



## AGENCIA DE INTELIGENCIA DE DEFENSA

WASHINGTON, DC 20340-5100

08 de enero de 2021

Anthony Bragaglia

Esto responde a su solicitud de la Ley de Libertad de Información (FOIA), con fecha del 27 de diciembre de 2017, que envió a la Agencia de Inteligencia de Defensa (DIA) para obtener información sobre cómo Solicitar toda la información sobre los resultados de las pruebas del material UAP de Bigelow Aerospace. Le pido disculpas por la demora en responder a su solicitud. DIA continúa sus esfuerzos para eliminar la gran acumulación de solicitudes FOIA pendientes. Para responder adecuadamente, fue necesario consultar con otra oficina dentro de la agencia.

Una búsqueda de los registros de los sistemas de DIA localizó cinco documentos (154 páginas) en respuesta a su solicitud.

Tras la revisión, he determinado que algunas porciones de cinco documentos (154 páginas) deben retenerse en parte de la divulgación de conformidad con la FOIA. Las porciones retenidas están exentas de divulgación de conformidad con las Exenciones 3 y 6 de la FOIA, 5 USC § 552 (b) (3) y (b) (6).

La exención 3 se aplica a la información específicamente exenta por un estatuto que establece criterios particulares para la retención. El estatuto aplicable es 10 USC § 424. El estatuto 10 USC § 424 protege la identidad de los empleados de DIA, la estructura organizativa de la agencia y cualquier función de DIA. La exención 6 se aplica a la

información que, si se publica, constituiría una invasión injustificada de la privacidad personal de otras personas. DIA no ha retenido ninguna parte razonablemente segregable no exenta de los registros.

Si no está satisfecho con mi respuesta a su solicitud, puede comunicarse con el Centro de Servicio para Solicitantes de FOIA de DIA, así como con nuestro Enlace Público de FOIA al 301-394-6253.

Además, puede comunicarse con la Oficina de Servicios de Información Gubernamental (OGIS) en la Administración Nacional de Archivos y Registros para solicitar información sobre los servicios de mediación FOIA que ofrecen. Puede comunicarse con OGIS por correo electrónico a [ogis@nara.gov](mailto:ogis@nara.gov); teléfono al 202-741-5770, sin cargo al 1-877-684-6448 o fax al 202-741-5769; o puede enviarlos por correo a la siguiente dirección:

Oficina de Servicios de Información Gubernamental Administración Nacional de Archivos y Registros 8601 Adelphi Road-OGIS

College Park, MD 20740-6001

También puede ejercer su derecho a presentar una apelación administrativa escribiendo a la dirección a continuación y refiriéndose al número de caso FOIA-00089-2018. Su apelación debe tener matasellos de no más de 90 días después de la fecha de esta carta.

Agencia de Inteligencia de Defensa 7400 Pentágono

AT1N: FAC-2C (FOIA)

Washington, DC 20301-7400

Atentamente,

Steven W. Tumiski

Jefe, Gestión de registros y servicios de información

## Recintos

1. Vidrios metálicos: estado y perspectivas de las aplicaciones aeroespaciales (30 páginas)
2. Biomateriales (32 pgs)
3. Materiales para plataformas aeroespaciales avanzadas (27 páginas)
4. Espintrónica metálica (27 páginas)
5. Metamateriales para aplicaciones aeroespaciales (38 páginas)

14 de diciembre de 2009

NO CLASIFICADO // P8R 81'PIIIAL I ' . 8HL'f

documentos de referencia de inteligencia de defensa

*Soporte para amenazas de adquisición de*

ICDD: 1 de diciembre de 2009

DIA-08 · 0911-012

## **Vidrios metálicos: situación y perspectivas de las aplicaciones aeroespaciales**

SIN CLASIFICAR // FQlii QFFIGIJ k Wlilii QtI klf

## **Vidrios metálicos: estado y perspectivas de las aeroespaciales**

### **aplicaciones**

#### **Preparado por:**

(b) (3): 10 usan 424

#### **Agencia de Inteligencia de Defensa Autor:**

#### **Nota administrativa**

ADVERTENCIA DE COPYRIGHT: mayor difusión de las fotografías de esta publicación No se autoriza una.

Este producto es uno de una serie de informes de tecnología avanzada producidos en el año fiscal 2009 bajo la Agencia de Inteligencia de Defensa, I (b) (3): 10 utilizan el 424 de Programa Aeroespaciales Aplicaciones de Sistemas de Armas Avanzadas (AAWSA). Los comentarios o preguntas relacionados con este documento deben dirigirse a (b) (3): 10 use 424; (b) (6) , gerente de programas de AAWSA , Defense Intelligence Agency, (b) (3): 10 use 424 g 6000, Washington, DC 20340-5100.

contenidos

Resumen de .....	v
Vidrio metalico.....	1
Estructura .....	1
Procesando .....	2
Aleaciones para formar vidrio.....	2
Fundición y moldura.....	4
Union.....	5
Espumas .....	5
Películas delgadas y recubrimientos .....	5
Comportamiento mecánico cerca de la temperatura ambiente .....	5
Rigidez:plástica deformación.....	6
Resistencia y ductilidad: Deformación plástica.....	6
Dureza a la fractura. ....	8
Fatiga.....	9
Resistencia al desgaste.....	10
Corrosión y agrietamiento por tensión-corrosión.....	10
Comportamiento mecánico a temperatura elevada. ....	11
Otras Propiedades: Magnéticas, Eléctricas, Ópticas, Térmicas y Acústicas.....	12
Metálico Vidrio Compuestos de Matriz de. ....	13
Procesamiento y estructura de compuestos .....	13
Composites Ex Situ .....	14
In Situ Composites .....	14
mecánicas	
Propiedades de los materiales compuestos .....	15
Resistencia y ductilidad: deformación plástica .....	16

Fractura y fatiga .....	16
aplicaciones.aeroespaciales de vidrios metál.....	16
Aplicaciones estructurales .....	16
Otras aplicaciones .....	19
<u>Desafíos actuales y perspectivas para el futuro .....</u>	<u>20</u>
Diseño de aleación .....	20
Propiedades termofísicas y procesamiento termoplástico.....	20
Composites y la búsqueda de la ductilidad .....	21
Resumen y recomendaciones .....	22
Figuras	
1. amorfa versus cristalina <b>Estructura</b> .....	1
2. <b>Tasa de enfriamiento crítica</b> .....	2
3. Ejemplos de procesamiento de vidrios metálicos .....	4
4. <b>Bandas de corte</b> ....	8
5.Límite de fatiga de la matriz de vidrio metálico Composites.....	10
6.Mapa de deformación para vidrios metálicos .....	11
<b>7, Cuña de vidrio metálico fundido</b> .....	13
8. Microestructura del compuesto de matriz de vidrio metálico n Situ ...	15
9. Gráficos de propiedades de materiales .....	18

## Tablas

1. Aleaciones formadoras de vidrio a granel seleccionadas ..... 3
2. Comparación de las fortalezas de las aleaciones amorfas y cristalinas de aluminio ... 7

## **Los vidrios metálicos: situación y perspectivas para aplicaciones Aeroespacial**

### Resumen

Los vidrios metálicos combinan algunas de las ventajosas propiedades mecánicas de la resistencia a los metales. rigidez, y en algunos casos tenacidad, con la flexibilidad de procesamiento generalmente asociada con polímeros termoplásticos. La ausencia de defectos crvstalline permite que los vidrios metálicos sean mucho más resistentes que las aleaciones convencionales, pero también significa que tienen una ductilidad a la tracción casi nula y una resistencia a la fatiga deficiente. En aplicaciones estructurales, por lo tanto, es más probable que los vidrios metálicos sean útiles en forma de compuestos que consisten en dendritas cristalinas dúctiles en una matriz de vidrio metálico. Estos compuestos dendríticos sacrifican algo de resistencia, pero pueden tener una tenacidad a la fractura excepcionalmente alta, así como una buena resistencia a la fatiga, y podrían reemplazar los aceros de alta resistencia en ciertos componentes estructurales de carga limitada en vehículos aeroespaciales donde el espacio es limitado.

Debido a que son vidrios verdaderos, la formación de termoplásticos cerca de la temperatura de transición vítrea proporciona a los vidrios metálicos una tremenda flexibilidad en el procesamiento. Por ejemplo, los componentes de vidrio metálico se pueden formar en un solo paso (por ejemplo, mediante moldeo por inyección) en geometrías complejas que serían difíciles o imposibles de producir con aleaciones convencionales. Además, las espumas de vidrio metálico se pueden fabricar con relativa facilidad, lo que aumenta la posibilidad de fabricar espumas estructurales con alta resistencia y rigidez. Finalmente, debido a que carecen de una estructura de grano cristalina, los vidrios metálicos pueden usarse para formar características a nanoescala

con alta fidelidad. Esto puede hacer que los vidrios metálicos sean útiles en una variedad de aplicaciones de sistemas microelectromecánicos (MEMS).

Sin embargo, los vidrios metálicos también tienen limitaciones importantes para las aplicaciones aeroespaciales. La principal de ellas es la falta de buenas aleaciones formadoras de vidrio; en particular, no hay buenas aleaciones que formen vidrio ricas en aluminio, las aleaciones conocidas a base de titanio son relativamente densas (debido a las altas concentraciones de elementos de aleación) o contienen berilio, y las aleaciones conocidas a base de magnesio y hierro son todas bastante quebradizo, con baja tenacidad a la fractura. Aunque los compuestos de matriz de vidrio metálico pueden tener propiedades sobresalientes (particularmente resistencia y tenacidad a la fractura), el número de buenos sistemas compuestos conocidos en la actualidad también es bastante limitado.

Por lo tanto, para que los vidrios metálicos (y sus compuestos) sean de amplia utilidad en aplicaciones estructurales aeroespaciales, es necesario avanzar en las siguientes áreas:

Desarrollo de nuevas aleaciones ligeras y sistemas compuestos, preferiblemente mediante enfoques computacionales y / o combinatorios en lugar de prueba y error.

- Comprensión del comportamiento mecánico, especialmente:

El efecto de la composición y estructura de la aleación sobre la deformación del plástico.

Diseño microestructural de composites para optima! tenacidad.

- Desarrollo de técnicas de procesamiento, incluido el procesamiento termofísico de características complejas y / o nanoescalares, así como la producción de espumas de vidrio metálico.

Es muy probable que el trabajo continuo durante los próximos 20-50 años dé como resultado avances significativos en todas estas áreas, y que los vidrios metálicos y los compuestos de matriz de vidrio metálico tengan una aceptación cada vez mayor como materiales estructurales. Sin embargo, si logran o no un uso generalizado en aplicaciones aeroespaciales, depende fundamentalmente del desarrollo de nuevas ligeras aleaciones.

## Vidrios metálicos

### ESTRUCTURA

La estructura a escala atómica de la mayoría de los metales y aleaciones es cristalina; es decir, los átomos están dispuestos de una manera muy ordenada en una red que es periódica en tres dimensiones, como se muestra en la Figura (a). En contraste con esta estructura cristalina, los vidrios metálicos carecen del orden de largo alcance de una red y son por lo tanto, se dice que es amorfo, como se muestra en la Figura 1 (b). Aunque la palabra "amorfo" implica una total falta de orden estructural, de hecho, la estructura atómica de los vidrios metálicos no es verdaderamente aleatoria.

Las restricciones en el empaquetamiento atómico proporcionan un fuerte rango de corto alcance; por ejemplo, en promedio, los átomos tienen un número particular de vecinos atómicos más cercanos a un bien distanciadefinida. Pero este orden de corto alcance persiste sólo a distancias de unos pocos átomos; no hay un orden de largo alcance como en una aleación cristalina .En muchos sentidos, la estructura a escala atómica de los vidrios metálicos se parece más a la estructura altamente desordenada de un líquido que a la estructura de una aleación cristalina.

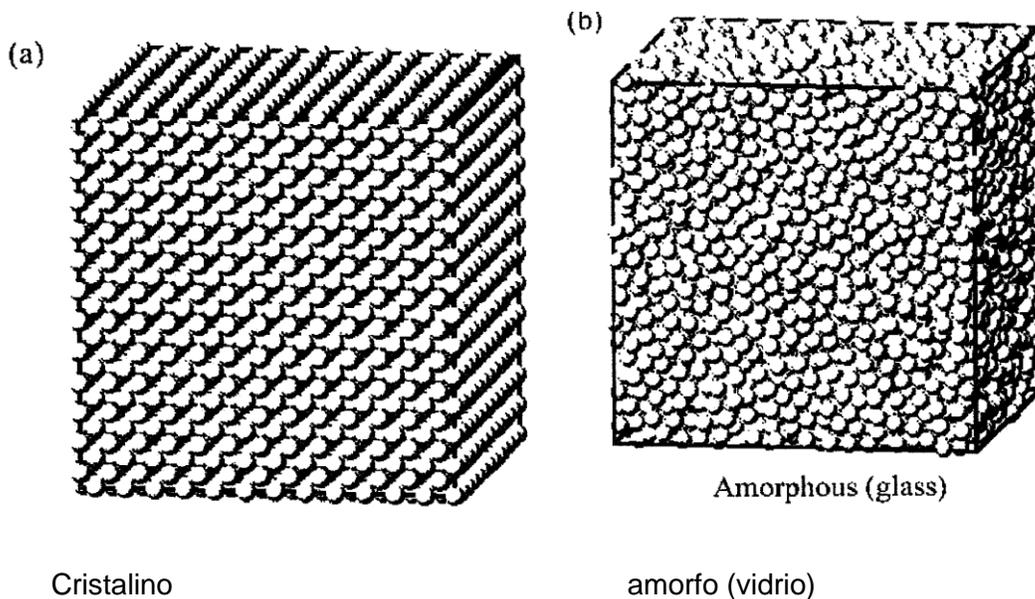


Figura 1: Estructura amorfa versus cristalina. Estructura esquemática a escala atómica de la cristalina (a) y metales amorfos (b). En una estructura cristalina, el orden persiste a

grandes distancias (muchas proporciones atómicas). En un vaso, hay un orden de corto alcance pero no un orden de largo alcance.

Un corolario de esta diferencia en la estructura es que la naturaleza de los defectos estructurales es bastante diferente entre las aleaciones cristalinas y amorfas. Las aleaciones cristalinas, por ejemplo, tienen defectos lineales extendidos en la estructura cristalina, llamados dislocaciones, que son (en gran parte) responsables de determinar en gran medida el comportamiento mecánico. La falta de orden cristalino excluye la existencia de dislocaciones en vidrios metálicos, pero otros tipos de defectos puede estar presente y puede influir en las propiedades y el comportamiento.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, la estructura amorfa de los vidrios metálicos tiene dos implicaciones principales. Primero, las propiedades mecánicas de las aleaciones amorfas son significativamente diferentes de las de sus contrapartes cristalinas; Algunas de estas diferencias son ventajosas, pero otras no. Segundo, porque los vidrios metálicos son vidrios en el verdadero sentido de la palabra, en lugar de derretirse abruptamente (como lo hacen los metales cristalinos), se ablandan y fluyen en un rango de temperaturas de una manera similar a los vidrios comunes (óxido). Esto crea oportunidades tremendas de flexibilidad en el procesamiento de vidrios metálicos.

## **PROCESANDO**

### **Aleaciones formadoras de vidrio**

La clave para hacer un vidrio metálico es retener la desordenada de escala atómica similar a un líquido estructurado durante el enfriamiento de la masa fundida. Todos los materiales tienen tendencia a cristalizar al enfriarse porque el estado cristalino es la estructura más estable a cualquier temperatura por debajo del punto de fusión. Pero la cristalización lleva tiempo, por lo que si el enfriamiento es lo suficientemente rápido,

es posible evitar la cristalización y formar una estructura amorfa a la temperatura de transición vítrea (Figura 2 (a)). Por tanto, la formación y cristalización de vidrio son procesos competitivos; cuál ocurrirá depende del material y las condiciones de procesamiento.

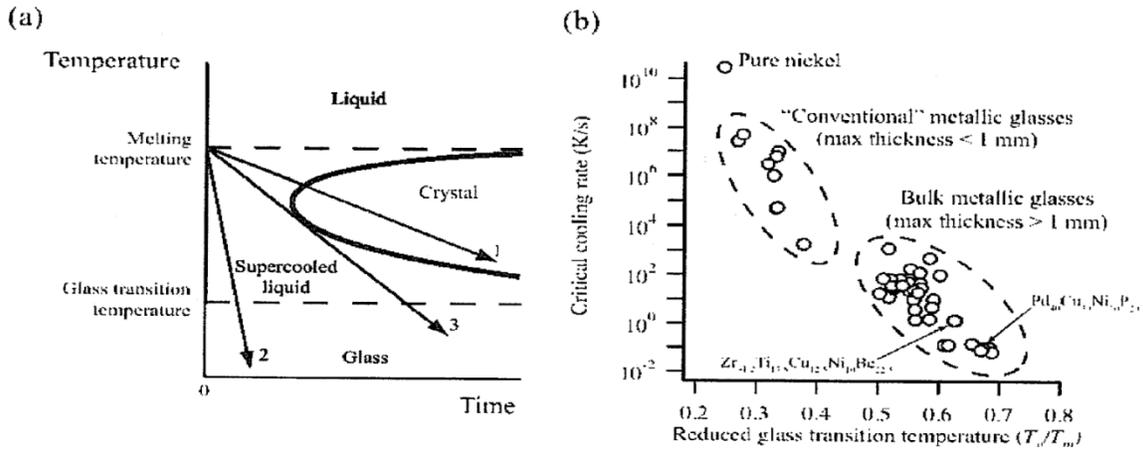


Figura 2. enfriamiento crítico Tasa de. (A) Efecto de la tasa de enfriamiento sobre la formación de vidrio - Si la tasa de enfriamiento es lenta (ruta 1), entonces el cristal cristaliza antes de pasar por el vidrio transición. Si la enfriamiento velocidad de es lo suficientemente rápido (ruta 2), entonces el melt puede formar un vidrio. la crítica! Caoling tasa (ruta 3) es la tasa más lenta a la que la masa fundida se puede enfriar y todavía formar un vidrio. ( b) tasas de carboneras críticos lejos var ialeaciones metálicas OU el eje horizontal es -la temperatura de transición de vidrio normalizado a la temperatura de fusión (liquidus) 1

Para algunos materiales, como la sílice (dióxido de silicio) y la mayoría de los polímeros termoplásticos, el proceso de cristalización es lento porque las estructuras cristalinas son complejas y las unidades estructurales básicas (por ejemplo, segmentos de cadenas de polímeros) se almacenan para reordenar en una forma cristalina. . Por lo tanto, estos materiales se pueden producir en forma vítrea incluso a velocidades de enfriamiento muy bajas; de hecho, puede resultar difícil cristalizarlos por completo. Los metales y las aleaciones son otro asunto porque las estructuras cristalinas son relativamente simples y las unidades estructurales básicas son átomos individuales, que son muy móviles. Los cristales metálicos se nuclean y crecen rápidamente, lo que hace que la producción de un vidrio metálico sea más desafiante.

Una forma de cuantificar la capacidad de una aleación metálica para producirse en forma vítrea es a través de la crítica. Velocidad de enfriamiento: la velocidad más lenta a la que un se puede enfriar líquido metálico y aún producir una estructura completamente amorfa, como se muestra en la Figura 2 (a). ¡La crítica! La velocidad de enfriamiento para una

variedad de aleaciones metálicas formadoras de vidrio se muestra en la Figura 2 (b). Los primeros vidrios metálicos (descubiertos en las décadas de 1960 y 1970) eran aleaciones binarias con críticas! tasas de enfriamiento típicamente en el rango de 104 a 107 K / s. Lograr velocidades de enfriamiento tan altas requiere técnicas especializadas (como el hilado por fusión) y limita el espesor máximo del vidrio metálico a  $< 100 \mu\text{m}$  debido a la necesidad de extraer rápidamente calor de la masa fundida. Como resultado, estos primeros vidrios metálicos podrían producirse solo en una limitada gamade formas, incluidas cintas, láminas, alambres y .polvos.

Los extensos esfuerzos de investigación en el diseño de aleaciones durante las últimas dos décadas han dado resultado como el desarrollo de aleaciones multicomponente con críticas mucho más bajas. velocidades de enfriamiento (0,1 K / so incluso más bajas). Esto ha permitido la producción de probetas de vidrio metálico en tamaños más grandes, en algunos casos con un espesor de sección superior a 1 cm. La práctica común en el campo es referirse a cualquier aleación capaz de moldearse en una sección de al menos 1 mm de espesor como vidrio metálico "a granel". Estas aleaciones se pueden fundir o moldear en formas adecuadas para aplicaciones estructurales.

En la actualidad, i1: no es posible predecir a priori la capacidad formadora de vidrio de una aleación de composición arbitraria. Se una han propuesto variedad de reglas empíricas para seleccionar elementos de aleación y composiciones, y se han demostrado técnicas para la búsqueda eficiente del espacio de composición. Pero la identificación de aleaciones con buena capacidad de formación de vidrio sigue siendo principalmente una cuestión de prueba y error. Como resultado, la cantidad de aleaciones formadoras de vidrio verdaderamente sobresalientes (vagamente definidas como que se pueden fundir como vidrio con un espesor de al menos 1 cm) es bastante limitada (ver Tabla 1).

**Tabla 1. Aleaciones formadoras de vidrio a granel seleccionadas.** Se informó que las aleaciones seleccionadas tienen una excelente capacidad de formación de vidrio, cuantificada aquí como el espesor máximo de fundición una

completamente amorfa. 2 3 4 5 G 7 a

<b>Composition</b>	<b>Maximum Thickness (mm)</b>	<b>Reference</b>
Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>5</sub> Pd <sub>5</sub> Gd <sub>10</sub>	10	2
Zr <sub>41.2</sub> Ti <sub>13.8</sub> Cu <sub>12.5</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>22.5</sub>	50	3
Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	72	4
Cu <sub>47</sub> Zr <sub>45</sub> Ag <sub>4</sub> Al <sub>4</sub>	10	5
Pt <sub>57.5</sub> Cu <sub>14.7</sub> Ni <sub>5.3</sub> P <sub>22.5</sub>	16	6
Ti <sub>40</sub> Zr <sub>25</sub> Ni <sub>3</sub> Cu <sub>12</sub> Be <sub>20</sub>	14	7
Fe <sub>48</sub> Cr <sub>15</sub> Mo <sub>14</sub> Er <sub>2</sub> C <sub>15</sub> B <sub>6</sub>	12	8

Pasando del laboratorio a la práctica industrial, es importante señalar que otros factores además de la composición de la aleación pueden afectar la capacidad de formación de vidrio. En particular, algunas aleaciones son sensibles a la presencia de impurezas; Por ejemplo, la capacidad de formación de vidrio de algunas aleaciones que contienen circonio se reduce drásticamente por la presencia de oxígeno.

Las condiciones de procesamiento también influyen en la capacidad de hacer un vaso; estos pueden incluir el material y el acabado de la superficie del molde y la temperatura del líquido antes de la colada. Finalmente, la capacidad de formación de vidrio puede ser bastante sensible a pequeñas variaciones en la composición, que pueden ser difíciles de controlar en la práctica industrial.

### **Fundición y moldeo**

Al igual que otras aleaciones, los vidrios metálicos se pueden fundir en geometrías en forma de red o casi en forma de red. La fundición a presión en un molde permanente (de metal) -porque proporciona la transferencia de calor rápida necesaria para cumplir con el requisito de enfriamiento relativamente rápido- es la técnica de fundición más común. En la mayoría de los casos, la fundición se realiza en vacío o en una atmósfera inerte para prevenir la formación de partículas de óxido que favorecen la cristalización.

De colada convencional, sin embargo, no toma ventaja de la flexibilidad proporcionada por la naturaleza vítrea de estas aleaciones. Si un cristal metálico se calienta a una temperatura por encima de su temperatura de transición vítrea, se convierte en un líquido. Infrareenfriado este estado, la viscosidad cae al aumentar la temperatura en un amplio intervalo, por lo que es posible el

controla viscosidad mediante el control de la temperatura. 1 Esta capacidad para controlar la viscosidad permite que muchas de las técnicas de procesamiento comúnmente utilizadas en el moldeado de polímeros termoplásticos se apliquen a vidrios metálicos (Figura 3).

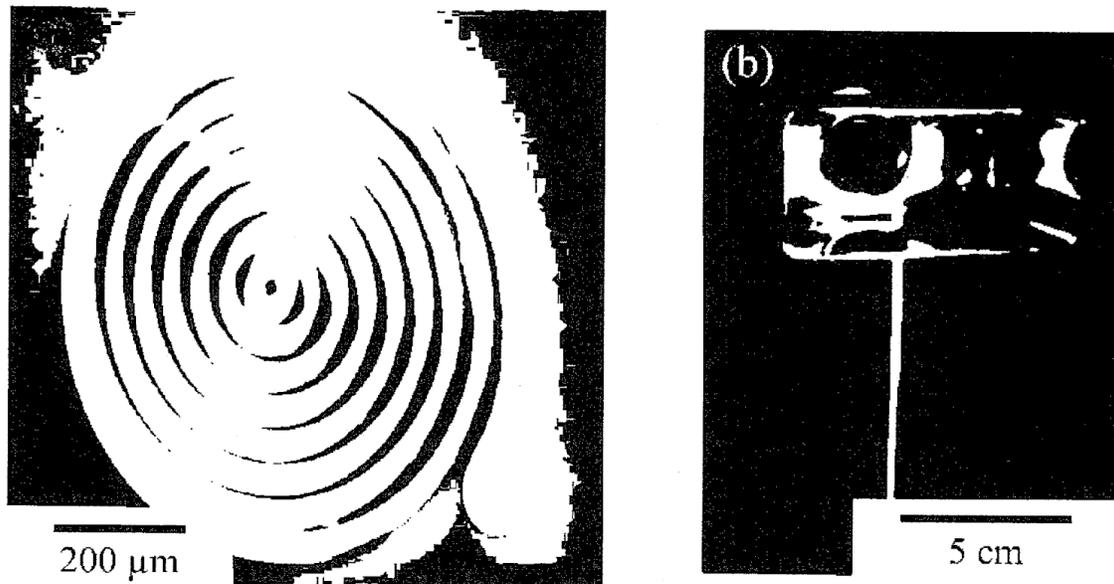


figura 3. Ejemplos de Procesado de Vidrios Metálicos. (a) de micro resortes producido por litografía y (b) la botella de pared fina producida por molde de sopladoing. Las imágenes son cortesía del profesor Jan Schroers (Universidad de Yale) .

Hay dos limitaciones importantes en el procesamiento de vidrios metálicos en la región del líquido sobreenfriado. En primer lugar, los líquidos superenfriados son metaestables y tienen tendencia a cristalizar, por lo que hay una ventana de tiempo limitada (típicamente en minutos) en la que el procesamiento debe completarse si se quiere mantener la estructura vítrea.

En segundo lugar, la viscosidad de muchas aleaciones vítreas cerca de la temperatura de transición vítrea es demasiado alta para un procesamiento conveniente. La viscosidad se puede reducir aumentando la temperatura de procesamiento, pero las temperaturas más altas promueven la cristalización.

y así reducir la ventana de tiempo disponible para el moldeo lejano. En la práctica, por lo tanto, un moldeo exitoso requiere un control cuidadoso de las condiciones de procesamiento.

## **Unión**

Las aplicaciones estructurales requieren inevitablemente la unión de componentes, por ejemplo, mediante sujetadores mecánicos o adhesivos o mediante soldadura, soldadura fuerte o soldadura fuerte. El uso de sujetadores y adhesivos es muy similar para los vidrios metálicos que para cualquier otro metal. Técnicas s.uch ya que la soldadura, la soldadura y la soldadura fuerte son potencialmente problemáticos porque implican calentar la aleación vítrea, corriendo el riesgo de cristalización (lo que podría hacer que la unión sea más frágil) .En la soldadura, por ejemplo, el metal a unir se derrite y luego se vuelve a solidificar al enfriarse.En el caso de un vidrio metálico, se debe tener cuidado para asegurar que la velocidad de enfriamiento sea lo suficientemente rápida para evitar la cristalización.También existe el riesgo de que el material vítreo en la zona afectada por el calor (cerca pero no en la región fundida) podría cristalizar. Se han realizado pruebas de laboratorio de una variedad de técnicas de soldadura en varias! aleaciones formadoras de vidrio con resultados mixtos, y está claro que queda mucho por hacer en esta área.

## **Espumas**

Un desarrollo reciente particularmente prometedor es la capacidad de producir espumas de vidrio metálico. Aquí, la viscosidad relativamente alta de las aleaciones formadoras de vidrio es una ventaja en la producción de una estructura de espuma estable que puede solidificarse, dejando una espuma de alta porosidad con ligamentos de vidrio metálicos.<sup>9</sup> Estas espumas tienen una alta resistencia específica (es decir, una resistencia normalizada a la densidad) y. rigidez específica y podría tener una excelente tolerancia al daño, aunque esto no se ha demostrado.

## **Películas delgadas y recubrimientos**

La discusión anterior se centra en el procesamiento de vidrios metálicos independientes, con énfasis en aplicaciones estructurales. Sin embargo, también es posible producir aleaciones amorfas como películas delgadas o recubrimientos usando técnicas tales como deposición física de vapor o electrodeposición. Aunque los espesores de material que se pueden producir de esta manera son limitados, son útiles para hacer

revestimientos de aleaciones amorfas (para resistencia al desgaste y a la corrosión) y películas muy delgadas para aplicaciones de sistemas microelectromecánicos o magnéticos (MEMS). Una clara ventaja de las técnicas de película delgada es que debido a que las velocidades de enfriamiento efectivas durante la deposición de vapor son extremadamente altas, se puede producir una gama mucho más amplia de aleaciones en forma amorfa de lo que es posible con la fundición. Esto permite adaptar la composición de la aleación para optimizar las propiedades funcionales, con menos preocupación por la capacidad de formación de vidrio.

Comportamiento mecánico cerca de la temperatura ambiente Cuando un material se somete a una tensión, puede experimentar deformaciones tanto elásticas como plásticas. La deformación elástica se produce a tensiones más bajas y es recuperable cuando se elimina la tensión aplicada. El límite de deformación elástica está definido por el límite elástico, el punto en el que comienza la deformación plástica (no recuperable). Gran parte del actual interés por los vidrios metálicos surge porque sus tensiones de fluencia (es decir, sus resistencias) pueden ser mucho mayores que las de las aleaciones cristalinas de composición similar; esta diferencia es un resultado directo de la nueva estructura a escala atómica de los vidrios metálicos.

Las características de fractura y fatiga de los vidrios metálicos también son diferentes de las de aleaciones convencionales. En este apartado se revisa el comportamiento mecánico de los vidrios metálicos, con especial atención a las propiedades de interés para las aplicaciones aeroespaciales. Consideramos las propiedades reales en detalle en la siguiente sección sobre aplicaciones, donde comparamos las propiedades de los vidrios metálicos con las de otros materiales estructurales avanzados.

### **Rigidez: deformación elástica**

La rigidez es la resistencia de un material a la deformación elástica y se cuantifica mediante el módulo elástico (para cargas de tracción o compresión) o el módulo de corte (para cargas de corte). Los vidrios metálicos tienden a ser algo (20-30 por ciento) menos rígidos que las aleaciones cristalinas de composición similar. El módulo más bajo es una consecuencia de la estructura amorfa, en la que los átomos están (en promedio) ligeramente más separados que en una aleación cristalina, lo que permite ciertas relajaciones atómicas que no son posibles en un cristal. El módulo más bajo de las aleaciones amorfas es claramente una preocupación en aplicaciones donde la rigidez es

un criterio principal, pero presenta algunas ventajas. Por ejemplo, algunas aplicaciones (resortes, por ejemplo) requieren la capacidad de almacenar energía de deformación elástica (resiliencia), y aquí los vidrios metálicos funcionan bastante bien. La resiliencia también es una figura clave de mérito para el ensamblaje a presión de materiales sin sujetadores. Sin embargo, en general, para aplicaciones estructurales, la baja rigidez de los vidrios metálicos es una desventaja.

### **Resistencia y ductilidad: deformación plástica**

La resistencia teórica de los metales cristalinos perfectos y libres de defectos es varios órdenes de magnitud mayor que la resistencia medida en los experimentos de laboratorio típicos. La diferencia existe porque los cristales metálicos tienen inevitablemente defectos cristalinos (dislocaciones) que pueden sufrir tensiones relativamente bajas y causar deformaciones plásticas (no recuperables). Debido a que las dislocaciones no pueden existir en una estructura amorfa, en principio, la resistencia de las aleaciones amorfas debería acercarse a límites teóricos basados en la resistencia inherente de los enlaces atómicos. Como se muestra en la Tabla 2, la resistencia de los vidrios metálicos a base de aluminio puede ser dos o tres veces mayor que la de las aleaciones de aluminio convencionales (cristalinas) de alta resistencia. De manera similar, se observan resistencias elevadas para otras aleaciones amorfas; por ejemplo, las mejores aleaciones a base de hierro tienen una resistencia de aproximadamente 4 GPa, una vez más, dos o tres veces mayor que las de los aceros convencionales de alta resistencia.<sup>10</sup> Estas altas resistencias crean un gran interés en las posibles aplicaciones estructurales de los vidrios metálicos.

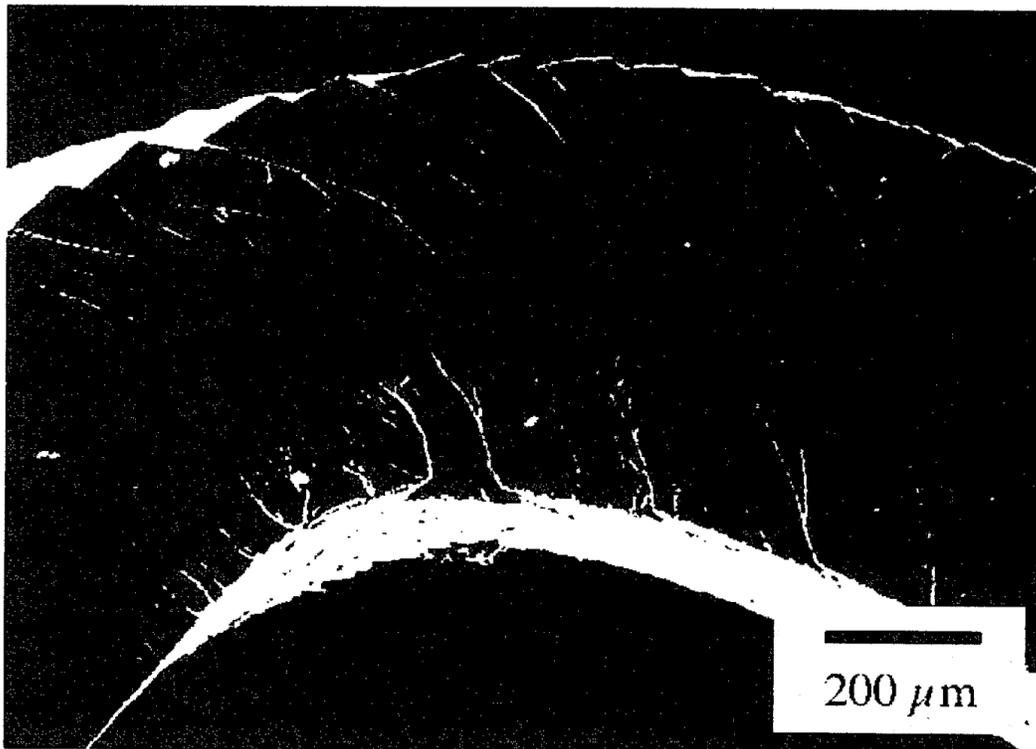
**Tabla 2. Comparación de resistencias de amorfas y cristalinas aleaciones de aluminio.** En comparación con TNE strength máxima teórica (llevado a ser  $\mu / 30$ , donde  $\mu$  es el Módulo de cizallamiento de aluminio puro).

	<b>Yield Stress (MPa)</b>	<b>% of Theoretical Strength</b>
Theoretical Strength (Defect-Free Crystal)	1,600	-
Typical High-Strength Aluminum Alloy (7xxx Series) <sup>11</sup>	400–500	25–31%
Best Crystalline Aluminum Alloy <sup>12</sup>	770	48%
Aluminum-Based Metallic Glass <sup>13</sup>	1,280	80%

Lamentablemente, la falta de dislocaciones en las aleaciones amorfas es también sus aleaciones cristalinas de Aquiles heel. In, dislocaciones se mueven una y se multiplican en respuesta a tensiones aplicadas, que resulta en ovillos de dislocación que aumentan la resistencia a más el movimiento de dislocación. Este proceso, llamado de endurecimiento por deformación, es de importancia crucial porque hace estable deformación plástica. Si una región de un material cristalino cede y comienza a deformarse plásticamente, la deformación de la región de deformación se endurece y, por lo tanto, otra región se deformará en su lugar. El resultado es que la deformación plástica no se concentra sino que se esparce por un gran volumen de material. Los vidrios metálicos, sin dislocaciones, no se endurecen por deformación y de hecho se ablandan por deformación en respuesta a la deformación plástica. Esto significa que tan pronto como una región ceda, se producirá cualquier deformación adicional en la misma región. Este proceso, conocido como localización de cortante, conduce a la formación de bandas de cortante (Figura 4). En cualquier geometría de carga en la que el vidrio metálico experimenta una carga de tensión significativa, se produce la fractura en una única banda de cizallamiento dominante con una ductilidad a la tracción esencialmente nula.<sup>2</sup> Por lo tanto, metálico de los vidrios de la fractura de una manera abrupta, aparentemente frágil en la escala macroscópica (a pesar de que no puede haber plasticidad significativa en una escala microscópica). Esta falta de ductilidad es de obvia preocupación para los diseñadores interesados en aplicaciones estructurales. Por otra parte, se limita la capacidad para

fabricar vidrios metálicos en diferentes formas mediante el procesamiento de deformación (por laminación o forja, por ejemplo) después de la fundición.

2. THL asume que no hay geométrica restricción previniendo fractura. Geometrías SORNE (tales como sencilla bending) pueden implicar Tensile de carga, pero no pueden still ser signo de deformación plástica debido a que las Geométrías Cal inhiben la reproducción de bandas de corte a través de la muestra.



**Figure 4. Shear Bands.** Produced by bending of a zirconium-based metallic glass.<sup>14</sup>

Dureza a la fractura.

La tenacidad a la fractura es una medida de la resistencia de un material al crecimiento de grietas, ¡un factor crítico! propiedad para materiales estructurales sometidos a cargas de tracción. En metales muy duros, la tenacidad generalmente resulta de la deformación plástica que ocurre cerca de la punta de la grieta que avanza; la deformación plástica requiere energía, y la necesidad de proporcionar esta energía se traduce en resistencia al crecimiento de grietas.<sup>3</sup> A pesar de su falta de ductilidad a la tracción, al menos algunos vidrios metálicos no son frágiles en el mismo sentido que las cerámicas, por ejemplo,

porque pueden experimentar una deformación plástica significativa alrededor de la punta de la grieta durante la fractura. Por ejemplo, la tenacidad a la fractura ( $K_{Ic}$ ) de los vidrios metálicos a base de circonio es de aproximadamente  $20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , algo menor que los  $55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

típicos de las aleaciones de circonio cristalino<sup>16</sup> pero mucho mayor que la fractura. dureza de las cerámicas (típicamente  $1-5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) El hecho de que los vidrios metálicos sean razonablemente resistentes a pesar de su falta de ductilidad a la tracción sugiere que las aplicaciones estructurales no están descartadas.

Sin embargo, algunos vidrios metálicos parecen ser intrínsecamente frágiles porque se fracturan con sólo una deformación plástica limitada cerca de la parte superior de la grieta y, por lo tanto, tienen valores muy bajos de tenacidad a la fractura. Por esta razón, algunas aleaciones que de otro modo serían muy deseables, como los vidrios metálicos a base de hierro (por su alta resistencia y bajo costo) y los vidrios a base de magnesio (por su baja densidad), entran en esta categoría. Los orígenes físicos de la diferencia entre vidrios metálicos intrínsecamente frágiles y aquellos capaces de deformación plástica limitada (y por lo tanto cierta tenacidad) no se comprenden bien.

Incluso algunos vidrios metálicos con una dureza razonable pueden debilitarse por la exposición a temperaturas elevadas. Esto puede ocurrir en la zona afectada por el calor durante la soldadura (como se discutió anteriormente), o puede ser un subproducto del procesamiento en el régimen líquido sobreenfriado (como en el moldeo por inyección, por ejemplo). Las causas de la fragilidad tampoco se comprenden bien y no se conoce una forma de revertir la fragilidad una vez que ocurre.

## **Fatiga**

La fatiga es un proceso mediante el cual los materiales pueden experimentar un crecimiento incremental de grietas debido a la carga cíclica, incluso en tensiones muy por debajo del límite de fluencia. Si no disminuye, las grietas por fatiga pueden crecer hasta un punto crítico. longitud a la que se produce una fractura catastrófica abrupta. Hasta

Se estima que el 90 por ciento de las fallas de los componentes estructurales en servicio son causadas por fatiga, lo que hace que la resistencia a la fatiga tenga una importancia obvia para los diseñadores.

La resistencia a la fatiga de los vidrios metálicos no es muy buena. Una medida común de resistencia a la fatiga es el límite de fatiga: la amplitud (rango) de tensión por debajo del cual no se producirá ninguna falla por fatiga, independientemente del número de ciclos de carga que experimente el material. El límite de fatiga para las aleaciones cristalinas de alta resistencia es típicamente alrededor del 40 por ciento de la resistencia a la tracción, pero para los vidrios metálicos, es solo alrededor del 5 por ciento de la resistencia a la tracción (Figura 5). La razón de esta diferencia tiene que ver con la estructura del material, en una aleación cristalina existen características microestructurales (como límites de grano y partículas precipitadas) que pueden inhibir el crecimiento de grietas por fatiga, en vidrios metálicos la microestructura es completamente sin rasgos, y no hay nada que evite que las grietas por fatiga crezcan una vez que se han iniciado.

La escasa resistencia a la fatiga de los vidrios metálicos es crítica! limitación para aplicaciones estructurales en la industria aeroespacial porque implica la necesidad de sobrediseñar componentes para mantener las tensiones muy por debajo del límite elástico. Por lo tanto, se pierde gran parte de la ventaja de tener un material de alta resistencia en primer lugar. El deseo de mejorar la resistencia a la fatiga de los vidrios metálicos ha llevado al desarrollo de compuestos de matriz de vidrio metálico con propiedades sobresalientes, como se analiza a continuación.

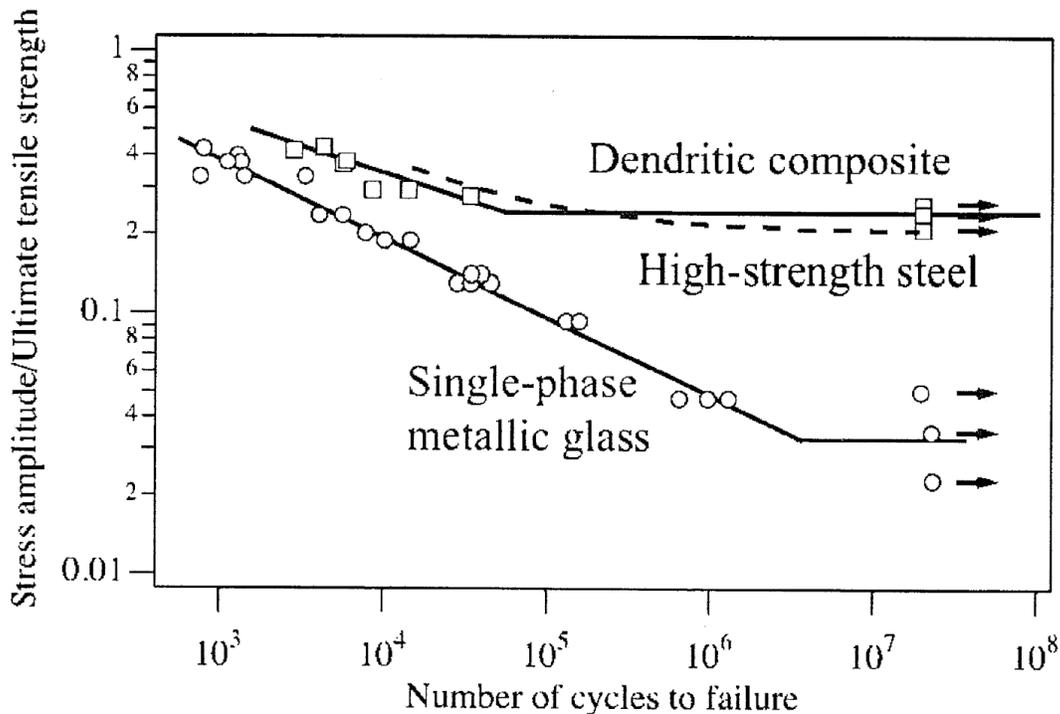


Figura 5. Límite de fatiga de vidrios metálicos y compuestos de matriz de vidrio metalizado. Datos de vida de fatiga para vidrio metálico monofásico a base de circonio (rojo) y un compuesto matriz de vidrio metalizado dendrítico (azul).

Los datos representativos del acero (300-M) de resistencia a la tracción similar se muestran a modo de comparación. 17 18 19

### Resistencia al desgaste

Debido a su alto límite elástico, los vidrios metálicos también tienen una dureza muy alta. Esto, a su vez, implica que pueden tener un buen comportamiento tribológico, lo que sería de especial interés cuando se combinara con la buena resistencia a la corrosión de algunas aleaciones (ver más abajo), abriendo aplicaciones potenciales como recubrimientos sobre rodamientos secos para aplicaciones espaciales. Sin embargo, la tendencia de los vidrios metálicos a formar bandas de cizallamiento y (en algunos casos) cristalizar parcialmente debido a la deformación significa que su resistencia al desgaste tal vez no sea tan buena como sugeriría su alta dureza. Sin embargo, la resistencia al desgaste de los vidrios metálicos puede ser todavía bastante buena y, de hecho, uno de

los principales mercados actuales de las aleaciones mucho amorfas es el de los recubrimientos resistentes al desgaste y a la corrosión para herramientas como el taladro. bits.

### **Corrosión y agrietamiento por tensión-corrosión**

Con frecuencia se afirma que los vidrios metálicos tienen una excelente resistencia a la corrosión, pero esto no siempre es cierto. La falta de límites de grano y partículas de segunda fase hace que algunos vidrios metálicos sean extremadamente resistentes a la corrosión, pero esto no es cierto para todas las aleaciones (algunas de las cuales se oxidan rápidamente en el aire). En términos generales, la resistencia a la corrosión de los vidrios metálicos a base de níquel y hierro es mejor que la de las aleaciones a base de circonio, titanio y cobre (particularmente en ambientes que contienen iones cloruro) .21 Algunas aleaciones son susceptibles a la corrosión localizada por picaduras, probablemente facilitada por la presencia de inclusiones cristalinas.

El tema del agrietamiento por corrosión bajo tensión de los vidrios metálicos, a pesar de su importancia obvia para las aplicaciones estructurales, ha recibido escasa atención en la literatura. El poco trabajo que se ha realizado se ha centrado en los vidrios a base de zirconio, con la observación de que estas aleaciones son muy susceptibles al agrietamiento por corrosión bajo tensión en ambientes acuosos que contienen cloruros, probablemente debido al hecho de que no forman una superficie protectora de óxido. capas.22

### **Comportamiento mecánico a temperatura elevada**

La discusión anterior se refiere al comportamiento mecánico a temperaturas muy por debajo de la temperatura de transición vítrea. A temperaturas elevadas, la resistencia cae y la deformación plástica pasa a un modo homogéneo, ocurriendo en toda la muestra en lugar de localizarse en bandas de cizallamiento (Figura 6). Por encima de la temperatura de transición vítrea, la aleación se convierte en un fluido, con una viscosidad que cae exponencialmente al aumentar la temperatura. Debido a que la resistencia del material es baja, las temperaturas por encima o por debajo de la transición vítrea pueden ser útiles para el procesamiento, como se discutió anteriormente. Sin embargo, la disminución de la resistencia y la tendencia a la cristalización a temperaturas elevadas impiden el uso de

vidrios metálicos para aplicaciones estructurales a temperaturas que se acercan a la temperatura de transición vítrea.

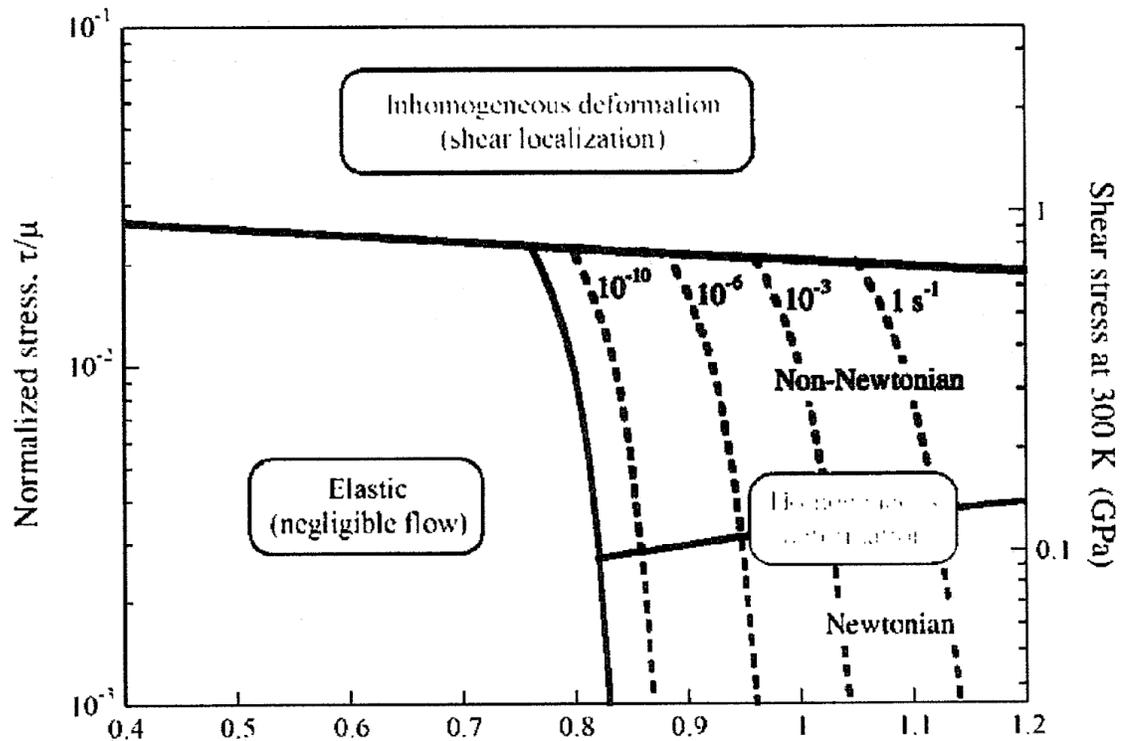


Figura 6. Mzip de deformación para vidrios metálicos. En función de la temperatura (normalizada a la temperatura de traslación del vidrio) y esfuerzo cortante aplicado, (normalizado al módulo de cortante,  $\mu$ ). A altas tensiones, el plástico la deformación se produce de forma no homogénea, localizándose en bandas de cizallamiento. A altas temperaturas, la deformación plástica se vuelve homogénea. Las líneas discontinuas representan diferentes tasas de deformación. Las tensiones absolutas dadas son representativas del vidrio metálico a granel bien tachonado  $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12}Ni_{10}Be_{22.5}$ , pero se espera que las características generales del mapa se apliquen a todos los vidrios metálicos.

Otras propiedades: magnéticas, eléctricas, ópticas, térmicas y acústicas Aunque la mayor parte del interés actual por los vidrios metálicos se centra en sus propiedades mecánicas, conviene considerar otras propiedades de utilidad potencial. OMestos destacan las propiedades magnéticas de los vidrios metálicos ferromagnéticos.<sup>24</sup> Existe una variedad de aleaciones formadoras de vidrio ferromagnéticas, en su mayoría basadas en metales de transición (hierro, níquel y cobalto). La presencia de elementos de aleación (necesarios

para hacer que el material formación de vidrio} significa que la magnetización por saturación de los vidrios metálicos no es tan grande como la de los elementos puros. Sin embargo, algunas aleaciones amorfas tienen una coercitividad muy baja (una medida de cuán fuerte debe ser un campo magnético para cambiar la dirección de magnetización del material) debido a la falta de defectos cristalinos (como límites de grano) y anisotropía magnetocristalina. La resistividad eléctrica relativamente alta de las aleaciones amorfas (ver más abajo) minimiza las pérdidas por corrientes parásitas causadas por la magnetización / desmagnetización de alta frecuencia. Algunas aleaciones amorfas también tienen fuertes efectos magnetoelásticos (acoplamiento entre propiedades magnéticas como susceptibilidad o magnetización y deformación elástica). Las aplicaciones actuales y futuras potenciales de estas propiedades magnéticas se discuten a continuación.

Al igual que las aleaciones cristalinas, los vidrios metálicos tienen electrones de conducción que los hacen conductores tanto eléctrica como térmicamente, <sup>25</sup> aunque su desorden estructural y alto contenido de aleaciones los hacen malos conductores. Además, en un comportamiento que es útil en algunas aplicaciones, la conductividad de los vidrios metálicos no es muy sensible a la temperatura; una excepción es cerca del cero absoluto, donde algunas aleaciones amorfas se convierten en

### **superconductor.**

Otra consecuencia de la estructura amorfa de los vidrios metálicos es que tienden a tener una amortiguación acústica muy baja. Esto puede ser útil en aplicaciones tales como giroscopios de estructura vibratoria en la orientación de vehículos lejanos. <sup>26</sup>

Una percepción errónea común entre quienes escuchan sobre los vidrios metálicos por primera vez es pensar que son transparentes. Este no es el caso; Las aleaciones amorfas son altamente reflectantes, con un brillo similar al de otros metales (Figura 7). Este es el resultado de la presencia de electrones de conducción, que dispersan y absorben la luz incidente

### **Compuestos de matriz de vidrio metálico**

Como se discutió anteriormente, la falta de defectos cristalinos le da a los vidrios metálicos una alta resistencia pero compromete su ductilidad y resistencia a la fractura. En particular, la tendencia a la deformación plástica a localizarse en bandas de

cizallamiento evita que el material se deforme de una manera "elegante" . Por lo tanto, no debería sorprender que haya habido muchos

intentos de controlar la iniciación y propagación de la banda de cizallamiento haciendo materiales compuestos que consisten en partículas o fibras de algún otro material (más comúnmente un metal cristalino dúctil) en una matriz de vidrio metálico. La idea es producir un material con mejores propiedades de ductilidad, tenacidad a la fractura y fatiga sin sacrificar (con suerte) las cualidades, especialmente la resistencia y la flexibilidad de procesamiento, que hacen que los vidrios metálicos sean interesantes en primer lugar.

## **PROCESAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA DE COMPOSITOS**

A grandes rasgos, existen dos tipos de composites de matriz de vidrio metálico: ex situ e in situ. En los materiales compuestos ex situ, el vidrio metálico y la fase cristalina (ya sea en forma de partículas o fibras) se combinan físicamente, por ejemplo, añadiendo partículas a la masa fundida antes de la colada. Los compuestos in situ son diferentes en que la fase cristalina se produce directamente a partir de la masa fundida (por precipitación) durante el procesamiento. Esta diferencia fundamental en el procesamiento conduce a diferencias significativas en la estructura y, por lo tanto, en las propiedades.

## **EX SITU COMPUESTOS**

Hay dos formas básicas de hacer compuestos ex situ, en los que la matriz de vidrio metálico y la fase cristalina se combinan físicamente, sin una reacción química:

- Agregar partículas cristalinas a un fundir una aleación de formación de vidrio y luego fundir en condiciones que permitan que la matriz forme un vidrio metálico.
- Haga una preforma de una fase cristalina (empaquetando fibras en un molde, por ejemplo) y luego coloque la aleación formadora de vidrio alrededor de la preforma.

Ambos enfoques tienen limitaciones. En el primero, la adición de partículas a la masa fundida aumenta considerablemente la viscosidad (que ya es bastante alta en relación con las aleaciones que no forman vidrio), en última instancia, hasta un punto en el que la fundición se vuelve imposible. Esto limita la fracción de volumen de partículas que se pueden agregar, lo que a su vez limita el control que se tiene sobre la microestructura y,

en particular, el espaciamiento de las partículas. Con un rendimiento, la fracción de volumen de la fase cristalina puede ser mucho mayor (hasta aproximadamente el 80 por ciento en volumen), pero el problema entonces es cómo infiltrar la masa fundida de alta viscosidad en la preforma sin dejar huecos y sin dejar de garantizar una rapidez suficiente. enfriar para formar una matriz vítrea. Con ambos enfoques, las reacciones interfaciales entre la fase cristalina y la masa fundida pueden provocar una cristalización parcial o completa de la matriz, degradando las propiedades mecánicas.

## **COMPOSITOS IN SITU**

La dificultad de hacer composites ex situ satisfactorios ha llevado al desarrollo de un nuevo enfoque en el que la fase cristalina se precipita directamente de la masa fundida, ya sea durante la fundición<sup>28</sup> o en un paso separado antes de la fundición<sup>29</sup>.<sup>30</sup> Precipitación durante la fundición. , aunque más fácil, es problemático desde un punto de vista práctico. punto de vista porque las variaciones en la velocidad de enfriamiento (desde la superficie hasta el centro de una pieza fundida, por ejemplo) conducen a variaciones significativas en la estructura y, por lo tanto, en las propiedades.

Uno de los avances recientes más prometedores en el campo del vidrio metálico es el desarrollo de compuestos in situ en los que la fase cristalina se precipita como dendritas, ya sea durante la fundición (Figura 8) o manteniendo la aleación a una temperatura elevada antes de la fundición.<sup>31</sup> Al elegir adecuadamente la composición de la aleación, el tiempo de mantenimiento y la temperatura, se puede controlar la fracción de volumen, el tamaño y el espaciamiento de la fase dendrítica. Este control proporciona una gran flexibilidad para determinar las propiedades mecánicas del material resultante. Debido a que la fase cristalina se produce antes de la fundición, la variación en la velocidad de enfriamiento a través de la fundición es mucho menos importante, aunque la velocidad de enfriamiento debe ser todavía lo suficientemente alta para asegurar que la matriz forme un vidrio durante el enfriamiento. Una vez que se forma la matriz vítrea, el material compuesto se puede recalentar por encima de la temperatura de transición vítrea, lo que permite la formación de termoplásticos de una manera similar a los vidrios metálicos monofásicos (como se describe anteriormente). Finalmente, la presencia de la segunda fase dendrítica permite procesos de deformación (por ejemplo, por laminación en frío o forja), similares a las aleaciones cristalinas.<sup>32</sup>

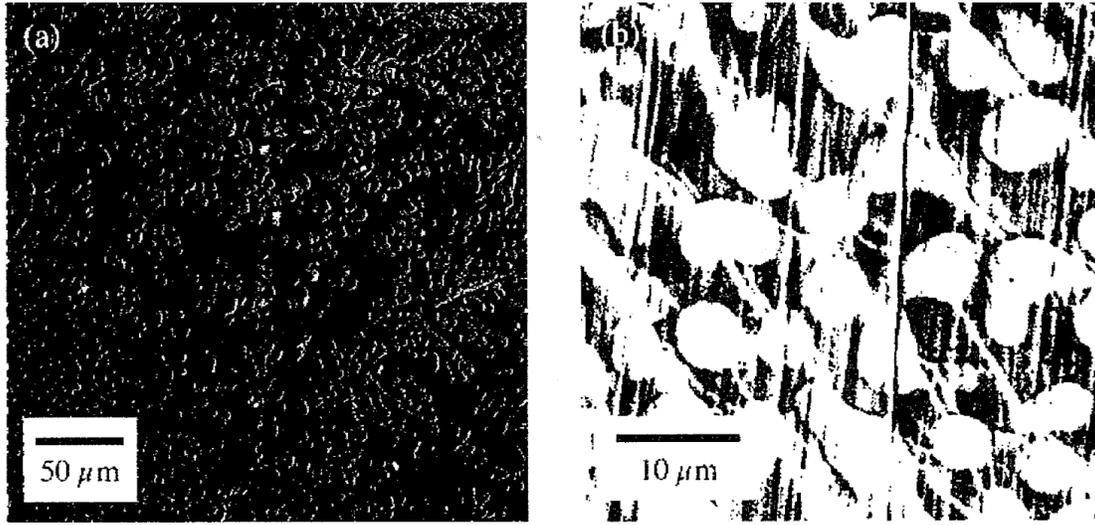


Figura 8. Microestructura del compuesto de matriz de vidrio metálico *in Situ*. Con dendritas cristalinas dúctiles.

(a) Micrografía electrónica de barrido que muestra las dendritas (gris claro) en la matriz vítrea (gris oscuro).

(b) Compuesto por deformación plástica; nótese la multiplicidad de pasos de deslizamiento, lo que indica una interacción extensa de las bandas de cizallamiento con las dendritas.<sup>33</sup>

La limitación clave de estos compuestos *in situ* es que no todos los sistemas de aleación son capaces de formarlos. Si bien cualquier aleación formará fases cristalinas a temperaturas elevadas, normalmente las fases cristalinas que se forman son intermetálicos frágiles que degradan en lugar de mejorar las propiedades mecánicas. Para ser eficaz en el control de las bandas de cizallamiento, la fase precipitada debe ser dúctil, tener un módulo de cizallamiento menor que el de la matriz vítrea y (preferiblemente) formarse como dendritas. Hasta la fecha, los únicos informes publicados de sistemas que satisfacen estos criterios se refieren a aleaciones basadas en metales de transición tempranos, en particular circonio y titanio. Queda por ver si los materiales compuestos *in situ* se pueden desarrollar en otros sistemas de aleación.

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS COMPOSIDADES

La capacidad de producir una microestructura cristalina amorfa mixta proporciona la capacidad de controlar la formación y propagación de bandas de cizallamiento. Los materiales resultantes pueden tener una buena resistencia a la fractura y la fatiga, al tiempo que conservan la alta resistencia y flexibilidad de procesamiento asociadas con los vidrios metálicos.

El origen de estos efectos está relacionado con el desarrollo de un región de deformación plástica en la punta de una fisura que avanza. Lejos de una fisura que se abre bajo carga de tracción, el tamaño de la región plástica viene dado aproximadamente por:

$$R_p \approx \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2, \quad (\text{Equation 1})$$

(Ecuación

1)

donde  $K_{Ic}$  es la tenacidad a la fractura por deformación plana (mencionada anteriormente) y  $\sigma_y$  es la resistencia a la deformación. El tamaño de la zona plástica varía de ..., 1  $\mu\text{m}$  para vidrios metálicos "intrínsecamente frágiles" a "1 mm para vidrios capaces de alguna deformación plástica. 34 Si el material tiene una estructura en esta escala de longitud (o si la muestra en sí es de este tamaño), luego deformación se puede proceder de manera estable mediante la generación y posterior detención de bandas de cizallamiento. La clave para el diseño de compuestos es producir una microestructura con la escala de longitud correcta para evitar que las bandas de cizallamiento que se propagan se conviertan en grietas catastróficas. Esto resulta relativamente difícil con los composites ex situ, por razones de procesamiento descritas anteriormente. Como resultado, los compuestos dendríticos in situ recientemente desarrollados tienen las propiedades más prometedoras, y centramos el resto de nuestra discusión en ellos.

### RESISTENCIA Y DUCTILIDAD: DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Al igual que con otros materiales compuestos, el límite elástico de los compuestos de matriz de vidrio metálico se puede aproximar como una regla simple de mezclas basada

en la fracción de volumen de las dos fases. Debido a que las fases cristalinas dúctiles útiles para limitar la propagación de la banda de cizallamiento son más débiles que la matriz amorfa, al producir un compuesto, es inevitable algún sacrificio en la resistencia. Sin embargo, las ganancias en la ductilidad a la tracción pueden ser significativas. Por ejemplo, los vidrios metálicos monolíticos a base de titanio (como todos los vidrios metálicos) tienen esencialmente una ductilidad a la tracción cero, pero se ha informado de compuestos in situ basados en titanio con un alargamiento por tracción de hasta el 12 por ciento.<sup>35</sup> Esto es comparable a la ductilidad de Ti-6Al-4V (la convencional más común aleación de titanio), pero en un material con aproximadamente un 30 por ciento más de resistencia. Las propiedades de los compuestos de matriz de vidrio metálico y los materiales más convencionales se comparan a continuación.

## **FRACTURA Y FATIGA**

El desarrollo de una zona plástica estable significa que se requiere energía adicional para la propagación de grietas, lo que hace que los compuestos in situ sean mucho más resistentes a la fractura y la fatiga que los vidrios monofásicos. Por ejemplo, la tenacidad a la fractura por deformación plana de algunos compuestos in situ a base de circonio puede exceder los 170 MPa mlf<sup>2</sup>-7 veces mayor que la de los vidrios monofásicos y mayor que la de prácticamente cualquier otra aleación metálica.<sup>36</sup> Esta resistencia a la propagación de grietas también se manifiesta como una mejora en el rendimiento frente a la fatiga. La resistencia a la fatiga de los compuestos in situ a base de circonio es del 20 al 30 por ciento de la resistencia a la tracción; en comparación, los vidrios metálicos monolíticos tienen una resistencia a la fatiga de sólo, ..., 5 por ciento de la resistencia a la tracción.<sup>3</sup> La resistencia a la fatiga de los compuestos in situ es, por tanto, comparable a la de las aleaciones estructurales convencionales.

## **Aplicaciones aeroespaciales de vidrios metálicos**

### **APLICACIONES ESTRUCTURALES**

Las propiedades clave de los materiales para aplicaciones estructurales en la industria aeroespacial son:

- Resistencia.
- Rigidez (módulo de Young).

- Densidad (peso).
- Tenacidad a la fractura (tolerancia al daño).
- Resistencia a la fatiga (incluida la resistencia tanto a la iniciación de grietas por fatiga como al crecimiento de grietas por fatiga).
- Resistencia a la corrosión (incluido el agrietamiento por tensión-corrosión).
- Costo (incluidas las materias primas, la conformación y el ensamblaje). La

Figura 9 ilustra las propiedades mecánicas de los vidrios metálicos y los compuestos de matriz de vidrio metálico en comparación con otros materiales estructurales. Dado que el peso es una preocupación particular En aplicaciones aeroespaciales, en la Figura 9 (a) normalizamos tanto el límite elástico ( $\sigma_y$ ) como la rigidez ( $E$ ) a la densidad ( $\rho$ ); dos materiales con la misma resistencia específica ( $\sigma_y / \rho$ ) o rigidez específica ( $E / \rho$ ) podrían Se puede utilizar para producir un componente con la misma resistencia o rigidez total, respectivamente; con el mismo peso. Materia Está en la esquina superior derecha del gráfico tiene la mejor combinación de resistencia y rigidez para un peso dado. Observe que los vidrios metálicos (y compuestos dendríticos) pueden ser más fuertes que prácticamente todos los metales cristalinos, aunque la rigidez de los vidrios metálicos tiende a ser algo menor que la de las aleaciones cristalinas de composición similar. La

Figura 9 (b) ilustra la tolerancia al daño de los vidrios metálicos en comparación con otros materiales. Al trazar la tenacidad a la fractura ( $K_{Ic}$ ) frente al módulo ( $E$ ), también podemos comparar la energía de fractura ( $G_{Ic} = (K_{Ic})^2 / E$ ) de los materiales; las líneas diagonales punteadas son líneas de energía de fractura constante. La Figura 9 (b) revela varios aspectos interesantes de la tolerancia al daño de los vidrios metálicos. En primer lugar, aunque la tenacidad a la fractura de algunos vidrios metálicos es comparable a la de los metales cristalinos, algunos vidrios metálicos, sobre todo los basados en hierro (Fe) y magnesio (Mg), son tan frágiles como cualquier cerámica. En segundo lugar, tanto la tenacidad a la fractura como la energía de fractura de los compuestos de matriz de vidrio metálico dendrítico pueden ser superiores a las de todos los metal, excepto a los más resistentes a las fracturas.

Estas consideraciones sugieren que los compuestos de matriz de vidrio metálico dendrítico podrían encontrar aplicaciones como materiales estructurales en aeronaves y / o naves espaciales. Las aplicaciones más obvias serían reemplazar el acero en ciertos componentes donde la resistencia es crítica pero el espacio es limitado. Estos podrían incluir estructuras de pilones y trenes de aterrizaje, 38 aunque aún no se ha demostrado que los materiales compuestos se puedan fabricar en los tamaños necesarios. Además, la resistencia a la corrosión y al agrietamiento por corrosión bajo tensión de estos materiales no se ha evaluado completamente.

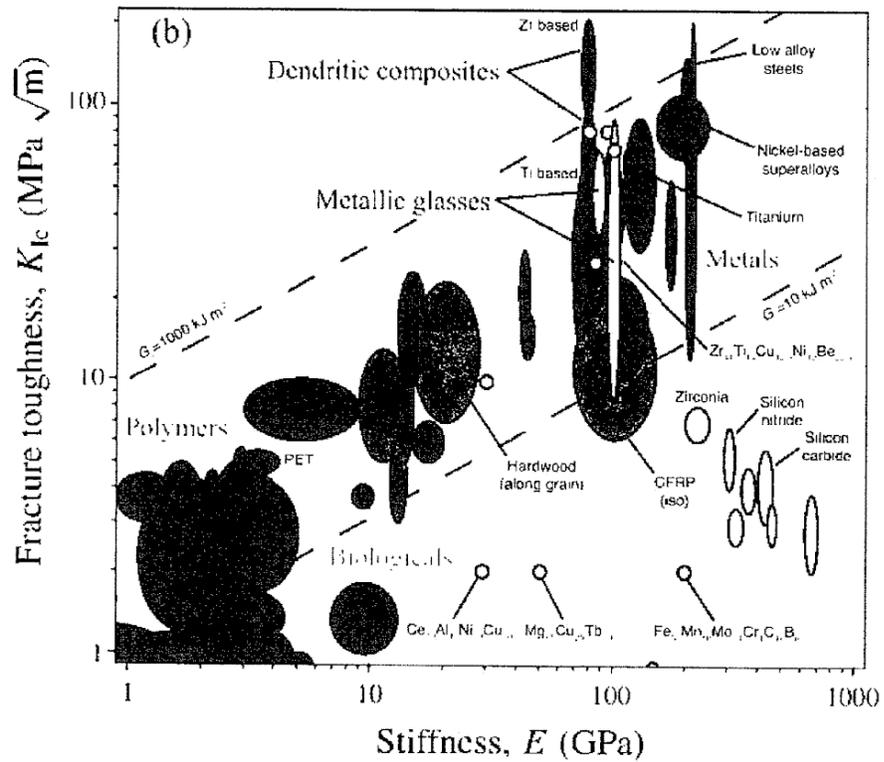
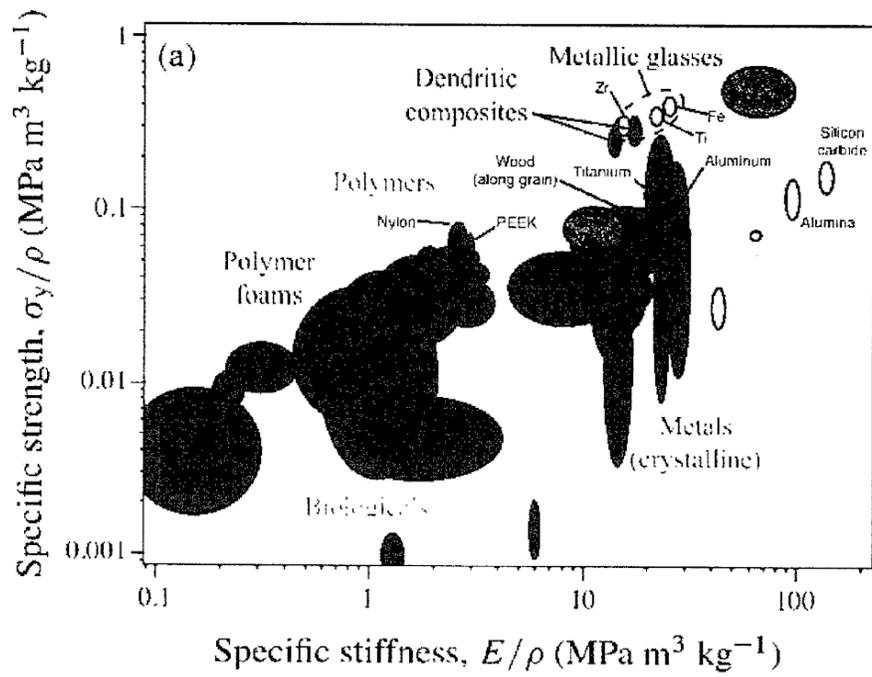


Figura 9. Cuadros de propiedades de los materiales. (a) Resistencia y rigidez (baño normalizado a densidad) de vidrios metálicos (amarillo) y compuestos de matriz de vidrio metálico dendrítico (rojo) en comparación con otros materiales. (b) Tolerancia al daño. En este gráfico, las líneas discontinuas representan contornos de igual energía de fractura. En ambas gráficas, los compuestos poliméricos (CFRP y GFRP) están representados por promedios isotrópicos; los compuestos de fibras continuas pueden tener mayor resistencia y rigidez en una dirección paralela a las fibras. 3

espumas de vidrioMetallíc (ver arriba) también brindan interesantes posibilidades para aplicaciones estructurales. Recientemente se ha demostrado que se pueden formar espumas de vidrio metálico con una resistencia sobresaliente controlando el tamaño de los ligamentos entre pares.<sup>40</sup> Este es un nuevo desarrollo, y estas espumas no se han caracterizado completamente, pero parece probable que las espumas optimizadas tengan una rigidez específica ( $E / \rho$ ) superior a la de las espumas poliméricas, junto con una alta resistencia y amortiguación acústica. Tales espumas estructurales podrían ser útiles en aplicaciones que requieran resistencia y rigidez bajo cargas de compresión, como paneles estructurales en edificios extraterrestres. Posiblemente, tales espumas estructurales podrían incluso producirse en el sitio (a partir de materia prima), reduciendo el volumen de material que debe lanzarse.

Una última posibilidad es que los vidrios metálicos se combinen con compuestos poliméricos en materiales laminados de fibra de metal. Laminados similares (con aleaciones de aluminio cristalino) se están empleando en grandes cantidades en el nuevo Airbus 380 y es probable que encuentren una mayor aplicación en el futuro. <sup>41</sup> El uso de vidrios metálicos en estos laminados es atractivo por su alta resistencia específica (aunque la rigidez específica es menor que la del aluminio). Además, las capas individuales en el laminado son lo suficientemente delgadas como para considerar una amplia gama de aleaciones formadoras de vidrio (a diferencia de las secciones estructurales más gruesas, que se verán limitadas por la capacidad de formación de vidrio de la aleación).

## **OTRAS APLICACIONES**

Los vidrios metálicos monolíticos son únicos entre los materiales metálicos por no tener microestructura en escalas de longitud de más de unos pocos espaciamentos atómicos. Entonces, en principio, los vidrios metálicos deberían ser capaces de reproducir

características hasta esta escala. Esta posibilidad se ve facilitada por la capacidad de los vidrios metálicos de formarse en el rango de temperatura del líquido sobreenfriado con viscosidad controlable. De hecho, se ha formado superplástica de superficies de vidrio metálico con características tan pequeñas como 13 nanómetros demostrado la. 42 Esta capacidad podría aprovecharse para el estampado directo de nanoestructuras en polímeros u otros materiales. Las estructuras en esta escala de longitud también son potencialmente útiles como rejillas de difracción para radiación ultravioleta y de rayos X suaves.

En un área relacionada, los vidrios metálicos tienen una variedad de propiedades útiles para su aplicación en actuadores de sistemas microelectromecánicos (MEMS), que incluyen grandes deformaciones elásticas y alta resiliencia (almacenamiento de energía de deformación elástica), buena resistencia a la corrosión y al desgaste, y una superficie excelente. acabado.43 La escala de estos dispositivos es menor que el tamaño de la zona plástica (Ecuación 1 anterior), lo que hace improbable una fractura frágil. Además, se puede fabricar una variedad mucho más amplia de aleaciones amorfas en forma de película delgada (por deposición de vapor) de lo que es posible mediante fundición.

### **'Finalmente,**

las propiedades magnéticas de ciertas aleaciones amorfas han sido durante mucho tiempo explotados.

Por ejemplo, su baja coercitividad y alta resistividad eléctrica hacen que las aleaciones ferromagnéticas amorfas sean atractivas como transformadores eléctricos de alta eficiencia, particularmente a altas frecuencias. Es probable que estas aplicaciones continúen en el futuro.

## **Retos actuales y perspectivas para el futuro**

### **DISEÑO DE ALLOV ;**

Una crítica! La limitación de la tecnología de vidrio metálico existente (y compuestos relacionados) es la relativa escasez de aleaciones con buena capacidad de formación de vidrio. Las mejores aleaciones para la formación de vidrio se basan en elementos costosos (por ejemplo, paladio) o contienen elementos tóxicos (por ejemplo, berilio en las

mejores aleaciones a base de circonio y titanio). Para las aplicaciones aeroespaciales, la falta más evidente es que, a pesar de los importantes esfuerzos de diseño de disipación en los Estados Unidos (a través del programa DARPA Structural Amorphous Metals), Japón, China y otros lugares, no existen buenas aleaciones formadoras de vidrio basadas en aluminio. Los intentos de fabricar componentes de vidrio metálico a base de aluminio mediante la consolidación de polvos amorfos han tenido un éxito limitado. De manera similar, todos los buenos vidrios metálicos a base de hierro contienen cantidades considerables de elementos no metálicos (en particular, carbono, boro, silicio y / o fósforo), que se cree que contribuyen a la muy baja tenacidad a la fractura de estas aleaciones (Figura 9 (b)).

Sin embargo, hay motivos para esperar que sea posible seguir avanzando. Los resultados experimentales recientes han demostrado que algunas de las "reglas" empíricas de la capacidad de formación de vidrio<sup>44</sup> son en realidad bastante flexibles, y que la capacidad de formación de vidrio es mucho más sensible a la composición de lo que se había apreciado previamente.<sup>45</sup> Por lo tanto, es muy probable que algunas excelentes Quedan por descubrir composiciones de aleaciones formadoras de vidrio, que posiblemente incluyan algunos vidrios de baja densidad a base de aluminio.

Identificar estas buenas aleaciones formadoras de vidrio será un desafío. La mayor parte del desarrollo de aleaciones hasta la fecha se ha realizado con un enfoque de fuerza bruta, ¡pero combinatoria! Es probable que las técnicas<sup>46</sup> permitan un cribado mucho más rápido. Un problema es la identificación de métricas adecuadas para la capacidad de formación de vidrio, ya que los enfoques combinatorios utilizan películas delgadas depositadas con vapor, y no está claro qué características de dicha película se correlacionan con la capacidad de formación de vidrio a granel. De manera similar, el desarrollo continuo de técnicas de dinámica molecular ab initio debería permitir la identificación de aleaciones candidatas a partir de simulaciones por computadora, particularmente a medida que las computadoras continúan aumentando su potencia.

Un área que no ha recibido suficiente atención es la influencia de las condiciones de procesamiento en la capacidad de formación de vidrio. Por ejemplo, la aplicación de vibraciones electromagnéticas durante el enfriamiento mejora significativamente la capacidad de formación de vidrio de los vidrios metálicos a base de magnesio. <sup>47</sup> Este enfoque podría, en principio, aplicarse a otras aleaciones, posiblemente ampliando en

gran medida la gama de aleaciones y composiciones que se pueden producir como vidrios metálicos a granel.

## **PROPIEDADES TERMOFÍSICAS Y PROCESAMIENTO TERMOPLÁSTICO**

La mayor parte del interés práctico en los vidrios metálicos monofásicos (monolíticos) se centra en el potencial del procesamiento termoplástico cerca o por encima de la temperatura de transición vítrea. Sin embargo, las propiedades termofísicas y el comportamiento de los vidrios metálicos no se comprenden bien. Por ejemplo, la viscosidad de la masa fundida de vidrio metálico (o líquido sobreenfriado) es crítica. importancia, pero no sabemos cómo y por qué la composición de la aleación influye en la viscosidad. Desde el punto de vista de la ingeniería, la práctica!

Los aspectos del moldeo de vidrios metálicos apenas comienzan a explorarse. Ciertamente muchos se pueden dibujar paralelos con la formación termoplástica de polímeros, pero también hay muchas diferencias.

Es muy probable que los continuos desarrollos en esta área den como resultado la capacidad de producir piezas complejas con forma de red en un solo paso de procesamiento. Esta facilidad de procesamiento podría compensar los mayores costos de las materias primas para los vidrios metálicos, haciéndolos competitivos en una gama mucho más amplia de aplicaciones. Además, como se señaló anteriormente, la capacidad de replicar características extremadamente pequeñas (<20 nanómetros) en vidrios metálicos probablemente se explore en la fabricación de dispositivos nanoestructurados.48 49

Por último, el desarrollo de espumas de vidrio metálico continuará y se verá favorecido por mejor comprensión de las propiedades termofísicas. Es muy probable que las espumas se produzcan en una amplia gama de aleaciones formadoras de vidrio y que se desarrollen técnicas para un control preciso de la porosidad, el tamaño de los poros, el tamaño de los ligamentos y la conectividad. Esto permitirá que las propiedades de estas espumas se adapten a aplicaciones particulares.

## **COMPUESTOS CUESTIONES DE DUCTILIDAD**

Y Desde el punto de vista de las aplicaciones estructurales, la localización de la deformación plástica en bandas de corte es el desafío más grande porque esta tendencia

limita la ductilidad a la tracción, la tenacidad a la fractura y la resistencia al agrietamiento por fatiga de los vidrios metálicos. Es posible que no haya solución a este problema para los vidrios metálicos monolíticos, por la sencilla razón de que carecen de microestructura para interactuar con las bandas de cizallamiento.

Es probable que se produzcan avances en dos frentes. Primero, ahora está bien establecido que algunas aleaciones son inherentemente frágiles, en el sentido de que experimentan muy poca deformación plástica alrededor de la punta de una grieta, mientras que otras aleaciones muestran una extensa deformación plástica (aunque localizada en bandas de cizallamiento). La razón precisa por la que esta diferencia no se comprende en la actualidad, pero parece probable que se resuelva con un trabajo continuo sobre los aspectos fundamentales de la deformación plástica y la fractura. Es probable que esto conduzca al desarrollo de nuevas aleaciones con una tenacidad a la fractura razonable, aunque no a la ductilidad a la tracción. Sin embargo, incluso este será un paso importante si dichas aleaciones se pueden utilizar como matrices para materiales compuestos.

En segundo lugar, para lograr la ductilidad a la tracción, parece ser necesario tener algunas características microestructurales para interactuar con las bandas de corte. Además, ¡la escala de longitud de la microestructura es claramente crítica! parámetro para detener la propagación de la banda de cizalla. Una vez más, se desconocen las razones precisas de esto, pero es muy probable que la investigación continua conduzca a una mejor comprensión de las interacciones entre las partículas de segunda fase y las bandas de cizallamiento.

En la actualidad, el enfoque más prometedor para producir materiales compuestos con la escala de longitud microestructural adecuada es la formación de compuestos dendríticos, como se discutió anteriormente. Una limitación crítica es que este proceso se ha demostrado en solo dos aleaciones estrechamente relacionadas y no parece ser un fenómeno general.

Desafortunadamente, nuestra comprensión de la termodinámica y el formato de fase en aleaciones multicomponente complejas no es tal que podamos predecir a priori qué aleaciones son capaces de producir dendritas dúctiles en una matriz formadora de vidrio. Hasta que se desarrolle esa comprensión, el descubrimiento de nuevos materiales compuestos dendríticos seguirá siendo una cuestión de prueba y error. Sin embargo, los

beneficios potenciales son significativos porque existe la posibilidad de fabricar materiales con una resistencia, tenacidad a la fractura y resistencia a la fatiga excepcionalmente altas.

### **Resumen y recomendaciones**

Los vidrios metálicos combinan algunas de las ventajosas propiedades mecánicas de la resistencia, rigidez y, en algunos casos, tenacidad de los metales, con la flexibilidad de procesamiento generalmente asociada con los polímeros termoplásticos. La ausencia de defectos cristalinos permite que los vidrios metálicos sean mucho más resistentes que las aleaciones convencionales, pero también significa que tienen una ductilidad a la tracción cercana a cero y una baja resistencia a la fatiga. de dendritas cristalinas dúctiles en una matriz de vidrio metálico. Estos compuestos dendríticos sacrifican cierta resistencia, pero pueden tener una tenacidad a la fractura excepcionalmente alta, así como una buena resistencia a la fatiga, y podrían reemplazar los aceros de alta resistencia en ciertos componentes estructurales de carga limitada en vehículos aeroespaciales donde el espacio es limitado.

Debido a que son vidrios verdaderos, la formación de termoplásticos cerca de la temperatura de transición vítrea proporciona a los vidrios metálicos una tremenda flexibilidad en el procesamiento. Por ejemplo, los componentes de vidrio metálico se pueden formar en un solo paso (por ejemplo, mediante moldeo por inyección) en geometrías complejas que serían difíciles o imposibles de producir con aleaciones convencionales. Además, las espumas de vidrio metálico se pueden hacer con relativa facilidad, aumentando la posibilidad de realizar espumas estructurales de alta resistencia y rigidez.

Finalmente, debido a que carecen de una estructura de grano cristalina, los vidrios metálicos pueden usarse para formar características a nanoescala con alta fidelidad. Esto puede hacer que los vidrios metálicos sean útiles en una variedad de aplicaciones de sistemas microelectromecánicos (MEMS).

Sin embargo, los vidrios metálicos también tienen limitaciones importantes para las aplicaciones aeroespaciales. La principal de ellas es la falta de buenas aleaciones formadoras de vidrio; en particular, no hay buenas aleaciones que formen vidrio ricas en aluminio, las aleaciones conocidas a base de titanio son relativamente densas (debido a

altas concentraciones de elementos de aleación) o contienen berilio, y las aleaciones conocidas a base de magnesio y hierro. son todos bastante frágiles, con baja tenacidad a la fractura. Aunque los compuestos de matriz de vidrio metálico pueden tener

propiedades sobresalientes (particularmente resistencia y tenacidad a la fractura), el número de buenos sistemas compuestos conocidos en la actualidad también es bastante limitado.

Para que los vidrios metálicos lejanos (y sus compuestos) sean de amplia utilidad en aplicaciones estructurales aeroespaciales, se requiere avanzar en las siguientes áreas:

- Desarrollo de nuevas aleaciones ligeras y sistemas compuestos, preferiblemente mediante enfoques computacionales y / o combinatorios en lugar de por ensayo y error. .
- Comprensión del comportamiento mecánico, especialmente:
  - El efecto de la composición y estructura de la aleación sobre la deformación plástica.
  - Diseño microestructural de composites con una tenacidad muy óptima.
- Desarrollo de técnicas de procesamiento, incluido el procesamiento termofísico de características complejas y / o nanoescalares, así como la producción de espumas de vidrio metálico.

Es muy probable que el trabajo continuo durante los próximos 20-50 años resulte en avances significativos en todas estas áreas, y que los vidrios metálicos y los compuestos de matriz de vidrio metálico verán una aceptación cada vez mayor como materiales estructurales. Sin embargo, si logran un uso generalizado en aplicaciones aeroespaciales o no, depende fundamentalmente del desarrollo de nuevas aleaciones ligeras.

1 ZP Lu, Y. Liu y CT Liu, Capítulo 4 en Vidrios metálicos a granel, M. Miller y PK Liaw, eds. (Springer, 2009).

2 H. Men, WT KIm y DH Kim, Mater. Trans. 44, 2142 (2003).

3 A. Peker y WL Johnson, Appl. Phys. Letón. 63, 2342 (1993).

4 N. Nishiyama y A. Inoue, Mater. Trans. JIM 37, 1531 (1996).

- 5 W. Zhang, QS Zhang y A. Inoue, *Mater. Trans.* 50, 679 (2009).
- 6 J. Schroers y WL Johnson, *Appl. Phys. Letón.* 84, 3666 (2004).
- 7 F. Guo, H. Wang, art. J. Poon y GJ Shiflet, *Appl. Phys. Letón.* 86, 091907 (2005).
- 8 V. Ponnambalam, art. J. Poon y GJ Shiflet, *J. Mater. Res.* 19, 1320 (2004).
- 9 AH Brothers y DC Dunand, *Scripta Mater.* 54, 513 (2006).
- 10 XJ Gu, SJ Poon y GJ Shiflet, *J. Mater. Res.* 22, 344 (2007).
- 11 Datos de MatWeb, <[www.rnatweb.com](http://www.rnatweb.com)>.
- 12 Datos de MatWeb, <[www.matweb.com](http://www.matweb.com)>.
- 13 Y. He, GM Dougherty, GJ Shiflet y SJ Poon, *Acta Metal !. Mater.* 41, 337 (1993).
- 14 Gráfico reproducido de c. A. Schuh, TC Hufnagel y U. Rammamurty, *Acta Mater.* 55, 4067 (2007) y se utiliza con la autorización de Elsevier, Ltd. La micrografía original es de RD Conner, WL Johnson, NE Paton y WD Nix, *J. Appl. Phys.* 94, 904 (2003).
- 15 P. Lowhaphandu y JJ Lewandowski, *Scripta Mater.* 38, 1811 (1998).
- 16 Datos de MatWeb, <[www.matweb.com](http://www.matweb.com)>.
- 17 CJ Gilbert, v. Schroeder, y RO Ritchie, *Metal !. Mater. Trans. A* 30, 1739 (1999).
- 18 B. Menzel y RH Dauskardt, *Acta Mater.* 54, 935 (2006).
- 19 ME Launey, DC Hofmann, WL Johnson y RO Ritchie, *Proc. Nat. Acad. Sel.* 106, 4986 (2009).
- 20 AL Greer, KL Rutherford y I. M. Hutchings, entrevista. *Mater. Rev.* 47, 87 (2002).
- 21 BA Green, PK Liaw y RA Buchanan, Capítulo 8 en *Vidrios metálicos a granel*, M. Miller y PKLiaw, eds. (Springer, 2009).
- 22 V. Schroeder y RO Ritchie, *Acta Metall.* 54, 1785 (2006).

23 Graphlc reproducido de CA Schuh, TC Hufnagel y U. Rammamurty, Acta Mater. 55, 4067 (2007) y se utilizó con el permiso de Elsevier, Ltd.

24 A. Hernando y M. Vazquez, Ch. 17 en Aleaciones rápidamente solidificadas, HH Liebermann, ed. (Marc: el Dekker, 1993).

25 T. Rfchmond y HJ Guntherodt, cap. 14 En Aleaciones Rapldly Solfdffied, HH Liebermann, ed. (Marcel Dekker, 1993).

26 C. Haon1 D. Camel, B. Drevet y JM Pelletier, Metall. Mater. Trans. A 39, 1791 (2008).

27 Fotografía de Todd Hufnagel.

28 CC Hays, c. P. Kírn y WL Johnson, Phys. Rev. Lett. 84, 2901 (2000).

29 C. Fan, RT Ott y TC Hufnagel, Appl. Phys. Letón. 81, 1020 (2002).

3D D. Hofmann, J.-Y. Suh, A. Wiest, G. Duan, ML Lind, M. o. Demetriou y w. L. Johnson, Nature 451, 1085 (2008).

31 D. Hofmann, J.-Y. Suh, A. Wiest, G. Duan, ML Lind, MD Demetriou y WL Johnson, Nature 451, 1085 (2008).

32 D. Hofmann, J.-Y. Suh, A. Wiest, G. ouan, ML Lind, M. o. Demetriou y w. L. Johnson, Nature 451, 1085 (2008).

33 Gráficos reproducidos de CA Schuh, TC Hufnagel y U. Ramrnarnurty, Acta Mater. 55, 4067 (2007) y se utilizó con la autorización de Elsevier, Ltd. Original obra de arte proporcionada por Charlle Hays, Caltech.

34 MF Ashby y AL Greer, Scripta Mater. 54, 321 (2006).

35 DC Hofmann, JY Suh, A. Wiest, ML Lind, MD Demetriou y WL Johnson, Proc. Nat. Acad. Sci. 105, 20136 (2008). 6

I D. Hofmann, J.-Y. Suh, A. Wiest, G. Duan, ML Lind, MD Demetriou y WL Johnson, Nature 451, 1085 (2008).

37 ME Launey, DC Hofmann, W. L Johnson y R. o. Ritchie, Proc. Nat. Acad. Sci. 106, 4986 (2009).

38 N. Barrington y M. Black, Cap. 1 en *Aerospace Materials*, B. Cantor, H. Assender y P. Grant, eds. (Instituto de Física, 1998).

39 Los datos para vidrios metálicos son de XJ Gu, SJ Poon y GJ Shiflet, *J. Mater. Res.* 22, 344 (2007); D. Hofmann, J.-Y. Suh, A. Wiest, G. Duan, ML Lind, MD Demetriou y WL Johnson, *Nature* 451, 1085 (2005);

MF Ashby y AL Greer, *Scripta Mater.* 54, 321 (2006); o. C. Hofmann, JY Suh, A. Wiest, ML Lind, MD Demetriou y WL Johnson, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105, 20136 (2008); JJ Lewandowski, WH Wang y AL Greer, *Phil. revista Letón.* 85, 77 (2005). Los datos de otros materiales provienen de Cambridge Materials Selector,

<<http://www.grantadesign.com/>>. 4 MD Demetriou, c. Veazey, J. s. Harmon, JP Schramm y w. L. Johnson, *Phys. Rev. Lett.* 101, 145702 (2008) .

1 C. Vermeeren, ed. *Around Glare: A New Aircraft Material in Context* (Kluwer, 2002).

42 D. V. Louzguine-Luzgín, DB Miracle, and A. Inoue, *Adv. Eng. Mater.* 10, 1008 (2008).

41 A. L. Greer, *Materials Today* 12(1•2), 14 (2009).

44 D. V. Louzguine-Luzgín, OB Miracle, and A. Inoue, *Adv. Eng. Mater.* 10, 1008 (2008).

5 Y. Li, Q. Guo, JA Kalb, and CV Thompson, *Science* 322, 1816 (2008) .

46 Y. Li, Q. Guo, JA Kalb, and CV Thompson, *Science* 322, 1816 (2008).

47 T. Tamura, K. Amiya, R. s. Rachmat, Y. Mrzutani, and K. Miwa, *Nature Mater.* 4, 289 (2005). 6 G. Kumar, H. X. Tang, and J. Schroers, *Nature* 457, 868 (2009).

49 A. L. Greer, *Materials Today* 12(1•2), 14 (2009).

7 January 2010

UNCLASSIFIED// F8R IFFil:lls Wlil 8PIk'f

## **Defensa**

### **Documento de referencia de inteligencia**

### **Soporte para amenazas de adquisición**

ICOD: 1December 2009

DIA-08-0912-006

Biomateriales

Preparado por

I (b) (3): 10 usan 424

Autor de la Agencia de Inteligencia de Defensa:

Nota administrativa

ADVERTENCIA DE COPYRIGHT: No se autoriza una mayor difusión de las fotografías de esta publicación.

Este producto es uno de una serie de tecnología avanzada reproducida en el año fiscal 2009 bajo la Agencia de Inteligencia de Defensa, (b) (3): 10 usan 424 Aplicaciones de Sistemas de Armas Aeroespaciales Avanzadas (AAWSA) ro ram. ommen s o preguntas relativas a este documento debe estar dirigido a (b) (3): 10 use 424; (b) (6) Programa AAWSA

Gerente, Agencia de Inteligencia de Defensa, g 6000, Washington, DC 20340-51

# Contenido

Introducción .....	..vi
Importancia de la biocompatibilidad .....	..vii
Ciencia de los biomateriales .....	.. vii
Blomateriales para biosensores 1	
Biomateriales para biomedicina .....	.. 2
Siliconas biomédicas - Polidimetilsiloxanos .....	.. 2
Química de la silicona • .....	
.. 4 Sillcone en Blomedical Products .....	.. 4
Teflón .....	.. 6
Polinizadores biodegradables .....	.. 7
Ventajas de la biodegradación .....	..8
Biomaterlals degradables .....	.. 8
Ácido poliláctico y ácido poliglicólico .....	.. 8
Polietilenglicol u óxido de polietileno .....	.. 10
Hidrogeles .....	.. 10
Titanio - Uniones para cadera y rodilla .....	..11
BioCerámica .....	.. 11
Cerámica dental .....	..13
Construcciones de tejido como biomateriales .....	.. 13
Blomateriales cardiovasculares .....	.. 15
Biomateriales de stent .....	.. 18
Nitinol como B1omaterlal .....	.. 19
Lentes de contacto .....	.. 19
Polímeros de Dellvery para fármacos • .....	..20

Titanio médico como biomaterial .....	22
Blomateriales en Dialvsis .....	24
Resumen y recomendaciones .....	25

## Cifras

Figura 1. Aplicaciones de biomateriales en Medica! Dispositivos .....	vi
Figura 2. ¡Medica común! Dispositivos que utilizan Blomaterlals .....	vm
Figura 3. Biomateriales como policarbonatos, celulosa y siliconas usados en membranas para sensores, dializadores y oxigenadores .....	1
Figura 4. Fotografía de plantas biomédicas de silicona (polidimetilsiloxano)	
Utilizado en Cirugía Reconstructiva de Senos .....	3
Figura 5. Grupos químicos de silicona .....	4
Figura 6. Cánula de traqueotomía de silicona .....	5
Figura 7. Láminas de silicona utilizadas debajo de la piel como capa de soporte físico para la reparación del tejido cicatricial .....	5
Figura 8. Estructura de teflón .....	6
Figura 9. PTFE expandido (Gore-Tex o ePTFE) utilizado en plantas de labio .....	7
Figura 10. Polímeros biodegradables .....	7
Figura 11. Estructura del ácido poliláctico (un polímero biodegradable) .....	9
Figura 12. PLA biodegradable como barrera antiadherencia después de corazón abierto	
Cirugía .....	9
Figura 13. Polímeros biodegradables basados en copolímeros de ácido poliláctico y polietilenglicol (Polysciences nc) .....	10
Figura 14. Puntos de hidrogel .....	10
Figura 15. Varios componentes de Titanium usados en el reemplazo de Hlp Jolnt	11

Figura 16. Estructura ósea porosa de hidroxiapatita después de comercial Procesamiento .....	12
Figura 17. Biocerámica utilizada en el componente de reemplazo artificial de cadera ...	12
Figura 18. Dientes de cerámica esculpidos por computadora .....	13
Figura 19. Regeneración de tejido guiada por andamio .....	14
Figura 20. Material biodegradable CSLG depositado en una estructura de panal para Permitir la filtración de células vivas mientras se encuentra en un cultivo celular sumergido •	15
Figura 21. Algunos de los dispositivos biomédicos más populares y duración de su contacto con la sangre .....	16
Figura 22. Espuma de teflón Gore Medical utilizada en injertos vasculares .....	16
Figura 23. Ilustración del tratamiento de un defecto del tabique auricular utilizando un Producto a base de teflón fabricado por Gore, nc .....	17
Figura 24. Válvula cardíaca Bjork Shiley de acero inoxidable y teflón .....	18
Figura 25. Ilustración de la colocación de un stent	18
Figura 26. Stent de nitinol. • .....	19
Figura 27. Lentes de contacto .....	20
Figura 28. Representación esquemática de un fármaco biodegradable (bioerosionable) Dispositivo de administración .....	21
Figura 29. Microfotografía de titanio metálico (aparece negro en esta foto) en una integración ntima con Living Bone .....	23
Figura 30. Ilustración (izquierda) y fotografía (derecha) de un dializador de sangre como Utilizado en Medicina .....	24
Figura 31. La membrana de cuprofano pasa los productos de desecho de la sangre	

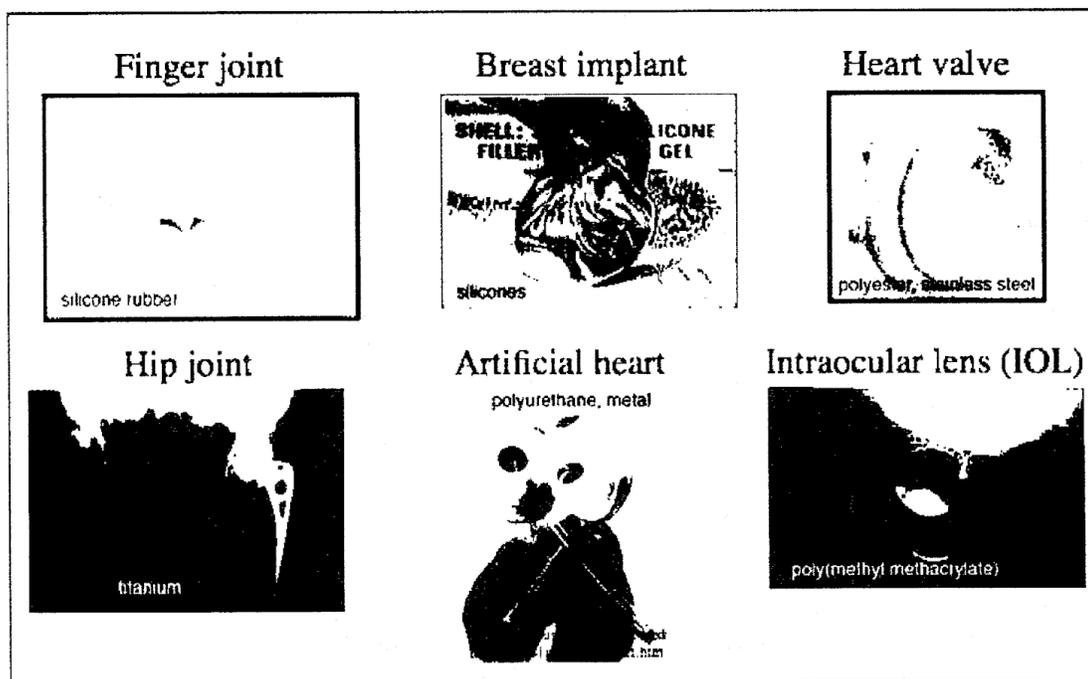
(puntos violeta y naranja) a través de los poros y bloquea el paso de los glóbulos rojo..... 25

## Biomateriales

### Introducción

Los biomateriales son metales, cerámicas, polímeros, vidrios, carbonos y materiales compuestos destinados a interactuar con sistemas biológicos. A menudo se usan para tratar, aumentar o reemplazar tejidos, órganos o funciones corporales. Dichos materiales se utilizan en diversas formas, incluidas piezas moldeadas o mecanizadas, revestimientos, fibras, películas, espumas y tejidos. Los biomateriales no suelen ser vivientes, pero las definiciones recientes también incluyen piel viva y tejidos producidos en cultivo.

Un material biocompatible es diferente de un material biológico producido por un sistema biológico, como el hueso. Las caderas artificiales, los stents vasculares, los marcapasos artificiales y los catéteres están hechos de materiales biocompatibles que suelen tener un origen sintético. Se fabrica una gama extraordinariamente amplia de dispositivos médicos a partir de biomateriales. La Figura 1 muestra algunos ejemplos representativos de dispositivos médicos que utilizan biomateriales.



## Figura 1: Aplicación de biomateriales en dispositivos médicos

La ciencia de los biomateriales, que abarca elementos de la medicina, la biología, la química y la ciencia de los materiales, ha experimentado un crecimiento firme y constante durante su historia de aproximadamente medio siglo.

Aunque los biomateriales se utilizan principalmente para aplicaciones médicas, también se utilizan para hacer crecer células en cultivo, para analizar proteínas sanguíneas en la clínica de laboratorio, en el procesamiento de biomoléculas en biotecnología, para implantes de regulación de la fertilidad en el ganado, en matrices de genes de diagnóstico, en la acuicultura de ostras, y para "biochips" de células-silicio en investigación. El hilo común en estas aplicaciones es la interacción entre sistemas biológicos y materiales naturales sintéticos o modificados.

Los materiales biomiméticos, por el contrario, no están fabricados por organismos vivos, pero tienen composiciones y propiedades similares a los materiales fabricados por organismos vivos.

Por ejemplo, el recubrimiento de hidroxiapatita de calcio que se encuentra en muchas caderas artificiales, utilizado como cemento de interfaz hueso-metal para facilitar la unión de implantes al hueso, es similar al recubrimiento que se encuentra en las conchas de moluscos.

### **IMPORTANCIA DE LA BIOCMPATIBILIDAD**

La biocompatibilidad es un tema importante en los implantes y sensores biomédicos. Una interacción material-tejido que resulta de la implantación de un objeto extraño en el cuerpo es un obstáculo importante para desarrollar dispositivos y sensores implantables estables y a largo plazo.

Los procesos que ocurren cuando los sensores se colocan en el complejo entorno de vida del cuerpo humano se conocen a veces como bioincrustaciones. En bioincrustaciones, la parte física o químicamente sensible de la interfaz del sensor se recubre con proteínas, elementos formados por sangre, adherentes

células inmunológicas y, a veces, formas de tejido cicatricial que tienden a aislar el sensor del resto del entorno corporal. Esta respuesta del tejido es una reacción de cuerpo extraño a cualquier objeto introducido en el tejido que no expresa características de suñace que lo identifican como parte de los tejidos del huésped.

Las experiencias de muchos investigadores (más de 600 estudios reportados desde 1996) con la biocompatibilidad de biomateriales relacionados con la función de biosensores implantados han sido deficientes, por lo que muchas empresas han abandonado

dispositivos sensores implantables en conjunto. Más bien, la tendencia reciente en los biosensores médicos es colocarlos fuera del cuerpo. Los sensores más nuevos a menudo se basan en principios ópticos en un esfuerzo por evitar los problemas de biocompatibilidad y biomateriales de colocar sensores dentro del cuerpo humano.

## **CIENCIA DE BIOMATERIALES**

El estudio y uso de biomateriales reúne a investigadores de diversos antecedentes académicos que deben comunicarse con claridad. Las profesiones que se cruzan en el desarrollo, estudio y aplicación de biomateriales incluyen bioingeniero, químico, ingeniero químico, ingeniero eléctrico, ingeniero mecánico, científico de materiales, biólogo, microbiólogo, físico, veterinario, ético, enfermero, abogado, especialista en regulación y capitalista de riesgo. .

¡El número de medica! Los dispositivos que se utilizan cada año en humanos es muy grande. La Figura 2 estima el uso de dispositivos comunes, todos los cuales emplean biomateriales.

lente intraocular 7.000.000

lentes de contacto 75.000.000

injerto vascular 400.000

prótesis de cadera y rodilla 1.000.000

catéter 300.000.000

válvula cardíaca 200000

stent (cardiovascular)> 2,000,000

implante mamario 3001000

implante dental 500.000

marcapasos 200.000

dializador renal 25.000.000

dispositivos de asistencia ventricular izquierda 100,000

Figura 2. Dispositivos médicos comunes que utilizan materiales biomateriales

El desarrollo de biomateriales es la unión de la ciencia de los materiales y la química. Los dispositivos médicos pueden estar compuestos por un único biomaterial o una combinación de varios materiales. Una válvula cardíaca podría fabricarse a partir de polímeros, metales y carbonos. Una articulación de la cadera puede fabricarse a partir de metales y polímeros (y en ocasiones de cerámica) y se conectará al cuerpo a través de un cemento óseo polimérico.

Los biomateriales por sí mismos no constituyen una terapia clínica útil, sino que deben fabricarse en dispositivos. Este suele ser el papel de un ingeniero, pero el ingeniero puede trabajar en estrecha colaboración con los químicos sintéticos para optimizar las propiedades del material y con los médicos para garantizar que el dispositivo sea útil en aplicaciones clínicas.

Los biomateriales deben ser compatibles con el cuerpo y, a menudo, hay problemas que deben resolverse antes de que un producto pueda comercializarse y utilizarse en un entorno clínico. Debido a esto, los biomateriales generalmente están sujetos a los mismos requisitos de seguridad muy estrictos que los de las nuevas terapias con medicamentos.

## **Biomateriales para biosensores**

Los biosensores implantables del cuerpo humano imponen algunas de las mayores exigencias funcionales a los biomateriales. Los biosensores controlan el estado fisiológico de los tejidos para terapéutica médica o para evaluar el desempeño humano. Son de interés los sensores de glucosa, oxígeno, pH sanguíneo, hormonas suprarrenales, actividad nerviosa, rendimiento cardíaco y monitores de presión arterial.

Los sensores de bioquímica sanguínea son los más difíciles de mantener funcionando a lo largo del tiempo, principalmente porque los materiales de la interfaz del sensor provocan reacciones de cuerpo extraño de bajo nivel en los tejidos. Estos tipos de respuestas no son específicamente importantes para los dispositivos implantables que tienen funciones estructurales más que de detección, como las válvulas cardíacas, pero pueden convertir completamente un biosensor de glucosa en sangre, por ejemplo, inútil después de unos días.

Las interfaces del biosensor químicamente sensibles a los tejidos y entornos corporales emplean membranas en un esfuerzo por proteger la superficie de detección activa del biosensor de posibles reacciones corporales. La membrana permite que pequeñas moléculas de interés pasen a través de sus pares, al tiempo que excluye proteínas más grandes, elementos formados por sangre y células como macrófagos que envolverían el sensor.

La composición del biomaterial de la membrana, el tamaño de la membrana y la integridad física a largo plazo son fundamentales. componentes en el funcionamiento del sensor. Si el biomaterial elegido retarda la adhesión de proteínas y no provoca una respuesta biológica, entonces esto mejora la longevidad del sensor. La Figura 3 muestra algunas biomembranas representativas

Ningún biomaterial es mejor para todas las aplicaciones de sensores, principalmente porque los diferentes biomateriales se comportan de manera diferente en relación con la sustancia que se detecta. Las membranas que pasan la glucosa, por ejemplo, pueden no pasar el oxígeno que se necesita para que funcione un sensor. La bioincrustación de la membrana comienza inmediatamente después del contacto del sensor con las células del cuerpo. Las proteínas y otros componentes biológicos se adhieren a la superficie del sensor y, en algunos casos, impregnan los poros del material. Este proceso retarda la difusión de las moléculas de interés a la superficie del sensor y ralentiza la respuesta del sensor a los cambios en concentración o reduce la respuesta general hasta el punto en que el sensor pierde la calibración.



Figura 3. Biomateriales como policarbonatos, Celulosa y bollos usados en membranas para Sensores, dializadores y oxigenadores

Se ha descubierto que el diseño de los materiales de la membrana del sensor depende críticamente de las características sutiles de la química de la membrana, el grosor del material y la porosidad, así como, de manera más general, en qué parte del cuerpo humano se encuentra el sensor.

puede adaptarse a la cola se puede adaptar a diversos grados de dureza y resistencia para obtener rigidez en aplicaciones de catéter.

Las siliconas biomédicas atrajeron notoriedad en 1995 cuando una demanda colectiva contra Dow Corning, Inc., trajo un gran acuerdo como resultado de los supuestos peligros de los implantes mamarios de silicona.

Después de revisar años de evidencia e investigación sobre los implantes mamarios rellenos de gel de silicona, el instituto nacional de medicina descubrió que "la evidencia sugiere que las enfermedades y afecciones como las enfermedades del tejido conectivo, el cáncer, las enfermedades neurológicas u otras dolencias o afecciones sistémicas ya no son comunes en las mujeres con implantes mamarios que en mujeres sin implantes ". ¡Dow se mudó de la medica! de silicona y desde entonces ha sido reemplazada por una serie de empresas más pequeñas que ofrecen productos de silicona especializados.

La Figura 4 muestra la forma actual de silicona usada para cirugía reconstructiva después de una mastectomía, particularmente después del cáncer de mama en mujeres.

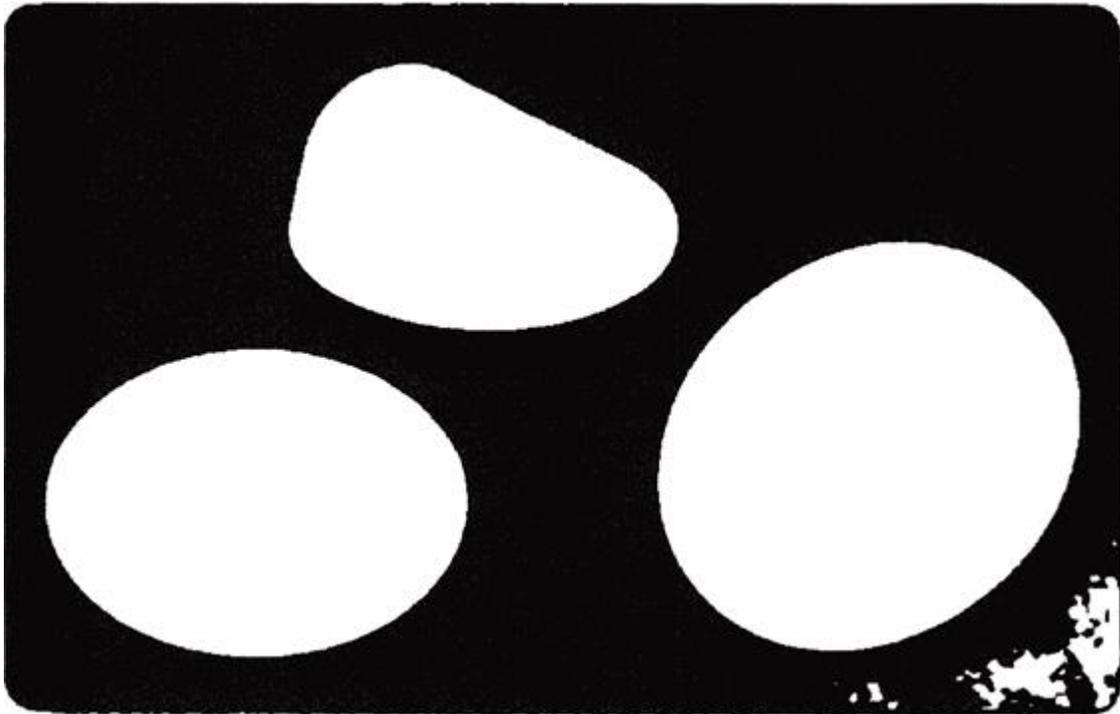
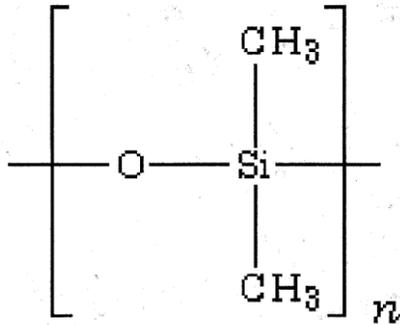


Figura 4. Fotografía de Silicone (polidimetilsiloxano) Blomedical mplantas utilizadas en cirugía de reconstrucción mamaria

#### QUÍMICA DE SILICONA

Silicona es en realidad un nombre común para el compuesto químico polidimetilsiloxano (PDMS), una clase de polímeros sintéticos con unidades repetidas de silicio y oxígeno. La figura 5 muestra la estructura polimérica repetitiva de medica siliconas. Se pueden unir varios grupos funcionales, a menudo metilo, a esa columna vertebral para cambiar las propiedades del material.

El polímero de silicona se puede transformar fácilmente en materiales lineales o reticulantes sin utilizar plastificantes tóxicos. Los materiales resultantes son elásticos a la temperatura corporal.



Los grupos de diferentes grupos unidos a la columna vertebral de silicio-oxígeno dan a las siliconas una gama de propiedades mecánicas y químicas que permiten su uso como fluidos, emulsiones, compuestos: resinas y elastómeros en aplicaciones numéricas. Por tanto, la silicona es un polímero versátil, aunque su uso suele estar limitado por su resistencia mecánica relativamente pobre. Sin embargo, esta limitación se puede superar reforzando la silicona con una carga de sílice o modificando químicamente la estructura.

La estabilidad, la falta de toxicidad y la excelente biocompatibilidad de PDMS hacen que estos materiales sean muy adecuados para su uso en el cuidado personal, farmacéutico y médico. aplicaciones del dispositivo. La silicona se moldea y moldea fácilmente mediante curado a temperatura ambiente (conocido como RTV) o mediante el uso de un catalizador orgánico.

## SILICONA EN PRODUCTOS BIOMEDICOS

Las fabrican vertiendo membranas de silicona seel precursor líquido de silicona en láminas delgadas. Dichas membranas se utilizan a menudo en biosensores sanguíneos de oxígeno y dióxido de carbono porque las membranas hechas de este material son altamente transmisivas a estos gases mientras bloquean la mayoría de las otras sustancias químicas presentes en el torrente sanguíneo. Además, la silicona es resistente a la adhesión de proteínas y su excelente biocompatibilidad general. lo convierten en uno de los materiales más utilizados para encapsular biosensores en contacto con tejidos o sangre.

Las formulaciones recientes de silicona pueden modelarse con luz ultravioleta y, por lo tanto, se prestan a fabricar con biosensores fabricados por fotolitografía.

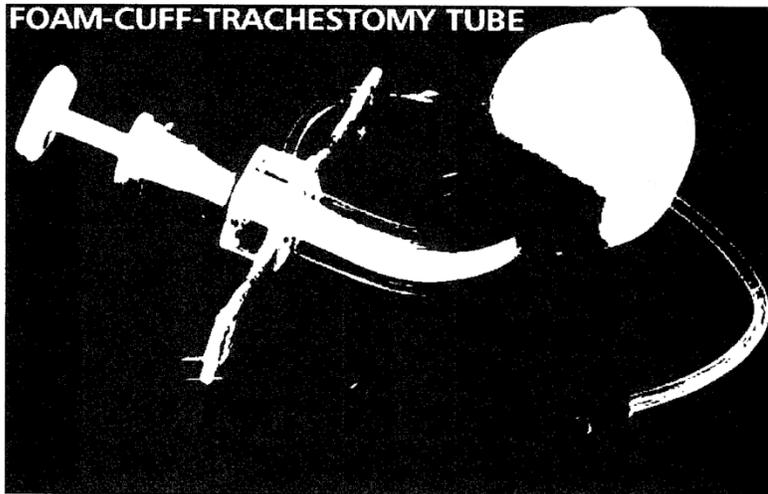


Figura 6. Tubo de traqueotomía Silicone La

figura 6 es un ejemplo representativo de medicamentos a base de silicona. productos para tubos o catéteres envolventes. Un tubo de traqueotomía, o "tubo de traqueostomía", es un tubo de plástico o metal curvo de 2 a 3 pulgadas de largo que se coloca en una abertura creada quirúrgicamente (traqueostomía) en la tráquea para mantenerla abierta. Las versiones de estos productos se utilizan en casos en los que los pacientes tienen dificultad para respirar por sí mismos, como en una lesión de la médula espinal.

Un producto conocido como Mepiform™ es un ejemplo del uso de silicona en forma de lámina para el tratamiento de cicatrices, particularmente cicatrices queloides. La figura 7 muestra este producto.



Figura 7. Láminas de silicona utilizadas debajo de la piel como capa de soporte físico para la reparación del tejido cicatricial Los

## TEFLON

materiales Biomedical deben ser inertes a la compleja química de los fluidos biológicos para que no sufran ni provoquen cambios en el tejido. Teflon™ cumple admirablemente estos requisitos. El teflón es un nombre comercial de politetrafluoroetileno (PTFE), un polímero a base de fluorocarbono. Se obtiene mediante la polimerización por radicales libres de tetrafluoroetileno y tiene una cadena principal de carbono en la que cada carbono tiene dos átomos de flúor unidos.

Este polímero es hidrófobo (agua odioso), biológicamente inerte y no biodegradable y también tiene características de baja fricción y excelente "deslizamiento". La inercia química (estabilidad) del PTFE está relacionada con la fuerza del enlace flúor-carbono que lo hace resistente a la adhesión. La figura 8 muestra la estructura de este material, es una larga cadena de unidades químicas repetidas, como se muestra a la derecha de la figura.

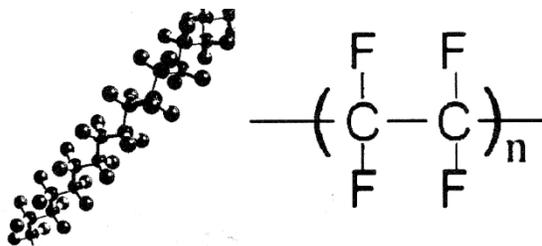


Figura 8. Estructura de teflón

Goretex® es una forma médica de teflón (PTFE) que, cuando se estira y extruye, atrapa las células de aire en su microestructura muclí como lo hace la espuma y, por lo tanto, es relativamente suave y repelente a la mayoría de los líquidos. Este material se conoce como e-PTFE (PTFE expandido).

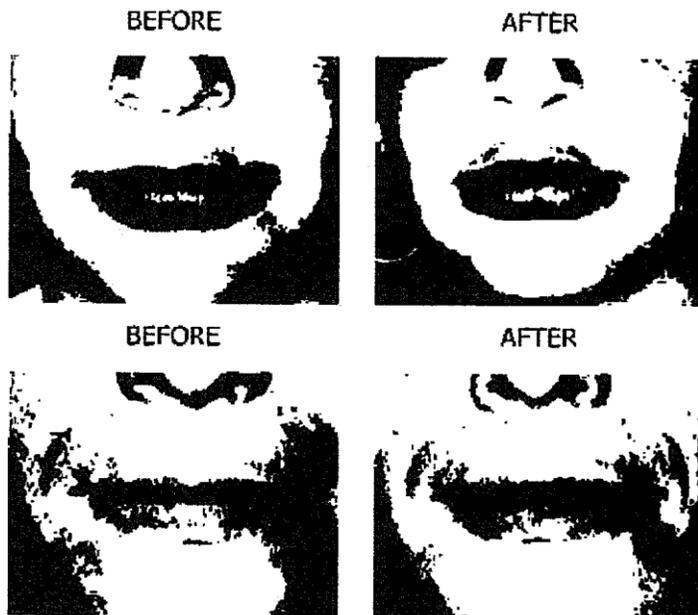
El PTFE se puede fabricar en muchas formas, incluidas pastas, tubos, hebras y láminas, mientras que el ePTFE se puede tejer en una malla porosa similar a una tela. Cuando se implanta en el cuerpo, esta malla fuerte permite que el tejido crezca en sus poros, lo que lo hace ideal para dispositivos médicos como los injertos vasculares.

Se han utilizado materiales de implantes subcutáneos de ePTFE preformados para mejorar la reconstrucción facial y los resultados de la cirugía estética. La Figura 9 es la información del producto de un fabricante que muestra la utilidad de usar ePTFE en cirugía estética.

El PTFE tiene una resistencia al desgaste relativamente baja, pero bajo compresión o en situaciones en las que puede producirse roce o abrasión, puede producir partículas de desgaste. Estos pueden resultar en una reacción inflamatoria crónica, un resultado indeseable. Para una adecuada aplicación, el ingeniero de biomateriales debe considerar muchos aspectos de las propiedades físicas y biológicas de los materiales. Por lo tanto, aunque el PTFE es altamente inerte en el cuerpo, aplicándolo en circunstancias incorrectas (por ejemplo, a un dispositivo que está bajo

Figura 9. PTFE expandido (Gore-Tex o ePTFE) utilizado en implantes de labios. Este es un implante sintético que se ha utilizado en el rostro y el cuerpo durante muchos años. La ventaja principal es que no se absorbe con el tiempo y los resultados son permanentes.

compresión o expuesto al desgaste) puede conducir a una reacción que ya no califica como "biocompatible".



## POLÍMEROS BIODEGRADABLES

Los polímeros biodegradables son una categoría importante y relativamente grande de biomateriales que se utilizan ampliamente en la medicina. e industrias alimentarias. En este último, se utilizan como envoltorios de alimentos y otros envases derivados de sustancias fabulosas naturales que se degradan lentamente, por evaporación en vapor de agua y dióxido de carbono, cuando se exponen al sol y al exterior, minimizando así la eliminación de residuos. La Figura 10 muestra una forma compleja hecha de polilactida (PLA), un polímero biodegradable.

Los polímeros biodegradables pueden ser naturales o sintéticos. En general, los polímeros sintéticos ofrecen una mayor

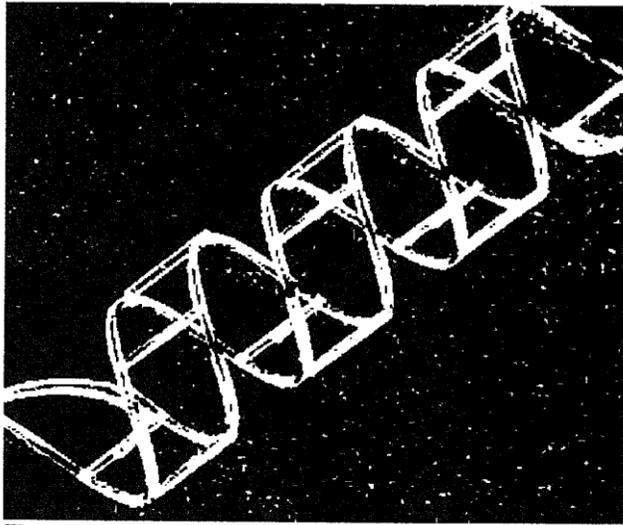


Figura 10. Biodegradable Polymers. Polymers such as

Figura 10. Polímeros biodegradables. Los polímeros como el PLA son muy parecidos a los plásticos convencionales y, como tales, tienen cualidades de claridad, flexibilidad y resistencia.

ventajas que los materiales naturales en el sentido de que se pueden adaptar para proporcionar una gama más amplia de propiedades y una uniformidad de lote a lote más predecible que los materiales de fuentes naturales. Los polímeros sintéticos también representan una fuente más confiable de materias uno libre de preocupaciones de inmunogenicidad. Estos polímeros pueden ser ópticamente transparentes, exhibir una buena flexibilidad y tener una resistencia comparable a la de muchos plásticos.

## **VENTAJAS DE LA BIODEGRADACIÓN**

En el cuerpo humano, los polímeros biodegradables tienen una buena compatibilidad, pero también se descomponen en materiales inofensivos y con el tiempo se disuelven por completo. Los polímeros biodegradables se someten a una hidrólisis química en el ambiente salado y húmedo de los tejidos por medio de una estructura química lábil del polímero. La degradación comienza inmediatamente después de la exposición al agua y ocurre en dos pasos.

En el primer paso, el material se hidrata completamente y el agua ataca las cadenas del polímero, convirtiendo las cadenas largas en fragmentos más cortos solubles en agua. El

aspecto deseable de este proceso es una reducción del peso molecular sin pérdida de las propiedades físicas, ya que la matriz del dispositivo aún se mantiene unida, incluso con las cadenas más cortas.

En el segundo paso, las cadenas de polímero más cortas son atacadas por enzimas que están presentes de forma natural en los tejidos. Básicamente, una metabolización de los fragmentos por los tejidos corporales da como resultado una rápida pérdida de masa de polímero, lo que se conoce como erosión masiva. Todos los dispositivos sintéticos y suturas disponibles comercialmente se degradan por erosión en masa.

## **BIOMATERIALES DEGRADABLES**

los diferentes polímeros biodegradables tienen diferentes tiempos de vida en los tejidos, que van desde unos pocos días hasta años. La combinación de dos biopolímeros diferentes, por ejemplo, corta (días)

PLA (polilactida) de vida y PGA (poliglicólido) de vida más larga (meses), revela que los polímeros se pueden producir con tiempos de descomposición intermedios. Por lo tanto, sus tiempos de descomposición se pueden determinar de forma personalizada a través de su formulación.

Los polímeros biodegradables satisfacen el deseo de un médico de tener un dispositivo implantado que no requiera una segunda intervención quirúrgica para su extracción, lo que es deseable en muchas aplicaciones. En aplicaciones ortopédicas, por ejemplo, un hueso fracturado que ha sido fijado con un implante inoxidable rígido no biodegradable tiene tendencia a la refractura al retirar el implante, lo que hace que la extracción sea indeseable. Esta refractura es el resultado de la descarga de la tensión sobre el hueso por el soporte de acero inoxidable porque el hueso no ha soportado una carga suficiente durante el proceso de curación. Sin embargo, se puede diseñar un sistema de fijación preparado a partir de un polímero biodegradable para que se degrade a una velocidad que transfiera lentamente la carga al hueso en curación, evitando así el riesgo de refractura y eliminando la necesidad de retirar el implante.

## **ÁCIDO POLILÁCTICO Y ÁCIDO POLIGLICÓLICO**

El ácido poliláctico (PLA), el ácido poliglicólico (PGA) y sus copolímeros son los polímeros biodegradables más utilizados. Estos materiales, cuando se exponen al sol y a la intemperie, se degradan en agua y dióxido de carbono y, en esencia, desaparecen, dado el tiempo suficiente.

En el cuerpo humano, las combinaciones de PLA y PGA se utilizan para controlar la longevidad de un material controlando su tasa de degradación cuando se expone a los tejidos. Los productos de degradación en el cuerpo humano son también agua y dióxido de carbono.

PLA, o polilactida, es un material orgánico termoplástico de cadena larga derivado de recursos renovables, como el almidón de maíz (en los Estados Unidos) o la caña de azúcar (en el resto del mundo). El PLA ha sido reconocido durante más de un siglo y es de interés comercial principalmente debido a sus aplicaciones biomédicas. La Figura 11 muestra la estructura química del PLA.

Estos materiales son populares porque ya se han utilizado en muchos implantes médicos aprobados. Y se ha demostrado que son seguros, no tóxicos y biocompatibles. Se han utilizado en el desarrollo de varios medicamentos disponibles comercialmente.



Figura 11. Estructura de Poly(lactide) acid (productos, incluyendo suturas, Polímero Biodegradable Tisular) tornillos y tachuelas, membranas de regeneración tisular guiada para odontología, interna! dispositivos de fijación de huesos, microesferas para sistemas de administración de fármacos implantables y sistemas de reparación de meniscos y cartílagos.

Estos polímeros se pueden usar potencialmente en el diseño de stents vasculares y urológicos y sustitutos de la piel. Esto es posible mediante la manipulación de las características poliméricas de estos materiales, como su arquitectura tridimensional, su integridad mecánica y estructural, y su biodegradabilidad. Los materiales también se pueden utilizar como andamios para la ingeniería de tejidos y para la reconstrucción de tejidos.

Una aplicación médica de estos materiales en forma de láminas delgadas es su colocación como una barrera fina que evita la entrada de desechos en las heridas y como una capa subyacente a la piel y el tejido graso. La figura 12 es la concepción de un artista de un implante de polímero PLA que se coloca sobre el corazón después de una cirugía a corazón abierto.



Figura 12. PLA biodegradable como antiadherencia barrera después de una cirugía a corazón abierto. La lámina de PLA actúa como barrera y espaciador para evitar que la pared del corazón en proceso de curación desarrolle una unión a la pared torácica y forme adherencias en los suprayacentes tejidos. La barrera permanece en su lugar solo durante una semana aproximadamente durante el proceso de curación antes de biodegradarse, por lo que no queda ningún cuerpo extraño dentro del cuerpo.

## **POLIETILENGLICOL U ÓXIDO DE POLIETILENO**

El polietilenglicol (PEG) es un material ampliamente utilizado en biomedicina, productos farmacéuticos, cosméticos y agricultura. Su compatibilidad química, solubilidad en agua, no toxicidad, biocompatibilidad y múltiples

Los estados permiten su uso como recubrimientos y en forma sólida para crear superficies que son muy aceptables para la biología. La Figura 13 muestra la comercialización de PEG en los mercados de pan que incluyen polímeros biodegradables.

Una de las principales aplicaciones de PEG es la creación de superficies "que no ensucian" cuando se exponen a sangre o entornos biológicos. Las propiedades antiincrustantes o resistentes a las células y las proteínas de las superficies que contienen PEG se deben al estado altamente hidratado del material.

El PEG se utiliza en sistemas de administración de fármacos.



Figura 13. Polímeros biodegradables basados en copolímeros de Poly(lactide Acid) y polietilenglicol para mejorar la solubilidad de los fármacos y ayudar a estabilizar los fármacos proteicos inmunogénicos o inestables. Esto puede mejorar los tiempos de circulación y la estabilidad de las drogas en el cuerpo.

## **HIDROGELES**

Los hidrogeles son materiales líquidos o semisólidos que tienen una fuerte afinidad por el agua. El ácido poli (hidroxietil metacrílico), o poli (HEMA), es uno de los hidrogeles más importantes en el mundo de los biomateriales porque tiene muchas ventajas sobre otros hidrogeles. Estos incluyen un contenido de agua similar al tejido vivo, inercia a los procesos biológicos, resistencia a la degradación, permeabilidad a los metabolitos y resistencia a la absorción por parte del cuerpo.

El poli (HEMA) se puede fabricar fácilmente en muchas formas y se puede esterilizar fácilmente. Esto se debe a su estructura, que es



Figura 14. Puntos de hidrogel compuesto por moléculas de cadena larga entrecruzadas entre sí para crear muchos pequeños espacios vacíos que pueden absorber agua u otros líquidos como una esponja. Los hidrogeles se pueden extruir en casi cualquier forma. La figura 14 los muestra como pequeños puntos.

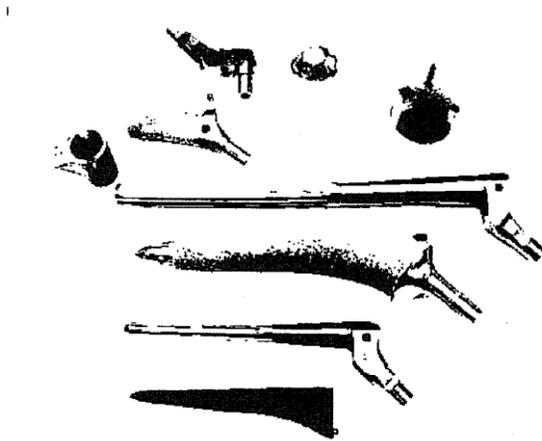
Si los espacios se llenan con un fármaco, el hidrogel puede dispensar el fármaco gradualmente a medida que la estructura se biodegrada. Los hidrogeles también se utilizan para la ingeniería de tejidos y la reparación de tejidos, donde los espacios en el gel pueden llenarse con células del tallo, factores de crecimiento de tejidos o una combinación de los dos.

Los hidrogeles son redes de polímeros reticulados que son insolubles en los fluidos corporales, pero que pueden hincharse y, a menudo, tienen un contenido de agua de hasta el 90 por ciento. Estos pueden formarse reticulando uno o varios tipos de unidades monoméricas en una red, formando un homopolímero, copolímero o multipolímero. Con la incorporación de diferentes monómeros, se pueden formar geles con propiedades químicas y físicas de amplio rango. Los geles pueden ser neutros o cargados, blandos o rígidos, fuertes o quebradizos. Los hidrogeles se utilizan habitualmente para aplicaciones biomédicas y farmacéuticas como liberación de fármacos, tendones artificiales 1 bioadhesivos para curar heridas, membranas de riñón artificiales, piel artificial<sup>1</sup> y lentes de contacto.

## **TITANIO - ARTICULACIONES DE CADERA Y RODILLA**

Los implantes de cadera y rodilla a base de titanio son bastante exitosos y se encuentran entre los procedimientos ortopédicos más comunes. Cuando se realiza un reemplazo de cadera, se extrae la articulación de la cadera dañada y artrítica. Luego, la articulación de la cadera de rótula se reemplaza con un implante artificial.

Los implantes de cadera a menudo no muestran signo de su existencia, ya sea en la marcha o en la funcionalidad. En los adultos, pueden durar toda la vida. También se sabe que los implantes de rodilla tienen éxito.



La Figura 15 muestra una variedad de conjuntos de articulaciones de cadera de titanio. La parte del eje largo del dispositivo llena un agujero perforado en el hueso largo del fémur.

## **BIOCERAMICAS**

Los materiales cerámicos a veces se usan directamente o se modifican para su uso en aplicaciones en el cuerpo humano y, por lo tanto, se conocen como biocerámicas.



Figura 15. Varios componentes de titanio utilizados en el reemplazo de la articulación de la cadera

Las aplicaciones más comunes se encuentran en la reparación ósea, la odontología y el uso de cerámica en reemplazos de articulaciones de cadera y rodilla, donde su excepcional dureza se puede aprovechar en las articulaciones de desgaste.

Las biocerámicas varían en biocompatibilidad desde los óxidos cerámicos, que son inertes en el cuerpo, hasta el otro extremo de los materiales reabsorbibles, que eventualmente son reemplazados por los materiales que se utilizaron para reparar.

Dos cerámicas comúnmente utilizadas en odontología y prótesis de cadera son la alúmina y la hidroxiapatita (HA). HA es un componente principal del compartimento inorgánico del hueso. El HA preparado comercialmente se procesa usando una técnica de ácido fosfórico e intercambio hidrotérmico que produce una morfología porosa, "similar a un hueso" en la estructura resultante. La figura 16 muestra este resultado. Cuando se implanta en defectos óseos, el HA favorece el crecimiento óseo a través de los poros y, por lo tanto, se convierte en un andamio intermedio, así como en una eventual matriz de soporte.

Los compuestos de hidroxiapatita se han utilizado con éxito para reparar, reconstruir y reemplazar partes del cuerpo enfermas o dañadas, especialmente huesos.

Se han utilizado en vertebral

Figura 16. Prótesis de estructura ósea porosa de hidroxiapatite espaciadores intervertebrales, posterior al procesamiento comercial injerto óseo, reemplazos óseos del oído medio y reparación de la mandíbula.

El óxido de aluminio, o alúmina ( $Al_2O_3$ ), se ha utilizado en cirugía ortopédica durante más de 20 años como superficie articular en prótesis totales de cadera debido a su coeficiente de fricción excepcionalmente bajo y tasas de desgaste mínimas. La alúmina tiene una excelente resistencia a la corrosión, buena biocompatibilidad, alta resistencia y alta resistencia al desgaste, lo que la hace ideal para aplicaciones ortopédicas.

Otras biocerámicas incluyen esqueletos de coral, que pueden transformarse en hidroxiapatita mediante altas temperaturas. Su estructura porosa permite un crecimiento relativamente rápido de células vivas a expensas de la resistencia mecánica inicial. La alta temperatura también quema las moléculas orgánicas, como las proteínas, previniendo la enfermedad de injerto contra huésped y el rechazo.

Se han utilizado biocerámicas hechas de un material de fosfato de calcio que contiene poros diminutos para revestir implantes de juntas metálicas o como rellenos de espacio sin carga para el crecimiento óseo. Se produce un crecimiento de tejido hacia el interior de los poros, con Componente de reemplazo un aumento en el área interfacial entre el implante y los tejidos. Este crecimiento de tejido da como resultado una mayor resistencia al movimiento del dispositivo dentro del tejido. Al igual que en el hueso natural, las proteínas se adsorben en la superficie del fosfato de calcio para proporcionar la crítica. capa intermedia a través de la cual las células óseas interactúan con el biomaterial implantado. La figura 17 muestra un ejemplo de esto.

## **CERÁMICA DENTAL**

La cerámica dental es una subclase fundamental de biomateriales. Las porcelanas son materiales cerámicos duros que se basan en un vidrio de sílice y alúmina, con fundentes utilizados para reducir su temperatura de fusión. Las porcelanas dentales pueden tener una dureza superior a la del esmalte de los dientes naturales, pero a menudo son más frágiles y tienen más probabilidades de fracturarse.

Tampoco tienen las mismas propiedades ópticas, conductividad térmica o fluorescencia natural que los materiales biológicos.

Los materiales dentales de porcelana completa (cerámica) incluyen obturaciones y coronas de porcelana, cerámica o similares al vidrio (una opción sin metal conocida como sobrecubierta). Se utilizan como incrustaciones, onlays, coronas y carillas estéticas. Una carilla es una capa muy fina de porcelana que puede reemplazar o cubrir parcialmente el esmalte dental. Las restauraciones de porcelana completa (cerámica) son especialmente deseables porque su color y translucidez imitan el esmalte dental natural.

El óxido de circonio es un material muy fuerte y refractario que ha aparecido recientemente como material dental. Con una resistencia a la flexión en tres puntos superior a 900 megapascales, se espera que el óxido de circonio sea aplicable a muchas aplicaciones nuevas en odontología, incluidos puentes, supraestructuras de implantes y clavijas radiculares.

El moldeado de la forma de un diente roto en una forma natural o que se asemeje al fragmento del diente roto se facilita enormemente mediante el uso de tecnologías CAD / CAM computarizadas. Estas tecnologías se utilizan para fabricar moldes para la colada de cerámicas dentales. La Figura 18 ilustra dientes de aspecto natural hechos de porcelanas dentales definidos por un molde generado por computadora.

## **EL TEJIDO SE CONSTRUYE COMO BIOMATERIALES**

Figura 18. Dientes de cerámica esculpidos por computadora Los tejidos vivos a veces se consideran biomateriales si se han cultivado antes de su aplicación al cuerpo humano o se han utilizado de la misma manera que se utilizaría un material sintético. La formación de tejidos vivos en estructuras de lata a veces se denomina ingeniería de tejidos. Este es un nombre poco apropiado, ya que es una forma avanzada de cultivo celular y biología celular y tiene poco en común con la ingeniería en el sentido clásico de la aplicación de las matemáticas y la física a los problemas.

Más bien, la ingeniería de tejidos es la aplicación de técnicas biológicas y de cultivo celular para estimular el crecimiento de tejidos de determinadas formas y en el

desarrollo de sustitutos viables que restablecen y mantienen la función de los tejidos humanos. Esta es una forma de medicina terapéutica y se diferencia de la farmacoterapia estándar o de los implantes permanentes en que el cultivo se integra en el paciente, lo que permite una cura potencialmente permanente y específica del estado patológico.

Hay muchos enfoques para la ingeniería de tejidos, pero todos involucran uno o más de los siguientes ingredientes clave: células recolectadas, introducción de moléculas de señalización especializadas y matrices tridimensionales.

El enfoque implica sembrar matrices biodegradables altamente porosas (o andamios) en la forma del hueso o tejido deseado, con células y moléculas de señalización (por ejemplo, factores de crecimiento de proteínas), luego cultivar e implantar los andamios en el defecto para inducir y dirigir el crecimiento de hueso o tejido nuevo. El objetivo es que las células se adhieran al andamio, se multipliquen, se diferencien (es decir, se transformen de un estado no específico o primitivo en células que exhiben funciones específicas) y se organicen en tejido normal y sano a medida que el andamio se degrada. Las moléculas de señalización pueden adherirse al andamio o incorporarse directamente al material del andamio. La Figura 19 ilustra la secuencia de pasos de este proceso.

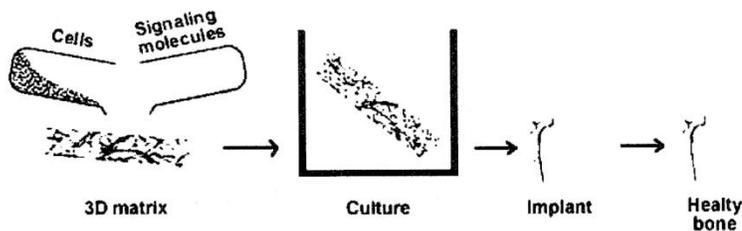


Figure 19. Scaffold-Guided Tissue Regeneration

Figura 19. Regeneración de Tissue con andamiaje

Quizás el mayor desafío para la ingeniería de tejidos es cómo garantizar la angiogénesis de manera oportuna dentro de la estructura del andamio; sin suministro de sangre, las células morirán y se producirá una infección masiva. En biología,

"autólogo" se refiere a células, tejidos o incluso proteínas que se reimplantan en el mismo individuo del que fueron extraídas. La médula ósea, la biopsia de piel, el cartílago y el hueso se pueden utilizar como autoinjertos; por el contrario, las células o tejidos trasplantados de un individuo diferente se denominan alogénicos, hamólogos o aloinjertos.

## **BIOMATERIALES DE ANDAMIOS DE TEJIDO**

Una idea intrigante en la ingeniería de tejidos es el uso de polímeros biodegradables como un andamio para extraer tejidos de una determinada forma definida, por ejemplo, el cartílago de un pabellón auricular perdido en un accidente.

Se han utilizado polímeros biodegradables con máquinas de creación rápida de prototipos basadas en computadora para formar formas porosas donde las células de los tejidos pueden crecer hacia adentro. El resultado después de muchas semanas de inmersión en cultivo de tejidos es que el polímero se degrada lentamente, dejando el tejido cultivado en la forma del andamio predefinido. Aunque este método no puede hacer crecer órganos complejos, como el corazón o el riñón, que tienen muchos tejidos diferentes, puede usarse para crear estructuras simples de productos celulares, por ejemplo, de cartílago excretado por las células de fibroblastos. Estas estructuras no crean sus propias redes de vasos sanguíneos, problema cuya solución está en el futuro.

La Figura 20 muestra CSLA (Star Lactide-co-Glycolide reticulable), un polímero biodegradable depositado en una estructura de panal mediante un proceso similar a la impresión por chorro de tinta. El bolígrafo de inyección de tinta se suministra con una forma líquida caliente del polímero CSLA, que luego se endurece cuando se enfría y se expone al aire. Usando una computadora para reescribir capas sucesivas una encima de la otra, se construye una estructura tridimensional.

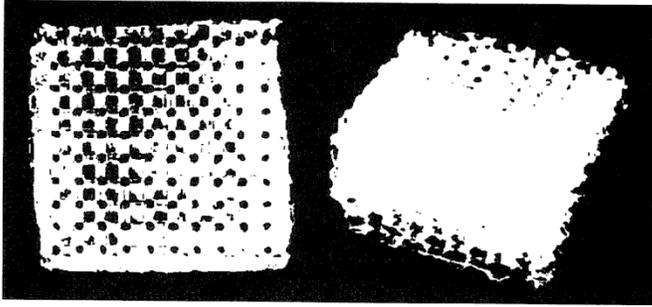


Figura 20. Material biodegradable CSLG depositado en una estructura de panal para permitir la infiltración de células vivas en un cultivo celular sumergido

## **MATERIALES CARDIOVASCULARES**

Los biomateriales a menudo se convierten en medicamentos. dispositivos en lugar de venderse en forma cruda. Entre las aplicaciones de biomateriales más grandes y exigentes se encuentran los dispositivos que entran en contacto directo con la sangre. En general<sup>1</sup>, varios derivados del teflón y la silicona son los más utilizados para el contacto con la sangre, mientras que los metales y la cerámica se utilizan con mayor frecuencia en los tejidos.

Las aplicaciones cardiovasculares (corazón y vasos sanguíneos) son una de las categorías más importantes de biomateriales de implantes. Los biomateriales para aplicaciones cardiovasculares se preparan normalmente usando polímeros, porque los polímeros están disponibles en una amplia variedad de composiciones con propiedades físicas y mecánicas adecuadas y pueden fabricarse fácilmente en productos con la forma deseada. Además, algunos metales y cerámicas se utilizan en el torrente sanguíneo. La Figura 21 enumera algunos de los desarrollos cardiovasculares comunes y cuánto tiempo están en contacto con la sangre.

Dispositivos médicos utilizados en el torrente sanguíneo

## Medical Devices Used in the Bloodstream

	<u>Blood contact time</u>
<b>Catheters</b>	<b>Min-days</b>
<b>Guidewires</b>	<b>Min-hrs</b>
<b>Sensors</b>	<b>Min-months</b>
<b>Pacemaker</b>	<b>10 yrs</b>
<b>Vascular Graft</b>	<b>lifetime</b>
<b>Heart Valve</b>	<b>lifetime</b>
<b>Stent</b>	<b>lifetime</b>
<b>Extracorporeal Oxygenation</b>	<b>hrs</b>
<b>Artificial Kidney (hemodialyzer)</b>	<b>hrs</b>
<b>Total Artificial Heart</b>	<b>10 yrs</b>
<b>Left Ventricular Assist Device (LVAD)</b>	<b>Days-yrs</b>

Catéteres Alambres guía Sensores Marcapasos Injerto vascular Válvula cardíaca Stent

Figura 2i. Algunos de los óvulos médicos más populares y la duración de sus materiales de contacto con la sangre. se utilizan como injertos vasculares en los que se conectan (injertan) con vasos sanguíneos naturales en ambos extremos. Cuando las arterias, en particular las arterias coronarias y los vasos de las extremidades inferiores, se bloquean por depósitos de grasa (aterosclerosis) , los segmentos en algunos casos se pueden reemplazar con injertos.La Figura 22 muestra injertos vasculares comerciales fabricados por Gore Medica! (Flagstaff, Arizona, EE. UU.).

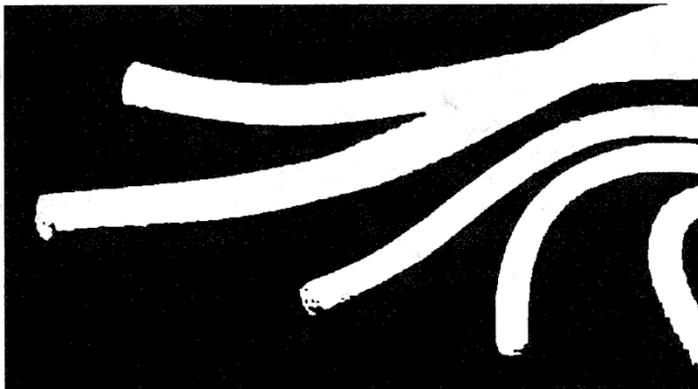


Figura 22. Espuma de teflón Gore Medcal utilizada en injertos vasculares. Estos son vasos sanguíneos artificiales que se utilizan para reemplazar los vasos sanguíneos en

el cuerpo humano dañados por accidente, aterosclerosis o enfermedad vascular diabética.

Un problema que causan la mayoría de los materiales cuando entran en contacto con la sangre es que desencadenan la rápida formación de trombos (una agregación de células sanguíneas). La formación de un trombo es peligrosa, ya que el trombo podría adherirse a la superficie del biomaterial o desprenderse. Si se desprende un trombo, puede viajar en el torrente sanguíneo y ocluir vasos más pequeños en el cerebro (llamado accidente cerebrovascular) o pulmones (llamado embolia). Algunos injertos vasculares de pequeño diámetro (<5 mm de diámetro interno) y prótesis para la reconstrucción de venas enfermas son "seguros" sólo cuando se utilizan fármacos anticoagulantes.

Además de la formación de trombos, los biomateriales pueden colonizarse con bacterias que causan infecciones. Algunos microorganismos que se encuentran en los hospitales son extremadamente resistentes a la terapia con antibióticos y las infecciones no se pueden resolver por completo hasta que se elimine el biomaterial. Esto es particularmente un problema con los implantes de cadera y rodilla, donde hay un flujo sanguíneo deficiente cerca de la articulación y el sistema inmunológico del cuerpo tiene acceso limitado. Las infecciones por *Staphylococcus aureus* resistente a la metilicina son peligrosas en estas situaciones.

La alta tolerancia del cuerpo al teflón tejido y formado permite que se utilice como material de parche flexible para otras superficies en contacto con la sangre, además de los vasos sanguíneos. Por ejemplo, Gore, nc., Fabrica un material a base de teflón que se usa para parchear los agujeros en el corazón de los bebés que nacen con defectos del tabique auricular. La figura 23 es la concepción de un artista de cómo se inserta el parche en el hueco en la pared auricular usando un catéter.

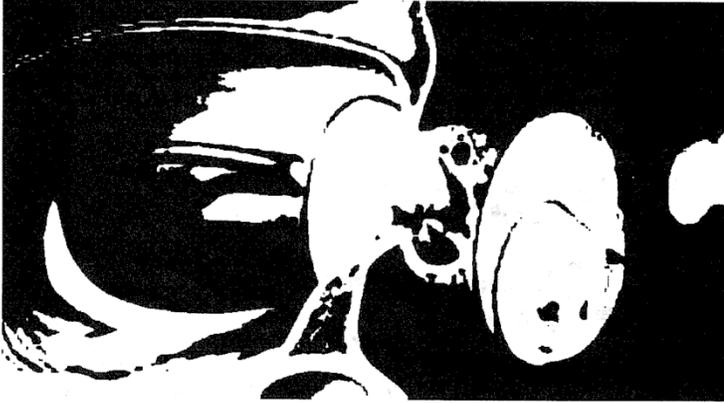


Figura 23. Ilustración del tratamiento de un defecto septal atrial que utiliza un producto basado en Teflón fabricado por Y Gore, Inc. Las válvulas cardíacas son otra aplicación de biomateriales en la que los materiales están en contacto directo con la sangre. Por lo general, se construyen utilizando una forma de acero inoxidable y teflón tejido (ar Dacron) como anillo de sutura para anclar el dispositivo. La Figura 24 muestra uno de estos dispositivos.

### **BIOMATERIALES STENOSIS**

Un stent es un tubo de malla metálica que se parece a un rompecabezas de dedos chino y se usa para mantener abierta una arteria obstruida. Estos se administran al corazón a través de un catéter en el extremo de un cable que generalmente se inserta en una arteria en la ingle.

El stent se colapsa a un diámetro pequeño y se coloca sobre un globo.

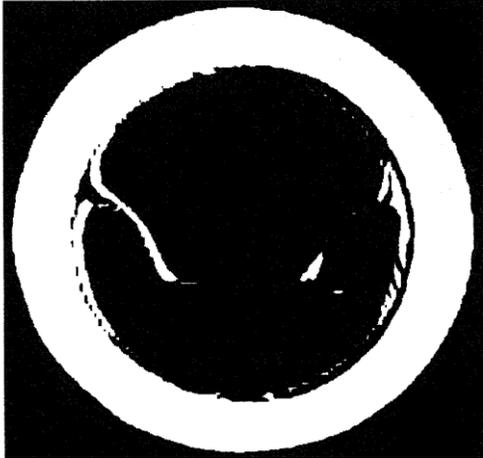


Figura 24. Válvula cardíaca Bjork Shiley de acero sin talón y espiga catéter. Luego se mueve quirúrgicamente al área del bloqueo. Cuando se infla el globo, el stent se expande, se bloquea en su lugar y forma un andamio que mantiene la arteria abierta. La Figura 25 muestra la concepción artística de este proceso.

El stent permanece en la arteria de forma permanente, la mantiene abierta, mejora el flujo sanguíneo al músculo cardíaco y alivia los síntomas (generalmente dolor en el pecho). Unas pocas semanas después de la colocación del stent, el revestimiento interior de la arteria (el endotelio) crece sobre la superficie metálica del stent.

Los stents a menudo están hechos de una forma de acero inoxidable que es lo suficientemente dúctil para expandirse con un globo y luego resistir las fuerzas de cierre de la pared del vaso después de que se retira el globo.

La inserción y el uso del globo para expandir el stent implica algunos peligros que pueden superarse si el stent está hecho de un metal autoexpandible llamado Nitinol <sup>TM</sup>.  
Con un nitinol

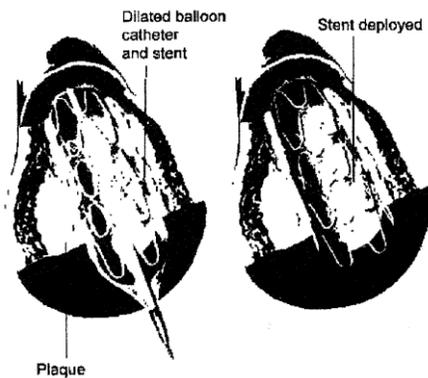


Figura 25. Ilustración de la colocación de un stent. El stent se utiliza para expandir la apertura luminal de un vaso sanguíneo obstruido.

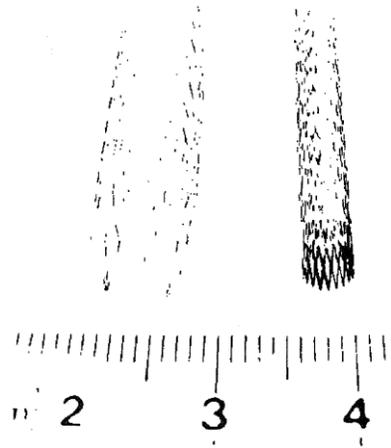
el stent se coloca en el cuerpo colapsado mientras se mantiene frío mediante un flujo de solución salina refrigerada a través del catéter. Cuando se deja calentar a la temperatura corporal cerrando el paso del agua fría al catéter, el stent se expande y aplica de manera más reproducible una cantidad calibrada de presión a las paredes de los vasos sanguíneos.

#### NITINOL COMO BIOMATERIAL

El uso de nitinol metálico en stents es una aplicación inteligente de las propiedades de una clase de materiales llamados aleaciones con memoria de forma (SMA). Los SMA son mezclas de metales que, después de ser tratados bajo tensión, pueden deformarse significativamente, pero luego se activan para volver a su forma original. Las SMA tienen una propiedad bastante notable: recuerdan su forma. Esta propiedad "inteligente" es el resultado de la capacidad de la sustancia para sufrir un cambio de fase. Esto ocurre a nivel atómico, donde los átomos en el sólido cambian sutilmente sus posiciones en respuesta a un estímulo, como un cambio de temperatura o la aplicación de estrés mecánico.

Una vez que el metal se forma a alta temperatura, recuerda esta forma. Distorsiones posteriores del material cuando hace frío permanecer encerrado en su lugar mientras el material permanece a baja temperatura. Sin embargo, al calentar el material a una

temperatura específica que está relativamente más cerca de su temperatura de



formación provocará un retorno a su forma original.

En los stents, la banda se colapsa mientras está fría para facilitar la inserción en un vaso sanguíneo y se mantiene fría mediante un flujo de solución salina fría que sale del catéter. Cuando el stent se contrae cuando se retira el catéter, se expande a sí mismo y al vaso sanguíneo circundante. La Figura 26 muestra un stent de Nitinol.

## LENTES DE CONTACTO

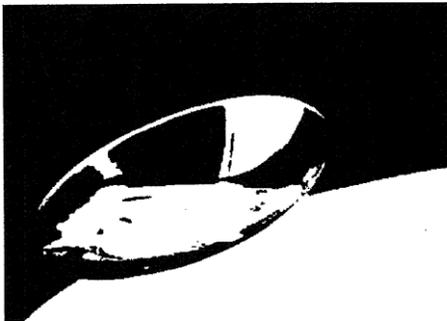


Figura 26. Stent de nitinol. Nitinol es un alejo de titanio. es biocompatible y también un material con memoria de forma. Los lentes de contacto se utilizan para corregir la visión de la misma manera que los anteojos usados, pero son livianos y prácticamente invisibles. Su practicidad y popularidad dependen en última instancia de los biomateriales de los que están hechos. Las lentes de contacto blandas modernas fueron inventadas por el químico checo Otto Wichterle y su asistente, Drahoslav Lím,

quien también inventó el primer gel utilizado para su producción. Sin embargo, no fue hasta el empleo del polimetilmetacrilato, conocido como PMMA (primo de los plásticos acrílicos, como Plexiglas™), que comenzaron a gozar de un atractivo masivo. La figura 27 muestra una lente de contacto permeable a los gases.

El PMMA, sin embargo, no es un material ideal para lentes de contacto, ya que no se transmite oxígeno a través del lente a la conjuntiva y la córnea. Esto puede causar una serie de efectos clínicos adversos.

efectos. Para solucionar este problema, se desarrolló una gama de materiales rígidos pero permeables al oxígeno. Estos materiales, denominados materiales o lentes "rígidos permeables a los gases" o "RGP", se fabricaron mediante la adición sintética de dimetilsiloxano (una forma de silicona) a los plásticos de acrilato. ¡Las siliconas tienen un nivel muy alto! del transporte de oxígeno, y fusionarlos con plásticos agrega esta calidad, mientras que la Figura 25. Lente de contacto. Las lentes de contacto modernas están fabricadas con acrílicos que proporcionan resistencia y de una mezcla de acrílicos y siliconas que pasan fácilmente la dureza. La fácil difusión del oxígeno a la córnea.

Se cree que el oxígeno a través de las siliconas es el resultado de una solubilidad intermedia del oxígeno en la fase gaseosa con la fase de gel de la silicona.

Ocasionalmente, el término "permeable a los gases" se utiliza para describir las lentes RGP, pero esto es potencialmente engañoso, ya que las lentes blandas también son permeables a los gases porque permiten que el oxígeno se mueva a través de la lente hasta la superficie ocular.

En 1999, se lanzaron los primeros hidrogeles de silicona al mercado de las lentes de contacto. Estos nuevos materiales tenían la ventaja de una alta permeabilidad al oxígeno, con la comodidad y el rendimiento clínico de los hidrogeles convencionales que se habían utilizado durante los 30 años anteriores. Inicialmente, se propugnó el uso de estos lentes principalmente durante mucho tiempo (durante la noche), aunque más recientemente, se han lanzado lentes de contacto de hidrogel de silicona para uso diario (no durante la noche).

## POLÍMEROS DE SUMINISTRO DE FÁRMACOS

Un área de investigación de biomateriales es el uso de materiales biodegradables en el diseño de sistemas para la administración controlada de fármacos. Gran parte de este trabajo se debe a la necesidad de una liberación lenta de insulina para el control de la diabetes frágil. Las bombas mecánicas de administración de insulina tienen un éxito moderado, pero generalmente se usan en la parte exterior del cuerpo y son engorrosas.

La capacidad de introducir insulina y otros fármacos en forma de liberación controlada utilizando biopolímeros tiene claras ventajas en términos de conveniencia para el usuario. De manera similar, la liberación lenta de otros fármacos, como los agentes quimioterapéuticos, es necesaria para mantener el fármaco en el rango terapéutico deseado con una sola dosis.

La estrategia básica con algunos de estos sistemas es encapsular fármacos en membranas, cápsulas, microcápsulas, liposomas y fibras huecas. Otro enfoque es dispersar

el agente activo en un polímero biodegradable, como se muestra en la Figura 28. El polímero que aloja el fármaco se disuelve, liberando el fármaco de manera controlada a lo largo del tiempo.

El uso de materiales biodegradables permite que se introduzca el fármaco sin mucha preocupación por la acumulación del portador polimérico. El vehículo finalmente es absorbido por el cuerpo y, por lo tanto, no es necesario extraerlo quirúrgicamente.

La difusión del fármaco a través de la matriz polimérica también puede determinar la tasa de dosificación del fármaco sin pérdida real del polímero. Esta velocidad está determinada por la elección del polímero, el tamaño de sus poros y la velocidad a la que el fármaco se difunde desde los pares.

Las tres ventajas clave que pueden ofrecer los productos de administración de fármacos poliméricos son:

Administración localizada de fármacos: la combinación polímero-fármaco se puede implantar directamente en el lugar donde se necesita la acción del fármaco y, por tanto, se puede reducir la exposición del fármaco en todo el cuerpo. Esto se vuelve especialmente importante para los fármacos tóxicos, como los fármacos quimioterapéuticos.

Entrega sostenida de medicamentos: una vez inyectado, el medicamento encapsulado se libera durante períodos prolongados, lo que elimina la necesidad de múltiples inyecciones. Esta característica puede mejorar el cumplimiento del paciente, especialmente con medicamentos para indicaciones crónicas que requieren inyecciones frecuentes (como por deficiencia de ciertas proteínas).

Estabilización del fármaco: el polímero puede proteger al fármaco del entorno fisiológico y, por tanto, mejorar su estabilidad in vivo. Esta característica particular hace que esta tecnología sea atractiva para la administración de fármacos lábiles, como las proteínas.

Es necesaria una selección apropiada de la matriz polimérica para desarrollar un sistema de administración de fármacos exitoso. Los polímeros más utilizados para esta aplicación, polilactida (PLA) y poli (lactida-co-glicólido) (PLGA), se han utilizado en aplicaciones biomédicas durante más de 20 años y se sabe que son biodegradables, biocompatibles y no tóxicos. Existe una gran cantidad de bibliografía sobre la caracterización de estos polímeros y sus propiedades de biodegradación y liberación de fármacos.

## TITANIO MÉDICO COMO BIOMATERIAL

El metal titanio tiene cualidades de resistencia, inercia y compatibilidad biológica que lo hacen deseable como biomaterial. ¡Esencialmente todos los marcapasos, neuroestimuladores y varios otros medicamentos implantados! Los dispositivos utilizan titanio como material de caja de embalaje.

El titanio metálico expuesto brevemente a la atmósfera se oxida para formar un microscópicamente delgado! Ayer de titania (óxido de titanio). La titania es un compuesto similar a la cerámica, duro, adherente e inerte y se cree que es en gran parte responsable de la aceptabilidad del titanio en aplicaciones biomédicas donde la

corrosión del metal en fluidos corporales calientes y salados normalmente sería un problema.

El titanio se utiliza por su alta resistencia en las articulaciones de cadera y rodilla de reemplazo. En estos casos, es importante cómo el metal se integra con el tejido vivo y el hueso porque la carga debe transferirse del metal al hueso. El titanio generalmente funciona muy bien y se usa como el metal de elección en casi todas las aplicaciones biomédicas donde es importante una alta resistencia y resistencia al impacto.

El titanio tiene una capacidad particular entre los diversos metales que, de otro modo, podría elegirse, ya que puede integrarse bien con el hueso vivo. El reconocimiento de esto se remonta a 1952, cuando el profesor sueco Per-Ingvar Branemark llevó a cabo un experimento en el que estudió el flujo sanguíneo en huesos vivos de conejo. El hueso se fijó en un soporte de titanio toscamente mecanizado. Al final del experimento, después de muchos días, descubrió que el hueso se había integrado tan completamente con el titanio que era imposible extraerlo. Llamó a esto osteointegración y vio las posibilidades para el uso humano.

La Figura 29 muestra una microfotografía de una interfaz de titanio-hueso. La aproximación de clase del titanio (negro) al tejido es un indicador de una estrecha integración del tejido metálico. Osseointegración se implementó por primera vez en odontología para fijar dientes. Ahora también se utiliza para la reconstrucción de la cabeza y la mandíbula.



Figura 27. Microfotografía de metal titanio (aparece negro en esta foto) en una integración íntima con hueso vivo. La intersección de los dos materiales muestra una delgada barrera! Ayer y luego tejido sano muy similar al metal. No muestra inflamación ni formación de tejido cicatricial.

La optimización de la integración ósea con titanio se ha estudiado mucho a lo largo de los años. Se ha descubierto que si las células individuales pueden encajar en pares en la superficie del metal y luego pueden extenderse y adherirse a sus vecinas, esto forma una interfaz adhesiva particularmente buena. Esta observación ha llevado a nuevos tipos de tratamientos de superficie para el titanio para mejorar su capacidad de adherirse al hueso. ¡La necesidad de una escala de tamaño de porosidad particular para óptimos! La integración ósea sólo se ha reconocido recientemente.

El pulido con arena de la superficie de titanio se ha realizado durante mucho tiempo, pero, recientemente, se ha descubierto que el grabado con plasma y las picaduras con el uso

de ácidos son eficaces. Algunas de las innovaciones más recientes (2008) han sido el uso de láseres para crear una modificación de la superficie mediante pozos de fusión.

Otro buen enfoque es recubrir los implantes metálicos con materiales bioactivos, como el hidroxiapatite (HA). HA tiene una excelente biocompatibilidad, bioactividad y propiedades de unión a los huesos. Forma una unión con películas delgadas de titania en la superficie de los implantes de titanio y así prepara la superficie para la adhesión. Los investigadores determinaron recientemente que hacer que esta capa sea más gruesa (alrededor de 1 micrón) fomenta la proliferación y la unión celular.

Las mejoras recientes en HA han incluido su fabricación en forma de nanopolvo esférico que es más aceptable para los tejidos que las formas de espículas de su ocurrencia natural. El uso de HA en forma de nanopolvo estimula la formación de hueso y conduce a una adhesión natural y química, muy parecida a la del pegamento.

Otro descubrimiento reciente es que el tratamiento de la superficie de titanio con un compuesto de silano creará una química superficial que atrae a ciertos biomateriales conocidos como proteoglicanos. A partir de este punto, es posible depositar capas de colágeno en la superficie a partir de la cual se formarán los tejidos conectivos.

El titanio metálico utilizado para los implantes suele ser una aleación biomédica, Ti-6Al-4V, ya que las aleaciones biomédicas proporcionan una buena resistencia a la corrosión y una vida útil razonable a la fatiga y son mucho más rígidas que el hueso cortical. La aleación Ti-6Al-4V es más adecuada que la aleación de Co-Cr con revestimiento lejano con HA porque tiene menos potencial de protección de tensión proximal y reabsorción ósea.

## BIOMATERIALES EN DIÁLISIS

¡Medica! La diálisis terapéutica, a menudo llamada hemodiálisis, es un método para eliminar el ácido úrico y otros productos de desecho de la sangre, una necesidad cuando los riñones fallan. También es útil para eliminar venenos exógenos como etanol, aspirina, barbitúricos y ácido bórico de la sangre en casos de intoxicación.

La hemodiálisis accede al torrente sanguíneo mediante el uso de dos agujas grandes, una en una arteria y otra en una vena, para hacer fluir la sangre del paciente a través de una serie de fibras en forma de tubo, de membrana hueca y delgadas.

Un dializador se compone de miles de hebras de fibra hueca en forma de tubo encerradas en un cilindro de plástico transparente de varias pulgadas de diámetro. La sangre fluye por el interior de la fibra de la membrana y un dializado (flujo de extracción) fluye por el exterior. Los productos de desecho de bajo peso molecular pasan a través de la membrana, mientras que las células sanguíneas y otras moléculas grandes en la sangre se retienen. La Figura 30 muestra una ilustración (izquierda) y una fotografía (derecha) de dializadores utilizados para tratar la insuficiencia renal.

Dialysis trabaja sobre los principios de la difusión natural de productos de desecho metabólicos en la sangre a través de una membrana semipermeable. Los productos de desecho en alta concentración en la sangre se difundirán a través de la membrana. La membrana permite el paso de moléculas de cierto tamaño a través de ella, pero evita el paso de otras moléculas más grandes de la carga, lo que ayuda a eliminar los productos de desecho. La figura 31 ilustra esta idea. Las células sanguíneas se mantienen en el exterior de la membrana (naranja) mientras pasan los residuos del producto de desecho (puntos violetas y amarillos).

Avances en bioingeniería y en la



Figura 29. La membrana de cuprofano pasa los productos de desecho de la sangre (Violet y puntos naranjas) a través de pares y bloquea el paso de los glóbulos rojos

Los aspectos técnicos de las máquinas de diálisis han hecho de la hemodiálisis un procedimiento seguro y eficaz.

El diseño de dializadores es principalmente un ejercicio de selección de biomateriales. ¡Los materiales de biomembrana son los críticos! papel en la limpieza de la sangre, pero no deben dañar la sangre ni provocar trombos. El biomaterial más común utilizado en los dializadores es una membrana semipermeable hecha de acetato de celulosa de nombre comercial Cuprophane <sup>TM</sup>.

Las membranas del dializador vienen con diferentes tamaños de papel. La nanotecnología se está utilizando en algunas de las membranas de alto flujo más recientes para crear un tamaño parejo uniforme. El objetivo de las membranas de alto flujo es hacer pasar moléculas relativamente grandes, como la beta-2-microglobulina (PM 11.600 daltons), pero no la albúmina (PM 66.400 daltons). Los materiales de las membranas de diálisis son cruciales para el desempeño práctico de los medicamentos. Sistemas de hemodiálisis. Estos sistemas / materiales apoyan la supervivencia de millones de personas con insuficiencia renal que se someten a diálisis de rutina, generalmente durante varias horas durante el día y tres veces por semana.

### **Resumen y recomendaciones**

El rendimiento de los biomateriales es la base del éxito de muchos dispositivos médicos que deben ser aceptables para los tejidos corporales. Estos materiales a menudo tienen funciones críticas, quizás de vida o muerte y, por lo tanto, requieren una gran cantidad de dinero y tiempo para probarlas rigurosamente. Esta parece ser la razón por la que la industria biomédica es lenta para producir y aceptar nuevos materiales.

Los materiales existentes para implantes se basan generalmente en materiales que han estado disponibles durante más de 20 años. Los materiales biodegradables, particularmente el polilactida y glicólido, tienen una larga historia de uso seguro y eficaz.

Sobre la base de esta base sólida, la mayor parte de la innovación se está produciendo en el diseño de nuevas formas de incorporar los materiales y aplicarlos a nuevas aplicaciones. Por lo tanto, los mercados de están expandiendo

- biomateriales se los médicos pueden esperar nuevos productos que ayudarán a acelerar la recuperación del paciente.

12 de enero de 2010

## **Documento de referencia de inteligencia de Defensa Adquisición de soporte de amenazas**

ICDD: 1 de diciembre de 2009

DIA • 08 • 0912 • 008

Materiales paraaeroespaciales avanzadas plataformas

### **Materiales para plataformas aeroespaciales avanzadas**

Preparado por:

rb) (3): 10 use 424

Agencia de Inteligencia de Defensa Autor:

Nota Administrativa

ADVERTENCIA DE COPYRIGHT: No se autoriza la divulgación adicional de las fotografías de esta publicación.

Este producto es uno de una serie de informes de tecnología avanzada producidos en el año fiscal 2009 bajo la Agencia de Inteligencia de Defensa, j (b) (3): 10 USC 424

Aeroespaciales

, Aplicaciones de Sistemas de Armas Avanzadas (AAWSA) Las preguntas relacionadas con este documento deben dirigirse a (b) (3): 10 USC 424; (b) (6), Programa AAWSA

Gerente, Agencia de Inteligencia de Defensa, ATTN: (b) (3): 10 USC 424 Bldg 6000, Washington, DC 20340-5100.

Contenido

Introducción .....iv

Vehículos de lanzamiento..... 1

módulos de tripulación reutilizables •..... 9

Vehículos reutilizables desde la etapa a la órbitaaleación .....10

Aleaciones avanzadas de Compuestos de matriz polimérica ..... 11

Al Matrix Composites ..... , 12

aleaciones TI ..... 12

TI Matrix Composites •..... 14

aleaciones a base de NI ..... 16

Aleaciones de metales refractarios..... 18

Ceramic Matrix Composites ..... 18

Composites Carbono-Carbono. .... 19

AlumInldes de Titanlum .....	20
Sistemas de propulsión •.....	21
Resumen y Recomendaciones .....	22

## Figuras

1. Diagrama esquemático de la soldadura Friction Stir 2
2. Transportador 747 especialmente modificado que descarga un compuesto Boeing 787 de sección de barril de fuselaje 4
1. Micrografo que muestra el formato de fase en la superficie de una aleación de TI que ha sido expuesta al aire a temperatura elevada 13
3. Micrografía de sección transversal de un compuesto de matriz de Ti 15

## Tablas

1. Materiales potenciales por régimen de temperatura de uso y propiedad 10
2. Ejemplo, e , de propiedades de compuestos de matriz de Ti ..... 1,4

## **Materiales para plataformas aeroespaciales avanzadasPlataformas**

### Introducción

"aeroespaciales avanzadas" es un tema amplio que se puede dividir en varios subtemas más estrechos para permitir una discusión más concisa de los avances, desafíos y oportunidades de los materiales. En consecuencia, este documento analiza las áreas de los vehículos de lanzamiento, los vehículos espaciales y los sistemas de propulsión espacial por separado porque sus requisitos clave son a menudo específicos de la aplicación, lo que afecta las decisiones de selección de materiales. Además, los impulsores de un solo uso y reutilizables tienen diferentes requisitos de durabilidad que directamente inciden en el diseño y la selección de materiales. Además, la práctica actual de la ingeniería ha evolucionado hasta el punto de que los sintéticos deben integrar la estructura y los materiales de construcción para lograr un rendimiento óptimo del producto. Por ejemplo, el transbordador espacial fue diseñado para cumplir con los requisitos de misión impuestos por el cliente (alcance, carga útil, peso vacío, capacidad de aterrizaje, etc.) sin una consideración significativa en tiempo real de la capacidad de los materiales. Este enfoque condujo a compromisos significativos en etapas posteriores del desarrollo y maduración del transbordador. (Podría decirse que el transbordador podría diseñarse como un vehículo más eficiente hoy en día). En el extremo, una ingeniería espectacular falló: fue el Avión Aeroespacial Nacional (también llamado Orient Express), que se lanzó como un proyecto militar y estaba destinado a ser un Mach 12 vehículo de huelga reutilizable. Este proyecto se convirtió rápidamente en material limitado y se canceló en 1993, después de aproximadamente \$ 750 millones en gastos federales de investigación y desarrollo y una inversión sustancial del sector privado. El punto es que cualquier "diseño de hoja limpia de papel" debe comenzar con una evaluación de los requisitos de los materiales de construcción e ir acompañada de una evaluación realista de la capacidad de los materiales actualmente disponibles para satisfacer estas necesidades. Si estas dos evaluaciones indican una brecha entre los requisitos y la capacidad de los materiales existentes, se debe desarrollar una evaluación de riesgos y un plan de mitigación de riesgos antes de gastar horas de ingeniería y fondos.

Desde el inicio de los vuelos espaciales tripulados, el enfoque del diseño ha cambiado para incluir el concepto de tolerancia al daño. Este cambio en la filosofía del diseño fue impulsado por el (eventual) reconocimiento de que las estructuras complejas no se pueden diseñar y producir con cero defectos. Con la maduración de la mecánica de la fractura y los medios para llevar estos conceptos a la práctica, la transición de cero defectos a la tolerancia a defectos se convirtió en la norma. Este nuevo enfoque, a su vez, llevó al reconocimiento de que los materiales de alto rendimiento requerían no solo una alta resistencia y rigidez específicas, sino también un aumento de la resistencia del ritmo con mejoras simultáneas en la tenacidad a la fractura y la resistencia al crecimiento de grietas por fatiga. La introducción de la tolerancia al daño fue acompañada por un renovado énfasis en las capacidades de inspección no destructiva. Este último impulso fue impulsado por la necesidad de demostrar la capacidad de localizar de forma reproducible pequeñas fallas que podrían convertirse en placas de iniciación de fallas, ya sea debido a condiciones de carga estáticas o cíclicas. En el caso del vuelo atmosférico, la Fuerza Aérea de Estados Unidos ha introducido normas para fuselajes (el Programa Integridad Aviones estructural) y sistemas de propulsión (el Programa Integridad estructural del motor) que unen la vida estructural y fiabilidad a esto demostró capacidad de inspección. La implementación de estos estándares, comenzando con el bombardero B-1 y los motores F-100 y F-110, ha reducido drásticamente (pero no eliminado) la incidencia de catastróficas fallas de componentes críticos que ponen en peligro a las tripulaciones, vehículos o ambos.

Teniendo en cuenta estos cambios, este documento describe la situación actual con respecto al diseño y producción de estructuras de alto rendimiento para plataformas aeroespaciales, incluidos vehículos de lanzamiento, vehículos espaciales y sistemas de propulsión para transportar vehículos espaciales (y cargas útiles) a la órbita.

## **Materiales para plataformas aeroespaciales avanzadas**

### LANZAMIENTO DE VEHICULOS

Para los propósitos de este documento, los vehículos de lanzamiento se definen como la estructura que soporta y / o encierra el sistema de propulsión, el suministro de combustible y el módulo de carga útil de la tripulación.

Hoy en día, los vehículos de lanzamiento son de un solo uso o de uso múltiple después de la recuperación y una renovación extensa. Este enfoque aumenta considerablemente el costo de transportar una libra de carga útil a la órbita terrestre, independientemente de si se trata de un satélite no tripulado o un módulo de tripulación en órbita tripulado que debe soportar las temperaturas y cargas asociadas con la reentrada segura a la tierra. Además, cuanto mayores son las cargas útiles, mayores son las fuerzas de reacción que debe soportar el vehículo de lanzamiento durante el lanzamiento.

Con el peso total de la carga útil, el peso vacío del vehículo de lanzamiento y todo el combustible que se necesita levantar inicialmente, los vehículos de lanzamiento ligeros y de propulsión de bajo consumo son esenciales para maximizar la carga útil. Excepto en el área alrededor de propulsión escape del sistema, las temperaturas experimentadas por los vehículos de lanzamiento durante el lanzamiento no son exigentes. Por lo tanto, las aleaciones de aluminio (Al) avanzadas y de alta resistencia y los compuestos de fibra de carbono (PMC) de matriz polimérica son los principales candidatos para las partes de la estructura que experimentan cargas aerodinámicas y donde el calentamiento aerodinámico no supera los 125 °Celsius. Una clase de aleaciones avanzadas de Al son las aleaciones que contienen litio (Li), como la aleación Al 2090. Esta aleación contiene suficiente Li para reducir su densidad en un 8 por ciento mientras aumenta el módulo elástico (E) en un 10 por ciento. Otras aleaciones de Al avanzadas más nuevas, como 7050 y 2050, se han desarrollado para tener una mejor tolerancia al daño. Estas aleaciones tienen una resistencia específica excelente a temperatura ambiente o cerca de ella y no experimentan una pérdida mayor de ductilidad a temperaturas criogénicas. Las variantes más nuevas de las aleaciones de Al 2000 y 7000 también tienen una resistencia sustancialmente mejorada a la mayoría de los tipos de corrosión, incluida la exfoliación y el agrietamiento por corrosión bajo tensión. Esto puede ser importante en un vehículo reutilizable.

Quizás el aspecto más importante de las aleaciones de Al mejoradas es su mayor tenacidad a la fractura, lograda a través de una combinación de control de la composición de la aleación y procesamiento mejorado. En el control de la composición de la aleación, las concentraciones de los elementos residuales hierro (Fe), cromo (Cr), manganeso (Mn) y silicio (Si) se reducen en la etapa de lingote. Estos elementos se combinan con Al para formar compuestos intermetálicos duros y frágiles conocidos como fases constituyentes. Las aleaciones avanzadas contienen menos fases constituyentes más pequeñas, lo que conduce a una mejor resistencia a la fractura y mayores valores de tenacidad a la fractura. En aplicaciones tales como revestimientos de carrocerías para aviones comerciales, esta tenacidad mejorada ha permitido un aumento en el espaciado de los marcos circunferenciales del fuselaje, o "secciones de sombrero", que sirven como refuerzos y tapones de grietas para evitar una falla catastrófica durante la presurización. En este caso, cualquier esfuerzo de operación dado, el esfuerzo de presurización, el espaciado de los marcos, se relacionan directamente con el tamaño crítico de la grieta de la piel del cuerpo. ¡Las aleaciones de mayor tenacidad tienen mayores tamaños críticos de grietas, y los marcos se pueden espaciar más sin aumentar el riesgo de fallas catastróficas. El mayor espacio finalmente permite un diseño de fuselaje que requiere menos marcos. En consecuencia, el avión se beneficia de una reducción proporcional tanto en peso como en costes de fabricación. Existen posibilidades similares en el diseño de un vehículo de lanzamiento a prueba de fallas que tiene un peso vacío menor. Claramente, las aleaciones avanzadas de Al ofrecen mejoras intrínsecas sobre las aleaciones utilizadas en el vehículo de lanzamiento Saturn e introducen la perspectiva de diseños de vehículos de lanzamiento nuevos y más eficientes.

Las aleaciones de Al más nuevas también se pueden procesar especialmente para hacerlas superplásticamente conformables. Esta capacidad abre un campo de posibilidades para reemplazar estructuras que, en ausencia de esta capacidad, se mecanizan a partir de chapa gruesa. Se producen estructuras muy grandes en secciones que deben unirse. Las técnicas de soldadura por fusión convencionales no funcionan para aleaciones de Al de alta resistencia como 7075, 7050, 2024 o 2050 porque las soldaduras provocan grietas o las soldaduras realizadas en condiciones que evitan el agrietamiento tienen propiedades de tracción muy reducidas. Debido a que estas aleaciones no son aptas para la soldadura, se deben usar uniones fijadas mecánicamente más pesadas y propensas a la fatiga. Recientemente, los científicos desarrollaron un proceso de unión

que permite la unión de aleaciones de Al como la 7050. Este proceso, llamado soldadura por fricción y agitación (FSW), permite diseños de unión en una variedad de configuraciones que no se consideraban posibles cuando la soldadura por fusión era el único cambio. nativo.

En FSW, se inserta una herramienta de acero giratoria en la costura entre las dos piezas de aleación de Al que se van a unir. A medida que la herramienta giratoria se impulsa hacia adelante, la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo genera suficiente calor para ablandar la aleación de Al sin derretir. En la Figura 1 se muestra un esquema de este proceso.

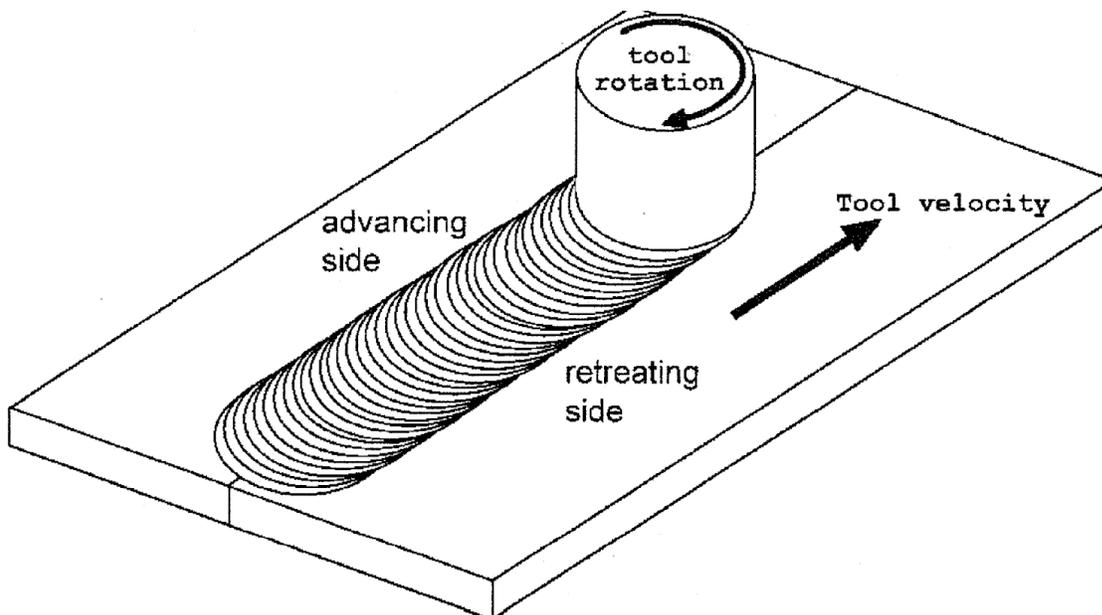


Figura 1 Diagrama esquemático de la soldadura Friction Stir

La acción combinada de la rotación y el desplazamiento de la herramienta esencialmente amasa las dos piezas juntas, dejando una unión mecánicamente sana. Aunque las propiedades de la soldadura pueden ser algo inferiores a las del metal base, son lo suficientemente buenas como para compensar un aumento relativamente pequeño de espesor en la posición de la junta.

Aunque el desarrollo sustancial del proceso de FSW está en curso, FSW ya se ha puesto en práctica. Por ejemplo, la corriente externa! El tanque de propulsor del transbordador

espacial está hecho de una aleación de Al-Li fabricada a través de FSW. La ventaja de peso de utilizar uniones soldadas en lugar de atornilladas en una estructura grande, como un vehículo de lanzamiento, es considerable. Con las aleaciones anteriores de alta resistencia, como la 7075, las preocupaciones sobre la tenacidad a la fractura junto con las estructuras monolíticas habrían provocado una soldadura la construcción debe considerarse demasiado arriesgada. Hoy en día, la combinación de aleaciones de mayor tenacidad y FSW abre la posibilidad de una mayor flexibilidad de diseño que da como resultado estructuras grandes más livianas con igual o mayor confiabilidad que las anteriores.

En resumen, los vehículos de lanzamiento metálicos, no reutilizables (al menos nominalmente) hechos de aleaciones avanzadas de Al y fabricados a través de FSW constituyen una mejora incremental pero significativa con respecto a las versiones anteriores.

En los últimos años, las PMC han madurado significativamente. Para muchos componentes que no están expuestos a temperaturas elevadas, los PMC proporcionan un grado de flexibilidad de diseño que no se encuentra fácilmente en los metales. En consecuencia, los materiales PMC han comenzado a suplantar las aleaciones de Al en la construcción de aviones subsónicos comerciales. El uso de PMC en el empenaje del Boeing 777 fue uno de los primeros ejemplos de desplazamiento de aleaciones de Al. Posteriormente, el nuevo Boeing 787 tiene más estructura hecha de materiales compuestos que de materiales metálicos. Una vez que se introducen PMC en una estructura en cantidades significativas, también se introduce una restricción relacionada con la incompatibilidad galvánica entre la estructura de PMC y cualquier aleación de Al adyacente. Cuando una estructura de PMC está en contacto directo con una estructura de aleación de Al, puede ocurrir una corrosión catastrófica de los componentes de la aleación de Al. En el Boeing 787, el remedio a esta preocupación es el uso de aleaciones de titanio (Ti) en áreas donde hay contacto directo entre las estructuras metálicas y PMC. Esto es directamente análogo al casquillo de plástico que coloca un plomero en la unión entre las tuberías de cobre y hierro. A pesar de esta limitación, la resistencia y rigidez específicas de las estructuras de PMC constituyen un argumento convincente para su aplicación en estructuras de alto rendimiento, como los vehículos de lanzamiento.

Las estructuras compuestas se pueden fabricar utilizando uno de estos tres métodos: colocación manual de preimpregnado, colocación automática de remolques y moldeo por transferencia de resina.

- El más rudimentario de estos, pero también el más flexible, es la colocación manual de pre-preg. Este método utiliza láminas de material que contienen tanto la fibra como la matriz polimérica (llamada pre-preg). La matriz polimérica puede ser un termoestable (por ejemplo, epoxi) o un termoplástico. Las capas individuales se cortan del preimpregnado típicamente usando un láser de control numérico o un dispositivo de corte mecánico y se colocan para formar la forma deseada. Las áreas que tienen cargas más pesadas contienen más capas localmente, y las capas se cortan en una orientación con respecto a la dirección de la fibra en el preimpregnado para lograr la resistencia deseada en relación con la trayectoria de carga principal.

Estas capas se colocan cuidadosamente de acuerdo con un dibujo (plano), lo que hace que la colocación a mano sea un proceso que requiere mucha mano de obra y, por lo tanto, hace que las piezas fabricadas con este método sean costosas. ¡Durante la colocación de las capas, es crítico! que no se introduzcan arrugas en las capas, ya que estas crean severas reducciones en la capacidad de carga local del

- componente final. Una vez que todas las capas están en sus lugares adecuados, el artículo se coloca en una bolsa hermética al vacío que se evacua y se coloca en un autoclave para curar la matriz epoxi o fusionar el termoplástico. Una desventaja de un preimpregnado cuya matriz es termoestable es la vida útil limitada. En la práctica, esto se maneja hasta cierto punto almacenando el preimpregnado en un congelador para disminuir la velocidad de reacción química que fragua el epoxi. Sin embargo, esto no detiene completamente la reacción, lo que hace que estos materiales tengan una vida útil más allá de la cual no se manipulan fácilmente durante el laminado y no desarrollan su fuerza completa después del curado en el autoclave. Un problema adicional es el tiempo de espera: el tiempo que el preimpregnado puede estar fuera del congelador durante el depósito antes de que la reacción avance a un ritmo acelerado y llegue a un punto en el que el material no es adecuado por las razones expuestas anteriormente. ¡Claramente, el tiempo requerido para los puestos de almacenamiento es práctico! limitaciones en el tamaño de los componentes.

- En la colocación automatizada de remolques, las cintas delgadas de un preimpregnado se alimentan de un tambor o se enrollan en una máquina controlada

numéricamente por computadora que las coloca en la posición deseada. En principio, este proceso intercambia el costo de mano de obra recurrente por una inversión de capital inicial ( la máquina de colocación de remolques) y el tiempo de programación. Si el volumen anticipado de piezas idénticas es lo suficientemente alto como para amortizar la inversión de capital y, en particular, el costo de programación, este puede ser un medio atractivo para reducir los costos de fabricación. Formas axisimétricas lejanas, como cilindros, esto esencialmente se convierte en un proceso de bobinado y es bastante eficiente. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de una sección de cañón de fuselaje compuesta acabada para el Boeing 787. Para formas tridimensionales más irregulares, como un larguero o un puntal, colocar los remolques se vuelve mucho más difícil y presenta una limitación fundamental. En consecuencia, las estructuras de PMC con formas complejas todavía se fabrican en su mayor parte utilizando el proceso de colocación manual. Una variante de la colocación automática de la estopa es la compresión, mediante la cual una preforma, fabricada mediante la colocación automática de la estopa, es forzada mediante una prensa a una matriz preformada. Este proceso permite la fabricación de formas más complejas, pero la rigidez de la fibra y la extrema anisotropía de las estopas pueden provocar arrugas, que no son aceptables debido a las reducciones de propiedades que estas provocan.

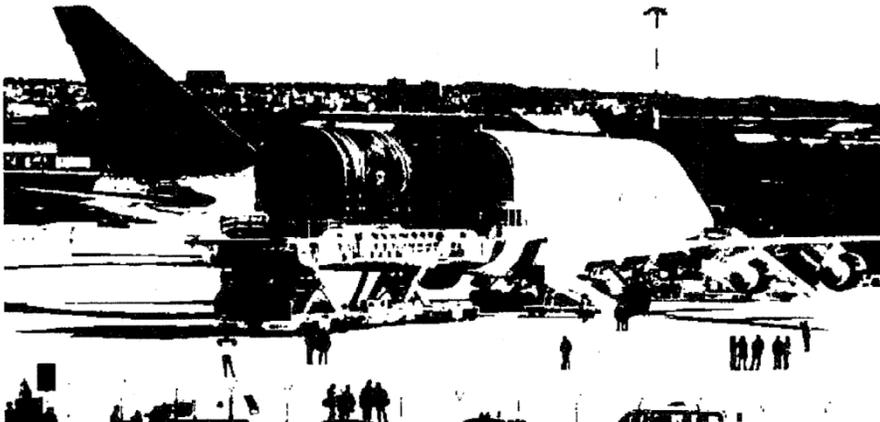


Figura 2. Transportador 747 especialmente modificado descargando unacañón de fuselaje compuesto BoeIng 787 sección de

- El tercer método principal de fabricación de compuestos, el moldeo por transferencia de resina (RTM), comienza con una estera de fibra tejida o una preforma. La matriz polimérica se inyecta en este tapete para crear un compuesto completamente

denso. El principal beneficio de RTM es que permite el uso de un tejido tridimensional que minimiza el riesgo de delaminación entre capas. Tenga en cuenta que, con los otros dos métodos, el material se refuerza en solo dos dimensiones (el plano del preimpregnado o remolques). Las limitaciones de RTM incluyen la viscosidad de las resinas utilizadas. Si la resina es demasiado viscosa, inyectarla distorsiona la arquitectura de la fibra de la preforma tejida o no penetrará completamente en la preforma, dejando huecos. Esta limitación dificulta el uso de muchas resinas termoplásticas que, por lo demás, son atractivas porque son reciclables y tienen una vida útil mucho más prolongada que los termoestables (epoxis). Otra limitación más obvia de RTM es el tamaño del componente. Esto se debe en parte a que tejer preformas de fibras muy grandes es un desafío y requiere una máquina de tejer muy grande. También requiere una máquina de inyección grande capaz de múltiples sitios de inyección para asegurar la infiltración completa necesaria para evitar la formación de huecos.

En la práctica, ¡hay varios! desafíos importantes asociados con la fabricación de grandes estructuras de PMC en la actualidad. Entre estos, quizás los más importantes sean el costo de fabricación y la dificultad asociada con la fabricación de componentes grandes no asimétricos.

Los grandes componentes axisimétricos que pueden producirse enrollando remolques de preimpregnado son claramente posibles hoy en día, como lo demuestra el fuselaje del Boeing 787 cuya sección se muestra en la Figura 2. Para otras formas, porque la capacidad de carga de los PMC depende de la transferencia de cargas impuestas externamente a las fibras fuertes y rígidas, las uniones que se cruzan con la ruta de carga principal se vuelven problemáticas. Esto se debe a que las fibras y, como consecuencia directa, la ruta de carga son discontinuas, lo que requiere ajustes de tamaño de sección local para compensar esta ineficiencia estructural local. Por lo tanto, lograr el uso más eficiente desde el punto de vista estructural de las PMC requiere estructuras monolíticas con fibras continuas.

En estructuras grandes, esto es, en el mejor de los casos, un desafío. Incluso en el fuselaje PMC del Boeing 787, se utilizan juntas fijadas mecánicamente para conectar secciones de cañón adyacentes. En el fuselaje, como en cualquier recipiente de presión cilíndrico, las tensiones principales son tensiones circulares derivadas de la presurización durante el vuelo. Sin embargo, el compromiso en la eficiencia estructural es minimizado por la orientación circunferencial de los joints. Aunque estas uniones atornilladas añaden

peso, la eficiencia estructural general de la estructura de PMC es aún mejor, aunque considerablemente más cara, que una estructura de Al reforzada longitudinal y circunferencialmente. Las juntas circunferenciales también crean trayectorias de grietas longitudinales discontinuas que mejoran la tolerancia al daño de la estructura. Algunos de los gastos adicionales del fuselaje PMC se deben al uso de sujetadores de aleación de Ti debido a los problemas de acoplamiento galvánico que acompañarán a los sujetadores de acero Al ar.

Para otras aplicaciones, que están limitadas por diferentes propiedades del material, el sistema PMC se puede adaptar para optimizar el rendimiento estructural. Esto es posible porque tanto la matriz como la fibra se pueden seleccionar independientemente. Además, la "arquitectura" de la fibra (orientación de la fibra, geometría del tejido y fracción de volumen de la fibra) se puede variar espacialmente para optimizar la capacidad de carga bajo estados de tensión complejos. Por ejemplo, nuevamente basándose en aplicaciones recientes en aviones comerciales, las aspas del ventilador del gran motor turbofan de alta relación de derivación (GE90) producido por General Electric para el Boeing 777 están hechas de PMC. La consideración de diseño limitante para estas ventilador aspas es la resistencia a los golpes de aves. Para optimizar la resistencia al impacto de los PMC, se seleccionó una fibra de carbono de módulo medio y alta resistencia a la tracción en combinación con una matriz epoxi termoplástica endurecida. Además, la arquitectura de la fibra se estableció para optimizar la resistencia a la flexión bajo el impacto de un pájaro. Las aspas del ventilador GE90 se fabrican a mano y son bastante costosas de producir. En los más de 10 años que estas aspas del ventilador han estado en servicio, no se ha producido ni una sola remoción no programada del motor relacionada con las aspas del ventilador PMC. La tecnología de paletas de ventilador de la competencia para los motores de la clase B-777 es el Ti hueco, que utilizan tanto Pratt & Whitney como Rolls Royce. Según todas las cuentas informales, estas hojas son costosas. Este ejemplo respalda la regla no escrita de que las vías que conducen a estructuras de alto rendimiento y valor suelen depender de la tecnología pero son costosos, sin importar qué tecnología se emplee para cumplir con los requisitos.

Una característica adicional de las estructuras de PMC, una relacionada con la construcción laminada de componentes hechos por métodos de colocación manual o de colocación automática de remolques, es su susceptibilidad a la formación de delaminaciones cuando se impactan perpendicularmente al plano de las capas. Esto se debe al desajuste en la rigidez de flexión entre capas adyacentes que tienen diferentes

orientaciones de fibra unidireccionales. Este desajuste hace que se desarrollen tensiones cortantes que pueden exceder la resistencia al cortante de los enlaces interlaminados, provocando la formación de pequeñas grietas incrustadas. Bajo la subsiguiente carga de compresión en el plano, los laminados se arquean debido a las tensiones de Poisson y se separan debido a la falta de una unión interlaminar para mantenerlos juntos. En cargas de compresión significativas, los laminados se comban y esto conduce a una falla estructural. Este fenómeno, llamado compresión después del impacto, es un modo de falla insidioso porque las delaminaciones no son detectables externamente a menos que se utilicen métodos de inspección ultrasónica.

son usados. Las fuentes de tal impacto incluyen herramientas caídas, objetos extraños (por ejemplo, meteoritos) y, quizás más comúnmente, tormentas de granizo. La inspección ultrasónica, si se requiere, es costosa y requiere mucho tiempo. Esta última preocupación, a su vez, afecta la disponibilidad de los vehículos y el tiempo de respuesta. Las piezas de PMC fabricadas con RTM suelen tener fibras de refuerzo en la dirección del espesor a través, por lo que las preocupaciones sobre la compresión después del impacto son mínimas.

La temperatura máxima a la que se pueden utilizar las PMC está limitada por la susceptibilidad de las PMC a la degradación por oxígeno de la matriz polimérica. La temperatura máxima de uso para una exposición prolongada está determinada por la estabilidad oxidativa térmica (TOS) de un

resina particular. El TOS, como cualquier reacción química, está determinado tanto por el tiempo como por la temperatura. La temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) de la matriz polimérica también impone limitaciones de resistencia y estabilidad dimensional independientes de los límites de TOS. Esto es particularmente cierto en los termoplásticos lejanos. Sin embargo, los límites de TOS generalmente imponen límites de temperatura más bajos que T<sub>g</sub> si se contempla una exposición térmica prolongada. Existen tres clases o grupos distintos de resinas, cada una con una capacidad de temperatura sucesivamente más alta. Se trata de epoxis convencionales y la mayoría de plásticos térmicos, bismaleimídes (BMIs) y poliimidas lineales. La primera clase está limitada por TOS a aproximadamente 125 ° Celsius. BMIs se puede utilizar a unos 175 ° Celsius. Las poliimidas lineales, tales como la polimerización in situ del grupo de reactivos monoméricos (PMR) de formulaciones termoendurecibles, se pueden usar hasta aproximadamente 300 ° Celsius. Muchas de las resinas PMR contienen el compuesto peligroso metilendianilina, que requiere un cuidado especial durante su uso, incluida la

ropa protectora para limitar la exposición del personal (por ejemplo, durante el corte de capas y la colocación manual). Este requisito reduce la productividad, agrega costos y crea un grado de preocupación por la responsabilidad del fabricante de los componentes de PMC. Para RTM, las resinas BMis y PMR normalmente tienen una viscosidad más alta y requieren temperaturas de inyección proporcionalmente más altas para reducir la viscosidad a niveles manejables por las razones discutidas anteriormente. Constantemente se desarrollan nuevas resinas, incluidas algunas con propiedades atractivas. Sin embargo, muchas de las fuentes de estas resinas son empresas de nueva creación que existen gracias a la financiación de I + D, a menudo en forma de SBIR (Pequeños negocios Proyectos de investigación innovadora. Estas empresas son buenas en innovación, pero a menudo tienen una experiencia limitada en la transición de nuevos productos del laboratorio a la producción a gran escala. Además, en el clima económico actual, el acceso a capital suficiente para establecer una capacidad a escala de producción puede ser un problema formidable para una empresa pequeña.

Las empresas más grandes (por ejemplo, BASF, DuPont, GE Plastics) normalmente no están interesadas en materiales con un volumen de ventas anual pequeño, por lo que incluso la concesión de licencias del nuevo material a una de estas empresas puede no ser comercialmente viable.

Esta discusión anterior destaca una inconsistencia común entre la innovación técnica y el progreso comercial. Hasta que exista una fuente a escala de producción, el precio de los nuevos materiales es, en el mejor de los casos, muy incierto y potencialmente inestable a lo largo del tiempo. Esto se debe en parte a la incertidumbre que rodea a la demanda y al volumen asociado de material que se requerirá. En conjunto, estos factores actúan como un claro impedimento para la adopción de nuevos materiales de literalmente todas las clases (polímeros, metales y cerámicas).

Para estructuras muy cargadas o estructuras que experimentarán temperaturas superiores a aproximadamente 200 °Celsius, las aleaciones de Ti son la clase de material preferida. Las aleaciones de Ti son aproximadamente la mitad de densas que el acero o las aleaciones a base de Ni y poseen una resistencia y rigidez con corrección de densidad competitiva con la de otros materiales metálicos. Hoy en día se utilizan numerosos grados de aleaciones de Ti, y existe una sólida base industrial nacional de proveedores para casi todos los estos grados. Las aleaciones de Ti para aplicaciones estructurales se pueden

dividir en tres grupos según su metalurgia: aleaciones cercanas a, aleaciones a: + f) y aleaciones metaestables (comúnmente llamadas aleaciones para abreviar). Tanto los fabricantes de equipos originales de propulsión como de aeronaves y severa! Las empresas de ingeniería privadas tienen una amplia experiencia en diseño con aleaciones de Ti. Aunque la mayor parte de esta experiencia es con Ti-6Al-4V (Ti-6-4), otras aleaciones también se utilizan ampliamente, particularmente en motores a reacción y motores de cohetes de combustible líquido. La aleación que probablemente se utilizará en un vehículo de lanzamiento, Ti-6-4, ha estado disponible y en uso durante más de 40 años, pero sigue siendo muy competitiva con los grados más nuevos, en gran parte debido a su versatilidad. Las aplicaciones potenciales de otras aleaciones que tienen características particularmente atractivas, como una capacidad de temperatura más alta, se analizan en las secciones de vehículos de reentrada reutilizables y sistemas de propulsión de este documento.

El grado estructural de aleación de Ti más comúnmente utilizado en la actualidad, Ti-6-4, se puede soldar por fusión fácilmente, formado tanto por forjado como como un producto de hoja, y mecanizado convencionalmente, aunque cada una de estas operaciones requiere precauciones especiales. Se ha demostrado la viabilidad de la soldadura por fricción y agitación. El Ti-6-4 también puede formarse superplásticamente y unirse por difusión, lo que permite la síntesis de componentes con formas innovadoras. En el caso de los vehículos de lanzamiento, la aplicación más probable de las aleaciones de Ti se encuentra en la estructura que transporta las reacciones del sistema de propulsión al propio vehículo.

Estas aplicaciones generalmente involucran secciones pesadas para acomodar las grandes cargas, y los principales requisitos de propiedad son alta resistencia, resistencia a la fatiga y tenacidad a la fractura. Las aleaciones de Ti se han utilizado tanto en aviones militares como comerciales. Los componentes fuertemente cargados en servicio hoy incluyen la caja del ala del bombardero B-16 (Ti-6-4), la viga del tren de aterrizaje en el B-747 (Ti-6-4) y la viga del camión del tren de aterrizaje en el B-777 (Ti-10V-2Fe-3Al [Ti-10-2-3] de mayor resistencia). La elección de Ti-10-2-3 para la viga del camión del tren de aterrizaje refleja la maduración basada en el tiempo de las aleaciones B-Ti más nuevas, como Ti-10-2-3. Estas aleaciones tienen la ventaja de ser "endurecibles en profundidad" en comparación con Ti-6-4, pueden desarrollar una resistencia completa en secciones

más gruesas durante el tratamiento térmico. Por ejemplo, el hecho de que la viga del camión del B-777 tenga un grosor de hasta 6 pulgadas en algunos lugares fue un factor significativo en la elección de Ti-10-2-3. Debido a que las aleaciones de Ti son aproximadamente la mitad de densas que el acero, son muy competitivas sobre una base de densidad corregida. Sin embargo, la masa no es el único impulsor de algunas aplicaciones; el volumen de un componente también debe ser compatible con el espacio disponible para él. Este factor también es una consideración en la elección de Ti-10-2-3 para la viga del camión B-777. Y también se aplica a una aplicación como el tren de aterrizaje, ya que se retrae en el fuselaje por motivos mucho aerodinámicos.

Las aleaciones J3-Ti serían una opción atractiva para un vehículo de lanzamiento con una carga útil muy pesada. Estas aleaciones pueden procesarse y tratarse térmicamente para obtener resistencias máximas a la tracción superiores a 1300 megapascuales (MPa), lo que las convierte en aleaciones estructurales muy eficientes. Sin embargo, a estos niveles de resistencia, la tenacidad a la fractura se reduce a aproximadamente  $40 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ , lo que hace que la tolerancia al daño sea marginal. Un ejemplo lejano, utilizando una tensión de diseño que es dos tercios de la resistencia a la tracción máxima, el tamaño crítico de la grieta para una aleación con estas propiedades es de aproximadamente 4 milímetros. ¡Qué pequeña crítica! El tamaño de la grieta representa un desafío para cualquier inspección de campo requerida asociada con los requisitos de reutilización. {} La rigidez de las aleaciones -Ti también es hasta un 10 por ciento menor que la de las aleaciones a. + 13. Una rigidez diez por ciento menor generalmente no es un problema en una estructura cargada por tensión, pero puede ser un problema para una estructura cargada por compresión debido al potencial de pandeo. Los diseños con un módulo de sección más alto pueden eliminar esta preocupación, pero la complejidad adicional de la forma seguramente agregará costos. En circunstancias extremas, las aleaciones de Ti pueden reforzarse con fibras cerámicas (típicamente carburo de silicio) para aumentar su rigidez intrínseca, como se verá más adelante.

Las aleaciones de Ti son reactivas cuando se exponen al aire a temperaturas de 550 °Celsius o más. En consecuencia, cualquier operación de fabricación que exceda este límite de temperatura debe realizarse en una atmósfera protectora de gas argón (Ar) o helio (He). Se produce una excepción durante el forjado si se deja suficiente material sobrante en el forjado en bruto para contener la capa contaminada con oxígeno de modo

que se pueda mecanizar durante el mecanizado final del componente terminado. Cómo lidiar con este problema de reactividad está bien. En otras operaciones, como la soldadura, el uso de accesorios especialmente diseñados que incorporan gas protector inerte también elimina eficazmente las preocupaciones sobre la contaminación por oxígeno. En las aplicaciones, la pieza tal como está formada generalmente se muele químicamente para eliminar la capa superficial rica en oxígeno porque esta capa generalmente tiene menor ductilidad y puede causar agrietamiento por fatiga en servicio. La práctica de eliminar todo el material contaminado con oxígeno ha funcionado bien en la industria aeroespacial a lo largo de los años, pero es bastante conservadora y restrictiva. Este asunto se analiza con mayor detalle en la sección de vehículos de reentrada reutilizables de este documento.

En resumen, aunque las opciones de materiales para vehículos de lanzamiento lejano son en principio numerosas, en la práctica estas opciones se reducen por una variedad de consideraciones específicas de la aplicación que incluyen la capacidad de fabricación de componentes grandes y el costo de fabricación. La discusión anterior ha intentado examinar las perspectivas de las aleaciones avanzadas de Al, PMC y aleaciones de Ti a la luz de estas prácticas percibidas. limitaciones. Sobre una base de caso por caso, una variedad de requisitos son impuestos por restricciones de diseño, que algunos materiales cumplen más fácilmente que otros. En todos los casos, la discusión de las opciones de materiales disponibles se vio limitada por el supuesto de que las temperaturas máximas de servicio serían relativamente bajas. En consecuencia, las clases de materiales discutidas aquí están destinadas a un uso a temperaturas relativamente bajas. El caso separado de un vehículo reutilizable de una sola etapa a órbita, donde los requisitos de temperatura de funcionamiento son considerablemente más altos, se analiza en una sección posterior de este documento. En última instancia, los materiales se seleccionan para optimizar el rendimiento estructural, y un enfoque coordinado de selección de materiales y diseño geométrico es esencial para esto. De cara al futuro, un diseño que utiliza un proceso de síntesis que trata la forma, el ajuste, la función y los materiales. La capacidad como restricciones iguales es necesaria para lograr una verdadera eficiencia estructural óptima.

## **MÓDULOS DE TRIPULACIÓN REUTILIZABLES**

El concepto de módulos de tripulación orbitales tripulados ha evolucionado desde las cápsulas Mercury hasta los programas Gemini y Apollo hasta el transbordador espacial, el primer módulo de tripulación totalmente reutilizable. El transbordador también tiene una bahía de carga útil combinada que se utiliza para transportar satélites a la órbita y hardware para desarrollar la Estación Espacial Internacional y para reparar y restaurar el telescopio Hubble, entre otros usos. La naturaleza reutilizable del módulo de la tripulación del transbordador introdujo una serie de desafíos de diseño y selección de materiales.

Quizás el más importante entre ellos es el requisito de un sistema de protección térmica (TPS) que protegería a la tripulación durante el reingreso y también minimizaría el intermedio requisitos de reacondicionamiento de la propia nave espacial. Durante los primeros días del programa de desarrollo del transbordador, hubo mucho interés inicial en un TPS metálico porque parecía satisfacer mejor las necesidades del programa. Sin embargo, en última instancia, se utilizaron baldosas de cerámica en la parte inferior de la carrocería y compuestos de carbono-carbono (C-CC) en la bordes de ataque de las alas. Por tanto, el propio diseño de la lanzadera se puede caracterizar como una "estructura fría" con un TPS aislante. Un ejemplo lejano, gran parte de la estructura de carga de la lanzadera está hecha de la aleación de Al 2219, en parte porque es soldable por fusión y en parte porque conserva su resistencia a temperaturas moderadamente elevadas mejor que otras. las aleaciones de Al de alta resistencia pueden. Se dice que las necesidades de renovación de las baldosas cerámicas del transbordador después de cada vuelo son considerables y aumentan con la antigüedad del vehículo. El ala e-ce Los bordes de ataque básicamente no son reparables pero requieren un escrutinio. La retrospectiva muestra que los C CC "envejecen" y pierden gran parte de su tenacidad a la fractura durante la exposición térmica repetida. (Esta pérdida de resistencia fue un factor primordial en el desastre de Columbia. Si se hubiera utilizado un escudo térmico metálico que incluyera los bordes de ataque del ala, este desastre podría decirse que podría Se han evitado.) Si la discusión de un TPS metálico se llevó a cabo hoy, el resultado no podría ser muy diferente. Ciertamente, cualquier consideración sería de un vehículo reutilizable de etapa a órbita en la actualidad necesitaría reabrir la discusión sobre un TPS metálico. Los desafíos y oportunidades asociados con un TPS metálico se discuten más adelante. La eficiencia de diseño de un TPS integrado y una estructura portante es extremadamente atractiva. Tal diseño requiere la disponibilidad de aleaciones de alta temperatura que también tengan buena resistencia a temperaturas moderadas para soportar las cargas aerodinámicas y vibratorias encontradas durante el lanzamiento y la

inserción orbital. Cualquier aleación atractiva también debe tener una resistencia intrínseca razonable a la oxidación a las temperaturas de reentrada y debe poder fabricarse en forma de láminas a un costo razonable.

Cumplir con estos diversos requisitos en combinación se vuelve bastante abrumador. Los programas anteriores, como el planeador de reentrada reutilizable DynaSoar, dedicaban un tiempo y recursos considerables a examinar el uso de aleaciones refractarias como el Mo-0.5% Ti (Moly half Ti) y varias aleaciones a base de Columbia para el TPS y alguna estructura caliente. Todas las aleaciones de metales refractarios están reforzadas con solución sólida y, en consecuencia, tienen resistencias a temperatura ambiente relativamente bajas. También son bastante densos, lo que hace que la resistencia con corrección de densidad sea aún menos atractiva. Los metales refractarios y sus aleaciones reaccionan ampliamente cuando se exponen al aire a temperaturas elevadas. Por lo tanto, incluso si se pudieran superar las limitaciones de las propiedades mecánicas, cualquier estructura caliente requeriría un recubrimiento protector resistente a la oxidación. En el caso del programa DynaSoar, los científicos investigaron exhaustivamente un recubrimiento de conversión de superficie de MoSi<sub>2</sub> formado al reaccionar la aleación de medio Ti Moly con polvo de Si en un lecho fluidizado a alta temperatura. Con el beneficio de la retrospectiva, ahora no está claro cómo una gran estructura podría haber sido exitosamente recubierto de esta manera. Esto es particularmente cierto cuando la naturaleza frágil de MoSi<sub>2</sub> es considerado a la luz de las tensiones térmicas que seguramente se desarrollarían en una gran estructura colocada en el lecho fluidizado.

## **Vehículos reutilizables de una sola etapa a órbita**

Un vehículo reutilizable de una sola etapa a órbita (550) requerirá materiales metálicos para el TPS y para gran parte de la otra estructura caliente. Esto será un desafío desde el punto de vista del peso de un vehículo vacío. Con la excepción de las aplicaciones militares, que están fuera del alcance de este documento, ¡el peso del vehículo vacío es crítico! métrica porque cada libra adicional de peso vacío reduce la carga útil en la misma cantidad (suponiendo una capacidad de propulsión fija). Como se mencionó anteriormente, la clave para un vehículo liviano es el uso de métodos de diseño que integren el TPS y la estructura de carga. minimizar la redundancia estructural y la estructura de función única (por ejemplo, un TPS que no soporta carga). Lograr este objetivo requerirá nuevos paradigmas de diseño que incorporen una verdadera síntesis de nuevos conceptos estructurales. En realidad, estos diseños pueden serlo. completarse

solo si se basan en un conjunto detallado de requisitos de misión, incluido el número de misiones y las expectativas de tiempo de respuesta entre misiones.

Además, se necesitan parámetros operativos como el valor de insertar una libra de carga útil en órbita para consolidar el costo del vehículo inicial y el costo de mantenimiento por misión (traducido en costo por libra de carga útil). En ausencia de tales datos específicos, a continuación se analizan las posibilidades de los sistemas de materiales que pueden habilitar un vehículo SSO reutilizable. Quizás sea más eficiente discutir estos materiales de acuerdo con su capacidad principal y el régimen de temperatura anticipado en el que se pueden usar de manera más productiva. Este método de categorización se ilustra en la Tabla I.

<b>Temperature Regime</b>	<b>Specific Strength</b>	<b>Specific Stiffness</b>	<b>Fatigue Resistance</b>	<b>Fracture Toughness</b>	<b>Creep Resistance</b>
Ambient up to 250 °C	PMCs; Advanced Al alloys; AMCs*; Ti alloys; TMCs*	PMCs; AMCs; TMCs	PMCs; AMCs; Ti Alloys; TMCs	PMCs; Ti alloys	Ti alloys; TMCs
250 °C up to 550 °C	Ti alloys; TMCs	TMCs	Ti alloys; TMCs	Ti alloys	Ti alloys; TMCs
Above 550 °C	Ni-base alloys; Ti aluminides; Refractory metal alloys; CMCs*; C-C Cs*	Ti aluminides; CMCs; C-CCs	Ni-base alloys; Refractory metal alloys	Ni-base alloys; CMCs; Refractory metal alloys	Ni-base alloys; Ti aluminides; CMCs; Refractory metal alloys; C-C Cs

Table 1. Potential Materials by Use Temperature Regime and Property

La Tabla 1 muestra que hay esencialmente 10 clases distintas de materiales candidatos para su uso en un vehículo SSO reutilizable. Su utilidad para aplicaciones y componentes específicos depende del régimen de temperatura de funcionamiento y del material que limita el diseño.

**propiedad.**

En esta sección se describen algunos antecedentes y características de cada uno de estos materiales. Las aplicaciones de algunos de estos materiales ya se han abordado, por lo que la discusión aquí se limita a las aplicaciones para un vehículo SSO reutilizable.

### **Aleaciones de aleación avanzadas**

Esta clase de materiales está limitada por su capacidad de temperatura porque, incluso si se usa en una estructura empotrada, ¡la absorción térmica del exterior caliente! La estructura puede dar lugar a un ablandamiento en tiempo real o un sobrepromedio durante una exposición prolongada (es decir, • después de varias misiones). Los científicos han trabajado para desarrollar aleaciones de Al de pulvimetalurgia a alta temperatura, principalmente aleaciones que contienen Fe, cobalto (Co) y cesio (Ce) o Mn y Si. Estas aleaciones no se producen de forma rutinaria hoy en día debido a la falta de demanda derivada en parte de su costo y su relativa falta de madurez, a juzgar por la alta variabilidad en las propiedades mecánicas entre lotes de material. En consecuencia, la principal aplicación de las aleaciones de Al se encuentra en el propio compartimento de la tripulación, donde las temperaturas deben mantenerse a niveles tolerables para los ocupantes humanos. Las aleaciones de aluminio tienen una rigidez marginal, incluso sobre una base de densidad corregida. Sin embargo, el uso de paneles fabricados con láminas frontales de Al y un núcleo liviano puede minimizar esta limitación. Dichos paneles tienen un módulo de sección alto, lo que aumenta la rigidez estructural sin agregar mucho peso. Los usos anteriores de los núcleos de panal de abejas fenólicos experimentaron sólo un éxito limitado debido a la tendencia del núcleo a absorber agua del medio ambiente si se producía una ruptura de la hoja frontal o de la unión del núcleo de la hoja frontal. Hoy en día, la construcción de sándwich de panal de abejas fenólico de Al es impopular entre los diseñadores de aeronaves y naves espaciales debido a esta experiencia anterior y desfavorable. Sin embargo, vale la pena considerar una nueva posibilidad para estructuras rígidas y ligeras (láminas frontales de Al con un núcleo de aleación de Al espumado).

En los últimos 10 años se ha logrado un progreso considerable en la fabricación de Al de densidad uniforme y otras espumas metálicas. Esta nueva clase de materiales tipo sándwich es lo suficientemente diferente de las versiones anteriores como para merecer una evaluación cuidadosa.

### **Compuestos de matriz polimérica**

Como se describe en la sección Vehículo de lanzamiento, los compuestos de matriz polimérica tienen excelente resistencia, rigidez, resistencia a la fatiga y tenacidad a la fractura. Todos los materiales poliméricos son, hasta cierto punto, susceptibles de degradación cuando se exponen a la radiación ultravioleta (UV). Para un vehículo en órbita, una limitación importante son los efectos de la radiación UV sobre la matriz polimérica. Dado su tiempo limitado en altitud, esta vulnerabilidad no es un problema para los vehículos de lanzamiento; sin embargo, es motivo de preocupación las estructuras lejanas que permanecen en órbita durante un tiempo prolongado en altitudes donde la intensidad de los rayos ultravioleta es mucho mayor. Aunque existen recubrimientos que protegen los sustratos (PMC en este caso) de la radiación ultravioleta, el riesgo de que se rompan estos recubrimientos y la incertidumbre sobre su efectividad en órbita hacen que la exposición a los rayos ultravioleta sea una preocupación constante. Cualquier consideración sobre el uso de PMC para aplicaciones exteriores debería incluir una evaluación de su eficacia. Como se discutió para las aleaciones de Al, los PMC también podrían considerarse aplicaciones en interiores lejanos donde las temperaturas están dentro de las capacidades del material. Como se discutió anteriormente, algunas resinas de poliimida se pueden utilizar hasta aproximadamente 300 °Celsius; por lo tanto, la baja densidad y la excelente rigidez específica de las PMC las convierten en candidatas viables para algunos componentes. Como también se discutió, algunas poliimidias, como PMR-15, contienen metil / enedianilina, y se debe tener cuidado de asegurarse de que cualquier desgasificación que se produzca en el espacio no libera nada de este material tóxico, al menos no donde la tripulación pueda ingerirlo.

## **Al Matrix Composites**

Los compuestos de matriz de Al (AMC) se fabrican típicamente mezclando fibras cortas o incluso partículas de carburo de silicio (SiC) con polvo de aleación de Al y presionando en caliente o consolidando mecánicamente la mezcla por extrusión o forjado. Los AMC tienen un módulo y una resistencia más altos, pero sufren pérdidas de ductilidad debido a la segunda fase de SiC duro y no deformable. También son mucho mejores en fatiga porque las partículas de SiC o las fibras cortas mitigan los efectos del deslizamiento plano en las matrices de aleación de endurecimiento por precipitación. El mecanizado, la soldadura por fusión o el conformado en frío de AMC es difícil. La fijación mecánica es

posible, pero la perforación de orificios de fijación es difícil y costosa porque el desgaste causado por las fases duras de refuerzo acorta la vida útil de la herramienta.

La mayoría de los AMC producidos hasta la fecha han utilizado aleaciones de matriz de Al relativamente simples, como 6061 y 5083. Esto se debe presumiblemente a la sabiduría convencional de que los AMC no se pueden tratar térmicamente y a la percepción de que no se obtienen beneficios mediante el uso de matrices de aleación más complejas. Este es probablemente el caso de una solución convencional de tratamiento y envejecimiento. En consecuencia, ha habido poco esfuerzo para optimizar los sistemas AMC. Para la aplicación correcta donde los AMC podrían proporcionar un beneficio significativo, esto podría presentar una oportunidad. Un ejemplo lejano, el uso del polvo de aleación Al-Fe-Co-Ce de alta temperatura como matriz podría resultar interesante y permitir el uso de AMC a hasta 200 °Celsius, una temperatura a la que las aleaciones de Ti no brindan ninguna ventaja significativa, pero una que es una aleación de Al convencional demasiado alta para ser adecuada.

En resumen, si bien los AMC no son realmente un sistema de materiales comerciales hoy en día, se han realizado suficientes investigaciones para establecer una prueba de concepto. Si surgiera un mercado adecuado para AMC, el tiempo y el costo para hacerlos disponibles comercialmente podrían resultar aceptables.

### **Aleaciones de Ti**

Las aleaciones de Ti también se han discutido anteriormente, pero principalmente en el contexto de aplicaciones de sección pesada y de gran capacidad de carga para vehículos de lanzamiento. Aquí, se considera el potencial de las aleaciones de Ti para aplicaciones de menor calibre en la estructura cálida y el TPS. La Tabla 1 muestra que a temperaturas intermedias, las aleaciones de Ti son atractivas en todos los aspectos excepto por la rigidez específica. Lo que esta tabla no captura es la propensión de las aleaciones de Ti a reaccionar con el oxígeno en el aire para formar una capa de fase estabilizada con oxígeno en la superficie conocida como caja. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de un caso.

El caso a es más duro que el de la matriz porque el oxígeno es un potente reforzador de solución sólida en fase a. Como ocurre con casi todas las demás reacciones de fortalecimiento, el aumento de la resistencia se acompaña de una reducción de la ductilidad. Una vez más, basándose en la sabiduría convencional, la presencia de un caso en las láminas estructurales de ha sido prohibida por especificaciones, diseño prácticas de cualquier medio que utilice una empresa para administrar su hardware. Menos claro es cuán verdaderamente perjudicial es un caso para las propiedades. Esencialmente, no se ha hecho ningún esfuerzo para determinar si se puede tolerar si se permite que el hardware afectado funcione con un estrés moderadamente reducido. El estándar de la industria para un caso ha sido esencialmente uno de cero tolerancia. Dada la importante ventaja de peso potencial asociada con el uso de aleaciones de Ti en partes del TPS y la estructura cálida, este enfoque conservador debe revisarse. Varias cuestiones clave relacionadas con esto son:

- ¿El caso realmente perjudicial para la capacidad de carga de las estructuras de láminas de aleación de Ti?
- Si es así, ¿existe una cantidad limitante que se pueda tolerar sin degradar significativamente la capacidad estructural?
- ¿Qué propiedades están más degradadas?
- ¿Depende de la formación de cajas y de la degradación de las propiedades de la aleación?
- Si es así, ¿qué aleaciones son las más tolerantes para una formación de caja?
- Una vez que un se presentacaso, ¿se puede reparar la estructura (por ejemplo, mediante por fusión o soldadura fricción-agitación)?

Materiales de la Fuerza Aérea

La Dirección de Fabricación está iniciando un nuevo proyecto destinado a abordar estas cuestiones. La motivación de este programa son los vuelo vehículos hipersonicos. Los

resultados de este programa de la Fuerza Aérea de EE. UU. Deberían resultar muy útiles para el diseño de futuros vehículos SSO reutilizables.

Los usos anteriores de las aleaciones de Ti a altas temperaturas incluyeron la piel y gran parte de la

estructura de carga del SR-71 Blackbird. Este avión voló con éxito a velocidades máximas superiores a Mach 3,2 durante 34 años (1964-1998). Si bien las temperaturas máximas de la piel no están disponibles, superaron los 300 ° Celsius. No se conocieron problemas relacionados con un caso durante el servicio del SR-71. En particular, la aleación principal utilizada para el SR-71 fue una de las aleaciones originales de 13-Ti, B-120 VCA, cuya composición es Ti-13V-11Cr-3Al. La razón principal para elegir esta aleación fue que es mucho más fácil que cualquiera de las aleaciones de U + 8 Ti enrollar en calibres de hoja. Hoy en día hay 13 nuevas aleaciones de láminas de Ti con un mejor equilibrio de propiedades que podrían usarse de la misma manera que B-120 VCA. El más común de estos es Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al. Sin embargo, el uso exitoso de B-120 VCA plantea la pregunta de si (las aleaciones de 3-Ti son más resistentes que las + 13 aleaciones a como Ti-6-4 a la formación de cajas cc.

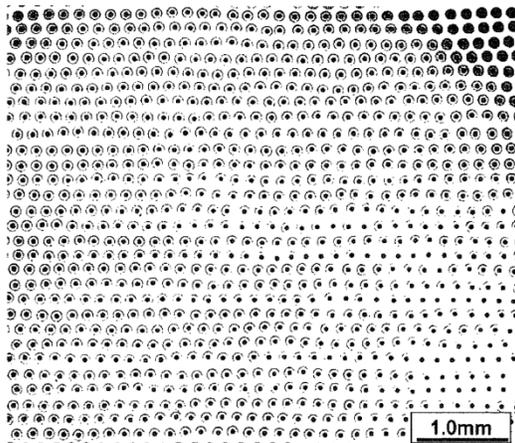
El atractivo de usar aleaciones de Ti, además de su eficiencia estructural, es la extensa base industrial para fabricar el material en una variedad de formas de productos y la amplia base de conocimiento resultante de las muchas aplicaciones exitosas de las aleaciones de Ti en productos de alto rendimiento. Por ejemplo, la capacidad de formar aleaciones de Ti superplásticamente como Ti-6-4 crea la oportunidad de diseñar una estructura que funcione como soporte de carga y como protección térmica.

### **Compuestos de matriz de Ti**

Como mostró la Tabla 1, las aleaciones de Ti no son especialmente atractivas por su rigidez específica. Una forma de superar esta limitación es reforzar una matriz de aleación de Ti con fibras de SiC. En este caso, las fibras son fibras "largas": tienen la longitud suficiente para que la matriz transfiera la máxima fracción posible de la carga externa a la fibra. Las fibras son esencialmente monofilamentos y deben colocarse con cuidado para que las fibras adyacentes no se toquen entre sí. Las zonas de contacto entre fibras son fundamentalmente fisuras incipientes que degradan la resistencia mecánica. Como muestra la Tabla 2, las TMC tienen excelentes propiedades.

### **Tabla 2. Ejemplo de propiedades de compuestos de matriz de Ti**

Propiedad unidades)	Valor de la propiedad (inglesas / métricas)
Resistencia a la tracción última	276 ksi / 1902 MPa
Módulo de Young	32,8 msi / 226 GPa
Deformación hasta la fractura	0,95%
Densidad	0,16 lb / in <sup>3</sup> / 4,43 g / cm <sup>3</sup>
Fracción de volumen de fibra	0,



**Figura 4. Micrografía de sección transversal de un compuesto de matriz de Ti.** Los centros pequeños y oscuros de las fibras son sustratos de monofilamento C para la deposición de SiC (micrografía de luz).

Sistema de materiales: aleación Matrix - Ti-6242; Fibra: SiC de aproximadamente 5,6 mil de diámetro SCS-6

La Tabla 2 muestra que las propiedades de resistencia y rigidez de los TMC pueden exceder las de la matriz de Ti (u otras aleaciones de Ti cx-1-13) en más de un factor de dos sin aumentar la densidad. Entonces, ¿por qué las TMC no son de uso generalizado? La principal razón es el costo. Otra razón es la disponibilidad de fibra SIC para TMC.

- Durante la década de 1990, cuando el gobierno de los EE. UU. (Principalmente el Departamento de Defensa) estaba interesado y proporcionaba dinero para el desarrollo de la I + D de TMC, la fibra de refuerzo más atractiva era la SCS-6- "1, que era producida exclusivamente por Textron Specialty Materials (TSM) en Lowell. , MA.

- Desafortunadamente (al menos en retrospectiva), TSM tomó la decisión comercial de no vender fibra y en su lugar, integrar y vender componentes TMC o molinos TMC terminados productos. Esta decisión se debió en parte a la experiencia empresarial negativa de TSM. con el desarrollo de fibra de base B (Boro-SiCTM) para TMC de primera generación.
- Antes de tomar esta decisión comercial, TSM no desarrolló suficiente experiencia en la fabricación de TMC para posicionarse adecuadamente como un productor de productos TMC con propiedades consistentes.
- Un par de fallos de prueba de componentes TMC costosos y altamente visibles utilizando TSM materiales pusieron en duda la viabilidad de los TMC. En realidad, el problema real era la calidad y no la viabilidad fundamental del concepto de material TMC.
- Estas fallas llevaron a extrema precaución por parte del gobierno, que rápidamente impuso estrictos requisitos de calidad en TSM. En consecuencia, TSM se convirtió en un serio cuello de botella para la disponibilidad de TMC con calidad aceptable. Como resultado, numerosos

Los grandes programas de I + D financiados por el gobierno se retrasaron hasta el punto de que algunos fueron cancelados y otros fueron abandonados.

menos atractivas

Durante este período se desarrollaron otras fibras de SiC, incluidas Nicalon en Japón y Sigma en el Reino Unido. Porque la fibra de SiC y los TMC se consideraron materiales estratégicos y ninguna de estas fibras alternativas se produjo en los Estados Unidos, hubo renuencia a experimentar con ellos, y los EE. UU.

El gobierno ocasionalmente prohibió su uso en programas de investigación y desarrollo financiados por el gobierno federal.

- El tema de la disponibilidad de fibra se convirtió en una gran distracción del negocio real en mano, es decir, mejorar la consistencia y reducir el costo del producto TMC.
- Al final, TSM cedió parcialmente, pero para entonces existía un interés tan limitado en las TMC

que se perdió la oportunidad original. Además, todavía no había concretas de pruebas que las TMC pudieran producirse con propiedades lo suficientemente consistentes como para que pudieran considerarse un material de ingeniería (a cualquier costo).

- A mediados de la década de 1990, un estudio de costos que asumió la disponibilidad de fibra mostró que las TMC que cumplen con las propiedades de especificación podrían fabricarse por alrededor de \$ 500/lb (en dólares de 1995) si el volumen de uso fuera de aproximadamente 10,000 lb / año. No se consideró posible encontrar suficientes aplicaciones de bajo riesgo y alto valor para consumir esta cantidad de TMC.

\*CONSECUENTEMENTE, el trabajo en TMC se detuvo después de una inversión de aproximadamente \$ 500 millones de EE. UU. fondos del gobierno y un (presumiblemente) comparable, pero menos conocido inversión del sector (principalmente I + D \$ independiente).

- Una lección de esto es que se debe realizar un estudio de costos y de mercado creíble antes de embarcarse en un importante programa de I + D para desarrollar materiales revolucionarios como TMC.

La discusión anterior ejemplifica los desafíos asociados con el desarrollo y la comercialización de un nuevo sistema de materiales revolucionario. Los nuevos conceptos de materiales que se originan en fuentes ajenas a la producción, como laboratorios nacionales o investigación de universidades, deben abordarse con cautela y nunca colocarse en el camino crítico del diseño de productos. Incluso si un nuevo material se examina a través de una producción establecida, se debe examinar cuidadosamente el momento de la comercialización completa.

### **Ni-base aleaciones**

Aleaciones a base de Ni se han considerado materiales reales de ingeniería durante al menos 40 años.

Debido a su tasa relativamente baja de pérdida de resistencia con el aumento de temperatura, Ni las aleaciones a base de también se denominan "superaleaciones". Se usan comúnmente a temperaturas muy por encima de la mitad de su punto de fusión ( $T_m$ ), que es el límite útil aceptado para la mayoría de los materiales metálicos estructurales. No hay otra clase de aleaciones estructurales para las que esto sea cierto. Las aleaciones a base de Ni se han utilizado en motores de turbina de todo tipo casi desde su comienzo. De

hecho, las aleaciones a base de Ni son un habilitador principal del motor de turbina de gas moderno. Como resultado, esta clase de materiales tiene una base industrial bien establecida para la producción de literalmente todas las formas de productos. Existe una segunda clase de aleaciones a base de Ni que tiene una excelente resistencia al ataque en entornos agresivos, como los que se encuentran en la recuperación de petróleo, pero estas aleaciones no son de interés para aplicaciones de alta temperatura. Para evitar confusiones, el término Ni- Las aleaciones base se utilizan en este documento para referirse a *las alta temperatura* aleaciones a base de Ni de. Las aleaciones a base de Ni tienen una alta resistencia a temperaturas elevadas porque normalmente contienen Al y Ti, lo que les permite ser reforzadas por precipitación. Las aleaciones con la capacidad de temperatura más alta se refuerzan con precipitados de Ni<sub>3</sub>Al (llamados  $\gamma'$ ), que tienen un coeficiente de temperatura positivo de resistencia hasta aproximadamente 1000 ° Celsius. Esta característica inusual explica la capacidad de temperatura elevada de las aleaciones a base de Ni. En combinación con la dependencia de la temperatura ordinaria de la resistencia de la matriz, la dependencia de la temperatura general es bastante baja en comparación con la de cualquier otra clase de aleaciones estructurales. Las aleaciones a base de Ni también contienen adiciones de aleación de elementos refractarios como tungsteno (W), tántalo (Ta) y niobio (Nb). Estas adiciones también mejoran la resistencia a temperaturas elevadas porque se difunden lentamente y fortalecen la matriz. Debido a que las aleaciones a base de Ni se utilizan a temperaturas elevadas, contienen adiciones de Cr en concentraciones significativas para mejorar su resistencia a la oxidación. La adaptación de las propiedades de las aleaciones a base de Ni se ha estudiado extensamente y se comprende bastante bien empíricamente, aunque menos en un sentido fundamental. Las aleaciones a base de Ni de la generación actual contienen hasta 10 adiciones de aleación, y las interacciones entre los elementos hacen que obtener una comprensión fundamental de los efectos de las aleaciones sea un desafío importante.

La producción de aleaciones a base de Ni ha evolucionado durante varias décadas. Tanto los métodos de metalurgia de lingotes como de pulvimetalurgia se utilizan para producir una gama completa de productos de molienda. Periódicamente se han introducido nuevas aleaciones en respuesta a necesidades especializadas. A veces, estos esfuerzos de desarrollo de aleaciones se han centrado tanto en la "necesidad especializada" que se ha pasado por alto la retención de otras propiedades de aleación a base de Ni generalmente aceptadas. Un ejemplo de esto es el desarrollo de aleaciones tempranas de "bajo

coeficiente de expansión térmica" ( $\alpha$ ) (las denominadas aleaciones de baja  $\alpha$ ). Un ejemplo de una aplicación para la que las aleaciones de baja  $\alpha$  son atractivas son las estructuras en las que hay dos o más anillos concéntricos conectados por puntales radiales. En presencia de un gradiente de temperatura radial, estas aleaciones tienden a agrietarse durante situaciones de ciclos térmicos debido a la "fatiga térmica". En principio, la disponibilidad de una aleación de "tipo Invar" con características estructurales reduce las deformaciones térmicas y mejora la vida de fatiga térmica. Invar se llama así porque utiliza las características magnéticas del Ni para compensar la expansión térmica normal, lo que da como resultado valores  $\alpha$  mucho más bajos. Se reconoció que este concepto también podría adaptarse a las aleaciones estructurales a base de Ni. La aleación de baja  $\alpha$  de primera generación, Inco 903, tenía aproximadamente la mitad del coeficiente de expansión térmica en comparación con las aleaciones de base Ni ordinarias hasta la temperatura de Curie. Esta notable alteración de una propiedad física se logró eliminando el Cr de la aleación para intensificar los efectos magnéticos de la magnetostricción. Una consecuencia desafortunada e involuntaria de esta alteración de la composición fue que la resistencia a la oxidación se degradó seriamente. En particular, Inco 903 tenía una propensión al agrietamiento intergranular en el aire bajo tensión, lo que lo hacía de utilidad limitada como aleación estructural. De hecho, el agrietamiento fue tan severo que se le dio un nombre: estrés oxidación del límite de grano asistida por (SAGBO). Un low- $\alpha$  de segunda generación. La aleación Inco 909 contenía Si para ayudar a mejorar la resistencia a la oxidación, pero esta aleación no ha ganado una aceptación generalizada, posiblemente porque los problemas de Inco 903 eran muy graves. Baja- $\alpha$  la resistencia superior a la fatiga térmica de las aleaciones les da un gran potencial para su uso en TPS; por lo tanto, sería apropiado volver a examinar esta clase de aleación después de abordar sus problemas pasados.

Muchas de las aleaciones a base de Ni son soldables por fusión, pero los grados de mayor resistencia son propensos a agrietarse sin precauciones especiales como precalentar la pieza de trabajo. La mayoría de las aleaciones que se pueden procesar en láminas también se pueden procesar para crear un grano estructura de fino. El material de grano fino puede formarse superplásticamente, lo que es potencialmente un beneficio muy importante para la fabricación de estructuras de soporte de carga de calibre ligero y componentes de TPS. Finalmente, aunque casi todas las aleaciones a base de Ni contienen Cr y Al, los cuales mejoran la resistencia a la oxidación al formar una escala protectora estable, esta escala

comienza a perder su efectividad por encima de aproximadamente 1000 ° Celsius. La serie de eficaces industria de las turbinas de gas ha desarrollado recubrimientos ambientales para aleaciones a base de Ni. La única preocupación o desconocida para la aplicación en un vehículo SSO reutilizable es la durabilidad de estos recubrimientos en condiciones de flujo másico muy alto, como durante la reentrada.

### **Aleaciones de metales refractarios**

Las aleaciones de metales refractarios se discutieron brevemente anteriormente en relación con el proyecto DynaSoar. Posteriormente a esto, ha habido un interés sistemático limitado en el diseño de estructuras aeroespaciales que incorporan aleaciones de metales refractarios. Ha habido interés en utilizar estas aleaciones para reactores nucleares refrigerados por gas de alta temperatura, donde el entorno operativo es benigno y está bien controlado, pero esto tiene una relevancia limitada para el debate actual sobre los vehículos espaciales necesarios para resistir la reentrada en la atmósfera terrestre. La atracción de los metales refractarios como clase es la alta fusión temperatura de Mo, Nb y Ta. Aunque las aleaciones de estos elementos metálicos exhiben una dependencia de la temperatura "normal" de la resistencia mecánica, 0.5 Tm de Nb o Mo es todavía una temperatura más alta que la que pueden soportar las aleaciones a base de Ni. De los tres metales, el Nb es, con mucho, el más atractivo debido a su menor densidad, menor módulo elástico y mejor (pero no buena) resistencia a la oxidación. La barrera clara para el uso de aleaciones de Nb es su reactividad en el aire a altas temperaturas. Hay recubrimientos para estas aleaciones, pero a 1.250 ° Celsius, una brecha en el recubrimiento provocará una falla catastrófica inmediata.

Una práctica de diseño razonable para estructuras críticas, como el TPS, es no permitir el uso de cualquier material recubierto si el material falla catastróficamente cuando se rompe el recubrimiento. Si esta práctica fuera la norma, entonces las aleaciones de metales refractarios no serían utilizables en el TPS u otra estructura caliente crítica en un vehículo SSO reutilizable.

### **Compuestos de Matriz de Cerámica**

Los compuestos de matriz de cerámica Los de matriz de cerámica (CMC) son atractivos porque son mucho más resistentes que las cerámicas monolíticas, pero retienen la capacidad de alta temperatura. La tenacidad de las CMC se deriva de las fibras utilizadas

para reforzar la matriz cerámica. Cuando una CMC se carga en tensión y la tensión en la matriz cerámica alcanza un valor crítico, semicro fisuras desarrollan. Este nivel de tensión se conoce como tensión de microfisura de matriz. En una monolítica cerámica como el carburo de silicio (SiC) o el nitruro de silicio (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), las microfisuras se propagarían rápidamente y provocarían una falla inmediata. Por esta razón, las cerámicas monolíticas no son adecuadas para aplicaciones cargadas por tensión. Esta característica se mitiga en las CMC reforzando la matriz cerámica con fibras cerámicas de alta resistencia, típicamente Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o SiC, cuya función es puentear y detener las grietas. Bajo carga continua, las fibras también eventualmente se fracturara en sus puntos más débiles, que, estadísticamente, a menudo se encuentra en algún lugar de la matriz en lugar de en la boca de la grieta. Estas fibras fracturadas luego deben sacarse de la matriz durante la extensión de la grieta bajo carga continua, una acción que disipa energía adicional. Por lo tanto, la energía total gastada durante la fractura de una CMC es mucho mayor de lo que sería en el caso de una muestra monolítica de la matriz cerámica. Los mecanismos de puenteo de fisuras y extracción del endurecimiento, con el consiguiente aumento de la disipación de energía durante la fractura, son la base conceptual de las CMC. En las CMC de matriz de SiC reforzada con fibra de SiC (llamada SIC-SIC), la tenacidad puede ser tan alta como 10 veces la de la matriz no reforzada. Claramente, la naturaleza de la fibra-interfazmatriz determina la resistencia a la extracción de la fibra después de la fractura y controla la tenacidad. En CMC de alta temperatura, las fibras se recubren para lograr una fuerza de unión interfacial intermedia entre la fibra y la matriz que optimiza el endurecimiento por extracción. Si la interfaz es demasiado débil, las fibras se desprenden con demasiada facilidad. Si es demasiado fuerte, las fibras se rompen sin que se desprendan. Ninguna de estas situaciones maximiza la dureza. Por lo tanto, el desafío de crear una CMC resistente no es solo crear esta interfaz, sino también encontrar un recubrimiento que se mantenga estable a lo largo del tiempo durante la exposición a elevadas temperaturas. A medida que aumenta la temperatura de servicio, este último requisito se vuelve más desafiante. Para servicios extendidos, las CMC de SiC-SiC están limitadas actualmente a aproximadamente 1.400 ° Celsius, pero esto es más alto que la capacidad de los materiales metálicos.

La tensión de la microfisura de la matriz también es significativa porque una vez que la matriz desarrolla microfisuras, permite que el entorno obtenga acceso a las interfaces fibra-matriz. El papel del medio ambiente puede ser alterar la naturaleza de la interfaz y

reducir el grado de endurecimiento por extracción. La dificultad obvia con esto es que las propiedades son mejores inicialmente que después de un período de exposición en servicio. Esto conduce a un conservador diseño que es peligroso. En ausencia de una caída arbitraria, actualmente no existe ningún medio de estimar la tenacidad reducida en función de la vida útil.

Sin embargo, las CMC son la clase de material que tiene la mayor promesa de superar los límites de temperatura de los metales actuales. Un problema importante en la actualidad es la base industrial limitada para producir CMC y la gama aún más restrictiva de adecuadas fibras cerámicas disponibles para su uso como refuerzo en CMC. El costo de las CMC es actualmente muy alto, pero debería reducirse con el aumento de la demanda, como sucedió con las TMC. Aun así, los CMC siempre serán costosos, lo que hace que el desarrollo de diseños eficientes que hagan un uso óptimo de esta clase de material sea importante.

### **Compuestos Carbono- Carbono**

carbono-carbono (C-CC) consisten en fibras de carbono en una típicamente amorfa matriz de carbono. En principio, esta clase de materiales es muy atractiva porque tiene una densidad muy baja y una alta resistencia a temperaturas elevadas. Los C-CC también tienen una buena resistencia a la oxidación a temperaturas muy altas (1200 ° Celsius) porque usan un recubrimiento rico en Si que forma una película protectora estable de SiO<sub>2</sub> en la superficie. Este recubrimiento sistema de "autocurativo" si se rompe porque, entre otras cosas, es vítreo (viscoso) y se reforma sobre las grietas. La principal vulnerabilidad ocurre a intermedias temperaturas donde la viscosidad del vidrio es lo suficientemente alta como para que no fluya lo suficientemente rápido como para curar una brecha, exponiendo el sustrato C reactivo al dañino ambiente oxidante. Al igual que con los CMC, también hay algunas preguntas sobre los largos cambios de aplazo en las interfaces fibra-matriz que son al menos parcialmente responsables de la pérdida de resistencia al impacto con el tiempo, como se experimentó en el accidente de Columbia.

Por lo tanto, las inestabilidades que causan reducciones de tenacidad dependientes del tiempo deben entenderse antes de que estos materiales puedan considerarse candidatos para futuras TPS aplicaciones de.

### **Aluminuros de Titanio**

Los aluminuros de titanio son compuestos intermetálicos que se forman entre el Ti y el Al. Hay tres compuestos de este tipo: ThAl, TiAl y Al<sub>3</sub>Ti, pero el de mayor interés es el TiAl, a menudo denominado aluminuro de titanio gamma o  $\gamma$ -TiAl. Este compuesto contiene aproximadamente un 35% en peso de Al, pero las aleaciones ternarias y cuaternarias basadas en TiAl contienen típicamente algo menos que esta cantidad. El  $\gamma$ -TiAl es interesante para temperatura intermedia aplicaciones por varias razones. Estos incluyen una densidad más baja, una capacidad de temperatura más alta de al menos 125 ° Celsius y una mejor estabilidad de la superficie (resistencia a la oxidación) en comparación con las aleaciones de Ti convencionales. La incrustación superficial que se forma durante la oxidación de  $\gamma$ -TiAl es rica en Al y es más protectora que la incrustación de TiO<sub>2</sub> que se forma en las aleaciones de Ti convencionales. Como la mayoría de los otros compuestos intermetálicos, el  $\gamma$ -TiAl tiene una ductilidad muy limitada a temperaturas de hasta aproximadamente 600 ° Celsius, pero no es frágil en el sentido clásico; es decir, tiene la capacidad de deformarse plásticamente antes de fracturarse. La ductilidad aumenta a medida que aumentan las temperaturas y es bastante buena a temperaturas normales de servicio.

La ductilidad limitada de las aleaciones  $\gamma$ -TiAl plantea problemas de fabricación para cualquier producto forjado. Estos problemas son manejables pero reducen el rendimiento del producto, lo que a su vez afecta los costos. Un trabajo reciente en Austria ha demostrado que algunas aleaciones de  $\gamma$ -TiAl se pueden convertir en láminas. Esto es particularmente relevante para aplicaciones como TPS metálico. Otro trabajo ha demostrado que algunas aleaciones de  $\gamma$ -TiAl se pueden forjar de forma convencional, aunque con cuidado. Si uno o más de los esfuerzos actualmente en curso para producir polvo de Ti prealeado de bajo costo tienen éxito, la disponibilidad de polvo de aleación de  $\gamma$ -TiAl asequible podría ser un gran avance en costos.

El desarrollo y la maduración de las aleaciones de  $\gamma$ -TiAl ha llevado más de 30 años. Esto se debe en parte a la falta de aplicaciones de producción reales debido a las preocupaciones del diseñador con respecto a la ductilidad limitada a baja temperatura de todas las aleaciones de  $\gamma$ -TiAl. Hoy, finalmente, existen varias aplicaciones de aleaciones basadas en  $\gamma$ -TiAl, la más significativa de las cuales son dos etapas de palas de turbina de baja presión en el motor que General Electric está proporcionando para el Boeing 787 y el 747 de crecimiento (llamado 747-X). Estas palas se moldean a una forma casi neta y funcionarán a temperaturas de hasta aproximadamente 750 ° Celsius. Otra aplicación es

un rotor de turbocompresor fundido  $\gamma$ -TiAl que Mitsubishi usa en un automóvil de producción porque tiene la mitad de la masa de un componente de aleación a base de Ni equivalente.

Una aplicación potencialmente ideal de alto volumen de las aleaciones  $\gamma$ -TiAl son las válvulas de escape para automóviles. Si la pólvora de bajo costo mencionada anteriormente se convierte en una realidad, este factor, junto con la presión actual para mejorar el consumo de combustible en los automóviles estadounidenses, podría hacer esta realidad perspectiva. El punto de esta breve discusión de las aplicaciones no relacionadas con el espacio de las aleaciones  $\gamma$ -TiAl es que la realización de cualquiera o todas estas aplicaciones creará una base de producción más sólida para esta clase de aleación, que a su vez hará su introducción en el espacio futuro. plataformas más fáciles y rentables.

## **SISTEMAS DE PROPULSIÓN**

Entre los sistemas de propulsión, aquí solo se consideran los motores de cohetes reutilizables porque tienen potencial para un progreso significativo que podría reducir el costo de colocar las cargas útiles en órbita.

El concepto básico del motor principal del transbordador espacial sigue siendo viable, pero la durabilidad de los materiales utilizados para fabricar el hardware ha sido un gasto importante y una fuente de

preocupación para la NASA. Gran parte de la preocupación está relacionada con los efectos del hidrógeno en el Ni -

aleaciones base utilizadas en las turbobombas. Las turbobombas son el corazón de un motor de cohete de hidrógeno y oxígeno de combustible líquido porque entregan el combustible y el oxidante a la cámara de empuje. Las turbobombas giran a una velocidad muy alta, hasta 35.000 rpm. Estas velocidades crean enormes tensiones centrífugas en los componentes giratorios, particularmente en los discos que sostienen las láminas de aire utilizadas para extraer el trabajo de la corriente de gas caliente. Un lado del rotor de la turbobomba opera en la corriente de gas caliente creada por la combustión de la mezcla de oxígeno e hidrógeno; el otro extremo es una criobomba que opera a temperaturas criogénicas, ya sea en oxígeno líquido (90 K) o en hidrógeno líquido (20 K). El lado caliente, una turbina, se asemeja al rotor de la turbina en un motor de turbina de gas y

está hecho de muchas de las mismas aleaciones a base de Ni. La criobomba está hecha de aleaciones de Ti.

La turbina opera esencialmente en un ambiente de vapor supercrítico rico en hidrógeno a una temperatura máxima de aproximadamente 1.050 ° Celsius. El disco de la turbina es una aleación forjada a base de Ni y las láminas de aire son piezas de fundición de inversión de monocristal. Ninguno de los materiales es adecuado para operar en un entorno rico en hidrógeno; sin embargo, ninguna otra clase de material puede soportar las temperaturas de funcionamiento y tiene mejor tolerancia al hidrógeno, una situación que todavía prevalece en la actualidad. El mecanismo del agrietamiento inducido por hidrógeno se comprende mucho mejor hoy en día como resultado de una extensa investigación durante los últimos 25 años. Por lo tanto, sería muy útil utilizar esta comprensión mejorada para diseñar una aleación a base de Ni que tenga una tolerancia al hidrógeno mejorada. Si tiene éxito, una turbina que tenga una mejorada resistencia al agrietamiento por hidrógeno reduciría en gran medida el tiempo y el costo de la renovación intermedia.

Tradicionalmente, las piezas giratorias de la criobomba se han fabricado a partir de piezas forjadas de lacasi en aleación de Tifase Ti-5Al-2.5Sn (Ti-5-2.5). Esta aleación ha sido elegida por susuperior en resistencia a la tracción con muescascomparación con Ti-6-4 cuando se prueba a temperaturas criogénicas. La retrospectiva sugiere que no está claro que la resistencia a la tracción con muescas sea el mejor criterio para seleccionar un material de rotor criogénico. El uso de la resistencia a la tracción con muescas se originó en los aceros. Aquí, el estado de tensión hidrostática en la raíz de la muesca podría desencadenar la aparición de una fractura frágil del tipo que se observa en las pruebas de tracción suave por debajo de la frágil dúctil temperatura de transición(DBTT). Las aleaciones de Ti no presentan DBTT; por lo tanto, la verdadera tenacidad a la fractura medida a la temperatura relevante es una indicación más precisa de la resistencia a la fractura del rotor. Un examen de los datos limitados defractura disponibles tenacidad a lapara las dos aleaciones no muestra una ventaja clara en el uso de Ti-5-2.5. Debido a que Ti-5-2.5 es más difícil de producir que Ti-6-4, el uso de Ti-5-2.5 agrega costos a la criobomba. Otras aleaciones de Ti, más nuevas y de mayor resistencia, por ejemplo, varias de las nuevas 13-Ti aleaciones de, pueden ser incluso más adecuadas que el Ti-6-4 para esta aplicación. La cuestión crítica de cuánta tenacidad se requiere realmente no puede responderse en la actualidad porque la relación de tracción con muescas ha sido el

criterio decisivo. Por tanto, una nueva El diseño de una criobomba puede beneficiarse potencialmente de estos nuevos materiales y del abandono del uso de la resistencia con muescas como paradigma de diseño. La cámara de combustión de un motor cohete está hecha de una aleación de cobre y se enfría pasando hidrógeno líquido a través de canales en la pared exterior. La cámara de combustión del motor principal del transbordador espacial está hecha de NARloy-Z, una aleación Cu-30 / 0Ag-0.50 / 0Zr que tiene una excelente conductividad térmica y mejor resistencia que laCu-disponible comercialmente aleación0.15% Zr conocida como AMZIRC. Si bien una cámara de combustión más liviana sería bienvenida, el desarrollo de materiales de turbina resistentes al hidrógeno sería un uso mucho mejor de los recursos disponibles para el desarrollo de aleaciones de motores de cohetes.

## **RESUMEN Y RECOMENDACIONES**

Este documento ha intentado revisar una variedad de materiales que pueden ser prometedores para todos los aspectos de las plataformas aeroespaciales. Debido a la amplitud de este tema, la discusión se ha centrado en las oportunidades y los riesgos asociados, pero con pocos detalles técnicos. También se han abordado cuestiones prácticas como la capacidad y los costes de fabricación y la disponibilidad de materiales, cuando ha sido apropiado. Otro problema recurrente es la capacidad de lograr una mejor eficiencia de diseño a través de un proceso de síntesis de diseño que trata al mismo tiempo la forma, el ajuste y la función, la capacidad de fabricación y la capacidad de los materiales como restricciones de diseño igualmente importantes. Aunque este enfoque aún no se ha utilizado con éxito para un proyecto importante de estructura de alto rendimiento, la ingeniería se está acercando a un estado de desarrollo en el que ahora puede ser factible.

Si se utiliza el transbordador espacial como punto de referencia, es evidente que existirán numerosas oportunidades para mejorar la eficiencia estructural. Esta posibilidad refleja el progreso realizado desde que se diseñaron la lanzadera y su motor. También es posible mejorar la durabilidad y reducir los costos operativos. El problema del tiempo de espera prolongado que frena estos métodos de diseño mejorados suele ser uno de la disponibilidad oportuna de materiales nuevos y atractivos que son lo suficientemente maduros para ser utilizados en un sistema sin aumentar el riesgo de falla. La comunidad de materiales está desarrollando y utilizando activamente modelos computacionales y métodos de simulación para abordar esta preocupación. A pesar de algunos avances, se

requieren más avances para llevar la ingeniería de materiales computacionales al nivel deseado de madurez.

1. Hatch, J. ed. Aluminio, Propiedades y Metalurgia Física. American Society for Metals, 1984.
2. Chawla K. Composite Materials, Science and Engineering 2 "edición. Springer, 1998.
3. Baker, A., Dutton, S. y Kelly, D. Composite Materials for Aircraft Structures 2" edición . AIAA, 2002.
4. Lijtjering, G y Williams, J. Titanium, edición de 2 ". Springer, 2007.
5. Sims, C. y Nagel, W. The Superalloys. Wiley, 1972.
6. Mishra, R. y Ma , Z. Friction Stir Welding and Processing, Ciencia e Ingeniería de Materiales. V.50, págs. 1-78, 2005,

ICOD: 1 de diciembre de 2009

DIA-08-1003-011

**SIN CLASIFICAR / 76Peilt • I, Pr**

**7fllt "f"**

# **Documentos de referencia de inteligencia**

*Soporte para amenazas de adquisición de*

## **Espintrónica metálica**

### **Espintrónica metálica**

**Preparado por:**

**Agencia de Inteligencia de Defensa**

**Autor:**

(b) (6)

**Nota administrativa**

ADVERTENCIA DE COPYRIGHT: No se autoriza una mayor difusión de las fotografías de esta publicación.

Este producto es uno de una serie de informes de tecnología avanzada producidos en el año fiscal 2009 bajo la Agencia de Inteligencia de Defensa, (b) (3): 10 USC 424 Advanced Aerospace Programa de aplicaciones de sistemas de armas (AAWSA). Comentarios o preguntas relacionadas con

este documento debe dirigirse a 1 (b) (3): 10 USC 424 • b 6  
Gerente, Agencia de Inteligencia de Defensa, ATTN. (b) (3) 10 USC 42

## Contenido

1.

Introducción

iv

2. Magnetorresistencia gigante 1

2.1 Conceptos básicos de GMR 1

2.2 Aplicaciones GMR 3

3. Spin-Transfer-Torque 4

3.1 Conceptos básicos de STT 4

3.2 Experimentos STT 7

3.3 Aplicaciones SIT 10

3.4 Movimiento impulsado por STT de paredes de dominio magnético 12

4. Espintrónica de metales antiferromagnéticos 12

4.1 GMR antiferromagnético 13

4.2 Antiferromagnético STT 14

5. Resumen y Conclusiones dieciséis

6. Referencias 18

Cifras

Figura 1. En una multicapa magnética, varias capas atómicas de material magnético  
Alternar con capas de material no magnético 1

Figura 2. Resistencia de un campo magnético multicapa  $R$  versus campo magnético 2

Figura 3. Resistencia diferencial  $dV / dI$  de un punto de contacto mecánico como función  
de corriente para una serie de campos magnéticos. 4

Figura 4. Esquemas de dispositivos para experimentos STT

Figura 5. Imagen cualitativa de STT 6

Figura 6. Torques en un momento magnético en un campo magnético y sujetos a una  
Corriente eléctrica 7

Figura 7. Conmutación magnética impulsada por par de giro 8

Figura 8. Voltaje oscilatorio 9

Figura 9. Imágenes de microscopía de rayos X de transmisión de barrido  
10

Figura 10. Célula 11 de MRAM convencional

Figura 11. Concepto de memoria del hipódromo 12

Figura 12. Esquema del contacto puntual con la geometría de la muestra  
15

## Espintrónica metálica

### 1. Introducción

El rápido ritmo de progreso de la industria informática durante los últimos 40 años se ha basado en la miniaturización de chips y otros

Componentes de la computadora. Sin embargo, una mayor miniaturización se enfrenta a desafíos serios, por ejemplo, una disipación de energía cada vez más alta. Para continuar con el ritmo, la industria debe ir más allá del incremento mejoras y adoptar tecnologías radicalmente nuevas. Una prometedora tecnología a nanoescala conocida como espintrónica (un neologismo para "spin-electrónica"). La espintrónica se refiere al papel que desempeña el espín de un electrón en la física del estado sólido. Investigadores de la espintrónica tienen como objetivo desarrollar una nueva clase revolucionaria de dispositivos electrónicos basados en el giro de los electrones además de la carga. En espintrónica dispositivos, la información no es transportada por la carga del electrón, como en microchips convencionales, sino por el giro intrínseco del electrón. Cambiar el giro de un electrón es más rápido y requiere menos energía que moverlo. Por lo tanto, si se pudiera encontrar una forma confiable de controlar y manipular los giros, los dispositivos espintrónicos podrían ofrecer datos más altos. velocidades de procesamiento, menor consumo de electricidad y muchos otros ventajas sobre los chips convencionales, tal vez incluida la capacidad de realizar cálculos cuánticos radicalmente nuevos.

La espintrónica en los sistemas ferromagnéticos se basa en un conjunto de fenómenos en los que la configuración magnética del sistema influye en sus propiedades de transporte y viceversa. Gigante Los fenómenos de magnetorresistencia (GMR) (Referencia 1, 2) y torque de transferencia de espín (STT) (Referencia 3-5) ejemplifican tales interconexiones en multicapas compuestas de capas ferromagnéticas (F) y no magnéticas (N). La física y las aplicaciones de la espintrónica metálica son discutido en este informe desde la perspectiva de estos dos fenómenos. GMR, investigación en la que fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 2007, se refiere a un gran cambio en la resistencia de las multicapas magnéticas cuando la orientación relativa de los momentos magnéticos en sus capas ferromagnéticas constituyentes se altera mediante una aplicación campo magnético. El efecto inverso, STT, en el que un gran

La densidad de corriente  $j$  puede perturbar el estado magnético de una capa múltiple, también se ha predicho (Referencia 3, 4) y se ha observado en experimentos sobre la inversión inducida por la corriente y la precesión de la magnetización.

(Referencia 5-9) y el movimiento de la pared del dominio magnético (Referencia 10, 11).

La espintrónica es un amplio campo de investigación con (actualmente) tres importantes subcampos: (1) investigación de materiales que intenta crear nuevos materiales que sean tanto magnéticos como semiconductores, (2) investigación sobre nuevos efectos de magnetotransporte en metales ferromagnéticos, y (3) investigación sobre técnicas que pueden usarse para manipular espines de electrones individuales. El primer subcampo tiene como objetivo magnético semiconductores porque los dispositivos basados en dichos materiales serían los más fáciles de integrar con el dispositivo semiconductor actual tecnología y capacidades de procesamiento. Sin embargo, a pesar de una extensa investigación, la mayoría de los dispositivos espintrónicos semiconductores siguen siendo conceptos teóricos que esperan demostraciones experimentales. Este informe se centra en la investigación de la espintrónica en sistemas metálicos dentro del alcance de los subcampos segundo y tercero. El segundo subcampo ha experimentado un período sin precedentes de nuevos descubrimientos en los últimos 20 años, incluyendo el descubrimiento de GMR, y ya ha generado importantes cambio tecnológico en la industria del almacenamiento de información con el uso de sensores GMR y cabezales de lectura. El tercer subcampo es vital para dispositivos espintrónicos, ya que prácticamente cualquier procesamiento de información en tales dispositivos está asociado con el transporte y manipulación de espines.

Métodos nuevos y eficientes para manipular giros que estimulan programas activos de investigación en espintrónica en un gran número de instituciones académicas y media docena de laboratorios de investigación industrial en todo el mundo son muy deseables. El premio a ganar es control activo y manipulación de distribuciones de espín (magnéticas momentos) para una funcionalidad nueva y mejorada en dispositivos electrónicos / espintrónicos. La confluencia de intensos básicos El interés de la ciencia y la industria en la espintrónica de metales ferromagnéticos no se ha producido a esta escala en la física en mucho tiempo.

El informe está organizado de la siguiente manera: la sección 2 está dedicada a efectos de magnetotransporte en sistemas magnéticos donde magnéticos La configuración puede influir en las propiedades de transporte del sistema. Eso discute GMR en multicapas magnéticas y fenómenos relacionados, destaca los principios físicos básicos responsables de la RMG, y describe las aplicaciones tecnológicas del efecto. La sección 3 se centra en la conexión inversa entre las conexiones magnéticas del sistema. configuración y sus propiedades de transporte, el llamado efecto STT. Se discuten el origen físico y las aplicaciones potenciales. Sección 4 discute otras nuevas direcciones en espintrónica metálica, con un especial atención a la espintrónica con materiales antiferromagnéticos. La sección 5 resume, con miras al futuro, el desarrollo de tecnologías espintrónicas y sus aplicaciones aeroespaciales.

## 2. Magnetorresistencia gigante

### 2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE GMR

En esta sección se analiza el fenómeno de la magnetorresistencia gigante (GMR). Excelentes reseñas de GMR están disponibles en otros lugares (Referencia 12-22). Se discute el enfoque en conceptos físicos importantes para las secciones siguientes.

GMR en multicapas magnéticas se refiere a una reducción drástica en la resistencia del multicapas cuando se somete a un campo magnético externo. El tamaño de GMR generalmente se define como el cambio de resistencia en el campo magnético en relación con su valor máximo. El efecto se puede distinguir de la magnetorresistencia ordinaria (MR) que proviene de la acción directa del campo magnético sobre las trayectorias de los electrones a través de la fuerza de Lorentz (Referencia 23), y de la MR anisotrópica, que proviene de la dependencia de la resistividad de la relativa orientación del momento magnético a la corriente (Referencia 24).

Para preparar las multicapas magnéticas, donde varias capas atómicas de una material (ferromagnético) alternado por capas de otro (no magnético) material (ver Figura 1), una amplia variedad de los métodos de deposición se han utilizado, como la deposición electroquímica técnicas (Referencia 25, 26) y varias técnicas de deposición al vacío (Referencia 27, 28). Este último comparte

principalmente entre dos métodos que utilizan ya sea deposición catódica o molecular sistemas de epitaxia de haz (MBE). Chisporroteo deposición implica la eliminación de la

átomos del material de interés de un objetivo por bombardeo de partículas, seguido por la deposición de alta- átomos energéticos (-2-30 electronvoltios [eV]) sobre el sustrato. Un director La ventaja de la deposición catódica es la facilidad con la que muchos Los materiales se pueden depositar a relativamente altas tasas de deposición. A diferencia de, Las tasas de deposición en los sistemas MBE son generalmente mucho más bajo que para la pulverización catódica sistemas, pero energías mucho más bajas ("0,1 eV) del material evaporado hacer que esta técnica sea favorable para el crecimiento

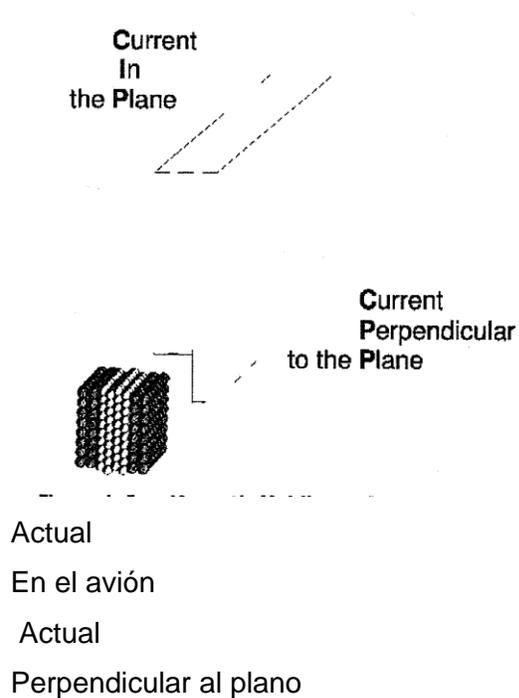


Figura 1. En una multicapa magnética, varias capas atómicas de material magnético (mostradas en gris)

Alternar con capas de material no magnético (mostrado en blanco). GMR ocurre en uno de dos diferentes geometrías: (1) cuando la corriente fluye en el plano (geometría CIP) de las capas o (2) cuando la corriente fluye perpendicular (geometría CPP) a las capas. de películas monocristalinas altamente orientadas.

La observación original de GMR (Referencia 1) se realizó en multicapas de hierro-cromo (Fe / Cr) cultivadas con MBE con cristalinidad casi perfecta. Posteriormente, mediante el uso de muestras pulverizadas que crecen mucho más rápidamente que las muestras de MBE, fue posible no solo reproducir estos resultados sino también observar oscilaciones

en la magnetorresistencia a medida que se variaba el grosor de las capas espaciadoras no magnéticas (Referencia 29). Subsecuente estudios (Referencia 30) en multicapas de cobalto-cobre (Co / Cu) pulverizado revelaron magneto resistencias a temperatura ambiente de 3 a 4 veces mayores que las de hierro- cromo y 13 veces mayor que los de las películas de permalloy que se utilizaban como sensores magnetorresistivos en cabezales de lectura magnéticos en ese momento. Los números mucho más altos observados en las multicapas magnéticas predeterminaron el destino de GMR en la tecnología de grabación magnética.

El entendimiento actual es que GMR observado en multicapas magnéticas surge de la dependencia de la resistividad en su configuración magnética interna y el papel de los magnéticos externos campo para cambiar esta configuración. La figura 2b ilustra GMR en el límite simple donde el camino libre medio de electrones es mucho más largo que el grosor de la capa.

Las propiedades de transporte eléctrico del sistema se describen en términos de la llamado modelo de dos corrientes (Referencia 31), basado en la sugerencia de Mott (Referencia 32) que, a temperaturas

más baja que la temperatura de Curie, los electrones de spin-up y spin-down serán casi independientes y llevan corriente en paralela. Los electrones son mucho más fuertemente dispersos por una capa magnética si ellos y la magnetización local giran en opuesta en lugar de la misma dirección ( $R > r$ ). Por simplicidad, la figura es dibujado con dispersión solo en interfaces; sin embargo, también hay dispersión dentro de las capas. En campo magnético cero, donde las magnetizaciones de adyacentes las capas magnéticas están alineadas antiparalelo, por ejemplo, debido al acoplamiento de intercambio entre las capas (Referencia 29) —el descenso los electrones están débilmente dispersos en la capa

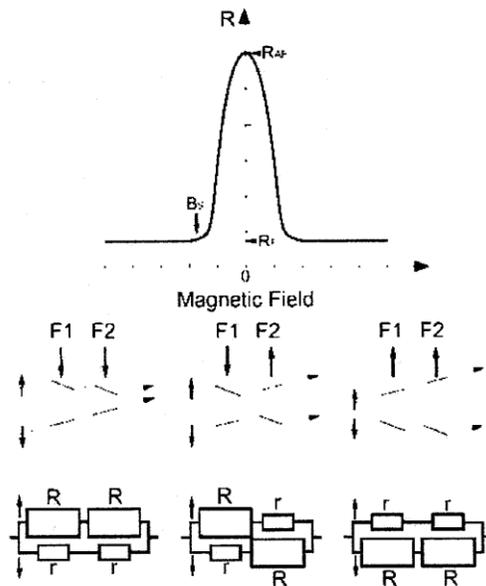


Figura 2. (a) Resistencia de una multicapa magnética  $R$  versus campo magnético. (b) Origen de la RMG en términos de Dispersión de electrones dependiente de espín: F1 y F2 son Capas ferromagnéticas con una capa no magnética en Entre. En campo magnético cero, las magnetizaciones en F1 y F2 están alineados antiparalelo (panel central) y se puede cambiar a la orientación paralela mediante un campo aplicado. (c) Los circuitos de resistencia equivalentes correspondiente a las tres configuraciones magnéticas mostrado en (b). Consulte el texto para obtener más detalles.

F1 pero fuertemente disperso en F2. En contraste, los electrones de spin-up están débilmente dispersos en la capa F2 pero fuertemente dispersos en F1. Como resultado, dos canales son equivalentes, conduciendo a una resistencia total en esta configuración "antiferromagnética"  $RAF = (R + r) / 2$  (ver el circuito de resistencia correspondiente en la Figura 2c). Cuando las magnetizaciones de las dos capas F se configuran en paralelo mediante un campo magnético aplicado, los electrones de spin-up se dispersan débilmente en ambas capas y forman un canal de baja resistividad, mientras que los electrones de spin-down están fuertemente dispersos en todas las capas. La inversión del campo magnético simplemente intercambia los roles de los canales de giro hacia arriba y hacia abajo. La derivación de la corriente

por el canal de baja resistividad produce una baja resistencia total  $R_F = 2Rr / (R + r)$  en esta configuración "ferromagnética". El tamaño del GMR se define como  $(R_F - R) / R_F = (R - R_{GMR}) / R$  ocurre en dos geometrías diferentes (ver Figura 1): es decir, cuando la corriente fluye en el plano de las capas, o geometría CIP, o cuando la corriente fluye perpendicular a las capas, o geometría CPP. La mayoría de los experimentos sobre GMR se llevan a cabo en el CIP geometría porque medir la resistencia bastante grande de una película delgada es bastante fácil (la longitud de la película es típicamente órdenes de magnitud mayor que su espesor). Los experimentos en la geometría CPP son más difíciles (Referencia 33) y requieren técnicas especiales para mediciones de precisión de resistencias muy pequeñas — $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  c resultantes de la Geometría "corta y ancha" de una muestra de 1 mm<sup>2</sup> de "ancho" y 1 μm de "largo". Con el fin de Para aumentar las resistencias a valores fácilmente observables, se pueden utilizar técnicas de microfabricación para reducir el área de la sección transversal de la muestra (Referencia 34-36). Finalmente, una técnica de punto de contacto simple y económica (Referencia 37) también puede ser adecuada para este propósito. Las muestras con un área de sección transversal reducida serán de interés para la experimentos de torsión de transferencia presentados en la Sección 3.

## 2.2 APLICACIONES GMR

GMR se utiliza actualmente en sensores de campo magnético, incluidos los de cabezales de lectura para discos duros de computadora, en aisladores galvánicos y en dispositivos de memoria de acceso aleatorio no volátiles. La lectura de información almacenada en discos duros magnéticos en computadoras fue la primera aplicación comercial a gran escala de GMR. La información es almacenada por magnetizar pequeñas regiones (dominios magnéticos) de un disco de grabación magnético en diferentes direcciones. Los campos magnéticos extraviados de estos dominios son detectados por un GMR elemento sensor llamado válvula de giro. El tipo más simple de válvula giratoria consta de dos Capas ferromagnéticas separadas por un espaciador delgado no magnético. La válvula giratoria La resistencia es menor cuando las magnetizaciones de las dos capas ferromagnéticas son paralelo y mayor cuando las magnetizaciones son antiparalelas. La alineación antiparalela se logra haciendo que las dos capas respondan de manera diferente a un campo magnético externo; un antiferromagnet en contacto con una de las capas se utiliza para "fijar" eficazmente el magnetización en esta capa a través de un efecto llamado "sesgo de intercambio". La capacidad de respuesta excepcional de las

válvulas giratorias a los campos magnéticos ha permitido densidades de empaque de área muy altas en los discos duros.

Otras aplicaciones de sensores que utilizan elementos GMR incluyen el monitoreo de la rotación de un engranaje ferroso en el funcionamiento de la maquinaria (Referencia 38) mediante la detección de un flujo magnético cambiante cuando un diente de engranaje pasa cerca del sensor, el monitoreo de la corriente eléctrica mediante la detección del campo magnético de Oersted inducido por la corriente y la transferencia de alta señales de frecuencia entre circuitos aislados (Referencia 39) a través de campos magnéticos generado por un inductor de alta frecuencia en un circuito y replicado en otro circuito por un sensor GMR.

### **3. Spin-Transfer-Torque**

Esta sección se centra en el fenómeno de torsión de transferencia de espín (STT), que se refiere a un método novedoso para controlar y manipular momentos magnéticos en nanoestructuras mediante corrientes de espín, una de las áreas de vanguardia y más interesantes en la investigación del magnetismo actual.

#### **3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE STT**

La sección anterior mostró que el estado magnético de un ferromagnético puede afectar sus propiedades de transporte eléctrico; por ejemplo, la orientación relativa de los momentos magnéticos en las multicapas magnéticas subyace al fenómeno de GMR (Referencia 1, 2). También se ha predicho el efecto inverso, en el que una gran densidad de corriente eléctrica puede perturbar el estado magnético de una multicapa (Referencia 3, 4). Aquí la corriente transfiere el giro vectorial entre las capas magnéticas e induce la precesión y / o inversión de las magnetizaciones de la capa. La alteración del estado magnético con corrientes de espín se basa en la interacción de intercambio mecánico cuántico y representa un método novedoso de control de magnetización en la escala de longitud nanométrica y la escala de tiempo de picosegundos.

La primera observación de tal spin- fenómeno de transferencia en magnético multicapas fue registrado por Tsoi et al. (Referencia 5) (ver Figura 3). En esto experimento, el spin-transfer inducido Las excitaciones se produjeron inyectando corrientes eléctricas de alta densidad en un Multicapa magnética de Co / Cu a través de un punto de contacto mecánico. Contactos puntuales menores de 10 nanómetros (nm) son formado cuando un metal Cu afilado el alambre (punta) se introduce con cuidado en contacto con la multicapa. los área de sección transversal extremadamente pequeña de tal contacto hace posible lograr densidades de corriente superiores a  $10^{12}$  A / m<sup>2</sup>. Debido a su extremadamente tamaño pequeño (<10 llantas), el punto de contacto es un sonda muy eficiente de electricidad propiedades de transporte en muy pequeñas volúmenes de muestra inaccesibles con otros técnicas (por ejemplo, electrón- patrón de litografía de haz).

los

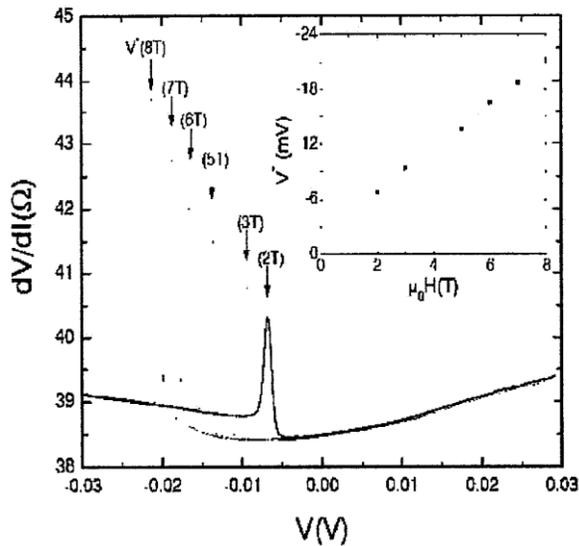


Figura 3. Resistencia diferencial  $dV / dI$  de un Contacto puntual mecánico en función de la corriente

para una serie de campos magnéticos. El pico en  $dV / dI$  indica el inicio de las excitaciones de la SST. El recuadro muestra que la corriente de umbral en el pico en  $dV / dI$  aumenta linealmente con el campo aplicado. (Referencia 5)

Este último califica el punto de contacto como la sonda más pequeña de STT en la actualidad.

El fenómeno STT actualmente atrae una atención considerable porque combina preguntas científicas fundamentales poco entendidas con la promesa de aplicaciones en una amplia gama de tecnologías. En grabación magnética de alta velocidad y alta densidad tecnología, por ejemplo, SST podría reemplazar el campo de Oersted que se usa actualmente para escribir bits magnéticos en medios de almacenamiento (por ejemplo, en la memoria de acceso aleatorio magnético [M RAM]). Esto puede conducir a una memoria magnética más pequeña y más rápida. Otra posible aplicación se basa en la precesión de magnetización inducida por transferencia de espín, que convierte una entrada de voltaje de corriente continua (dc) en un voltaje de corriente alterna (ac) producción. La frecuencia de tal precesión se puede sintonizar desde unos pocos gigahercios (GHz) a  $> 100$  GHz cambiando el campo magnético aplicado y / o la corriente continua, de manera efectiva resultando en un oscilador controlado por corriente para su uso en circuitos prácticos de microondas.

Desde su predicción en 1996, el efecto STT se ha observado en varios experimentos, incluidos aquellos con mecánicos (Referencia 5, 9, 40) y litográficos contactos puntuales (Referencia 6, 41), uniones de manganita (Referencia 7), nanocables cultivados electroquímicamente (Referencia 8), nanopilares definidos litográficamente (Referencia 42, 43), uniones de túnel (Referencia 44) y estructuras semiconductoras (Referencia 45). Todos estos métodos diferentes comparten un rasgo característico: permiten alcanzar densidades de corriente extremadamente altas ( $> 10^{12}$  A / m<sup>2</sup> para estructuras metálicas) necesarias para producir pares de transferencia de giro suficientemente grandes (Referencia 3, 4). Esto se logra forzando a que la corriente eléctrica fluya a través de una constricción muy pequeña. Este último puede ser un contacto puntual mecánico, un

contacto puntual definido litográficamente o nanopilar, o un nanoalambre, como se ilustra en la Figura 4. En todos los casos, la densidad de corriente máxima  $j_{max} = I / A$  se define por la corriente  $I$  que fluye a través del dispositivo y el cruce mínimo área seccional  $A$  del camino actual. Para contactos de puntos mecánicos típicos,  $I \sim 1$  mA y  $A \sim 100$  nm<sup>2</sup> dan  $j_{max} \sim 10^3$  A / m<sup>2</sup>. En estructuras definidas litográficamente, tanto  $I$  como  $A$  son típicamente más grandes,  $I$

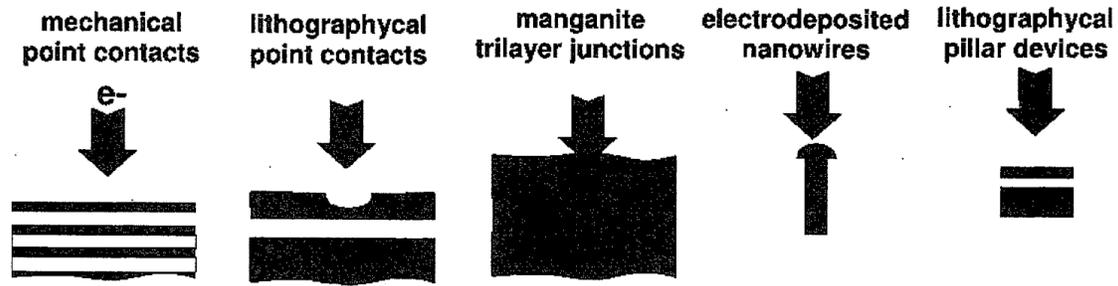


Figura 4. Esquemas de dispositivos para experimentos STT. Todos los experimentos comparten una característica común: una pequeña constricción para la corriente eléctrica, es decir, contacto puntual, unión, nano-filamento o nanopilar. Negro (gris) Indica aislante; azul oscuro indica material magnético,

El mecanismo físico básico que subyace a STT se basa en la conservación de angulares impulso. Considere un caso pedagógicamente simple en el que un electrón de conducción cruza una interfaz entre un metal no magnético (N) y un ferromagnético (F). Suponemos que el estado inicial del espín del electrón  $S$  en N no es colineal con la magnetización  $M$  de F. Una vez en F,  $S$  está sujeto a un par de intercambio causado por  $M$  que tiende a reorientar  $S$ .

Con ello, de acuerdo con la Tercera Ley de Newton, también debería existir un par de reacción que actúe sobre el par  $M$  - STT. Profundamente en F,  $S$  está alineado con  $M$ , y el cambio en El momento angular que se produce a partir de su reorientación se ha transferido a  $M$ . De ahí el nombre del fenómeno: par de transferencia de espín. Por supuesto, el par aplicado a  $M$  por un solo giro  $S$  es insignificamente pequeño debido a que  $S$  es insignificamente pequeño en comparación con  $M$ . Sin embargo, para una alta densidad de corriente que cruza la interfaz N / F, el número de tales espines puede ser

muy grande y la  $S$  efectiva resultante podría llegar a ser comparable a  $M$ . Esta destaca la necesidad de altas densidades de corriente para observar el fenómeno STT.

Un experimento típico sobre la excitación impulsada por la corriente de un ferromagnético generalmente involucra dos imanes de película delgada de dominio único separados por un espaciador no magnético. Aquí un imán

( $F_a$ ) es "duro" y se usa para polarizar la corriente, mientras que el espaciador ( $N$ ) es lo suficientemente delgado para que la corriente polarizada pase y excite el segundo imán "libre" ( $F_b$ ). Esta tres capas  $F_a / N / F_b$  estructura dees similar a una válvula giratoria GMR. El efecto GMR por lo tanto se puede utilizar para controlar la orientación de  $F_b$  en relación con  $F_a$  - GMR varía linealmente con  $\cos \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre momentos magnéticos de  $F_a$  y  $F_b$ , y una fenomenológica descripción (Referencia 46) da la resistencia de tres capas  $R(B) = R_F + (R_A - R_F) \frac{1 - \cos\theta}{2}$ . Cuando la corriente fluye a través de  $F_a / N / F_b$ , los pares inducidos por la corriente actúan sobre las  $F_a$  capas y  $F_b$  (Referencia 3, 47). Esto se ilustra esquemáticamente en la Figura 5. Esta imagen cualitativa de STT asume que las capas  $F_a$  y  $F_b$  son filtros de espín perfectos, de modo que los espines de electrones alineados con el momento magnético de, por ejemplo, la  $F_a$  capa se transmiten completamente a través de la capa, mientras que los espines están alineados. antiparalelo al momento de la capa se reflejan por completo. Cuando la corriente de electrones cruza la tricapa  $F_b / N / F_a$  de derecha a izquierda (Figura 5a), los electrones transmitidos a través de  $F_a$  se polarizarán a lo largo de  $F_a$ . Si la longitud de difusión de espín en  $N$  es lo suficientemente larga, esta corriente polarizada de espín alcanzará  $F_b$  y ejercerá un par en  $F_b$  en una dirección para alinear  $F_b$  con  $F_a$ . Repitiendo el argumento para  $F_b$ , encontramos que los electrones reflejados desde  $F_b$  estarán polarizados en antiparalelo a  $F_b$  y, por lo tanto, a su vez, ejercerán un torque sobre  $F_a$  tratando de alinear  $F_a$  en antiparalelo con  $F_b$ . El resultado neto es un movimiento de tipo molinete con  $F_a$  y  $F_b$  girando en la misma dirección (en el sentido de las agujas del reloj en la Figura 5a), como describió anteriormente Slonczewski (Referencia 3). Cuando la corriente cruza la triple capa de izquierda a derecha, las direcciones de los pares se invierten (Figura 5b): el par en  $F_a$  intenta alinear  $F_a$  en paralelo con  $F_b$ , mientras que el par en  $F_b$  intenta alinear  $F_b$  en antiparalelo con  $F_a$ .

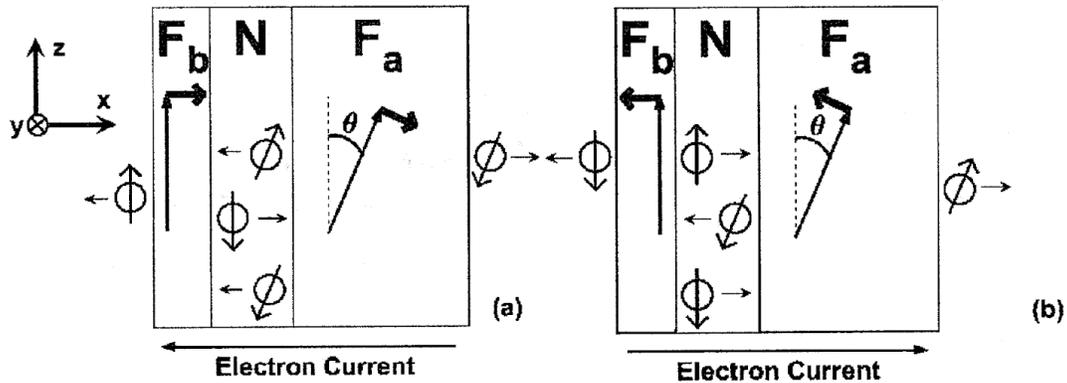


Figura 5. Imagen cualitativa de STT. (a) Los momentos magnéticos de los electrones del extremo izquierdo (flechas delgadas) de F y F<sub>b</sub> giran en el sentido de las agujas del reloj. (b) Para los electrones que van hacia la derecha, las direcciones de los pares (flechas gruesas) en F y F<sub>b</sub> se invierten. (Referencia 47)

La discusión anterior implica la asimetría de STT con respecto a la dirección actual como sigue. Fijemos la orientación del polarizador F<sub>a</sub>; en los experimentos, esto generalmente se logra haciendo F<sub>a</sub> muy grueso (en comparación con F<sub>b</sub>) o fijando su orientación con una capa antiferromagnética adyacente a través del fenómeno del sesgo de intercambio. Si inicialmente F<sub>b</sub> es casi paralelo con F<sub>a</sub>, los electrones de la izquierda estabilizarán esta alineación paralela y no habrá excitación STT. Cuando la polarización de la corriente se invierte, el par en F<sub>b</sub> intentará girar F<sub>b</sub> lejos de F<sub>a</sub> y dará como resultado la excitación STT del sistema. Esta asimetría con respecto a la polaridad actual es una de las principales características de STT en los experimentos; ver, por ejemplo, la Figura 5, donde las excitaciones STT están presentes solo en sesgo negativo.

### 3.2 EXPERIMENTOS STT

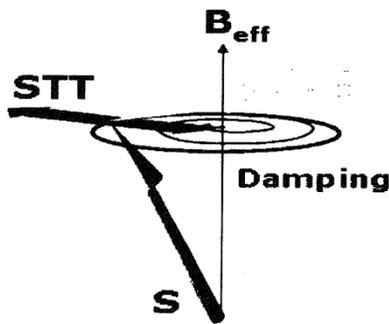
La sección 3.1 introdujo la física de STT en nano sistemas magnéticos. Hemos visto que una corriente eléctrica de alta densidad puede provocar pares en los elementos magnéticos del sistema. Estos pares pueden usarse para controlar y manipular el estado magnético del sistema. Sin embargo, el comportamiento resultante del sistema puede diferir significativamente de un caso a otro, dependiendo de las condiciones particulares de observación. Por ejemplo, en modestos campos magnéticos externos, la magnetización de un elemento pequeño se puede invertir repetidamente entre dos configuraciones estables,

mientras que en campos más altos, donde la inversión es energéticamente desfavorable, el momento puede establecerse en precesión a una muy alta frecuencia. Para comprender los detalles de lo que sucede con un momento magnético  $\mathbf{S}$  en una situación particular, se puede usar la Segunda Ley de Newton. Para  $\mathbf{S}$ , esta sería la ecuación de Landau-Lifshitz-Gilbert, donde la tasa de cambio de  $\mathbf{S}$  se establece igual al par neto que actúa sobre  $\mathbf{S}$ :

Ecuación 1:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \gamma \mathbf{S} \times \mathbf{B}_{\text{eff}} - \frac{\alpha}{|\mathbf{S}|} \mathbf{S} \times \frac{d\mathbf{S}}{dt} + \eta I \frac{\mu_B}{e} \mathbf{S} \times (\mathbf{S} \times \mathbf{S})$$

Aquí, el primer término a la derecha es el par en un momento magnético  $\mathbf{S}$  en un campo magnético efectivo  $\mathbf{B}_{\text{eff}}$  (incluidos campos aplicados, desmagnetizante, anisotropía y otros), con la relación lagrangiana; el segundo término es un término de amortiguamiento fenomenológico introducido por Gilbert, con un parámetro de amortiguamiento  $\alpha$ ; el tercer término es el STT donde  $\eta$  y  $\gamma$  son unitarios a los vectores  $\mathbf{S}$  y el polarizador  $\mathbf{g}^*$ ,  $I$  es la corriente,  $\mu_B$  es el magnetón de Bohr,  $e$  es la carga del electrón y  $q$  es el factor de polarización de espín.



El diagrama de la Figura 6 muestra las

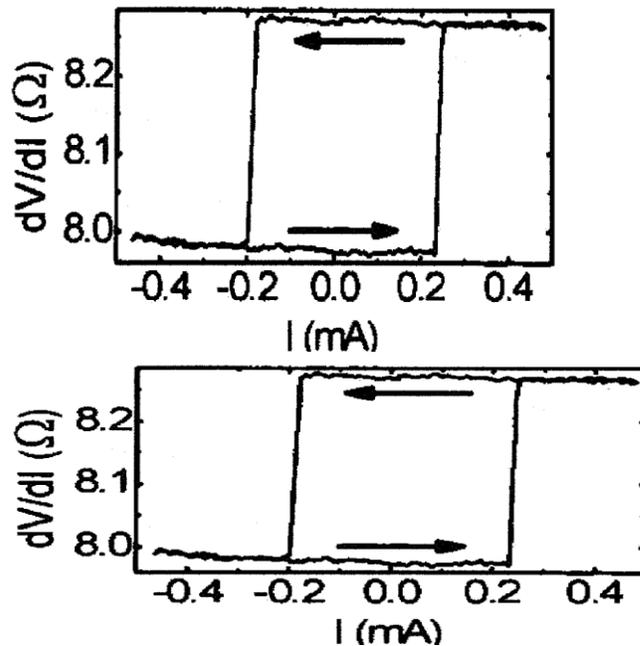
direcciones de los tres pares de la Ecuación 1. Tenga en cuenta que, dependiendo de la polaridad de la corriente aplicada, el STT puede estar en la misma o en la dirección opuesta que la amortiguación  $\mathbf{B}_{\text{eff}}$  Figura 6. Pares en un momento magnético en un

campo magnético y sujetos a una corriente eléctrica por de. En el primer caso, STT dará como resultado un amortiguamiento incrementado para cualquier magnitud de la corriente aplicada y suprimirá cualquier posible excitación de  $g$  desde su estado de equilibrio a lo largo de *Serf*. Sin embargo, si el par STT es opuesto a la amortiguación, podemos distinguir dos situaciones. Para corrientes por debajo de una corriente crítica, donde STT es pequeño en comparación con la amortiguación,  $S$  gira en espiral hacia *Serf* (trayectoria roja en la Figura 6). Para corrientes mayores que la corriente crítica, STT excede el par de amortiguación y hace que  $S$  se aleje en espiral de *Beff*, con un ángulo de precesión en constante aumento. El resultado final puede ser una precesión estable de estado estable de  $S$  alrededor de *Beff* (trayectoria negra en la Figura 6) o una inversión magnética de  $S$  en un estado antiparalelo a *Beff*, dependiendo de la dependencia angular de STT y los pares de amortiguación.

Casi todas las observaciones experimentales de STT se basan en el fenómeno GMR para detectar la reorientación inducida por la corriente de los momentos magnéticos en los nanodispositivos. Las típicas mediciones incluyen (1) medir la resistencia estática del dispositivo  $R = V / I$  como una función de la corriente de polarización de CC aplicada  $I$  en un campo magnético aplicado  $B$  y (2) medir  $R$  versus  $B$  a una constante  $I$ . La figura 3 muestra cómo la resistencia diferencial  $dV / dI$  de un punto de contacto desde  $Cu$  a la multicapa magnética de  $Co / Cu$  varía con el voltaje de polarización  $V$  (equivalente a  $I$ ) aplicado a través del contacto. Aquí los momentos magnéticos multicapa se saturan fuera del plano de las capas por un campo magnético externo suficientemente grande ( $B \approx 2T$ ). El inicio de la precesión magnética impulsada por STT se revela por un pico en la resistencia diferencial del contacto. El pico en  $dV / dI$  indica que la transición a la precesión es un proceso reversible, y en un pequeño rango de corrientes, uno puede aumentar o disminuir continuamente el ángulo de precesión. Sin embargo, también son posibles otros escenarios, por ejemplo, transiciones rápidas entre estados de precesión estáticos y de estado estable con tiempo de permanencia dependiente de la corriente.

Si el campo magnético aplicado es pequeño, el sistema magnético puede tener más de un estado de baja energía. En el caso simple de un elemento magnético con uniaxial anisotropía, STT puede desencadenar una transición entre dos estados estáticos que son energéticamente favorables. Un ejemplo de tal comportamiento se muestra en la Figura 7. Aquí la corriente pasa a través de una estructura de giro de capas  $válvula$  de  $Py20nm / Cu2nm / Py4.5nm$  modelada por haz de litografía de electrones en un nanopilar con un  $40 \times$

sección transversal de  $120 \text{ nm}^2$  área de (Referencia 48). La resistencia diferencial del nanopilar exhibe una histéresis en función de una corriente de polarización aplicada a medida que la magnetización de la capa delgada (libre) de permalloy (Py) se alinea en paralelo y Figura 7. Conmutación magnética impulsada por torque de giro



para una válvula de giro  $\text{Py}20\text{nm} / \text{Cu}2\text{nm} / \text{Py}4.5\text{nm}$  con un  $40 \times 120$

área de sección transversal de  $\text{nm}^2$ , ya que la magnetización de la capa magnética delgada (libre) se alinea en paralelo y antiparalelo a la capa magnética gruesa por una corriente aplicada. (Referencia 48) antiparalelo a la capa de Py gruesa (dura) por la corriente.

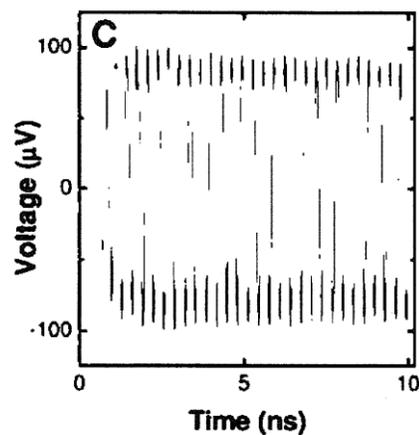
Los dos ejemplos presentados anteriormente (Figuras 3 y 7) demuestran cómo simples de CC

se pueden utilizar medidas de resistencia para la observación STT. Aquí, la medida de resistencia de un dispositivo proporciona información indirecta sobre la orientación relativa de los elementos magnéticos en el dispositivo. Sin embargo, las corrientes críticas medidas destacadas por variaciones bruscas en la resistencia siguen siendo la única información experimental que se puede utilizar para comparar cuantitativamente la teoría y el experimento. Además, las mediciones de CC en la Figura 3 no proporcionan información sobre la rápida evolución de la magnetización en el dispositivo, asociado con la precesión de alta frecuencia de momentos magnéticos. Deben emplearse técnicas de alta frecuencia para proporcionar tales capacidades, como se analiza a continuación.

El primer experimento que proporcionó evidencia inequívoca de que una corriente eléctrica de CC puede resultar en una precesión de momentos magnéticos de alta frecuencia

(decenas de GHz) fue informado por Tsoi et al. en (Referencia 9). Aquí un dispositivo STT-punto de contacto-se colocó en una cavidad de microondas de una alta frecuencia, de un alto campo de resonancia de spin electrónico espectrómetro (ESR). Esta disposición permitió realizar experimentos de transporte de corriente, como los descritos anteriormente, mientras el contacto se irradiaba con una alta frecuencia de microondas. Cuando la frecuencia de las microondas externas coincidió con la frecuencia de precesión de excitación por la corriente continua, se detectó un voltaje adicional (rectificado) a través del contacto. Al detectar este voltaje mientras se varía la frecuencia externa, el campo y la corriente aplicada, Tsoi et al. (Referencia 9) pudieron mapear la frecuencia excitada por la corriente continua en función del campo aplicado y la corriente. En un experimento más reciente, Rippard et al. (Referencia 49) alimentaron microondas a un punto de contacto a través de cables eléctricos e informaron la observación de una respuesta de CC similar.

Finalmente, la dinámica de alta frecuencia de la magnetización de la capa libre se puede medir directamente detectando altas oscilaciones de frecuencia en el voltaje a través de una válvula giratoria bajo corriente continua. Aquí la capa magnética dura está fija, mientras que la capa libre exhibe una alta frecuencia con precesión de respecto a la capa dura. GMR da como resultado una alta frecuencia de modulación de la resistencia de la válvula de giro, que a su vez conduce a una alta frecuencia componente del voltaje a través de la válvula de giro atravesado por una corriente continua. Este voltaje se puede probar directamente con un analizador de espectro de alta frecuencia, como lo hicieron recientemente Kiselev et al. (Referencia 50) y por Rippard et al. (Referencia 41). Además, las oscilaciones de voltaje debidas al par de giro impulsado por precesión magnética se pueden medir directamente en el dominio del tiempo usando un osciloscopio de muestreo (Referencia 51), como



se ilustra en la Figura 8.

Figura 8. Voltaje oscilatorio generado por el movimiento del imán libre en precesional IrMn8nm / NiFe4nm / CuBrim / NiFe4nm Nanopilar, en respuesta a un paso de voltaje de 335 mV aplicado al dispositivo en B - ? . 630 Oersted (Referencia 51)

Los ejemplos anteriores ilustran cómo la instrumentación de banda ancha para medir el voltaje en GMR dispositivos puede proporcionar información importante y, a menudo, única sobre la dinámica magnética de alta frecuencia impulsada por pares de transferencia de espín. Sin embargo, la detallada comprensión de STT sigue siendo objeto de debate y requiere nuevas técnicas experimentales capaces de sondear la dinámica de magnetización en longitud nanométrica escalas de escalas y de tiempo de sub-nanosegundos. En principio, esto se puede lograr mediante el uso de rayos X sincrotrón que se mostraron recientemente (Referencia 52) para sondear interfaciales fenómenos de visualizar directamente la respuesta resuelta en el tiempo de las nanoestructuras magnéticas a los pulsos de campo magnético de sub-nanosegundos (conmutación de Oersted) y corriente polarizada por espín pulsos (conmutación STT). La Figura 9 muestra microscopía de rayos X de transmisión de barrido

imágenes de (Referencia 53) de componentes en el plano de magnetización  $M_x$  en el panel (a) y  $M_y$  en el panel (b), en la capa de CoFe libre (indicada por elipse azul) de un Nanopilar magnético de  $100 \times 150 \text{ nm}^2$ . Las imágenes se obtuvieron escaneando un haz de rayos X enfocado (diámetro - 30 nm) polarizado circularmente a través de la capa de CoFe, con la energía del fotón sintonizada con la resonancia característica Co L3 para proporcionar contraste magnético a través del efecto de dicroísmo circular magnético de rayos X (Referencia 54), y monitorizando la transmisión de los rayos X en función de la posición  $x$ , y con un detector rápido de avalanchas. El campo del vector de la capa libre se puede reconstruir a partir de los  $M_x$  y  $M_y$  medidos componentes como se ilustra en la Figura 9c, y la técnica de microscopía de rayos X ultrarrápida proporcionó un medio para monitorear este campo en función del tiempo con -100-picosond resolución. La resolución espacial de la técnica es fijado por el tamaño de punto de los x-haz de rayos (-30 nm) y actualmente se limita su aplicación a los dispositivos espintrónicos > 100 nm de tamaño (Referencia 52). Potencialmente, sin embargo, el desarrollo técnico de la microscopía de rayos X ultrarrápida puede conducir a una técnica definitiva para los estudios STT que puede sondear el campo del vectores la escala de longitud nanométrica con una resolución de tiempo de pico segundos.

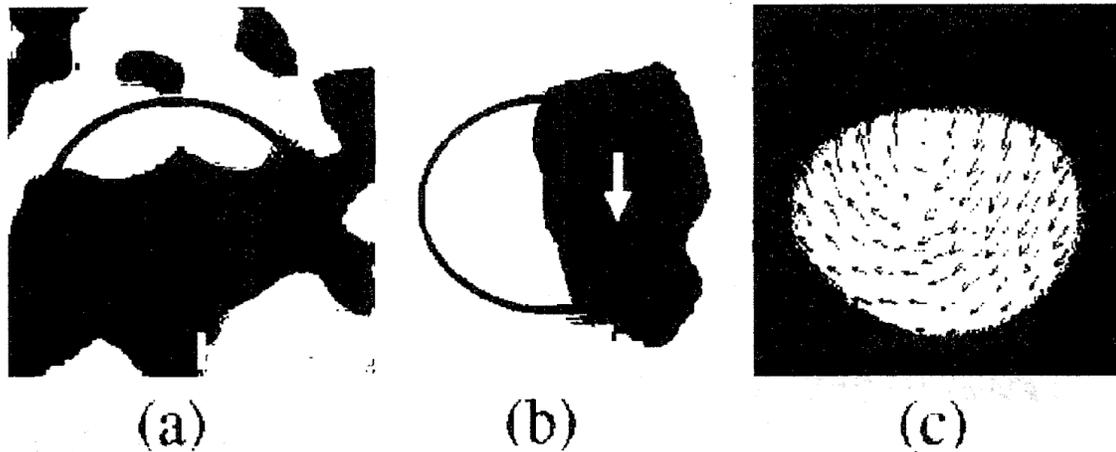


Figura 9. Imágenes de microscopía de rayos X de transmisión de barrido de los componentes  $M_x$  (a) y  $M_y$  (b) de la magnetización  $M$  se combinan en el campo vectorial (c), que representa la dirección de  $M$  en el plano de la capa libre de CoFe. (Referencia 52)

### 3.3 APLICACIONES STT

El método STT para manipular momentos magnéticos mediante una corriente eléctrica ofrece un control espacial y temporal sin precedentes de las distribuciones de espín y atrae una atención considerable debido a su aplicación potencial en una amplia gama de tecnologías. Se discute la perspectiva de STT para aplicaciones de comunicación de GHz y en tecnología de grabación magnética.

La aplicación STT en tecnologías de alta frecuencia se basa en la transferencia de espín precesión de espines inducida por. La sección anterior discutió cómo la precesión de la magnetización en los dispositivos GMR puede convertir una entrada de corriente continua en una salida de tensión alterna. La frecuencia de esta salida se puede sintonizar desde unos pocos GHz a  $> 100$  GHz cambiando el campo magnético aplicado y / o la corriente continua, lo que da como resultado un corriente oscilador controlado por para su uso en circuitos de microondas prácticos. Por tanto, el efecto STT en Las estructuras GMR proporcionan un medio para diseñar un oscilador de alta frecuencia a nanoescala alimentado y sintonizado por corriente continua. Tal oscilador podría tener frecuencia características de que abarquen más de 100 GHz y quizás en un rango de terahercios. Se demostraron anchos de línea tan estrechos como 2 megahercios (Referencia 55), lo que lleva a factores de calidad superiores a 18.000. Las aplicaciones potenciales para tales fuentes de alta frecuencia incluyen transceptores integrados para aplicaciones inalámbricas y cableadas, así como comunicaciones inalámbricas y cableadas de chip a chip y en chip.

Para este último, se propusieron circuitos lógicos con un bus de onda de espín (Referencia 56, 57) como una interfaz entre los circuitos electrónicos y los circuitos espintrónicos integrados. Aquí, las ondas de espín se utilizan para la transmisión y el procesamiento de información, y el efecto STY puede proporcionar un medio paraeficiente de ondas de espín a la generación nano escala.

En la tecnología de grabación magnética de alta velocidad y alta densidad, STT podría reemplazar el campo Oersted que se usa actualmente para escribir bits magnéticos en medios de almacenamiento (por ejemplo, memoria magnética de acceso aleatorio [MRAM]), lo que conduce a una memoria magnética más pequeña y rápida. La figura 10a muestra esquemáticamente una celda de bits de un MRAM convencional. El bit estado delse programa en "1" o "0" conmutando entre los estados paralelo y antiparalelo de un elemento de almacenamiento similar a GMR. El MRAM de primera generación utiliza magnético uniones de túnel(MT) como elementos de almacenamiento debido a sus relaciones de magnetorresistencia más altas y las limitaciones de adaptación de impedancia. Sin embargo, al escalar MRAM a pequeñas dimensiones, se espera que las mismas restricciones impulsen una transición de MTJ a elementos de almacenamiento de válvula giratoria completamente metálicos. El cambio entre los estados "1" y "0" (escritura) se basa en la inversión magnética de la capa libre del MTJ, lograda al pasar corrientes eléctricas por las líneas de "bit" y "escritura", que genera un campo magnético suficientemente fuerte en su intersección (es decir, para un MT dado)). Sin embargo, como el deterioro espacial de este campo de Oersted es bastante lento ( $\sim 1/r^2$ ), puede afectar a las celdas vecinas. Esto hace que el escalado de MRAM a pequeñas dimensiones sea cuestionable.

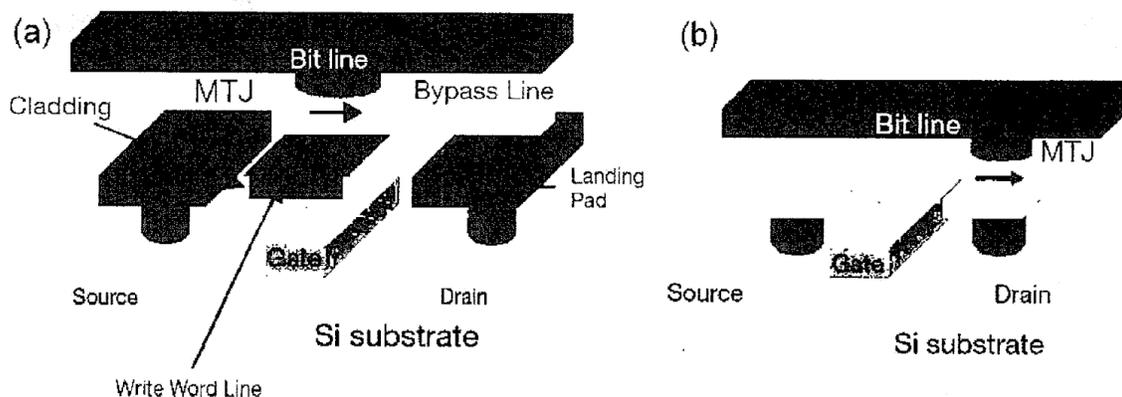


Figura 10. Celda MRAM convencional (a) versus celda STT MRAM (b) (Referencia 58)

STT MRAM (consulte la Figura 10b) elimina las limitaciones de escalabilidad. Aquí, la conmutación del momento magnético de la capa libre se logra mediante la conmutación STT cuando una corriente eléctrica de alta densidad se impulsa directamente a través del elemento de almacenamiento (MT) o válvula de giro).

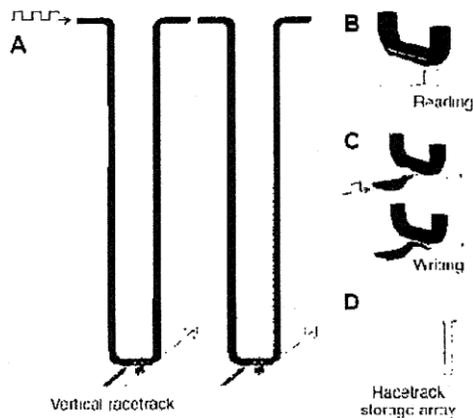
Por tanto, esta escritura se realiza a niveles de corriente elevados, mientras que la lectura (medida de la resistencia del elemento) se realiza a corrientes bajas. Dado que STT MRAM elimina la necesidad de líneas de "escritura" y "derivación", se puede realizar una memoria más compacta.

### **3.4 MOVIMIENTO IMPULSADO POR STT DE LAS PAREDES DE DOMINIO MAGNÉTICO**

Otra manifestación más de STT en ferromagnetos metálicos es un movimiento demagnético paredes de dominioatravesado por una corriente eléctrica. La predicción original del efecto se remonta a 1978, cuando Luc Berger predijo que una corriente de espín polarizado debería aplicar un par de torsión a una pared de dominio magnético (Referencia 59). En una serie de trabajos notables pero recientemente apreciados, Berger sentó lasteóricas (Referencia 59-62) y bases experimentales (Referencia 63-65) para el movimiento de la pared de dominio inducido por corriente (CIDWM), que ahora está documentado en materiales que van desde magnéticos semiconductores (Referencia 66) a superredes de anisotropía perpendicular (Referencia 67). Pero los materiales más ampliamente estudiados pormetálicos ahora han sido ferromagnetos de referencia (10, 11, 68-82), incluyendo Py ( $\text{Ni}_8\text{iFei}_9$ ), CoFe, y Co, a causa de sus décadas-a largo ubicuidad en la tecnología de almacenamiento magnético.

El efecto CIDWM puede entenderse cualitativamente sobre la base de los siguientes argumentos. Considere una corriente eléctrica que fluye entre dos dominios magnéticos (A y B) con magnetizaciones opuestas y, por lo tanto, atraviesa unamagnético de 180 grados pared de dominio. La situación es similar a la de una única interfaz N / F analizada en la Sección 3.1. Mientras que en el dominio A, los espines de los electrones de conducción se alinean preferentemente con el momento magnético de A. Una vez en el dominio B, los espines se invierten para alinearse con el momento de B. Al invertir los espines de los electrones, los momentos magnéticos en la pared del dominio experimentan un torque asociado con el cambio en el momento angular que se produce a partir de la rotación de espines de electrones. Esta spin-par de transferencia puede mover la pared de dominio en la dirección del flujo de electrones.

Se mover paredes de dominio magnético con propusocorriente como base para un Un nuevo tipo de memoria magnética llamada "pista de carreras" (Referencia 83). A diferencia de las unidades de disco duro (HDD) actuales, que dependen del movimiento giratorio de un disco para mover sus regiones magnéticas donde los datos se almacenan más allá de un cabezal de lectura, la memoria depista explota la idea de moverdatos almacenados magnéticamente electrónicamente.



La figura 11 ilustra el concepto de hipódromo. La pista de carreras es un nanoalambre ferromagnético, con datos codificados como un patrón demagnéticos a lo dominioslargo del cable. Pulsos de corriente vertical rocetrock hipódromo La matriz de storanc de puede mover todo el patrón a lo largo del Figura 11. Concepto de memoria del hipódromo. (Referencia 83) alambre. Las dos caricaturas de la Figura 11a muestran los patrones de la pared de dominio en la pista de carreras antes y después de que hayan pasado los elementos de lectura y escritura. La lectura se logra midiendo la resistencia de un elemento de unión de túnel conectado a la pista de carreras (Figura 11b); escritura (Figura 11c), mediante la aplicación de campos magnéticos locales; por ejemplo, los campos periféricos de una pared de dominio se movieron en otro nanoalambre. Si los nanocables en forma de U se colocan en posición normal al plano de un chip y se organizan en matrices de pistas de carreras de alta densidad (Figura 11d), la densidad de almacenamiento resultante puede ser mayor que la de los dispositivos de memoria de estado sólido como la memoria RAM flash y similar a los discos duros convencionales; pero la memoria de pista tendría un rendimiento de lectura / escritura mucho mayor que el HDD.

#### 4. Espintrónica de metales antiferromagnéticos

Recientemente, MacDonald y colaboradores (Referencia 84) predijeron que efectos similares a GMR y STT observados con ferromagnetos deberían ocurrir en sistemas multicapa donde los componentes ferromagnéticos (F) son reemplazados por antiferromagnetos (AFM). Primero, predijeron que la resistencia de una válvula de giro AFM, donde dos capas AFM están separadas por un espaciador N, podría depender de las orientaciones relativas de los momentos magnéticos en las dos capas AFM (antiferromagnético GMR = AGMR). En segundo lugar, predijeron que inyectar una densidad de corriente suficientemente fuerte en un AFM debería afectar su estado magnético a través del par de giro inducido por la corriente. Estos nuevos efectos de AFM podrían conducir a una nueva espintrónica totalmente AFM en la que se utilicen AFM en lugar de F.

Reemplazar metales F con metales AFM en un dispositivo espintrónico tiene varias ventajas.

Si bien se predijo que el AGMR de una válvula de giro AFM (Referencia 84) sería similar en magnitud al GMR en las válvulas de giro F estándar, la corriente crítica necesaria para alterar el orden magnético en los AFM puede ser menor que para Fs, en parte porque los pares de giro pueden actuar a través de todo el volumen de AFM. La estimación de la densidad de corriente necesaria  $j \approx 10^9 \text{ A/m}^2$  (Referencia 84) fue menor que la típica  $j \approx 10^{11} \text{ A/m}^2$  necesaria para invertir el orden magnético en multicapas F / N / F (Referencia 5-9, 40-43, 48-51). Finalmente, el uso de metales AFM en dispositivos espintrónicos en lugar de metales F eliminaría los efectos no deseados de la anisotropía de forma en la estabilidad magnética de elementos pequeños, ofreciendo así potencialmente un mejor control del estado magnético en sistemas a nanoescala y facilitando la fabricación de requisitos de. Siguiendo las predicciones originales de MacDonald y compañeros de trabajo (Referencia 84), Xu et al. (Referencia 85) calcularon el AGMR para un AFM / N / AFM / N = FeMn / Cu / FeMn / Cu multicapa simple, y Gomonay y Loktev (Referencia 86) proporcionaron evidencia adicional de evidencia que la corriente polarizada puede desestabilizar el estado de equilibrio de un AFM. Sin embargo, tenga en cuenta que todos los cálculos hasta la fecha son para muestras perfectas y dependen de la coherencia cuántica. Se sabe que el desorden puede reducir los efectos previstos. Por lo tanto, los experimentos son cruciales para ver si tales efectos son visibles en muestras reales.

#### **4.1 GMR ANTIFERROMAGNÉTICO**

Según el conocimiento del autor, el único estudio experimental que buscaba AGMR fue realizado por Wei et al. (Referencia 87). Han medido magnetorresistencias (MR) de corriente en plano (CIP) y de corriente perpendicular a plano (CPP) demagnéticas que multicapascontienen dos capas antiferromagnéticas separadas por una capa no magnética. Se predijo que una válvula de giro antiferromagnética, AFM / N / AFM, (Referencia 84) exhibiría AGMR similar a la GMR observada en válvulas de giro ferromagnéticas, F / N / F, que contienen dos capas ferromagnéticas separadas por una capa no magnética. Sin embargo, cuenta que los tenga encálculos (Referencia 84) asumieron el transporte balístico en muestras con capas e interfaces perfectas donde AGMR es una consecuencia de los efectos de interferencia cuántica. Por lo tanto, cualquier desorden que produzca dispersión difusiva y debilite la interferencia cuántica debilitará dicho AGMR.

En las tricapas F / N / F, la orientación relativa de las magnetizaciones de las dos F se controla mediante un campo magnético B aplicado externamente. Para lograr estados antiparalelos y paralelos bien definidos de las dos capas F, el momento de una F es a menudo "anclado", a través del acoplamiento de intercambio (polarización de intercambio) a una capa AFM adyacente (Referencia 88, 89), dejando el momento del otro libre para revertir en una B mucho más pequeña. En un simple de muestra AFM / IWAFM, simplemente aplicando un campo B No se espera que sea eficiente debido al débil efecto de los campos externos sobre los momentos magnéticos en los AFM. Para lograr un mejor control de los AFM, las válvulas de giro AFM / N / AFM se pueden intercalar entre dos capas F para dar F / AFM / N / AFM / F, con las dos capas AFM intercambiadas de manera diferente con sus respectivos vecinos F. La aplicación de un campo magnético para cambiar el orden magnético de las capas F también debería afectar el orden de las capas AFM. Además de las multicapas AFM / IWAFM y F / AFM / N / AFM / F, Wei et al. (Referencia 87) han estudiado una variedad de estructuras — F / AFM / N / AFM, AFM / F / N / AFM, F / AFM y capas F y AFM individuales — para aislar las observaciones de RM de interés de los posibles efectos espurios.

Para corrientes aplicadas pequeñas, ni las mediciones de RM estándar de corriente en el plano (CIP) en películas multicapa extendidas ni las mediciones de RM de CPP con contactos puntuales mostraron MR para muestras de todos los tipos. Para corrientes aplicadas más grandes, a veces se observaron pequeñas MR de CPP positivas (la resistencia es más alta en la saturación) en muestras con al menos una capa F, mientras que no se observó MR en muestras sin Fs. Estas observaciones sugieren que las multicapas de AFM / N / AFM pulverizadas no muestran AGMR, posiblemente debido al

transporte mayoritariamente difusivo en tales películas imperfectas. Las MR pequeñas observadas a corrientes más altas en películas con capas F pueden estar asociadas con la supresión en corrientes altas de la acumulación de espín inducida dentro y alrededor de Fs (Referencia 90). Aún se necesitan más estudios sobre películas de alta calidad para verificar cualquier posible existencia de AGMR en tales estructuras.

#### **4.2 STT ANTIFERROMAGNÉTICO**

Estimulado por los estudios teóricos en (Referencia 84-86), hasta ahora se han publicado cuatro búsquedas experimentales de los efectos de STT en AFM (Referencia 91-94), todas trabajando con válvulas de giro con polarización de intercambio (EBSV) de el formulario AFMJF1 / N / F2. Aquí, el AFM se encuentra fuera de la región GMR "activa" de las dos capas F y sirve principalmente para "fijar" la magnetización de la capa F2 adyacente a un campo de inversión (conmutación) más alto que el de la capa FI "libre", dejando el Capa de FI libre para rotar en un campo inferior. La fijación se produce calentando la muestra por encima de la temperatura de bloqueo del AFM, aplicando un campo magnético y luego enfriando a temperatura ambiente con el campo encendido o aplicando un campo magnético durante el crecimiento de la muestra. Wei y col. (Referencia 91) utilizó un punto de contacto para inyectar una alta densidad de corriente continua  $10^{12}$  A / m<sup>2</sup> aproximadamente CPP en una película de EBSV. Urazhdin y Anthony (Referencia 92) enviaron una densidad de corriente dc CPP  $j = 5 \times 10^{11}$  A / m<sup>2</sup> en EBSV nanopilares fabricados con litografía por haz de electrones. Tang y col. (Referencia 93) envió una densidad de corriente de corriente continua en el plano (CIP) -  $10^{10}$  A / m<sup>2</sup> en una película EBSV con un AFM metálico. Dal y col. (Referencia 94) envió una densidad de corriente CIP de ca  $j = 10^9$  Nm<sup>2</sup> en una película EBSV con un AFM aislante. En todos los estudios (Referencia 91-94), se encontró que una corriente de polarización suficientemente alta puede influir en la magnética inversión de la capa de FI "fijada". Como se sabe que la fijación (sesgo de intercambio) está asociada con momentos AFM interfaciales (Referencia 88, 89), esta observación puede tomarse como evidencia de los efectos de la corriente en el AFM predichos en (Referencia 84-86), dado que otros Pueden descartarse efectos espurios (por ejemplo, calentamiento Joule).

La observación original del efecto fue reportada por Wei et al, (Referencia 91), quienes midieron la magnetorresistencia de un punto de contacto a la película EBSV a temperatura ambiente (-295K) con corriente negativa fluyendo desde la punta de contacto hacia la película. La muestra geometría desde muestra en la Figura 12a. Un punto de contacto se

utiliza para inyectar una corriente continua en un N / F1 / N / F2 / AFM / N = Cu (50 o 100nm) / CoFe (3 o 10nm) / Cu (10nm) / CoFe (3 o 10nm) pulverizado. / FeMn (3 u 8 nm) JAu (5 nm) multicapa (o versiones invertidas de las mismas, es decir, Cu / FeMn / CoFe / Cu / CoFe / Au). La muestra se calienta a N 450K (por encima de la bloqueo temperatura dede FeMn) y luego se enfría en un campo magnético de 180 Oersteds para intercambiar: polarizar la capa "fijada" F2 a un campo magnético más alto que el necesario para revertir la capa "libre" F2 . La capa superior está cubierta por una capa de Au de 5 nm de espesor para protegerla de la contaminación atmosférica. El campo magnético H se aplica en el plano de las capas y en la dirección de la polarización del intercambio. El acoplamiento magnético entre las dos capas F debe ser insignificante, porque la capa N es lo suficientemente gruesa (10 nm) para eliminar el acoplamiento de intercambio, y las dos capas F son lo suficientemente anchas (- mm) para minimizar el acoplamiento dipolar. La capa inferior de N es Cu, lo suficientemente gruesa (50 o 100 nm) para aproximarse a un equipotencial, generando así un flujo de corriente de aproximadamente CPP a través del F1/N/F2/AFM EBSB

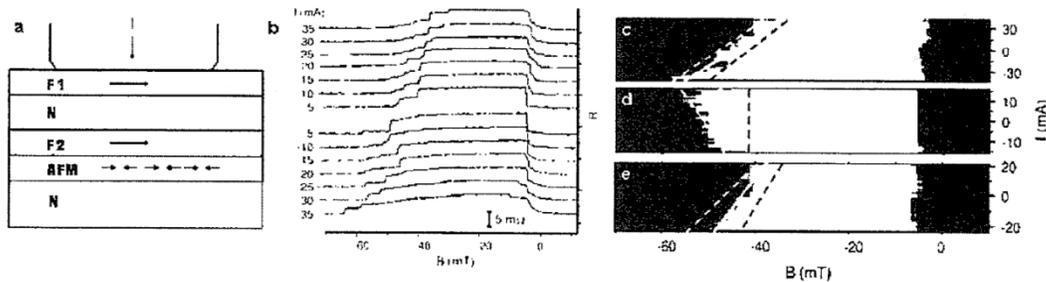


Figura 12. (a) Esquema del punto de contacto con la geometría de la muestra. Se omite una capa protectora de Au de 5 nm de espesor entre el punto de contacto y la multicapa. La capa inferior de N también es mucho más gruesa de lo que se muestra para ayudar a producir una corriente de casi CPP. (b) R (escala vertical) versus campo magnético aplicado B para una serie de corrientes I. Las curvas negras sólidas son curvas de histéresis que comienzan en B positivo grande y terminan en B negativo grande. Las curvas grises comienzan en B grande negativo y terminan en positivo B. En las curvas oscuras, la capa "libre", F1, cambia a -5 mT y la capa fija, F2, cambia en campos que van desde menos de -40 mT (I positivo grande) hasta aproximadamente -60 mT (negativo grande I). (ce) Gráficos en escala de grises de R versus B para diferentes valores de I. El blanco es el máximo R (estado antiparalelo) y el negro es el mínimo R (estado paralelo). Las líneas son ajustes lineales a los datos al 30 por ciento (blanco discontinuo), 50 por ciento (blanco continuo) y

70 por ciento (negro discontinuo) del máximo  $R$ . La muestra (c) es la muestra de (b), con la capa AFM en la inferior (más alejado del punto de contacto). La muestra (d) es similar a (c), excepto que está invertida, de modo que la capa de AFM está en la parte superior (la más cercana al punto de contacto). La muestra (e) se diferencia de (b) solo en que tiene dos capas F (B-nm) igualmente gruesas. (Referencia 91) La Figura 12b muestra curvas de magnetorresistencia para una serie de corrientes que apliqué a un punto de contacto con resistencia  $R = 0.92 \text{ sq}$ . Las curvas oscuras muestran barridos de positivo a campo negativo, y las curvas más claras muestran barridos de negativo a positivo. campo. Para este contacto,  $I = 30 \text{ mA}$  corresponde a  $j = 2 \times 10^8 \text{ A / cm}^2$ . Para curvas oscuras, un campo positivo grande  $+ B$  a lo largo de la dirección de fijación hace que los momentos de las capas F "libres" y "fijadas" apunten a lo largo de  $+ B$ , produciendo la resistencia mínima  $R_P$  en esta orientación paralela de las dos Fs. Reduciendo la magnitud de  $B$ , la capa F2 "libre" se invierte en una  $B$  negativa de pequeña magnitud, dando la máxima resistencia  $R_{AP}$  en configuración antiparalela. Finalmente, a  $B$  negativo de mayor magnitud rompe el bloqueo de polarización de intercambio de la capa de FI "fijada", y su momento gira a lo largo de  $-B$ , devolviendo la muestra a  $R_P$ . Para curvas más ligeras de barridos hacia atrás (Figura 12b), la resistencia medida sigue estos cambios en orden inverso.

Centrándonos en las curvas oscuras, vemos que el campo de conmutación de la capa libre FI es esencialmente independiente de la magnitud de  $I$  y muestra un pequeño ensanchamiento. Por el contrario, el campo de conmutación de la capa fija F2 se amplía significativamente a medida que aumenta la magnitud de  $I$ , y el punto medio de la conmutación también se desplaza con  $I$ , aumentando para  $- I$  y disminuyendo para  $+ I$ . Se observan comportamientos similares también en las curvas más claras. . Cambios opuestos para  $+ I$  y  $- I$  indican que estos cambios no pueden deberse al calentamiento Joule, que debería provocar cambios en la misma dirección para ambas direcciones de  $I$ . Pero el calentamiento Joule podría contribuir a la ampliación de las transiciones de conmutación. Los cambios de las curvas oscuras se especifican más claramente en la Figura 12c, que muestra gráficos en escala de grises de las alturas de las curvas en la Figura 12b, donde el blanco representa el estado antiparalelo de máximo.

resistencia, y negro el estado paralelo de mínima resistencia. Los datos de tres contactos representativos (de 29) en tres muestras diferentes muestran que el comportamiento de interés no se limita a una sola muestra o contacto, y que generalmente se obtienen resultados similares para ajustes de línea recta al 30 por ciento (líneas blancas

discontinuas), 50 por ciento (líneas blancas continuas) y 70 por ciento (líneas negras continuas) del cambio máximo en  $R$ . La muestra en la Figura 12d es un contacto con  $R = 1.6 c$  con una versión invertida de la muestra en las Figuras 12b y c, entonces que las "direcciones" de las corrientes se invierten. La muestra de la Figura 12e tiene capas de igual espesor  $F1 = F2 = 3$  nm. Las tres muestras muestran las mismas características, es decir, los electrones que pasan a través de F2 a la capa de AFM mejoran la fijación, y los electrones que pasan a través de la capa de AFM a F2 la reducen. Similar al caso de AFM = CoFe, se encontró que una densidad de corriente negativa  $-1012$  A / m<sup>2</sup> inyectada a través de F = CoFe en una interfaz AFM = IrMn / CoFe (Referencia 95, 96) aumenta el sesgo de intercambio, mientras que una corriente positiva lo disminuyó.

Wei y col. (Referencia 91) propuso la siguiente explicación cualitativa para estos cambios asimétricos en el campo de conmutación (polarización de intercambio) con la corriente. Cerca del campo de conmutación, la metaestabilidad de F2 opuesta a la orientación del campo se debe casi por completo a intercambiar interacciones con momentos no compensados en la capa superficial del antiferromagnet. Algunos de estos espines están fijados, lo que induce una barrera de energía para la inversión del espín de la capa ferromagnética (Referencia 88, 89). Los electrones que fluyen desde F2 hacia AFM inducen pares en momentos en la matriz AFM, alterando su configuración magnética (Referencia 84). Estos pares STT tienden a favorecer la alineación paralela de momentos en la interfaz F2 / AFM y, por lo tanto, tenderán a aumentar el campo de polarización de intercambio. Los electrones que fluyen en la dirección opuesta tenderán a tener el efecto contrario. El observado las variaciones en la polarización de intercambio mediadas por una corriente eléctrica pueden, por tanto, tomarse como una buena evidencia del efecto STT en AFM. Sin embargo, tales medidas de transporte no distinguen entre los efectos de la corriente en el AFM a granel y aquellos en los momentos AFM interfaciales, y se necesitan técnicas más elaboradas para obtener una descripción detallada comprensión del fenómeno.

## **5. Resumen y conclusiones**

La industria de los semiconductores se ha distinguido por una tendencia a largo plazo conocida como Ley de Moore (Referencia 97) que prevé un aumento exponencial en la densidad del transistor en un chip, duplicándose aproximadamente cada 2 años. Continuando a este ritmo, la densidad de transistores alcanzará  $10^{13}$  cm<sup>-2</sup> para 2035, lo que a velocidades de reloj de  $10$  GHz daría como resultado  $40$  MW / cm<sup>2</sup> de potencia

disipada en un chip. A menos que la disipación de energía de dieciséis La conmutación de transistores se puede reducir drásticamente, la carga térmica asociada con 40 MW / cm<sup>2</sup> excederá el de una boquilla de cohete. El fallo de la gestión térmica en un chip podría poner fin al progreso continuo de la industria de los semiconductores mucho antes de 2035.

La hoja de ruta tecnológica internacional para semiconductores (<http://www.itrs.net>) ha denominado a este colapso inminente el "muro de ladrillo rojo", donde "rojo" indica que no existen "soluciones fabricables conocidas" (de confianza razonable) para la ampliación continua en algún aspecto de la tecnología de semiconductores.

El escenario anterior motiva la búsqueda de dispositivos de procesamiento de señales que se disipen muy poca energía cuando cambian. La tecnología espintrónica emergente podría ofrecer tales dispositivos donde la información se transporta por giro, a diferencia de los transistores CMOS, donde se transporta mediante carga, ya que el espín tiene una ventaja inherente sobre la carga en lo que respecta a la disipación de energía. Por lo tanto, si se puede encontrar una manera confiable de controlar y manipular espines, los dispositivos espintrónicos podrían ofrecer mayores velocidades de procesamiento de datos, menor consumo de electricidad y muchas otras ventajas sobre los chips convencionales, tal vez incluida la capacidad de realizar cálculos cuánticos radicalmente nuevos.

Un dispositivo espintrónico requiere métodos eficientes para generar, conducir, procesar y detectar señales codificadas por espín. Hemos revisado la física y las aplicaciones emergentes de dos fenómenos espintrónicos principales, magnetorresistencia gigante y torque de transferencia de espín, que proporcionan medios para detectar (GMR) y manipular (STT) las señales de espín. GMR ya ha generado un cambio tecnológico importante en la industria del almacenamiento de información con el uso de sensores GMR y cabezales de lectura y, junto con la magnetorresistencia de túnel (TMR), se espera que continúe dominando la detección de señales codificadas por espín. STT es un desarrollo más reciente en espintrónica que proporciona un medio eficiente de controlando y manipulando distribuciones de espín en la escala de longitud nanométrica y la escala de tiempo de picosegundos, posicionando así STT como el método de elección para el procesamiento rápido de señales de espín en nanodispositivos.

¿Cuál es el futuro de las aplicaciones espintrónicas? Se han propuesto varios dispositivos espintrónicos nuevos basados en GMR y STT. Estos incluyen osciladores, fuentes y detectores de alta frecuencia (GHz), así como sensores de campo magnético, por ejemplo,

en memorias no volátiles como pistas de carreras y memoria de acceso aleatorio magnético STT (STT-MRAM). Sin embargo, queda mucho trabajo fundamental por hacer antes de que veamos aplicaciones de estos dispositivos. Para la industria de la memoria, el desarrollo de estas aplicaciones espintrónicas puede conducir a una memoria universal que combinaría los beneficios de costos de DRAM, velocidad de SRAM y no volatilidad de la memoria RAM flash. Potencialmente, todas las operaciones lógicas en un chip podrían llevarse a cabo manipulando giros en sistemas metálicos en lugar de manipulando cargas en transistores semiconductores, como en microchips convencionales.

Además, estas operaciones podrían combinarse en un chip con una memoria universal. Esto daría como resultado una nueva electrónica, computadoras, etc., escalables y resistentes a la radiación. La resistencia a la radiación sería de particular interés para las aplicaciones aeroespaciales porque se sabe que la radiación en el espacio daña gravemente la electrónica convencional al acumular una carga destructiva en los transistores. Largos viajes espaciales que expondrían la electrónica a bordo a años de radiación se beneficiaría de la resistencia a la radiación y consumo de energía reducido (por ejemplo, como una memoria no volátil que puede conservar la información almacenada incluso cuando no están alimentados) de dispositivos espintrónicos metálicos. De manera más general, el impacto de la reducción del consumo de energía en los dispositivos electrónicos es difícil de sobreestimar, ya que confiamos en dichos dispositivos en casi todos los aspectos de nuestra vida diaria.

Finalmente, la espintrónica metálica y sus aplicaciones discutidas en este informe están todas basadas en fenómenos físicos ya bien establecidos como GMR y STT. Dado que el campo de la espintrónica se encuentra todavía en un estado relativo de infancia, es probable que en el futuro se descubran fenómenos nuevos y más emocionantes.

## 6. Referencias

- (1) Baibich, MN y col., Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988).
- (2) Binasch, G. y col., Phys. Rev. B 39, 4828 (1989).
- (3) Slonczewski, JC, 3. Magn. Magn. Mater. 159, LI (1996).
- (4) Berger, L., J. Appl. Phys. 81, 4880 (1997).
- (5) Tsoi, M. y col., Phys. Rev. Lett. 80, 4281 (1998).
- (6) Myers, EB y col., Science 285, 867 (1999).
- (7) Sun, JZ, J. Magn. Magn. Mater. 202, 157 (1999).

- (8) Wegrowe, J.-E. y col., *Europhys. Letón.* 45, 626 (1999).
- (9) Tsoi, M. y col., *Nature* 406, 46 (2000).
- (10) Beach, GSD y col., *Phys. Rev. Lett.* 97, 057203 (2006).
- (11) Beach, GSD y col., *Phys. Rev. Lett.* 102, 067201 (2009).
- (12) Fert, A., Bruno, P., en *Estructuras magnéticas ultrafinas II: Introducción a las propiedades electrónicas, magnéticas y estructurales*, ed. por JAC Bld y B. Heinrich (Berlín: Springer, 1994), p.82.
- (13) Levy, PM, en *Solid State Physics*, ed. por H. Ehrenreich y D. Turnbull, vol. 47 (Boston, Londres: Acad. Press, 1994), p. 367.
- (14) Dieny, B., *J. Magn. revista Eстера.* 136, 335 (1994).
- (15) Gijs, MAM, Bauer, GEW, *Adv. Phys.* 46, 285 (1997)
- (16) Ansermet, 3.- Ph., *J. Phys. : Cond. Eстера.* 10, 6027 (1998).
- (17) Bass, J., Pratt, WP, Jr., *J. Magn. Magn. Eстера.* 200, 274 (1999).
- (18) Fert, A., Piraux, L., *J. Magri. Magn, Mat.* 200, 338 (1999).
- (19) Gijs, MAM, en *Magnéticos multicapas y magnetorresistencia gigante: Fundamentos y aplicaciones industriales*, ed. por U. Hartmann (Berlín: Springer, 2000), p. 130.
- (20) Coehoorn, P., in *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance: Fundamentals and Industrial Applications*, ed. by U. Hartmann (Berlin: Springer, 2000), p.65.
- (21) Barthelemy, A., Fert, A., and Petroff, F., in *Handbook of Magnetic Materials*, edited by KHJ Buschow (Amsterdam: Elsevier, 1999), p.1
- (22) Tsymbal, EY, Pettifor, DG, in *Solid State Physics*, ed. by H. Ehrenreich and F. Spaepen, Vol. 56 (Academic Press, 2001) pp.113-237.
- (23) Ashcroft, W., Mermin, D., *Solid State Physics* (Saunders College Publishing, Forth Worth, 1976).
- (24) Ciureanu, P., in *Thin Film Resistance Sensors*, ed. by P. Ciureanu, S. Middelhoek (Institute of Physics Publishing, Bristol, 1992), p. 253.
- (25) *Electrocrystallization*, ed. by R. Weil, RG Barradas (The Electrochemical Society, Pennington, 1981).
- (26) Lashmore, DS, Dariel, MP, *J. Electrochem. Soc.* 135, 1218 (1988).
- (27) Ohring, M., *The Materials Science of Thin Films* (Academic, Boston, 1992).
- (28) Slaughter, JM, Pratt, WP, Jr., and Schroeder, PA, *Rev. Sci. Instrum.*
- (29) Parkin, SSP, More, N., and Roche, KP, *Phys. Rev. Lett.* 64, 2304 (1990).

- (30) Parkin, SSP, Bhadra, R., and Roche, KP, Phys. Rev. Lett. 66, 2152 (1991).
- (31) Fert, A., Campbell, IA, J. de Physique 32, C1-46 (1971).
- (32) Mott, NF, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 153, 699 (1936), and 156, 368 (1936), and Adv. Phys. 13, 325 (1964).
- (33) Pratt, WP, Jr., et al., Phys. Rev. Lett. 66, 3060 (1991).
- (34) Dieny, B., et al. J. Appl. Phys. 69, 4774 (1991).
- (35) Piraux, L., et al., Appl. Phys. Lett. 65, 2484 (1994).
- (36) Blonde', A., Meier, JP, Doudin, B., Ansermet, 3.-Ph., Appl. Phys. Lett.
- (37) Tsoi, M., Jansen, AGM, Bass, J., J. Appl. Phys. 81, 5530 (1997)
- (38) Smith, C., Proc. UK Conf. for Sensors, Test and Measurement Technology, Birmingham, England, Jan. 22-23, 1997.
- (39) Daughton, JM, et al., IEEE Trans. Magn. 30, 4608 (1994).
- (40) Ji, Y., Chien, C. L, Stiles, MD, Phys. Rev. Lett. 90, 106601 (2003).
- (41) Rippard, WH, Pufall, MR, Kaka, S., Russek, SE, Silva, TJ, Phys. Rev. Lett. 92, 27201 (2004)
- (42) Katine, JA, Albert, FJ, Buhrman, RA, Myers, EB, Ralph, DC, Phys. Rev. Lett. 84, 3149 (2000).
- (43) Grollier, J., et al., Appl. Phys. Lett. 78, 3663 (2001).
- (44) Liu, Y., Zhang, Z., Wang, J., Freitas, PP, Martins, JL, J. Appl. Phys. 93, 8385 (2003)
- (45) Moriya, R., Hamaya, K., Oiwa, A., Munekata, H., Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 - Lett. Express Lett. 43, L825 (2004)
- (46) Dieny, B., et al., Phys.Rev.B 43, 1297 (1991).
- (47) Waintal, X., Myers, EB, Brouwer, PW, Ralph, DC, Phys. Rev. 13 62, 12317
- (48) Braganca, PM, et al., Appl. Phys. Lett. 87, 112507 (2005).
- (49) Rippard, WH, et al., Phys. Rev. Lett. 95, 067203 (2005).
- (50) Kiselev, SI, et al., Nature 425, 380 (2003).

- (51) Krivorotov, IN, et al., Science 307, 228-231 (2005).
- (52) Acremann, Y., et al., Phys. Rev. Lett. 96, 217202 (2006).
- (53) Kilcoyne, ALD, et al., J. Synchrotron Radiat. 10, 125 (2003).
- (54) StOhr, J., et al., Science 259, 658 (1993).
- (55) Rippard, WH, Pufall, MR, Kaka, S., Silva, TJ, Russek, SE, Phys. Rev. B 70, 100406 (2004).
- (56) Khitun, A., Nikonov, DE, Bao, M., Galatsis, K., Wang, KL, Nanotechnology 18, 465202 (2007).
- (57) Schneider, T., et al., Appl. Phys. Lett. 92, 022505 (2008).
- (58) Driskill-Smith, AAG, Huai, Y., Future Fab Intl. 23, 28 (2007).
- (59) Berger, L., J. Appl. Phys. 49, 2156 (1978).
- (60) Berger, L., 3. Appl. Phys. 55, 1954 (1984).
- (61) Berger, L., Phys. Rev. B 33, 1572 (1986).
- (62) Berger, L., J. Appl. Phys, 63, 1663 (1988).
- (63) Freitas, PP, Berger, L., J. Appl. Phys. 57, 1266 (1985).
- (64) Hung, C.-Y., Berger, L., J. Appl. Phys. 63, 4276 (1988).
- (65) Hung, C.-Y., Berger, L., Shih, CY, 3. Appl. Phys. 67, 5941 (1990).
- (66) Yamanouchi, M., Chiba, D., Matsukura, F., Ohno, H., Nature 428, 539 (2004).
- (67) Ravelosona, D., et al., Phys. Rev. Lett. 95, 117203 (2005).
- (68) Tsoi, M., Fontana, RE, Parkin, SSP, Appl. Phys. Lett. 83, 2617 (2003).
- (69) Grollier, J., et al., Appl. Phys. Lett. 83, 509 (2003).
- (70) Beach, GSD, Nistor, C., Knutson, C., Tsoi, M., Erskine, JL, Nat. Mater. 4, 741 (2005).
- (71) Beach, GSD, Knutson, C., Tsoi, M., Erskine, JL, J. Magn. Magn. Mater. 310, 2038 (2007).
- (72) Hayashi, M., et al., Phys. Rev. Lett, 96, 207205 (2006).
- (73) Hayashi, M., et al., Nat. Phys. 3, 21 (2007).
- (74) Klaui, M., et al., Appl. Phys. Lett. 83, 105 (2003).

- (75) Kimura, T., Otani, Y., Yagi, I., Tsukagoshi, K., Aoyagi, Y., 3. Appl. Phys. 94, 7226 (2003).
- (76) Vernier, N., Allwood, DA, Atkinson, D., Cooke, MD, Cowburn, RP, Europhys. Lett. 65, 526 (2004).
- (77) Laufenberg, M., et al., Phys. Rev. Lett. 97, 046602 (2006).
- (78) Thomas, L., et al., Nature 443, 197 (2006).
- (79) Yamaguchi, A., et al., Phys. Rev. Lett. 92, 077205 (2004).
- (80) Yamaguchi, A., et al., Phys. Rev. Lett. 96, 179904 (2006).
- (81) Klaui, M., et al., Phys. Rev. Lett. 95, 026601 (2005).
- (82) Meier, G., et al., Phys. Rev. Lett. 98, 187202 (2007).
- (83) Parkin, SSP, Hayashi, M., Thomas, L., Science 320, 190 (2008).
- (84) NUijez, AS, et al., Phys. Rev. B 73, 214426 (2006).
- (85) Ku, Y., Wang, S., Xia, K., Phys. Rev. Lett. 100, 226602 (2008)
- (86) Gomonay, H., Loktev, V., Low Temp. Phys. 34, 198 (2008).
- (87) Wei, Z., Sharma, A., Bass, J., Tsoi, M., J. Appl. Phys. 105, 07D113 (2009).
- (88) Meiklejohn, WH, Bean, CP, Phys. Rev. 102, 1413 (1956).
- (89) Stahr, J., Siegmann, HC, Magnetism: from fundamentals to nanoscale dynamics (Springer Series in Solid-State Sciences, Vol. 152, Springer, 2006).
- (90) Urazhdin, S., Chien, CL, Guslienko, KY, Novozhilova, L., Phys. Rev. B 73, 054416 (2006).
- (91) Wei, Z., et al., Phys. Rev. Lett. 98, 116603 (2007).
- (92) Urazhdin, S., Anthony, N., Phys. Rev. Lett. 99, 046602 (2007).
- (93) Tang, X.-L., Zhang, H.-W., Su, H., Zhong, Z.-Y., Jing, Y.-L., Appl. Phys. Lett. 91, 122504 (2007).
- (94) Dal, NV, et al., Phys. Rev. B 77, 132406 (2008).
- (95) Basset, J., Sharma, A., Wei, Z., Bass, J., Tsoi, M., Proc. SPIE 7036, 703605 (2008).
- (96) Wei, Z., Basset, J., Sharma, A., Bass, J., Tsoi, M., J. Appl. Phys. 105, 07D108 (2009).

(97) Moore, GE, Electronics Magazine (McGraw Hill, New York, 1965).

6 de abril de 2010

ICOD: 1 de diciembre de 2009

DIA-08-1004-006

**Defensa**

**Inteligencia**

**Referencia**

**Documento**

Soporte para amenazas de adquisición

Metamateriales para la industria aeroespacial

Aplicaciones

Metamateriales para aplicaciones aeroespaciales

Preparado por:

(b) (3): 10 USC 424

Autor de la Agencia de Inteligencia de Defensa:

Nota administrativa

ADVERTENCIA DE COPYRIGHT: No se autoriza una mayor difusión de las fotografías de esta publicación.

Este producto es uno de una serie de informes de tecnología avanzada producidos en el año fiscal 2009

dependiente de la Agencia de Inteligencia de Defensa, 1 Advanced Aerospace

Programa de aplicaciones de sistemas de armas (AAWSA). Los comentarios o preguntas relacionados con este documento deben dirigirse a j (b) (3): 10 USC 424; (b) (6) I., Programa AAWSA

Gerente, Agencia de Inteligencia de Defensa, ATTN: (b) (3) 10 USC 424 Bldg 6000,  
Washington, DC 20340-5100.

## Contenido

Definición de metamateriales .....	1
Aplicaciones a la obtención de imágenes por subdifracción: superlentes e hiperlentes ... ..	6
Aplicaciones a circuitos y miniaturización de 1Naveguide: desaceleración y manipulación de pulsos electromagnéticos (EMP) utilizando metamateriales avanzados ..	16
Metamateriales para la recolección de energía .....	20
Metamateriales quirales no lineales no recíprocos: para desarrollar nuevos aisladores ópticos y espejos de microondas "unidireccionales" .....	27
Metamateriales intercambiables ajustables .....	30
Resumen y conclusiones .....	31
Referencias .....	31

## Cifras

Figura 1. Ejemplo de un componente metamaterial: Diseño del resonador magnético de anillo partido (SRR) .....	2
Figura 2. Ejemplo de otro componente metamaterial: resonador de anillo eléctrico. (ERR) ...	2
Figura 3. Geometría de las celdas unitarias de metamateriales planas originales (0E1-0E6) y sus.Complementos (CE1-CE6) .....	3

Figura 4. Metamateriales ópticos recientes para longitud de onda y Material de permisividad indefinida de infrarrojo medio ... .. 5	
Figura 5. Esquema de la súper lente con $n = -1$ índice de refracción correspondiente.a (Rodeado por vacío ..... 7	
Figura 6. Esquema de la súper lente basada en SIC que genera imágenes de sublongitud de onda. Agujeros enterrados debajo de la capa de SiO <sub>2</sub> ..... 8	
Figura 7. Conceptos teóricos (panel izquierdo) e implementación experimental (panel derecho) de un hiperlente óptico capaz de ampliar objetos de sub-difracción a objetos observables (más grandes que el tamaño ..... 9	
Figura 8. Hyperlens basado en una matriz convergente de alambres metálicos ... .10	
Figura 9. Superlente de campo lejano (FSL) basado en una permisividad indefinida. Metamaterial colocado entre el objeto y la rejilla de liberación de imagen..... .12	
Figura 10. Holografía tomográfica de múltiples haces de múltiples detectores de objetos de sub-longitud de onda que utilizan un medio de permisividad indefinida (IPM) 12	
Figura 11. Primera demostración experimental de propagación de ondas de subdifracción en el medio de permisividad indefinida (IPM) 13	
Figura 12. Esquema para medición interferométrica de 2 haces / 2 detectores y simulación numérica. .... .14	
Figura 13. Configuración experimental para interferometría de 2 haces / 2 detectores. Medición en el laboratorio y resultados experimentales preliminares ..... 15	
Figura 14. Esquema de la compresión de pulsos en plasma magnetizado ..16	
Figura 15. Arco iris atrapado: una guía de ondas con un núcleo de índice negativo puede detener la luz .....17	
Figura 16. "Molécula plasmónica" que exhibe EIT .....18	
Figura 17. Verdadero metamaterial multicapa con una celda unitaria que se muestra en la Figura 16: Antena radiativa (una sola tira de metal) acoplada a una antena oscura (dos barras de metal perpendiculares) .....19	
Figura 18. Absorbedor de microondas de banda estrecha "perfecto" .....20	
Figura 19. Absorbedor plasmónico de gran angular basado en índice negativo. metamaterial..21	

Figura 20. Diseño específico de un absorbente plasmónico de gran angular basado en un negativo que metamaterial de índice opera a $\lambda = 1550$ nm .....	21
Figura 21. Reflectividad experimental versus longitud de onda y gráfica teórica de contornos reflectividad .....	22
Figura 22. Intentos preliminares para diseñar un mejor utilizando complementarios absorbedor metamateriales (C-MM en forma de U) .....	23
Figura 23. Ingeniería del coeficiente de reflectividad complejo utilizando el concepto de metaespejo. ....	26
Figura 24. Ejemplo de un metamaterial quiral genérico .....	28
Figura 25. Ejemplo de irreversibilidad temporal de la propagación de la luz dentro del núcleo de fibra trenzada .....	29
Figura 26. Propiedades de THz de un resonador eléctrico de anillo partido .....	31

## Definición de metamateriales

Un metamaterial se define como un medio artificial cuyas propiedades (mecánicas, ópticas, magnéticas u otras) no se pueden encontrar en materiales naturales. El énfasis de este estudio estará en los metamateriales electromagnéticos y ópticos. Dichos metamateriales pueden exhibir propiedades bastante extremas, como el índice de refracción negativo, lo que implica que tanto la permitividad eléctrica como la permeabilidad magnética deben ser negativas.

$<0 \mu <0$  (Referencia 1). Estos metamateriales solían llamarse "zurdos"

debido a la inusual relación de fase entre los campos eléctrico y magnético. Específicamente, en la mayoría de los medios (índice positivo, incluido el vacío) se usa la regla de la mano derecha para definir la relación  $\mathbf{h} = \mathbf{p} \times \mathbf{A}$  entre el campo eléctrico (campo magnético  $\mathbf{A}$ ) y el número de onda de propagación ( $\mathbf{A}$ ). La base física de la regla manual es que la dirección de propagación de energía definida por el vector de Poynting  $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$  y la dirección de la velocidad de fase (definida por el número de onda  $\mathbf{k}$ ) deben coincidir. Eso no es cierto para los metamateriales de índice negativo donde las dos direcciones son opuestas, por lo tanto, la relación zurda debe ser válida para los tres vectores. Sin embargo, la designación "zurdo" no resistió la prueba del tiempo porque estaba causando confusión y creando alusiones irrelevantes a estructuras helicoidales (también conocidas como quirales) . Aunque las estructuras quirales pueden exhibir un comportamiento de índice negativo (Referencia 2), la quiralidad no es necesaria.

Un metamaterial típico consiste en elementos resonantes como los resonadores de anillo dividido (SRR). Un ejemplo de un SRR es se muestra en la Figura 1. La función principal del SRR es permitir una fuerte respuesta magnética de la estructura. Existe una fórmula empírica simple para la permeabilidad magnética de un metamaterial compuesto por los SRR:

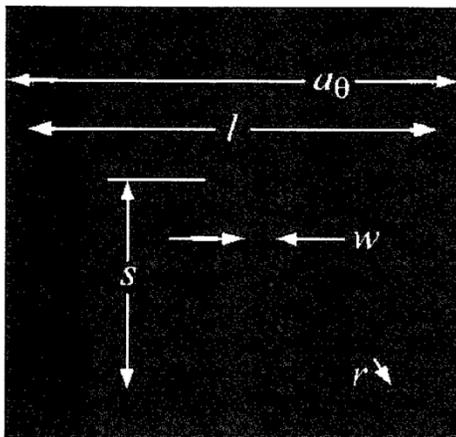
$$\mu = 1 - \frac{F \omega_M^2}{\omega^2 - \omega_M^2} < 0,$$

donde  $\omega_m$  es la frecuencia de resonancia del SRR y  $F$  es proporcional al volumen factor de llenado de los SRR. Cabe destacar que los SRR están diseñados de tal manera que tienen una gran capacitancia. Como resultado, la frecuencia de resonancia de un SRR es pequeña (es decir, la celda que contiene el SRR tiene una longitud de onda muy inferior). En el ejemplo que se muestra en la Figura 1

(tomado de la Referencia 6), la celda unitaria operada a  $42z = 10$  GHz es  $\lambda / 10$ . De hecho, el tamaño de sub-longitud de onda del metamaterial es lo que los distingue de sus primos cercanos: los cristales fotónicos. Al diseñar correctamente los SRR magnéticos, es posible

lograr cualquier valor de  $p$  para cualquier frecuencia dada. Sin embargo, existen desafíos especiales para las ópticas

embargo, estructuras, como se explicará a continuación.

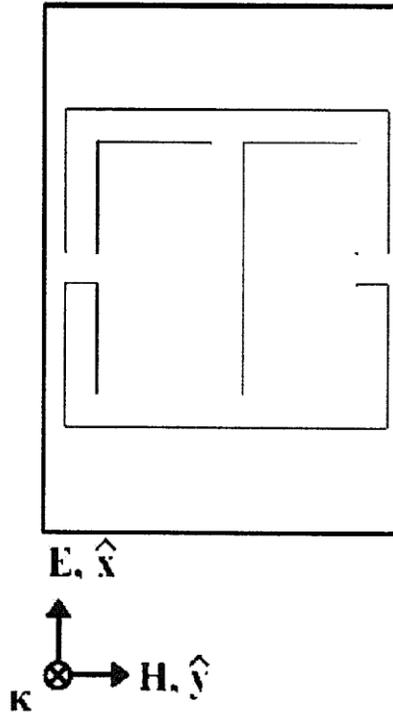


cyl.	$r$	$s$	$\mu_r$
1	0.260	1.654	0.003
2	0.254	1.677	0.023
3	0.245	1.718	0.052
4	0.230	1.771	0.085
5	0.208	1.825	0.120
6	0.190	1.886	0.154
7	0.173	1.951	0.188
8	0.148	2.027	0.220
9	0.129	2.110	0.250
10	0.116	2.199	0.279

...

en el plano los parámetros de celosía son  $a_y = a_x = 10/3$  mm. El anillo es cuadrado, con una longitud de borde  $l = 3$  mm y un ancho de trazo  $w = 0,2$  mm. El sustrato es Duroid 5670 de 381  $\mu$ m de espesor ( $E = 2,33$ ,  $\tan \delta = 0,0012$  a 10 GHz, donde  $\tan \delta$  es la pérdida tangente de). La película de Cu, a partir de la cual se modelan los SRR, tiene un grosor de 17  $\mu$ m. Los parámetros  $\mu_r$  se dan en la tabla junto con el valor asociado de  $p$ . (Referencia 6) Las propiedades eléctricas de los metamateriales se pueden controlar de

manera similar. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de un metamaterial plano



eléctricamente activo.

Figura 2. Ejemplo de otro componente metamaterial: eléctrico resonador de anillo (ERR). Este componente proporciona una respuesta eléctrica resonante sintonizable al campo electromagnético incidente y se puede utilizar para diseñar la dieléctrica dependiente de la frecuencia permitividad  $\epsilon(\omega)$ . Posible aplicación: THz y absorbentes de microondas. (Referencia 7)

## E. 2

La respuesta eléctrica de tal (o similar) metamaterial está dada por

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_R^2 + i\omega\gamma}$$

donde  $\omega_R$  es la frecuencia de resonancia y  $\gamma$  es el coeficiente de pérdida.

Los metamateriales de índice negativo no son de ninguna manera los únicos metamateriales potencialmente útiles. Varios conceptos nuevos como metamateriales de permisión

indefinido (IPM) (referencias 3, 4) y metamateriales Epsilon-Near-Zero (ENZ) (referencia 5) han recientemente surgido y han encontrado algunas aplicaciones interesantes que se revisarán a continuación. Los IPM se pueden usar como filtros espaciales ultracompactos (tanto de paso alto como de paso bajo), mientras que los metamateriales ENR se pueden usar para hacer guías de onda de sub-longitud de onda capaces de acoplar cerca del 100 por ciento de la radiación incidente (Referencia 8), también como dirigirlo alrededor de cerradas curvas con pérdidas de flexión insignificantes. Sin embargo otra clase de metamateriales planos, ha surgido recientemente los metamateriales complementarios (CMM) (Referencia 7). En lugar de utilizar estructuras metálicas depositadas sobre un sustrato (panel izquierdo de la Figura 3), las MMC consisten en hendiduras en la pantalla metálica continua (panel derecho de la Figura 3). La forma de las hendiduras coincide con la de los propios materiales. Estos metamateriales complementarios se han utilizado recientemente para hacer guías de ondas  $\epsilon$  cercanas a cero (Referencia 8).

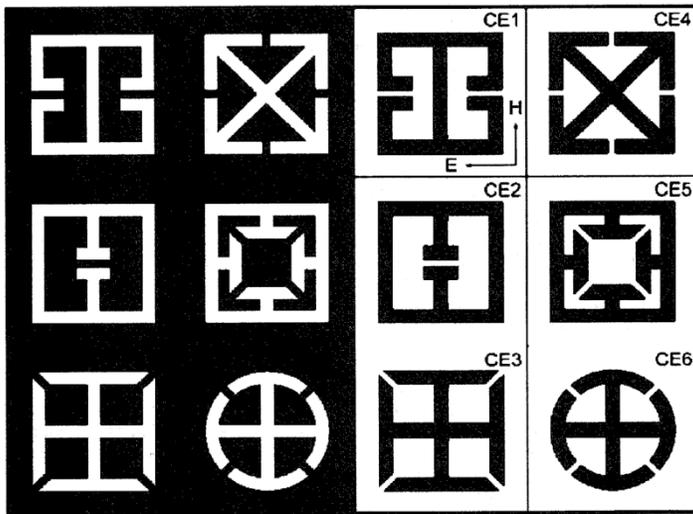


Figura 3. Geometría de las células unitarias de metamateriales planos originales (0E1-0E6) y sus complementos (CE1-CE6). La polarización de la radiación electromagnética normalmente incidente se configura como se muestra en 0E1 y CE1 para los metamateriales originales y complementarios, respectivamente. (Referencia 9)

En general, los metamateriales ofrecen una nueva forma de diseñar estructuras electromagnéticas con valores arbitrarios de tensores de permitividad / permeabilidad, así como otros parámetros (como el coeficiente de bi-anisotropía). En muchos casos, los metamateriales nos permiten minimizar considerablemente los tamaños de resonadores, líneas de transmisión, etc. Tal miniaturización es posible debido a la naturaleza resonante de las celdas unitarias individuales.

Específicamente, las estructuras mostradas en la Figura 3 tienen alta capacitancia; por lo tanto, sus tamaños individuales son muy inferiores a la longitud de onda. Eso permite la disposición dentro de sub-unidades de longitud de onda que pueden empaquetarse densamente y dar como resultado fuertemente miniaturizados componentes. Es esta miniaturización la que hace que los metamateriales sean interesantes para aplicaciones aeroespaciales donde el peso y el tamaño pequeños son esenciales.

Si bien el progreso más espectacular en el campo de los metamateriales electromagnéticos se ha producido hasta ahora en el rango de las microondas, son las regiones espectrales ópticas (visible, infrarroja, infrarroja media) las más prometedoras para aplicaciones revolucionarias. Los metamateriales electromagnéticos tienen un enorme potencial para revolucionar la propagación, el almacenamiento y la conversión de ondas electromagnéticas en todo el espectro electromagnético. En nuestra opinión, las aplicaciones más interesantes que son relevantes para las aplicaciones aeroespaciales incluyen la recolección de energía, el desarrollo de nuevos dispositivos ópticos con capacidades inusuales pero prácticamente importantes (por ejemplo, dispositivos no recíprocos), la mejora de la eficiencia de los dispositivos ópticos no lineales, el desarrollo de nuevas modalidades de imagen. capaz de romper el límite de difracción (por ejemplo, superlentes, hiperlentes, superlentes de campo lejano ) y desarrollar nuevas técnicas litográficas.

Los metamateriales ópticos son todavía un área muy nueva. En un puñado de experimentales

este momento, solo existiendo demostraciones de metamateriales ópticos multicapa (verdaderamente a granel). Entre los más recientes se encuentran (a) demostración del óptico de índice negativo metamateriales la longitud de onda de telecomunicaciones (Referencia 10) que utilizó la denominada estructura de red en forma de prisma para demostrar la Ley de Snell, y (b) demostración de la Permitividad Indefinida Material (IPM) y *refracción negativa* (que, en el contexto de metamateriales anisotrópicos, no es lo mismo

que *negativo índice de refracción*) en la parte del infrarrojo medio del espectro (Referencia 11). Estas estructuras tienen la distinción de ser multicapa (o a granel). La mayoría de los ejemplos anteriores de metamateriales ópticos se han referido a sustancias de una o dos capas que, en sentido estricto, no pueden caracterizarse como metamateriales. La dificultad para obtener una fuerte actividad magnética en metamateriales ópticos se ha explicado en varias revisiones recientes (Referencias 12, 13). En pocas palabras, el problema es que el momento magnético de la mayoría de las estructuras (incluidos los sistemas atómicos) es muy pequeño, mucho más pequeño que el eléctrico momento. Por lo tanto, es difícil observar efectos ópticos que puedan claramente asignarse a la actividad magnética. Esto es especialmente cierto para las estructuras que son mucho más pequeñas que una longitud de onda. Son posibles excepciones, como anillos partidos construidos artificialmente. Sin embargo, tales estructuras no pueden funcionar a frecuencias muy altas debido a la excitación de resonancias electrostáticas (Referencia 12). En otras palabras, cuando la frecuencia de resonancia es demasiado alta (o la permitividad dieléctrica de un metal no es lo suficientemente grande), las resonancias electrostáticas interrumpen la actividad magnética. Más específicamente, la energía dentro y en las proximidades de un elemento metamaterial (por ejemplo, resonador de anillo dividido) se vuelve predominantemente electrostática (es decir, en forma de energía cinética de electrones oscilantes). La red de pesca multicapa descrita recientemente (Referencia 10) no es una excepción: su celda unitaria (es decir, el período lateral) es solo la mitad de la longitud de onda operativa.

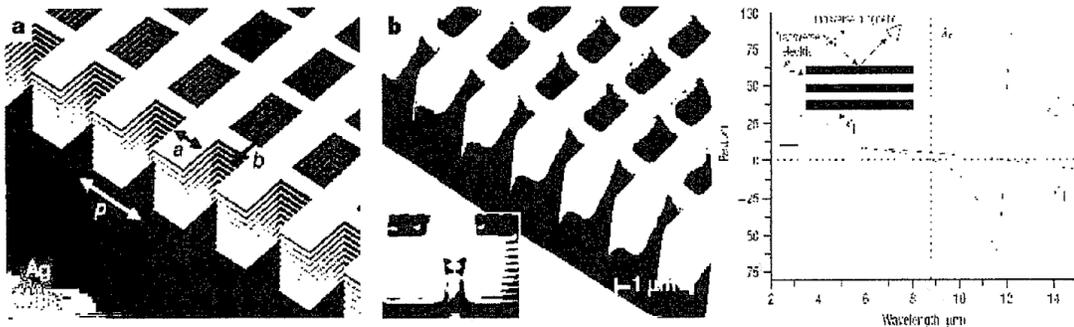


Figura 4. Metamateriales ópticos recientes para longitud de onda de telecomunicaciones  $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$  (izquierda y media) e IPM de infrarrojo medio. La red multicapa está hecha de películas de plata separadas por un espaciador dieléctrico. Se utilizó un haz de iones enfocado para producir la red de pesca en forma de prisma. El IPM se obtuvo depositando intercaladas de capas 80 nm de  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  y  $\text{Al}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}$ . Las capas, de

aproximadamente 8,1  $\mu\text{m}$  de espesor, crecieron mediante epitaxia de haz molecular sobre sustratos de InP emparejados en red. Las InGaAsdoparon capas de se uniformemente para crear diferentes valores de permitividad en capas alternas. (Referencia 10 y 11)

Eso no quiere decir que no haya un trabajo teórico y experimental en curso sobre el diseño de metamateriales ópticos para aplicaciones prácticas. El grupo de investigación del autor en UT-Austin, ha diseñado la primera superlente de metamateriales de índice negativo plasmónico (P-NIM) (referencia 14), ha desarrollado técnicas novedosas para analizar las propiedades ópticas de nanoestructuras plasmónicas (incluidos los cálculos de la estructura de bandas deperiódicas).

nanoestructuras) (Referencia 15) y cálculos cuasiestáticos de resonancias plasmónicas (Referencia 16). El grupo UT-Austin también ha diseñado varios P-NIM únicos de sublongitud de onda en la parte óptica del espectro (Referencias 14, 17, 18), y recientemente ha publicado una revisión de los P-NIM ópticos (Referencia 12). El grupo también ha contribuido al desarrollo e implementación experimental del concepto de "lente perfecta" (Referencia 19) basado en materiales plasmónicos / polaritónicos. Una lente perfecta permite obtener imágenes de objetos de sub-longitud de onda en la parte infrarroja del espectro, incluidos los objetos enterrados bajo la superficie. También se ha desarrollado un Absorbedor Gran Angular "Perfecto" de Radiación Infrarroja Media (WAPAMIR) (Referencia 20) basado en el índice negativo metamaterial decuya impedancia se adapta perfectamente al vacío.

A continuación se muestra un resumen conciso de varios temas / aplicaciones que son especialmente adecuados para la industria aeroespacial. Este estudio se concentra en la facilidad de los metamateriales para miniaturizar varios componentes ópticos y de microondas. Los metamateriales también se pueden utilizar para obtener imágenes de objetos muy pequeños (sub-longitud de onda) sin tener que recurrir acostosa y que espacio microscopía óptica de barrido de campo cercano,consume mucho. También se describen los curso esfuerzos enen el campo para fabricar láseres basados en metamateriales extremadamente compactos. Los láseres más pequeños significan un peso más pequeño y más espacio para otros dispositivos de diagnóstico y una útil carga útil dentro de los límites de un vehículo espacial. Las aplicaciones de metamateriales para la recolección de fotones son especialmente adecuadas para plataformas aeroespaciales avanzadas debido a la necesidad de recolectar energía electromagnética para recargar baterías,diagnóstico espectroscopía de otras funciones vitales de un vehículo espacial.

- Metamateriales complementarios para la captación de energía. El desarrollo de células fotovoltaicas y termo-fotovoltaicas ultradelgadas se ve obstaculizado por la débil absorción de los semiconductores. Los metamateriales pueden modificar la absorción haciéndola selectiva en longitud de onda (sintonizable), altamente eficiente y, si se desea, gran angular. Recientemente se ha encontrado una forma de crear resonadores de un cuarto de longitud de onda respaldados por espejos con fugas hechos de MMC.

- Superlente de campo lejano basado en la interferometría de ondas de subdifracción. Durante mucho tiempo se ha considerado que la obtención de imágenes por subdifracción solo es posible utilizando microscopios de campo cercano. Esos son dispositivos bastante complejos, de escaneo lento y grandes que no son apropiados para plataformas aeroespaciales avanzadas. Los metamateriales permiten nuevas modalidades de imagen: superlentes, hiperlentes y superlentes de campo lejano.

Además de una revisión de la literatura científica existente, nuevas ideas sobre el desarrollo de una nueva interferométrica de campo lejano Super-Lente (FSL) basados en la multi-difracción de haces múltiples técnica de materiales con permitividad Indefinida Tensor utilización se presentan. fabricación de tales Materiales de Permitividad Indefinida (MIP) para la parte del infrarrojo del espectro y se demuestra la capacidad de transmitir ondas electromagnéticas con un período espacial mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz del vacío. La interferencia entre ondas de sub-difracción permite desenredar múltiples órdenes de difracción y extraer sus amplitudes.

- Metamateriales quirales no lineales no recíprocos: desarrollo de nuevos ópticos aisladores y espejos de microondas "unidireccionales". Estos desarrollos están motivados por la necesidad de construir "diodos de luz" unidireccionales para ópticos compactos aisladores. Actualmente existen dos enfoques para el aislamiento óptico: el más común que utiliza campos magnéticos y el menos desarrollado basado en el uso de no linealidades. Un enfoque diferente se basa en el fenómeno de la conversión de modo adiabático en metamateriales quirales no lineales. Se obtienen resultados teóricos preliminares para una quiral simple fibra con un período de torsión variable (paso) que permite la transmisión completa de un modo de núcleo estrechamente confinado en la

dirección de avance y la conversión de modo completo del modo de núcleo en un modo de revestimiento para la propagación hacia atrás.

- Reducir la velocidad de la luz y miniaturizar los componentes ópticos utilizando el fenómeno de la transparencia inducida electromagnéticamente en metamateriales. La velocidad de la luz impone un límite natural al tamaño de los componentes ópticos / microondas. Los metamateriales ofrecen una gran oportunidad para reducir la velocidad de la luz. Esto tiene dos implicaciones principales: (a) la luz se puede almacenar / manipular en volúmenes más pequeños, y (b) los efectos no lineales se mejoran fuertemente por la compresión de energía resultante.

Aplicaciones a la obtención de imágenes de subdifracción: superlentes e hiperlentes El superlentes es una de las primeras aplicaciones de los metamateriales (Referencia 21), y su principio se muestra en la Figura 5. Sin el superlentes, toda la información sobre los - Las características de difracción (o sub-longitudes de onda, que es equivalente) del objeto periódico se habrían perdido. La razón de la pérdida de información es la desintegración evanescente de los grandes números de onda espaciales. El único método para acceder / medir estas características sería escanear el objeto usando un microscopio óptico de escaneo de campo cercano. Al insertar una superlente entre el objeto y el plano de imagen, las ondas evanescentes se pueden amplificar y la imagen se transfiere hacia adelante. Desafortunadamente, este enfoque por sí solo no elimina la necesidad de un dispositivo de escaneo de campo cercano, la imagen que se recrea en el plano de imagen todavía tiene una sub-longitud de onda y debe leerse.

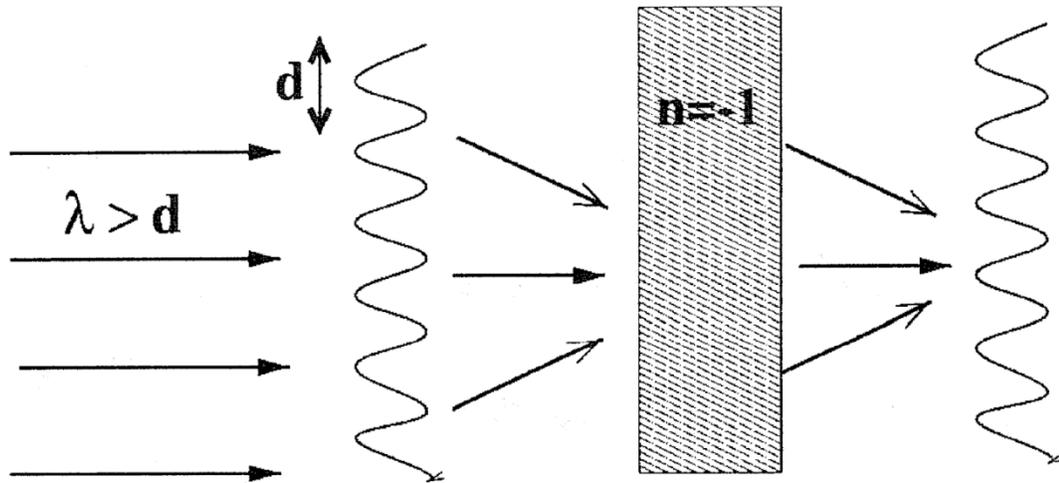


Figura 5. Esquema del Super-Lens con  $n = -1$  índice de refracción correspondiente a ( $\epsilon = -1$ ,  $\mu = -1$ ) rodeado de vacío. La presencia de superlentes permite obtener imágenes de objetos de sub-difracción, como la rejilla periódica que se muestra aquí.

Sin embargo, existen circunstancias interesantes en las que es muy importante transportar la imagen hacia el dispositivo de escaneo. Una de esas circunstancias especiales es la espacialmente de espectroscopia resuelta a estructuras pequeñas (por ejemplo, celulares). Uno puede imaginarse expediciones espaciales a otros planetas que podrían, potencialmente, resultar en encontrar alguna evidencia de vida primitiva a nivel celular. Entonces sería muy conveniente examinar la estructura de la célula viva en su entorno natural. Con toda probabilidad, ese entorno sería líquido. Por lo tanto, sería muy deseable examinar la celda sin tocarla realmente con la punta de un microscopio óptico de campo cercano. Por lo tanto, sería necesaria la formación de imágenes debajo de la superficie de un objeto pequeño que está enterrado debajo de una capa de líquido. Hasta ahora no se han realizado tales experimentos. Sin embargo, hace varios años hubo un experimento que demostraba imágenes de objetos de sub-difracción enterrados bajo la capa de dióxido de silicio. Los resultados esquemáticos y experimentales del experimento (Referencia 19) se muestran en la Figura 6. En este experimento, los objetos de sub-longitud de onda eran agujeros simples que se fresaron en el metal usando un FIB. Fueron enterrados debajo de la súper lente que consiste en SiC (material  $\epsilon$  negativo para frecuencias del infrarrojo medio) y silicio dióxido de (material  $\epsilon$  positivo). Tenga en cuenta que esta configuración (materiales con  $\epsilon < 0$  y  $\epsilon > 0$  unidos entre sí: intercalados o colocados uno al lado del otro) es típica de una superlente de campo cercano. La

diferencia entre la súper lente de campo cercano que se muestra en la Figura 6 y la súper lente "ideal" que se muestra en la Figura 5 es que el ideal también requiere un material con un valor negativo de permeabilidad magnética.

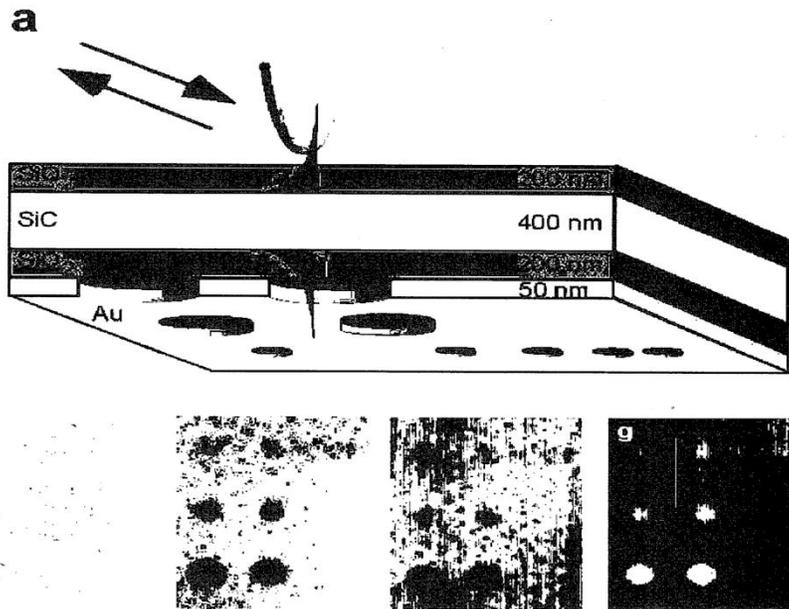


Figura 6. Esquema de la súper lente basada en SiC que está generando imágenes de agujeros de sub-longitud de onda enterrados debajo de lasi02 capa. Los objetos fotografiados son agujeros A120 fresados en oro usando FIB. La señal dispersa es captada por la punta de un NSOM y dirigida hacia el detector de infrarrojos. Dependiendo de la longitud de onda de la imagen, la amplitud (e) o la fase (f, g) de la señal son prominentes.

A medida que el rayo láser se dispersa por los orificios de sub-longitud de onda, su campo eléctrico es recogido por la punta de un microscopio óptico de dispersión de campo cercano (NSOM) y re-dispersado en el campo lejano. Allí se interfiere con el pulso de referencia y es detectado por un detector de infrarrojos. Tenga en cuenta que esta técnica interferométrica permite extraer tanto la fase como la amplitud del campo, como se muestra en la Figura 6. Esto amplía significativamente el rango espectral sobre el cual la superlente proporciona información significativa. Por ejemplo, el contraste de amplitud es más alto en  $A = 10.85 \text{ pm}$  que se muestra en el panel (e) mientras que los contrastes de fase son más altos en  $A = 11.03 \text{ pm}$  y  $A = 10.65 \text{ pm}$ .

A pesar de la conveniencia de la súper lente de campo cercano (es decir, su capacidad para transportar la imagen), todavía requiere un NSOM para leer la imagen. Dentro de los límites de una plataforma aeroespacial avanzada, tal dispositivo (con sus auxiliares necesarios) puede no encajar. Por lo tanto, hay que considerar ideas alternativas basadas en metamateriales para la obtención de imágenes por sub-difracción. Una de esas ideas, la hiperlente, ha sido propuesta recientemente por dos grupos (Referencias 22-24), y ya probada experimentalmente por otro grupo (Referencia 25). El principio de la hiperlente es muy simple: utilizar un permitividad indefinida medio de(a veces denominado medio hiperbólico porque la relación entre los números de onda de propagación y la frecuencia, también conocida como contorno de frecuencia constante, tiene una naturaleza hiperbólica) en un formato cónico. Sevarias implementaciones conceptuales, como la estructura en forma de radios y la estructura cilíndrica de múltiples capas han sugerido(ver Figura 7, panel izquierdo). La hiper-lente funciona en dos principios: (a) materiales de permitividad indefinidos (de los cuales los super-lente es un ejemplo) son capaces de propagar ondas sub-difracción, y (b) la naturaleza de expansión de la hiper-lente puede ampliar las imágenes al tamaño  $A / 2$ , momento en el que se vuelven observables en un microscopio convencional. Enimplementación experimental reciente de la hiperlente el panel derecho de la Figura 7 se muestra unaen UV. La hiperlente está hecha de 16 capas de Ag / A1203. Esta hiperlente específica se utilizó para obtener imágenes de un objeto de par de líneas con un ancho de línea de 35 nm y un espaciado de 150 nm y se hizo funcionar a  $A = 400$  nm. Laampliada imagen(espaciado de 350 nm) se puede resolver claramente con un microscopio óptico [numérica apertura(NA) = 1,4], demostrando así la ampliación y proyección de una imagen limitada por subdifracción en el campo lejano.

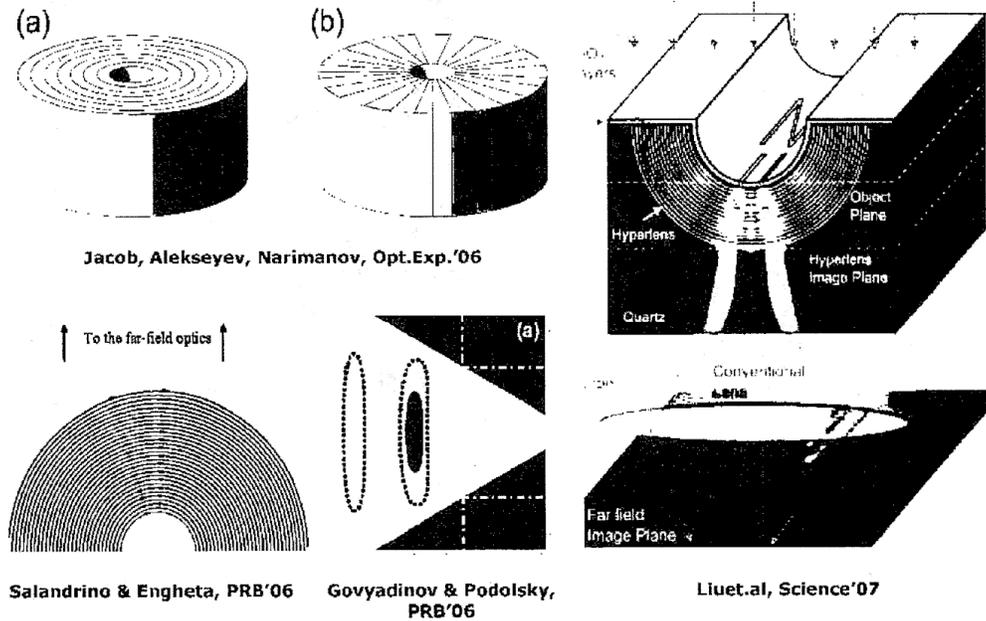


Figura 7. Conceptos teóricos (panel izquierdo) e implementación experimental (panel derecho) de un hiperlente óptica capaz de aumentar objetos de subdifracción a un tamaño observable (mayor que  $\lambda / 2$ )

Tenga en cuenta que el concepto de hiperlentes no requiere el empleo de un voluminoso campo microscopio óptico de barrido decercano. Sin embargo, la implementación práctica de la hiperlente no es en absoluto sencilla. La implementación original requería depositar la muestra en la superficie curva de la hiperlente. Otro grupo ha propuesto teóricamente una implementación más práctica de la superlente (Referencia 26). El concepto se muestra en la Figura 8. La hiperlente implica una serie de delgados alambres metálicos que convergen hacia la punta. Como se demuestra, una densa matriz de alambres metálicos separados por mucho menos que la longitud de onda constituye un metamaterial con el tensor de permitividad indefinido.

Específicamente, el componente tensorial a lo largo de los cables viene dado por:

$$\epsilon_{zz} = 1 - \frac{c_0^2}{\omega^2 - k_z^2 c^2} \quad (3)$$

donde el componente  $z$  está a lo largo de los cables y la dirección perpendicular es normal a los cables. Debido a que las únicas ondas que se propagan son las ondas TEM que satisfacen la relación de dispersión  $\omega^2 = k_z^2 c^2$ , este meta-medio es fuertemente anisotrópico y admite ondas de sub-longitud de onda que realizan imágenes. La resolución

espacial viene dada por el espacio entre cables. La Figura 8 (panel derecho) muestra la imagen ampliada de un objeto pequeño ( $A / 25$ ) colocado en la punta del hiperlente. El factor de aumento es  $5x$ ,

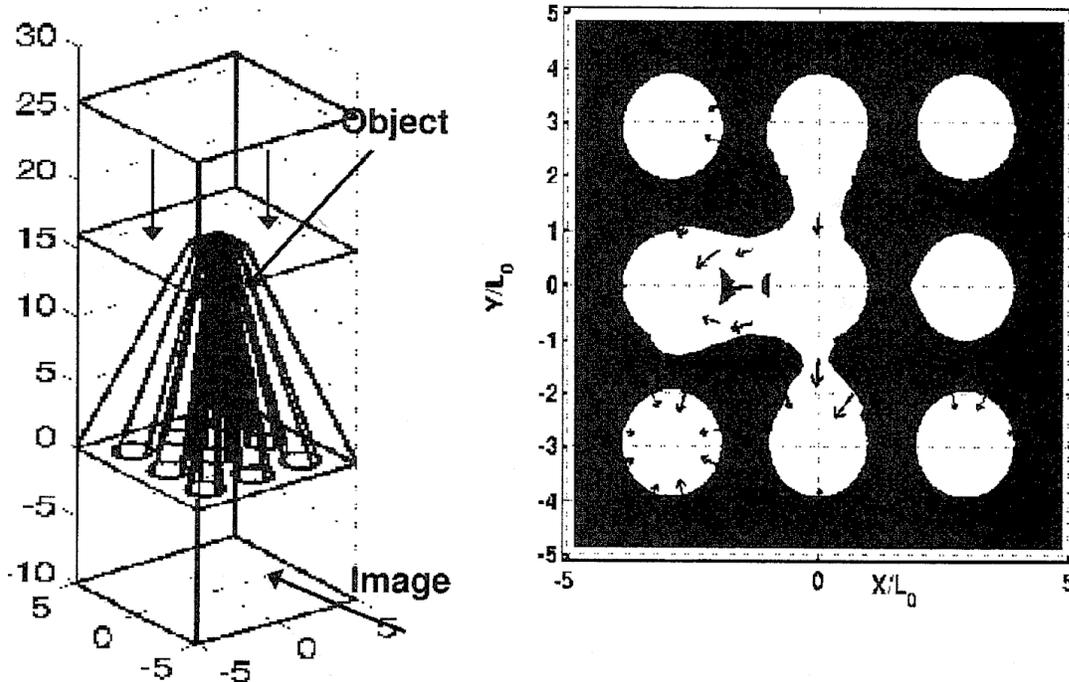


Figura B. Hyper-Lens basado en una matriz convergente de cables metálicos. Se puede colocar un objeto pequeño en la punta, iluminarlo desde la parte superior y ampliarlo mediante la expansión de la matriz de cables. Panel izquierdo: esquemático. Panel derecho: objeto  $A / 25$  ampliado en un factor de  $5x$  por la hiperlentes en expansión. Este hiperlente puede funcionar a frecuencias medias de infrarrojos. (Referencia 26)

Otro concepto para obtener imágenes de sub-longitud de onda empleando metamateriales es la llamada-Far-Campo de Super-Lens (FSL). El concepto es pionero en la Referencia 27. La idea se describe en la Figura 9. Un objeto de sub-longitud de onda (por ejemplo, dos rendijas) está ubicado en la parte inferior de una superlente multicapa. Otra rejilla de sub-longitud de onda se deposita encima de la superlente. Debido a que la súper lente (y para el caso, cualquier indefinida material de permitividad) es capaz de propagar ondas de sub-difracción, las perturbaciones electromagnéticas creadas por el objeto se propagan a través de la súper lente hacia arriba, hasta que encuentran la rejilla de sub-longitud de onda. En ese punto, estas sub- perturbaciones de longitud de onda se difractan en la rejilla de liberación de imágenes y se convierten en ondas electromagnéticas de campo lejano. Esas ondas de campo lejano son recogidas por el objetivo de un microscopio y

observadas a través del ocular. El esquema se muestra en la Figura 9 (a). Tenga en cuenta que, nuevamente, no hay necesidad de NSOM. La implementación real del FSL utilizó el siguiente objeto: un par de nanocables con una rendija de 50 nm de ancho y un 70 nm espacio deinscrito por un haz de iones enfocado en una película de Cr de 40 nm de espesor sobre el sustrato de cuarzo.

La imagen de difracción limitada de un microscopio óptico convencional no puede resolver los dos nanocables ( $NA = 1.4$ ,  $Ao = 377$  nm) como se puede ver en la Figura 9 (c), pero el microscopio equipado con FSL puede como se muestra en la Figura 9 (d) .

A pesar del éxito de esta demostración, existen serios problemas relacionados con la obtención de imágenes de objetos de sub-longitud de onda. Específicamente, se señala en la Referencia 27 que múltiples órdenes de difracción pueden enredarse (es decir, lanzarse en la misma dirección hacia el campo lejano). Es muy importante desenredar estos órdenes de difracción. La recompensa sería obtener imágenes de objetos completamente 2-D (planos) con una resolución menor que el período de la rejilla de liberación de imágenes. Más precisamente, esta ambigüedad se ilustra en el panel derecho en la Figura 10. Si el objeto de sub-longitud de onda está representado por el espectro continuo (línea azul), entonces el espectro se puede muestrear dentro del conjunto discreto de "zonas" que están definidas por los órdenes de difracción de la rejilla de liberación de imágenes. El ancho de cada zona es  $2\lambda$ , y están etiquetados como orden 15 $\lambda$ , segundo orden, etc. Los números de onda pertenecientes a las diferentes zonas se pueden difractar en el mismo detector de campo lejano como se explica en la Figura 10. Para desenredar las zonas 1 y 2 ", un solo detector no puede proporcionar suficiente información. Resulta que usar dos detectores (A y B) y dos rayos láser (Haz A y Haz B) proporcionan información adicional que es suficiente para desenredar las dos zonas. Esta información adicional se obtiene comparando la intensidad en los dos detectores A y B. Otra ventaja de esta imagen técnica es que es de naturaleza interferométrica. Por lo tanto, incluso si la contribución de algunos de los órdenes de estas zonas espectrales es muy débil, todavía se puede detectar debido a la alta sensibilidad de las técnicas interferométricas. Lo que hace que esta interferencia sea especial es que implica ondas subdifractivas que se propagan a través del metamaterial de permitividad indefinida. A continuación, se muestran algunos de los experimentos realizados en el laboratorio que demuestran dicha interferencia. He discutido.

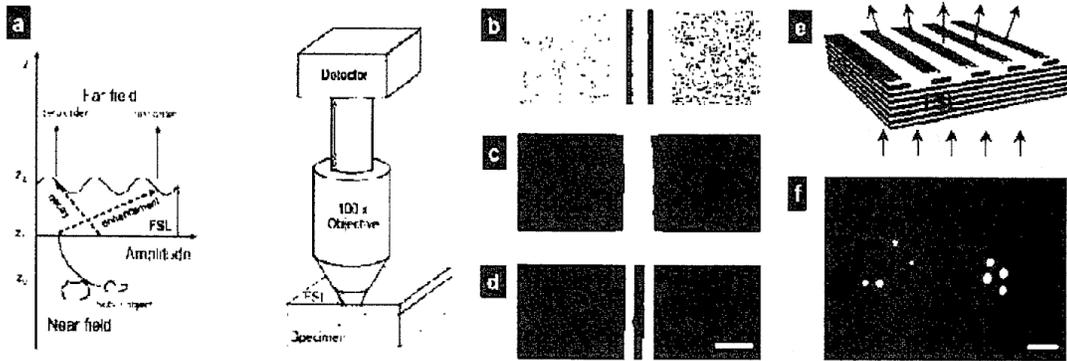


Figura 9. FSL basado en un metamaterial de permisividad indefinida colocado entre el objeto y la rejilla liberadora de imágenes. La rejilla libera en el campo lejano ondas de subdifracción producidas por la luz dispersión de ladel objeto. El papel del metamaterial es propagar ondas de sub-difracción del objeto a la rejilla. (Referencia 27) Desde la invención de Merlín (Referencia 28) de la placa de campo cercano de sub-difracción, ha quedado claro que la interferencia entre campos electromagnéticos de sub-difracción puede resultar en la formación de una imagen de sub-longitud de onda profunda. Sin embargo, la placa de campo cercano no es un dispositivo de formación de imágenes; su propósito es crear una imagen bien definida utilizando una elaborada estructura de sub-longitud de onda prefabricada en la superficie de la placa. El objetivo de este estudio es observar una imagen de sub-longitud de onda desconocida a priori utilizando una cercano estructura de campo. En el pasado,éxitos (Referencia 19) en la recuperación de imágenes se lograron objetos de longitudonda inferior (como agujeros  $A / 20$ ) utilizando un NSOM para la detección de radiación. Un NSOM es un instrumento de campo cercano, por lo tanto, unmucho más deseable método de detección implicaría la detección de campo lejano. Para avanzar en este objetivo y desarrollar una herramienta a la que a veces se hace referencia como FSL, hemos iniciado una investigación sobre lamúltiples de holografía de sub-longitud de onda de detectores haces múltiples que se ilustra en la Figura 10.

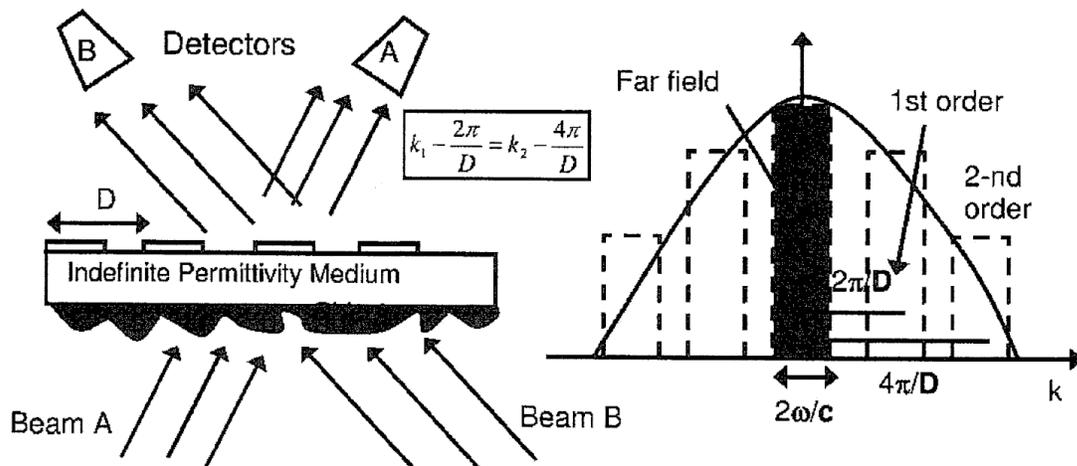


Figura 10. Holografía tomográfica de múltiples haces de múltiples detectores de objetos de sub-longitud de onda utilizando un medio de permisividad indefinida (IPM). Los haces incidentes se dispersan del objeto subacuático, se propagan a través del IPM y luego se vuelven a dispersar en el campo lejano por la rejilla con el período  $D$ . El propósito de la disposición de detectores múltiples es desenredar los  $k_1$  y  $k_2$  números de ondas espaciales en el espectro del objeto (mostrado en el izquierdo panel). Los haces A y B están desfasados entre sí.

Nuestra implementación del FSL utiliza un IPM cuyo tensor de permitividad dieléctrica es anisotrópico y contiene componentes positivos y negativos:  $\epsilon_{xx} > 0, \epsilon_{yy} < 0$ , donde paralelo se refiere a la interfaz IPM / objeto. Ya hemos fabricado dichos IPM utilizando multicapas de  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ , y estamos investigando otros enfoques que implican multicapas de semiconductores dopadas selectivamente similares a las utilizadas por el grupo de Gmachl en Princeton. Las multicapas  $\text{SiO}_2/\text{SiC}/\text{SiO}_2$  se producen internamente (con películas de SiC enviadas por el profesor Ferro de la Universidad de Lyons, Francia). La función principal del IPM es propagar ondas de subdifracción ( $k_x > \omega/c$ ) con la menor desintegración posible. Eso sucede porque estas ondas de sub-difracción ya no son evanescentes:  $k_x^2 - \omega^2/c^2 > 0$ . Se demuestra experimentalmente que existe un rango de frecuencia para el cual las ondas de subdifracción se propagan a través del IPM con menos atenuación que la radiación ondas de la zona de  $(k_x, \omega/c)$ , ver Figura 11.

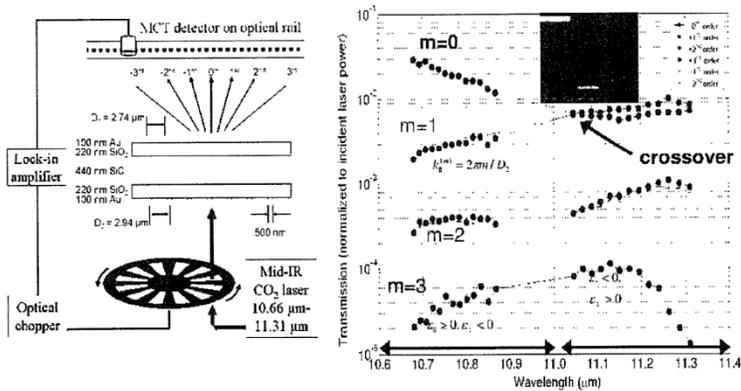
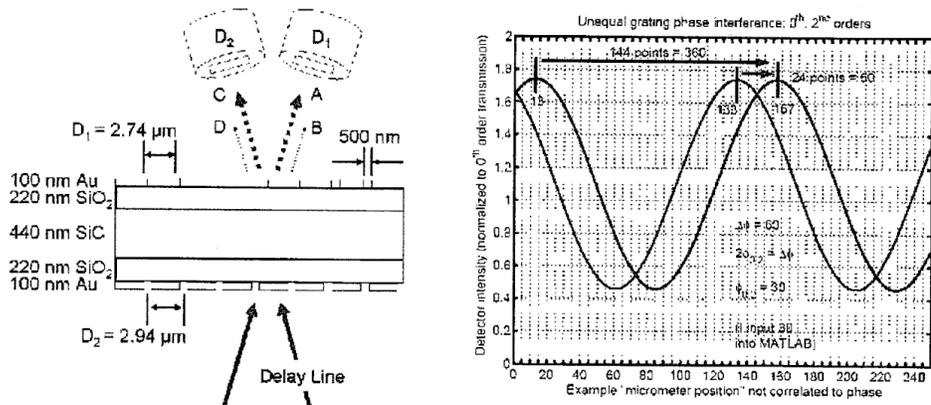


Figura 11. Primera demostración experimental de propagación de ondas de subdifracción en el IPM. (Izquierda): Configuración experimental que demuestra cómo se lanzan ondas de sub-difracción en el IPM utilizando sub-rejilla de longitud de onda. Debido a que los períodos de las rejillas inferior ("lanzamiento") y superior ("transformación") son  $S_1$  y  $S_2$  se habilita la observación de campo lejano diferente de diferentes armónicos de la rejilla inferior. (Derecha): Experimental Resultados: el primer armónico de subdifracción de la rejilla (línea verde) se vuelve más fuerte que la radiación cero. zona armónica de la rejilla (línea azul) en la región donde  $6 > 0,60 < 0$ . Una vez que las ondas de sub-difracción se propagan a través del IPM, pueden difractar en la imagen. soltar la rejilla (ver Figura 10) y ser irradiado hacia el campo lejano. Se puede utilizar una matriz de detectores para recopilar la señal y reconstruir la imagen. Desafortunadamente, diferentes números de onda  $k_i$  del objeto se dirigen al mismo detector y producen una ambigüedad en la extracción de sus respectivas amplitudes  $A$  (4). Esta ambigüedad se ilustra en la Figura 10: los números de onda  $k = Ak + 27TID yk, = Ak + 47r1D$  se dirigen al mismo detector de campo lejano. En pocas palabras, un solo número (intensidad de la luz con el número de onda  $Ak < t_0 / c$  incidente en el detector) es insuficiente para determinar dos dispersiones amplitudes ( $A(k)$  y  $A(k_2)$ ). Por lo tanto, se debe desarrollar un nuevo concepto, y la técnica de detectores múltiples es un concepto de este tipo.

El concepto requiere dos detectores y dos rayos láser coherentes. Los dos haces se forman usando un divisor de haz y una línea de retardo variable que imparte un cambio de fase a los dos haces (ver la fotografía experimental real en la Figura 13 donde el haz divisor BS y la línea de retardo se muestran). Hemos demostrado teóricamente que las dependencias de intensidad de las dos intensidades de detector 1, ( $w$ ) y 12 ( $v$ ) en función

del retardo de fase  $\phi$  proporciona suficiente información para recuperar tanto  $A(k_i)$  como  $A(k_r)$ .



Ejemplo de "posición del micrómetro" no correlacionada con la fase

Figura 12. (Izquierda): Esquema para medición interferométrica de 2 haces / 2 detectores. (Derecha): Simulación numérica: intensidad en los dos detectores en función del retardo de fase entre los haces A y B producido por la interferencia entre el cero y los primeros órdenes difractivos de la rejilla difractiva inferior. (simulación numérica). El segundo detector proporciona el segundo punto de datos necesario que es necesario para separar las contribuciones de diferentes órdenes de difracción.

Se llevan a cabo dos conjuntos de experimentos que demuestran la viabilidad del concepto. Ninguno de estos experimentos constituye imágenes per se. Sin embargo, sin demostrar los dos hitos clave que se describen a continuación, no se pueden realizar experimentos de imágenes adecuados. intentó.

El primer hito consiste en demostrar que IPM de hecho admite la propagación (no ondas de subdifracción evanescentes). La Figura 11 muestra el esquema experimental (panel izquierdo) y los resultados experimentales. La rejilla inferior "imprime" sus componentes de Fourier (cero, primero, segundo, tercero, etc.) en el pulso de láser incidente. generando ondas electromagnéticas que se lanzan al IPM basado en SiC. El armónico cero está dentro de la zona de radiación (es decir, no es sub-difracción), mientras que el primero, segundo, y así sucesivamente sub-difracción. Estas ondas EM se dispersan por la rejilla superior con un período ligeramente diferente y se liberan en el campo lejano. Debido a que la dirección en la que se liberan las ondas depende del

número del armónico de Fourier, podemos separarlos experimentalmente y medirlos. Claramente, las magnitudes relativas de estos órdenes de difracción varían drásticamente en función de la longitud de onda del láser. Por ejemplo, el orden de difracción cero domina claramente en el rango de frecuencia e,  $\ll$  (). Sin embargo, en el rango de frecuencia de  $6, > 0,6, 1 <^\circ$ , el primer orden de difracción se vuelve más grande que el cero. Esto confirma el efecto predicho recientemente de que para los MIP se puede observar un efecto muy contrario a la intuición: las ondas de subdifracción pueden de hecho se propagan con menos pérdida que los limitados por difracción.

El segundo hito consiste en demostrar la posibilidad de observar el interferencia de ondas electromagnéticas de sub-difracción dentro del IPM usando los dos técnica de haz / dos detectores. La Figura 10 muestra este patrón de interferencia que revela el avance de fase de las ondas de sub-difracción dentro del IPM. Si bien hasta ahora hemos demostrado la interferencia entre el primer componente de Fourier de la red (sub-difracción) y el componente cero de Fourier, vemos la posibilidad de interferir aún más ondas de sub-difracción ( $2^\circ$  y  $3^\circ$ ).

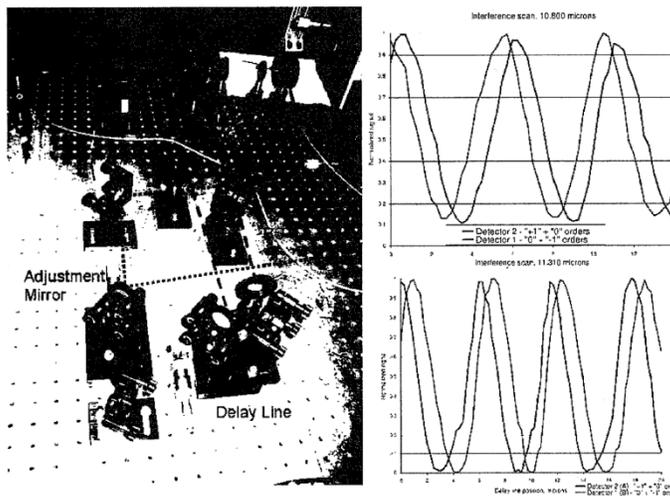


Figura 13. (Izquierda): Configuración experimental para medición interferométrica de 2 haces / 2 detectores en nuestro laboratorio. (Derecha): Resultados experimentales preliminares: la intensidad de infrarrojos en dos detectores (líneas roja y negra) son (i) diferentes entre sí; (ii) tienen una dependencia sinusoidal de la posición de la línea de retardo (en micrones), que es equivalente al retardo de fase entre los dos haces; (iii) se desplazan en fase en una cantidad igual al doble de la diferencia de fase entre los componentes de Fourier de orden I '(sub-difracción) y de orden O (zona de radiación) de

la rejilla inferior. Mediciones tomadas en  $A = 10.8 \text{ pm}$  y  $A = 11.3 \text{ pm}$ . Con estos dos hitos establecidos, ahora es posible realizar verdaderos sub- experimentos de imágenes de longitud de onda que utilizan dos (o más) detectores de campo lejano y procesan conjuntamente sus entradas. Más información sobre este texto de origen Para obtener más información sobre la traducción, se necesita el texto de origen Aplicaciones a circuitos y miniaturización de guías de ondas: ralentización y manipulación de pulsos electromagnéticos (EMP) utilizando metamateriales avanzados Dadas las limitaciones de espacio de una plataforma aeroespacial avanzada y la cantidad de carga útil que debe transportarse, es muy importante que todos los elementos ópticos y El componente de microondas sea lo más pequeño posible. Debido a la gran velocidad de la luz, existe un límite natural en cuanto a lo pequeños que se pueden fabricar dichos componentes. Cualquier estructura capaz de procesar EMP (ya sean ópticos, THz o microondas) de duración temporal  $\tau$  debe tener al menos  $L = c\tau$  de largo. Por ejemplo, un pulso de microondas de  $1 \text{ ns}$  puede ser manipulado dentro de un dispositivo que tiene al menos  $1$  pie de largo. La manipulación del pulso puede ser entendido de manera muy amplia por compresión de pulsos, desplazamiento de frecuencia, armónicos generación u otra. Para los sistemas de comunicaciones aeroespaciales, puede ser muy deseable tener la capacidad de manipular el formato de los EMP (es decir, para cambiar su frecuencia, duración y tasa de repetición). Disminuir o incluso detener el EMP puede eludir el requisito de longitud si la velocidad del grupo se reduce a  $v_g \ll c$ , y por lo tanto la longitud requerida es  $L$

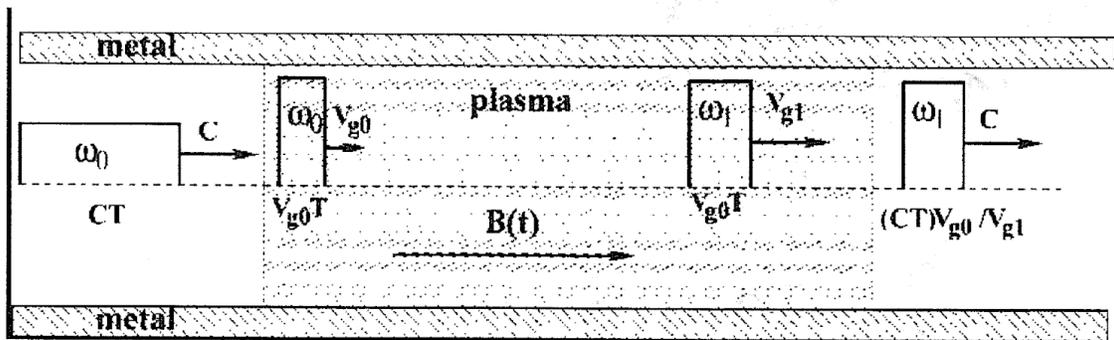
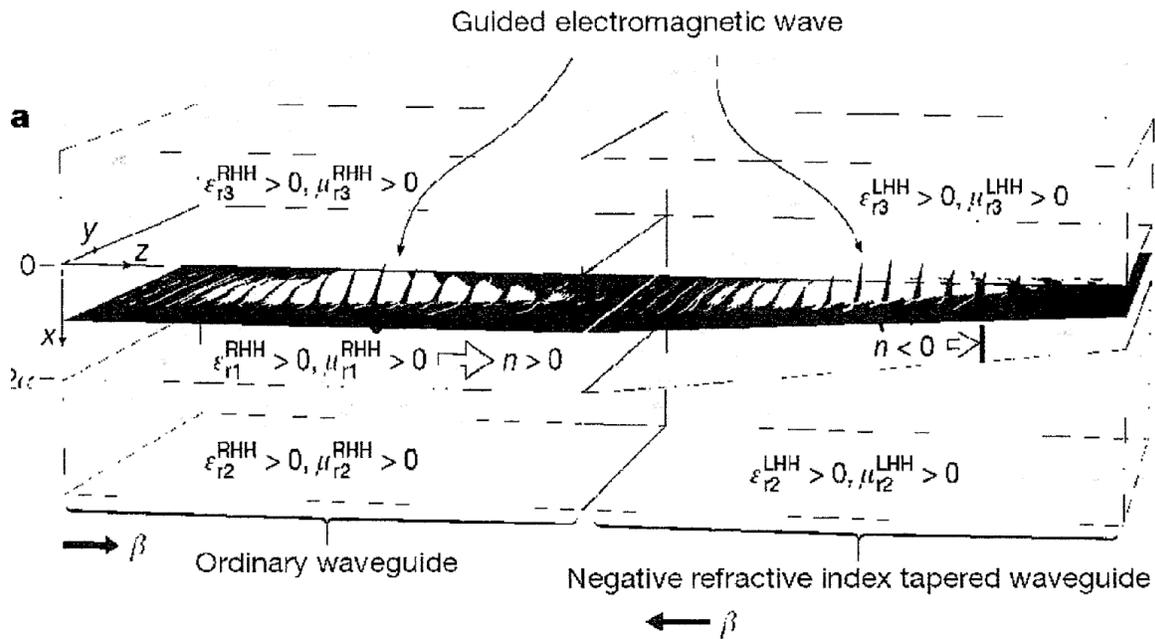


Figura 14. Esquema de la compresión de pulsos en plasma magnetizado. Un pulso de radiación con frecuencia inicial. La duración de  $\omega_0$  and  $T$  se ralentiza en el plasma a una velocidad de grupo  $v_{g0} \ll c$ . Variación espacialmente uniforme adiabática del campo

magnético cambia la frecuencia de radiación a COI y aumenta la velocidad del grupo a  $V_0 \gg V$ . Los el pulso emergente se comprime a  $l_{Tvm} l_{vxi}$ . (Referencia 29)

Un ejemplo de la desaceleración del pulso y la manipulación subsiguiente se analiza por primera vez en la Referencia 29 en el contexto algo esotérico del plasma magnetizado. La duración del pulso, la frecuencia y (para pulsos múltiples) la tasa de repetición se pueden controlar almacenando (o ralentización) ondas electromagnéticas y, posteriormente, cambiar el sistema parámetros. La esencia del manipulador de pulso compacto se muestra en la Figura 14. El pulso se ralentiza dentro del dispositivo de plasma compacto y se manipula cambiando la magnitud del campo magnético. La ventaja de ralentizar los pulsos es triple. Primero, el dispositivo puede hacerse más pequeño, lo que resulta en ahorros de tamaño. En segundo lugar, la escala temporal en la que debe manipularse el sistema se alarga porque el pulso se mueve lentamente. Finalmente, la relación potencialmente grande entre  $v$ ,  $\gg v$ , da como resultado el rango dinámico más dramático de las posibles relaciones de compresión de pulsos. Basado en plasma los dispositivos pueden no ser apropiados en el contexto aeroespacial debido a su gran tamaño, requisitos de potencia, grandes bobinas magnéticas, etc. Afortunadamente, los metamateriales ofrecen algunas oportunidades interesantes para reducir la velocidad ondas electromagnéticas como se ha reconocido recientemente (Referencia 30). Específicamente, los autores han demostrado teóricamente que una heteroestructura que varía axialmente con un núcleo de metamaterial de índice de refracción negativo se puede utilizar para detener la luz de manera eficiente y coherente. Uno de los aspectos más notables del enfoque es que funciona para pulsos de banda relativamente ancha. La capacidad de banda ancha se logra mediante la "reducción gradual" (o variación axial) de los parámetros de un metamaterial, como el  $\epsilon$  efectivo y  $\mu$ . Debido al estrechamiento, cada componente de frecuencia de la onda el paquete se detiene en un grosor de guía diferente, lo que lleva a la separación espacial de su espectro y a la formación de un "arco iris atrapado". En la Referencia 30, los autores han optado por una reducción física de la guía de ondas (es decir, reducir el grosor de la guía de ondas NIM a lo largo de la guía de ondas), aunque también funcionarían otros enfoques, como variar  $\epsilon$  y  $\mu$ . Onda electromagnética guiada



#### Negative refractive index tapered waveguide

Figura 15. Arco iris atrapado: una guía de ondas con núcleo de índice negativo puede detener la luz. Una ola guiada

El paquete se inyecta de manera eficiente desde la guía de ondas ordinaria a la heteroestructura izquierda LHH (ver también la Figura 4) 0 en cuyo interior se propaga suavemente debido a la lenta reducción (adiabática) del espesor del núcleo. Los componentes de frecuencia más pequeños (rojos) de la onda se detienen en los espesores de núcleo más pequeños de la LHH, mientras que los componentes más grandes (azules) se detienen en los espesores de núcleo correspondientemente más grandes. (Referencia 30 El esquema de la estructura de detención de la luz basado en la guía de ondas con un núcleo de índice negativo (denominada heteroestructura izquierda, o LHH, en la Referencia 30 se muestra en la Figura 14. Aunque la detención de la luz es posible en otras configuraciones guiadas que no necesariamente requieren  $p$  sea negativo (por ejemplo, una guía de ondas de metal-dieléctrico-metal sería suficiente), la clave aquí es que se puede lograr una perfecta adaptación de impedancia para las guías de onda basadas en metamateriales con el núcleo de índice negativo. Eso es muy importante para maximizar el acoplamiento eficiencia de la guía de onda regular al LHH. Aunque la Referencia 30 no presenta ninguna idea específica sobre lo que se podría hacer con el

ralentizado y / o luz detenida, el esquema que se muestra en la Figura 13 proporciona algunas ideas clave. Además, la perspectiva de producir un material de índice negativo de bajas pérdidas en El dominio óptico aún permanece algo distante. Por lo tanto, puede valer la pena Examinar otros enfoques para ralentizar la luz que han surgido en los últimos años.

Detener y / o ralentizar la luz es una vieja idea que se origina en el concepto atómico de Transparencia Inducida Electromagnéticamente (EIT). El fenómeno se ha considerado puramente mecánico cuántico hasta que varios grupos han demostrado que tiene algunas analogías clásicas (Referencia 31). Sorprendentemente, al menos un grupo ha demostró el año pasado que la EIT se puede lograr utilizando metamateriales plasmónicos (Referencia 32). La idea es crear una "molécula" plasmónica que consiste en un elemento radiativo acoplado con un elemento subradiante (oscuro). La molécula plasmónica mostró respuesta electromagnética que se asemeja mucho a la inducida electromagnéticamente transparencia en un sistema atómico. Debido a su dimensión de sublongitud de onda, este Se demostró que la molécula similar a la transparencia inducida electromagnéticamente es adecuada como bloque de construcción para construir un metamaterial plasmónico de "luz lenta". El diseño específico de la molécula plasmónica se muestra en la Figura 15.

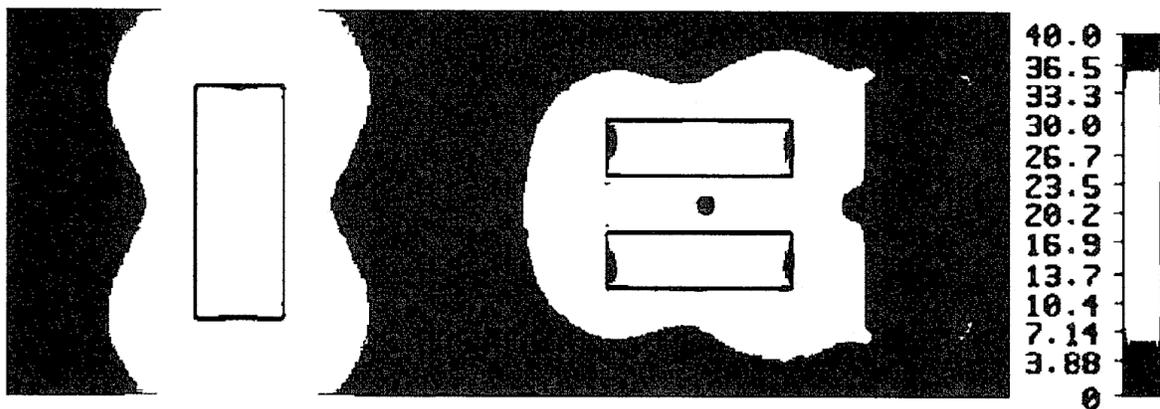


Figura 16. "Molécula plasmónica" que exhibe EIT. Izquierda: El elemento radiativo (tira de metal) por sí mismo se polariza fuertemente por la onda EM incidente, lo que resulta en una transmisión débil / reflexión fuerte. Derecha: elemento radiativo acoplado al elemento "oscuro" (dos tiras). El elemento oscuro posee una resonancia cuadrupolo no radiativa que es excitada por el elemento radiativo y despolariza el elemento radiativo. El resultado:

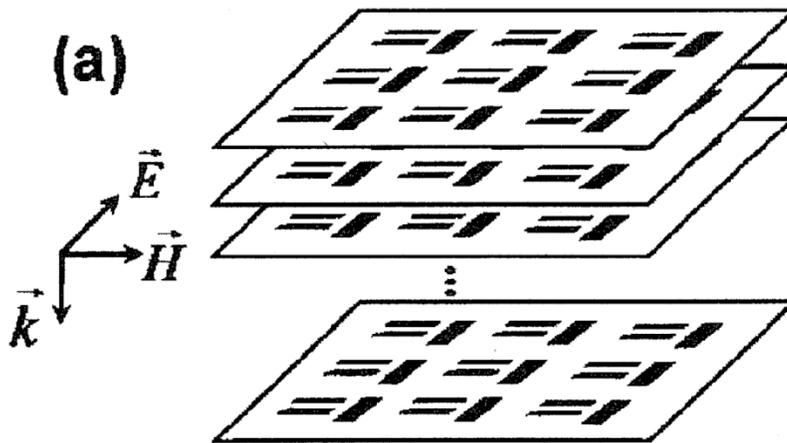
reflejo que se desvanece, alto transmisión. Barra de color: normalizada al campo láser incidente a  $\lambda = 700$  nm. (Referencia 32)

Esta molécula plasmónica específica consiste en el "estado oscuro" (dos plasmónicos paralelos antenas orientadas perpendicularmente al campo eléctrico vertical incidente) y el "estado radiativo" (antena plasmónica única orientada paralelamente al campo eléctrico). La calidad El factor del estado de "antena oscura" es un orden de magnitud mayor que el del antenna "radiativa". Cuando la antenna "radiativa" está separada espacialmente de la antenna "oscura" (o cuando las antenas oscuras no están presentes), toda o la mayor parte de la radiación incidente se refleja en una serie de antenas "radiativas" siempre que la resonancia

La frecuencia de la antenna coincide con la del láser. En este ejemplo, el largo La antenna tiene 128 nm de largo y la longitud de onda de resonancia es  $\lambda = 700$  nm. La clave El efecto aquí es que la resonancia de la antenna "oscura" debe estar al mismo longitud de onda.

Debido a que la resonancia explotada tiene una naturaleza cuadripolo, está ligeramente desplazada hacia el rojo. Por esa razón, la longitud de la antenna "oscura" es de 100 nm. Cuando las dos antenas se juntan, la antenna radiativa polariza la antenna oscura, que, a su vez, despolariza la antenna radiativa. Como resultado, el momento dipolar del sistema acoplado se reduce drásticamente, la reflexión cae y la transmisión aumenta a casi el 100 por ciento (limitado solo por pérdidas). La mayor parte de la energía se almacena ahora dentro de la antenna radiante (oscura).

Si se emplean múltiples capas de antenas oscuras / brillantes como se muestra en la Figura 16, entonces se puede lograr una de las manifestaciones más importantes de EIT; luz "lenta". ralenta luz puede tener muchas aplicaciones tecnológicas interesantes porque (a) la luz lenta es fácil de manipular cambiando los parámetros de la estructura (como se describe en la sección sobre metamateriales sintonizables), y (b) la luz lenta tiene una alta intensidad de campo (mejorada por la relación de la velocidad de propagación en el espacio libre a la velocidad de propagación lenta), por lo tanto, todos los procesos no lineales se mejoran para la luz lenta. Dichos procesos no lineales pueden incluir generación de armónicos, acción de diodos ópticos (consulte la sección sobre ópticos no recíprocos elementos) y muchos otros.



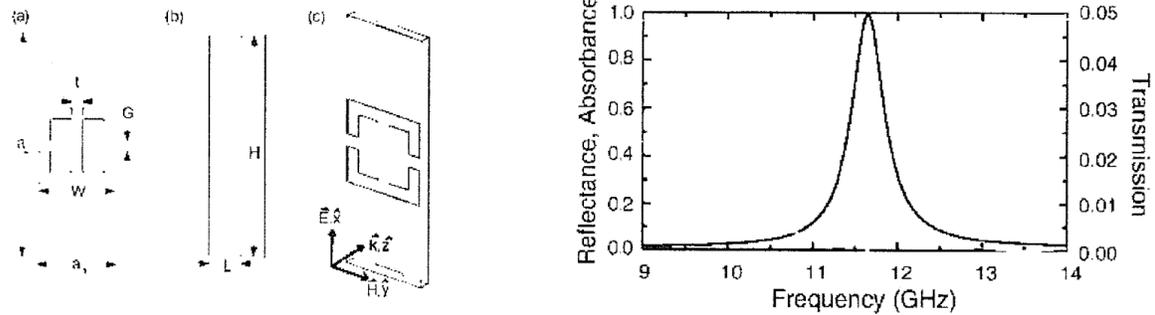
**Figura 17. Verdadero metamaterial multicapa con una celda unitaria** Se muestra en la Figura 15: antena radiativa (tira metálica única) acoplada a una antena oscura (dos barras metálicas perpendiculares). Dicho metamaterial exhibe unaluz "lenta" propagación dea lo largo de la dirección de incidencia (ralentizada en un factor de 30 o más). (Referencia 32)

Es importante darse cuenta de que la geometría sugerida en la Referencia 32 no es única. Por ejemplo, las antenas oscura y radiativa no necesitan residir en el mismo plano. El efecto de la EIT (y el fenómeno relacionado de la luz lenta) tampoco se limita alóptico dominio. Han comenzado a surgir diseños de rango de infrarrojos y microondas. estos Es probable quedominios de frecuencia sean de mayor utilidad para las plataformas aeroespaciales avanzadas que el rango visible al que apuntan la mayoría de los estudios.

### **Metamateriales para la recolección de energía**

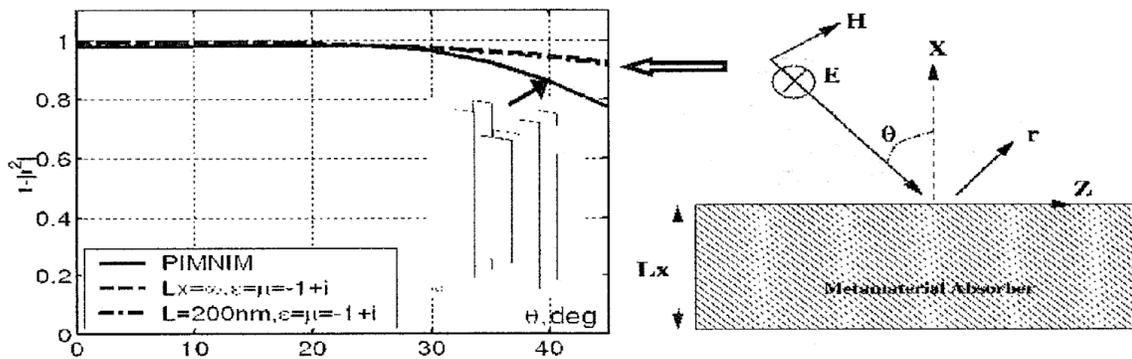
Una de las aplicaciones más importantes de los metamateriales está relacionada con el desarrollo de "absorbentes perfectos" de radiación electromagnética infrarroja, ya sea en la media a larga parte infrarroja del espectro (lo que lo hace relevante para la visión nocturna, recolección de la La Tierra brilla con radiación infrarroja media, etc.) o en el espectro IR cercano a medio (lo que lo hace relevante para la fotografía infrarroja diurna del terreno terrestre). Por ejemplo, la fotografía infrarroja diurna se basa en las diferentes reflectividades de la luz solar de las superficies (por ejemplo, nieve, paredes de ladrillo, paredes de hormigón, césped, etc.) y puede distinguir fácilmente entre esas superficies. Este diferencial de reflectividad tiende a ser mayor entre 2-3 micrones y decae

rápidamente hacia longitudes de onda más largas. El cielo abierto contiene muy poca radiación infrarroja, lo que explica por qué las infrarrojas imágenes / fotografías son muy importantes para los levantamientos aéreos y por satélite. Debido a que la dispersión de la luz en la atmósfera se escala como  $A^{-4}$ , la obtención de imágenes a través de la atmósfera en el rango visible es imposible, y las imágenes infrarrojas se vuelven importantes. Esto es especialmente cierto para el rango de  $1 < \lambda < 4 \text{ } \mu\text{m}$ . Para longitudes de onda más largas ( $\lambda > 10 \text{ } \mu\text{m}$ ), este diferencial de brillo desaparece en gran medida porque el espectro de emisión está dominado por la emisión térmica. De hecho, el brillo máximo de la Tierra es de alrededor de  $\lambda > 10 \text{ } \mu\text{m}$ , con la mayor parte de la energía contenida en el rango de  $3 \text{ } \mu\text{m} < \lambda < 14 \text{ } \mu\text{m}$ . Este rango espectral de longitud de onda más larga (IR medio a lejano) también es muy importante. Se puede utilizar para la recolección de energía nocturna mediante satélites de gran altitud y otras plataformas aeroespaciales. Ha habido un aumento de actividad en esta área, primero en la parte de microondas / THz del espectro electromagnético (Referencias 33, 34), y luego en el infrarrojo medio-lejano (Referencia 20). El concepto de absorbentes basados en metamateriales de banda estrecha presentado en la Referencia 33 tiene el potencial de desarrollar matrices de bolómetros altamente eficientes. Cuando se aplica a la parte infrarroja del espectro, se puede utilizar para la navegación espacial, especialmente cuando las señales infrarrojas débiles de objetos estelares específicos deben captarse y diferenciarse de otras fuentes de radiación. Para tales aplicaciones, la absorción "perfecta" de banda estrecha es muy adecuada. Una matriz de tales bolómetros rechazaría (reflejaría) todas las frecuencias indeseables y se centraría en la característica de longitud de onda única de la fuente de interés. Además, si se puede implementar una serie de detectores de banda estrecha diferentes (por ejemplo, sintonizados en diferentes frecuencias), la capacidad de generación de imágenes hiperespectrales podría traer beneficios adicionales. Por ejemplo, las temperaturas absolutas de una fuente de radiación (es decir, cuerpos estelares) podrían determinarse con precisión y podrían mejorar aún más la precisión de la navegación espacial.



**Figura 18. Absorbedor de microondas de banda estrecha "perfecto".** (a-c): Diseño de celda unitaria. Panel derecho: absorción / transmisión / reflexión simulada. (Referencia 33)

En la Figura 17 se muestra un posible diseño para la banda de frecuencia de microondas. La alta absorción se logra reduciendo los reflejos a cero. Esto se logra eligiendo parámetros de metamateriales tales que  $\epsilon_r = 1$ . ( $\mu_r = 1$ ) - en el resonancia frecuencia deTenga en cuenta que tanto la parte real como la imaginaria de la permitividad y la permeabilidad deben ser iguales entre sí, y que las partes imaginarias no necesariamente tienen que ser pequeñas para aplicaciones de absorbedor. De hecho, es deseable que no sean demasiado pequeños, lo que permite una absorción del 100 por ciento dentro de una sola capa de metamaterial. El diseño anterior se puede reducir al rango de THz, como se demostró más tarde en la Referencia 34. Es difícil encontrar materiales fuertemente absorbentes en frecuencias de THz que sean compatibles con la fotolitografía estándar. Por tanto, una potencial aplicaciónde estas estructuras de metamateriales es como elementos absorbentes entérmicos detectores. Tambiénun es necesariofuerte coeficiente de absorción para tener una pequeña térmica masa. Esto es importante para optimizar la respuesta temporal de los detectores térmicos. El metamaterial presentado aquí tiene una película de 6 micrones de espesor (es decir, un espesor de  $\lambda / 50$  para la radiación de THz) y una absortividad del 70 por ciento, lo que produce un coeficiente de absorción de  $2000 \text{ cm}^{-1}$ . Un inconveniente del diseño original fue el estrecho rango angular del absorbedor. La absorción se redujo drásticamente cuando el ángulo de incidencia era tan pequeño como 20 grados. La razón de esto es una celda unitaria relativamente grande del metamaterial. De hecho, cuando el tamaño de la celda unitaria es mayor o comparable a  $\lambda / 2n$ , donde  $n$  es el índice de refracción del sustrato, es inapropiado llamar a tal estructura un "metamaterial". Un verdadero impedancia metamaterial conigualada tendría, de hecho, siempre una respuesta angular muy amplia.

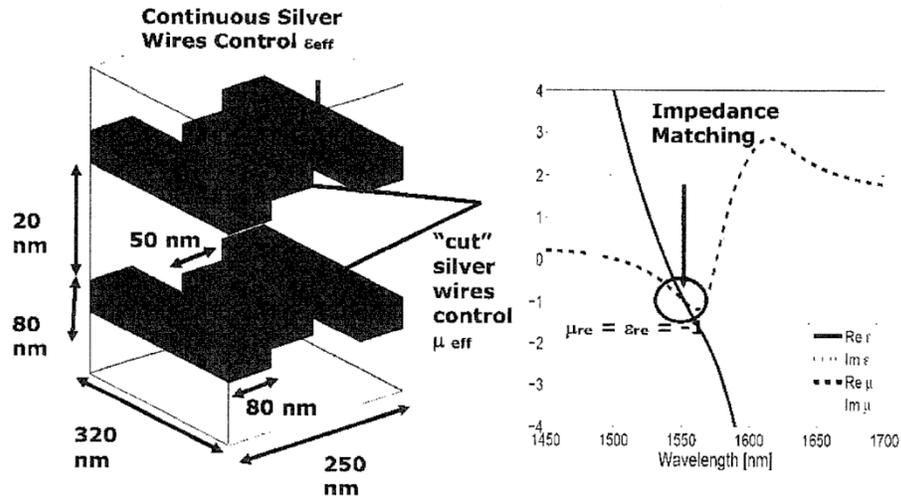


**Figura 19. Absorbedor plasmónico de gran angular basado en metamaterial de índice negativo.** Panel derecho: esquema de un experimento de medición de la absorción. Un metamaterial genérico con  $\epsilon = -8,1$ ,  $\mu = -1 + i$ ,  $p = L/\lambda$  asumido, panel izquierdo; dependencia angular de la absorción para un genérico y específico (mostrado en el recuadro) metamaterial. Ambos exhiben absorción de gran angular. (Referencia 20) Este hecho se puede expresar mediante una fórmula simple para

$$A = 1 - \frac{\left| \cos\theta - \sqrt{\epsilon_{yy} / \mu_{zz} - \sin^2\theta / (\mu_{xx}\mu_{zz})} \right|^2}{\left| \cos\theta + \sqrt{\epsilon_{yy} / \mu_{zz} - \sin^2\theta / (\mu_{xx}\mu_{zz})} \right|^2}$$

el

coeficiente de absorción  $A$  (Referencia 20): donde hemos asumido que, para una incidencia normal, este metamaterial está impedancia emparejado por:  $\epsilon = -1 + i$ . La ecuación 4 se puede simplificar bajo el supuesto de  $p \gg 1$ ,  $\epsilon_{yy} = 1$ ,  $\mu_{xx} = 1$ ,  $\mu_{zz} = 1 - \tan^4(\theta/2)$ , lo que implica que  $A \approx 0,97$  incluso para  $\theta = \pi/6$ . El desafío, por supuesto, es diseñar un verdadero metamaterial óptico con impedancia coincidente. Se ha logrado el éxito en el diseño de dicho metamaterial (Referencia 20). El diseño recientemente publicado se muestra en la Figura 19. La celda unitaria consta de dos capas de antenas plasmónicas; la antena de hilo cortado que imparte una respuesta magnética (así como algo eléctrica) a este metamaterial, y las antenas de hilo continuo que imparten una respuesta puramente eléctrica. Se encuentra que la capacidad de gran angular podría ser muy importante para varias aplicaciones. La eficiencia de absorción de potencia de gran angular es deseable para miniaturizar fotodetectores o microbolómetros hasta el tamaño de la longitud de onda.



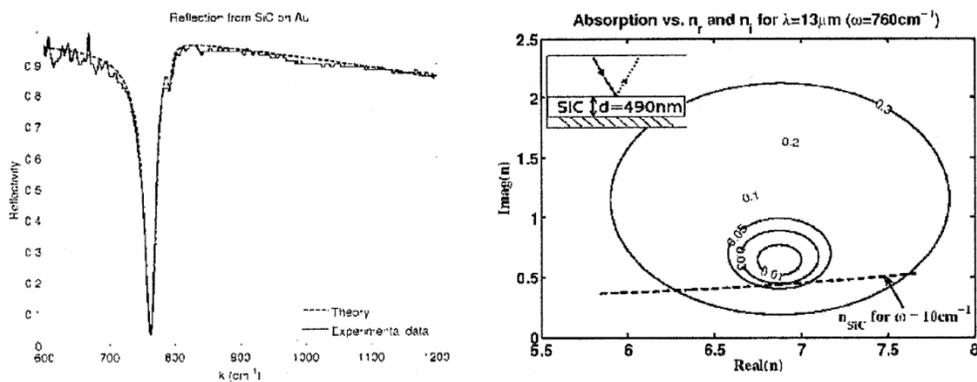
**Figura 20. Diseño específico de un absorbente plasmónico de gran angular basado en un metamaterial de índice negativo que opera a  $\lambda = 1550$  nm.** Panel izquierdo: esquema de la estructura plasmónica basada en astillas. Panel derecho: la extraídas permitividad y la permeabilidad para la incidencia normal demuestran la coincidencia de impedancia:

$$\epsilon_{\text{eff}} = -1 + i. \text{ (Referencia 20)}$$

Por ejemplo, para enfocar la luz en un fotodetector o microbolómetro del tamaño de una longitud de onda se requieren ópticas de alta NA (una NA = 0,5 o superior). Por lo tanto, un fotodetector debería poder absorber la luz incidente en un ángulo de 30 grados. Para las plataformas aeroespaciales avanzadas, es fácil imaginar un escenario en el que una plataforma aérea esté alimentada por una fuente de láser infrarrojo de alta potencia ubicada en la Tierra. Si la longitud de onda cae dentro de la ventana de transparencia de la atmósfera (entre las 3 y las 4, Y también alrededor de las 10), Entonces tal 22

La perspectiva no es demasiado descabellada porque la dispersión en el infrarrojo medio de los gases atmosféricos es esencialmente cero. Para que un escenario de alimentación remota de este tipo sea factible, se necesitaría un absorbedor altamente eficiente en la longitud de onda específica correspondiente a la de la fuente. Además, como el espacio de plataforma se está moviendo, es deseable que la absorción se mantienen altos incluso para los no-ángulos de incidencia normal.

La segunda aplicación es para termofotovoltaicos (TPV) (Referencia 35). Es casi seguro que se instalará algún tipo de convertidor termofotovoltaico en las avanzadas plataformas aeroespaciales del futuro. En la actualidad, incluso los automóviles eléctricos avanzados (experimentales) están utilizando celdas TPV para convertir el calor de sus motores en electricidad. Ya se ha demostrado que convertidores son capaces de aumentar la autonomía de los vehículos eléctricos en un factor de 3. Creemos que los metamateriales podrían desempeñar un papel importante en el desarrollo de células TPV eficientes. En virtud de la ley de Kirchhoff, la emisividad de un término se emisor acerca al límite del cuerpo negro solo si la absorptividad se acerca a la unidad. Además, los radiadores selectivos en longitud de onda pueden mejorar drásticamente la eficiencia de la generación corriente en una celda TPV si su espectro de emisión coincide con la banda prohibida del convertidor TPV. Por ejemplo, un convertidor TPV típico, GaSb, tiene un intervalo de banda de  $EG = 0,7$  eV que sería ideal para un radiador de longitud de onda selectiva que funciona en el infrarrojo cercano alrededor de  $\lambda = 1,7$   $\mu\text{m}$ .



**Figura 21. (Izquierda) Resultado experimental, reflectividad versus longitud de onda, que inspiró el propuesto esfuerzo: un material de absorción moderada (SiC) se convierte en un "absorbente de IR medio perfecto" cuando una película SiC de  $\lambda / 4$  de espesor está respaldada por un metal Espejo. (Derecha): Gráfico teórico - Contornos de reflectividad constante trazados en el espacio (Real ( $n$ ), Imag ( $n$ )). Se requiere una alta capacidad de absorción del material Imag ( $n$ ) para lograr una absorción perfecta ( $R = 0$ ). Pregunta planteada: ¿puede un espejo semitransparente basado en metamateriales mejorar la absorción y dar como resultado un absorbente ultrafino casi perfecto?**

Los absorbentes perfectos que se muestran en las Figuras 17-19 pueden ser demasiado complejos para prácticas aplicaciones. Los metamateriales tienden a tener pérdidas debido a la gran concentración de campo en el metal. Por lo tanto, recientemente se ha comenzado a trabajar en un nuevo tipo de metamaterial (los llamados MMC mencionados en la Introducción), que potencialmente podrían hacer que los débiles semiconductores de absorción (es decir, Si en el visible) absorban mucho más fuerte. El objetivo aquí es hacer un absorbente delgado (aunque no necesariamente con una longitud de onda muy inferior) respaldado por una hoja de CMM que evitaría los reflejos y daría como resultado una absorción muy alta. Las aplicaciones que se consideran son esencialmente las mismas que para los absorbentes "perfectos" descritos anteriormente. Por ejemplo, los satélites pueden utilizar el brillo de la Tierra para recargar la batería durante la noche. El poder acumulado es bastante alto; 1 m<sup>2</sup> de superficie negra