

Nanomateriales de gran interés tecnológico.

Tema 6

1

Tema 6: Materiales de gran interés tecnológico

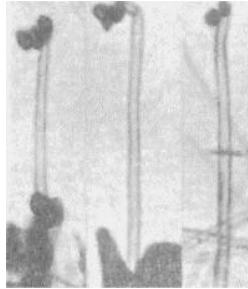
- 6.1 *Nanotubos de carbono: propiedades, métodos de síntesis y aplicaciones.*
- 6.2 *Silicio: aplicaciones fotoelectrónicas, semiconductores*
- 6.3 *Nanoestructuras de ZnO.*

2

6.1 Nanotubos de carbono

Historia

- ☒ Las fibras y filamentos de carbono se han estudiado desde hace más de 100 años (1890).



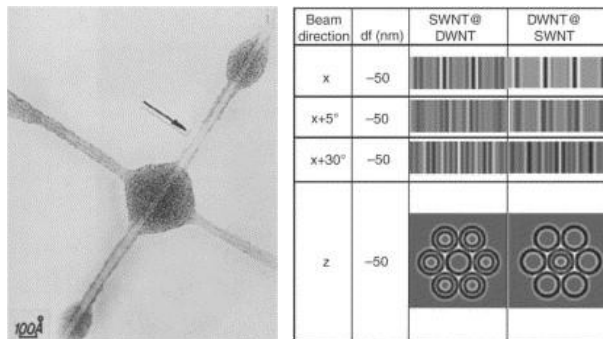
Imágenes TEM de tres fibras de carbono. (Radushkevich and Lukyanovich, 1950).

- ☒ Producción progresiva \Rightarrow demanda realizada por la industria espacial y aeronáutica.
- ☒ La preparación de fibras que sean resistentes a la propagación de fracturas requeriría un desarrollo de los métodos de crecimiento de las mismas (CVD)

3

6.1 Nanotubos de carbono

- ☒ En 1970 se muestra una imagen de los que hoy denominamos nanotubo de carbono (CNT) de simple- (SWNT) o doble- (DWNT) pared.

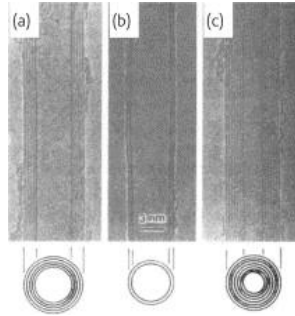


(Izqda) Primera imagen de los denominados SWNT ó DWNT, año 1975. (Dcha) Imágenes simuladas de DWNT en un haz de SWNT y un SWNT en un haz de DWNT.

4

6.1 Nanotubos de carbono

- ☒ Lijima (1991), muestra imágenes HRTEM de nanotubos de carbono donde se visualizan con claridad las múltiples capas concéntricas de grafeno (MWNT).



Imágenes HRTEM de lijima de tres MWNTs constituidos por 3, 5 y 7 capas concéntricas de grafeno.

- ☒ El interés de este tipo de fibras ha continuado hasta la actualidad.
- ☒ El número de publicaciones dedicadas a los CNT aumenta todavía de forma exponencial.

5

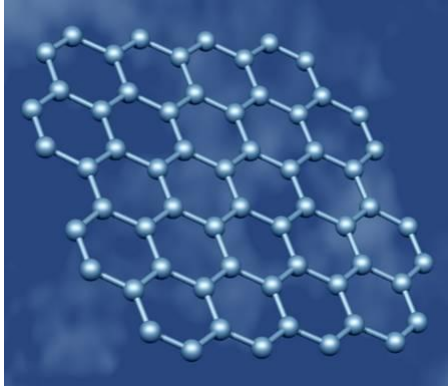
6.1 Nanotubos de carbono

Estructura

- ☒ CNT \Rightarrow cilindros de grafeno a nanoescala que se une en el punto final por medio fullereno
- ☒ Los SWNT se clasifican de acuerdo a tres posibles configuraciones: zig-zag, sillón y quiral.
 - ✓ Configuración de zig-zag: dos enlaces C-C opuestos de cada hexágono quedan paralelos al eje del tubo
 - ✓ Configuración de sillón: los enlaces C-C son perpendiculares al eje.
 - ✓ En todas las otras configuraciones: los enlaces C-C opuestos se disponen en cierto ángulo respecto al eje del tubo \Rightarrow nanotubo helicoidal quiral.
- ☒ Las propiedades de los CNTs dependen de su estructura.
 - ✓ Así, para diámetros similares, todos los SWNTs de sillón y 1/3 de los de zig-zag son metálicos, el resto son semiconductores.

6

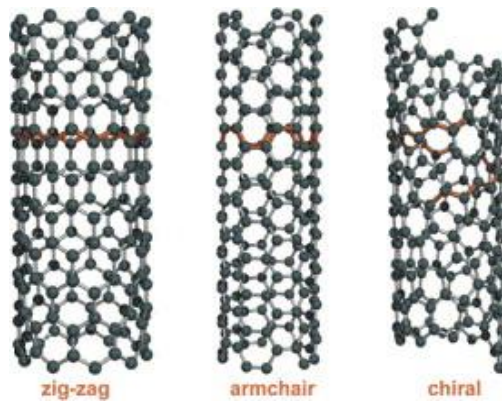
6.1 Nanotubos de carbono



Grafeno

7

6.1 Nanotubos de carbono



Modelos de las tres estructuras atómicas de SWNT

8

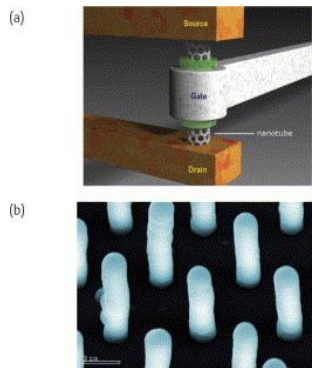
6.1 Nanotubos de carbono

Propiedades

- ☒ Los CNTs presentan extraordinarias relaciones de aspecto:
 - ✓ Los SWNTs pueden crecer hasta varios centímetros (10^9 veces su diámetro).
 - ✓ Los MWNTs tienen longitudes de hasta un centímetro y diámetros de 5-100 nm.
- ☒ Se han descrito extraordinarias propiedades mecánicas.
- ☒ Mediante dopaje se puede modificar su respuesta electrónica.
- ☒ Atractivos para aplicaciones en:
 - ✓ Nano-electrónica
 - ✓ Sensores
 - ✓ Rellenos en polímeros
 - ✓ Cerámica
 - ✓ Compuestos metálicos.
- ☒ Hoy en día las propiedades de los nanotubos de C se miden en masa.
 - ✓ Imposibilidad de obtener materiales limpios
 - ✓ Los métodos de crecimiento son insuficientes para controlar la producción de CNTs con propiedades y estructuras uniformes.

9

6.1 Nanotubos de carbono



(a) Modelo de transistor CNT vertical. (b) Fibras de carbono crecidas por PECVD, 1 μm de diámetro, utilizadas como conectores

10

6.1 Nanotubos de carbono

Propiedades individuales de los CNTs.

- ☒ Los datos descritos de propiedades de los CNTs varían significativamente.

Author	Young's modulus [TPa]	Tensile strength [TPa]	Nanotube type	Method
Treacy et al. ¹⁰²	1.8		MWNT _{ARC}	thermal vibrations (TEM)
Krishnan et al. ¹⁰³	1.25		SWNT _{LSR}	thermal vibrations (TEM)
Wong et al. ¹⁰⁴	1.28		MWNT _{ARC}	AFM
Salvetat et al. ¹⁰⁵	0.81		MWNT _{ARC}	AFM
Salvetat et al. ¹⁰⁶	0.01-0.05		MWNT _{CVD}	AFM
Yu et al. ¹⁰⁷	0.27-0.95	0.01-0.06	MWNT _{ARC}	AFM (dual cantilevers)
Demczyk et al. ¹⁰⁸	0.8	0.15	MWNT _{ARC}	TEM (tension)
Bacon ¹⁰⁹	0.8		Carbon whiskers	
Edie et al. ¹¹⁰	0.2-0.9	0.002-0.007	Carbon fibers	

Variación del modulo de Young y fuerza de tensión para CNTs diferentes.

- ☒ Falta de reproducibilidad en las medidas:
 - ✓ Repetir las medidas en varios tubos hasta encontrar el valor esperado.
 - ✓ Los métodos de síntesis empleados evidencian que no es posible todavía preparar nanotubos monoquirales.
 - ✓ Incertidumbre en la aplicación práctica de los CNTs.

11

6.1 Nanotubos de carbono

- ☒ La falta de consistencia de los resultados se comprende:
 - ✓ Los nanotubos en una muestra difieren en longitud, diámetro, quiralidad, y número de paredes
 - ✓ Los nanotubos preparados por métodos diferentes contienen distintos niveles de defectos y subproductos.
- ☒ Caracterización de los CNTs comerciales:
 - ✓ No se hace de forma exhaustiva.
 - ✓ Se asume que la producción en masa obtiene nanotubos de características similares

12

6.1 Nanotubos de carbono

Métodos de síntesis vs. propiedades de nanotubos de carbono

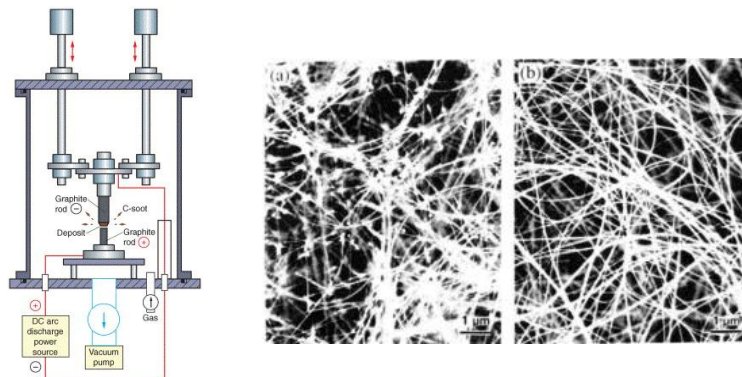
- ☒ La producción de CNTs es sencilla.
- ☒ Todos los métodos requieren de una fuente de C, un catalizador metálico y calor.
- ☒ La preparación de SWNT requieren del catalizador metálico.

a) Arco de descarga de C

- ☒ Utiliza dos electrodos de grafito a través de los cuales se pasa una corriente directa en una atmósfera inerte de He.
- ☒ Se obtiene un depósito en el cátodo con una capa externa gris y dura con una capa interna y blanda que contiene MWNTs, partículas poliédricas y carbono amorfo.
- ☒ Con el empleo de catalizadores (Fe, Co, Ni) se pueden obtener SWNT.
- ☒ En el caso de los MWNTs, el empleo de B permite aumentar la longitud de las fibras y favorece la formación en zig-zag.

13

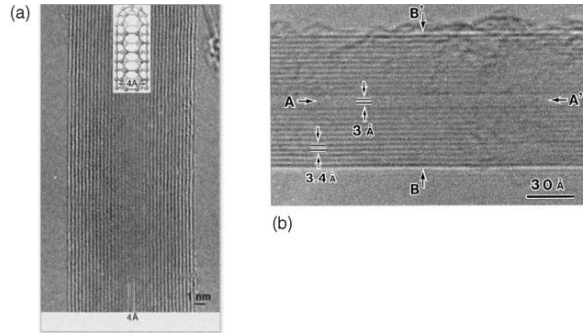
6.1 Nanotubos de carbono



(Izquierda) Esquema del aparato para formar CNTs por método de arco de descarga. (Derecha) Imágenes SEM de H₂-arc MWNTs: (a) como se recogen (b) purificados por radiación IR.

14

6.1 Nanotubos de carbono



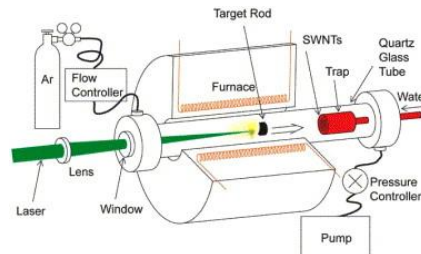
Imágenes HRTEM de H_2 -arc MWNTs

15

6.1 Nanotubos de carbono

b) Técnicas de vaporización laser ó ablación laser.

- ☒ También utiliza la condensación de átomos de C.



Esquema del montaje horno-laser

- ☒ La generación de SWNTs necesita del empleo de catalizadores (Ni, Co, Pt) en la fuente de grafito.
- ☒ No se suele utilizar para obtener MWNTs.
- ☒ La calidad, longitud, diámetro y distribución quiral es similar a la de los nanotubos obtenidos por arco de descarga.

16

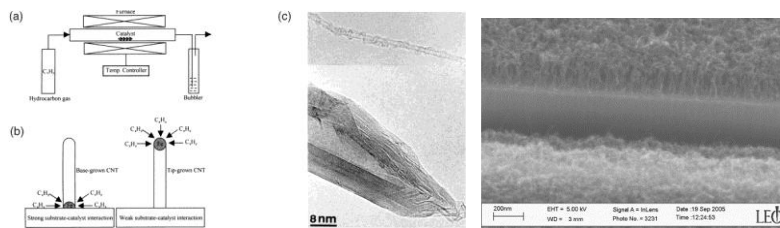
6.1 Nanotubos de carbono

c) Deposición de vapor químico (CVD)

- ☒ Obtuvo las primeras fibras de C (1890).
- ☒ CVD y PECVD son los métodos más utilizados para obtener un crecimiento alineado de MWNTs y SWNTs en varios sustratos: Ni, Si, SiO₂, acero, vidrio, etc.
- ☒ Los MWNTs obtenidos son poco cristalinos, con gran número de defectos, y por tanto menos derechos.
- ☒ Pueden alcanzar 1 cm de longitud y diámetros de hasta 100 nm, variando el número de paredes de 3 a 100.
- ☒ Crecen perpendiculares al sustrato, por lo que resulta fácil medir su longitud
- ☒ Es la técnica más versátil para obtener CNTs dopados con B ó N.

17

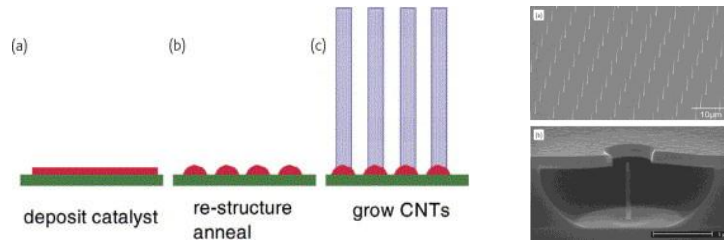
6.1 Nanotubos de carbono



(a) Esquema del dispositivo CVD. (b) Modelo de crecimiento de CNT. (c) Un ejemplo de SWNT y MWNT crecidos por CVD. (Derecha) Depósito de SWNTs alineados crecidos por CVD.

18

6.1 Nanotubos de carbono



(Izquierda) Crecimiento por CVD: (a) depósito de catalizador; (b) re-estructura en nanopartículas a las condiciones especificadas; y (c) crecimiento de los nanotubos. (Derecha) MWNTs crecidas en alineación vertical, por PECVD, para aplicaciones electrónicas.

19

6.1 Nanotubos de carbono

d) Electrolisis

- ⊗ Es el método menos empleado.
- ⊗ Los MWNTs se forma cuando una corriente se pasa entre dos electrodos de grafito inmersos en sales iónicas fundidas, vgr. LiCl a 600 °C.
- ⊗ El material obtenido se compone de MWNTs, partículas metálicas encapsuladas en carbón, carbono amorfo y filamentos de carbono.
- ⊗ Sólo produce MWNTs, con diámetros de 10-20 nm, longitud > 500 nm y sólo unas pocas paredes.

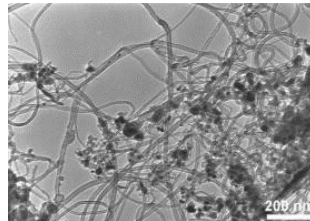


Imagen TEM característica de MWNTs obtenidos electroquímicamente

20

Celdas fotovoltaicas

- ☒ En los últimos 50 años se han afianzado las aplicaciones de las celdas fotovoltaicas.
- ☒ En estas aplicaciones, las celdas de Si cristalino han dominado en estos 50 años.
- ☒ Otras celdas se han desarrollado que compiten con las anteriores en términos de costes de producción. Todos los semiconductores poseen band-gaps de 1.1-1.7 eV.

Mejores eficiencias descritas para diferentes celdas solares.

Type of solar cell	Highest reported small area cell efficiency			Highest reported module efficiency		
	Efficiency (%)	Area (cm ²)	Reference	Efficiency (%)	Area (cm ²)	Reference
Crystalline Si	24.7	4.0	UNSW ¹ , PERL ²	22.7	778	UNSW/Gochermann ³
Multicrystalline Si	20.3	1.0	FhG-ISE ⁴	15.3	1017	Sandia/HEM ⁵
Amorphous (and nanocrystalline) Si	10.1	1.2	Kaneka, single junction ⁶	10.4	905	USSC ⁶ , triple junction ⁷
μc-Si/α-Si:H micro-morph cell	11.7	14.2	Kaneka, minimodule ⁸	11.7	14.2	Kaneka, minimodule ⁸
HITV cell	21.8	100.4	Sanyo Corporation ⁹	17.3	11 000	Sanyo Corporation ⁹
GaAs cell	25.8	3.9	Kopin Corporation ¹⁰	Not relevant	Not relevant	
InP cell	21.9	4.0	Spire Corporation ¹¹	Not relevant	Not relevant	
GaInP ₃ /GaAs/Ge multijunction cell	39.3*	0.4	Spectrolab, concentrator ¹²	Not relevant	Not relevant	
CdTe	16.5	1.0	NREL ^{4,13}	10.7	4874	BP Solarex ¹⁴
CIGS ¹⁵	19.5	0.4	NREL ¹⁵	13.4	3459	Showa Shell ¹⁶

¹ UNSW, University of New South Wales.

² PERL, passivated emitter rear locally diffused.

³ FhG-ISE, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.

⁴ USSC, United Solar Systems Corporation.

⁵ HIT, heterojunction with intrinsic thin layer.

⁶ NREL, National Renewable Energy Laboratory.

⁷ CIGS, copper indium gallium diselenide.

⁸ CIGS, copper indium gallium diselenide.

⁹ CIGS, copper indium gallium diselenide.

¹⁰ CIGS, copper indium gallium diselenide.

¹¹ CIGS, copper indium gallium diselenide.

¹² CIGS, copper indium gallium diselenide.

¹³ CIGS, copper indium gallium diselenide.

¹⁴ CIGS, copper indium gallium diselenide.

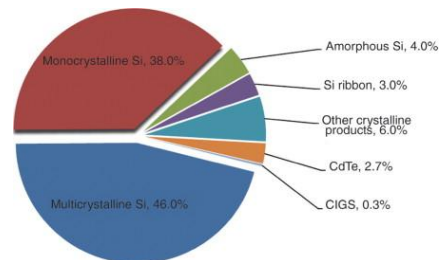
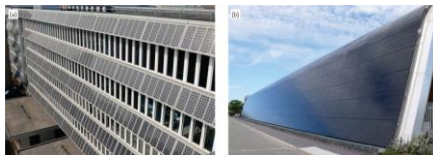
¹⁵ CIGS, copper indium gallium diselenide.

¹⁶ CIGS, copper indium gallium diselenide.

*Boeing-Spectrolab (Sylmar, CA) announced a 40.7% efficient cell under 240x concentrated light in December 2006 (unpublished).

21

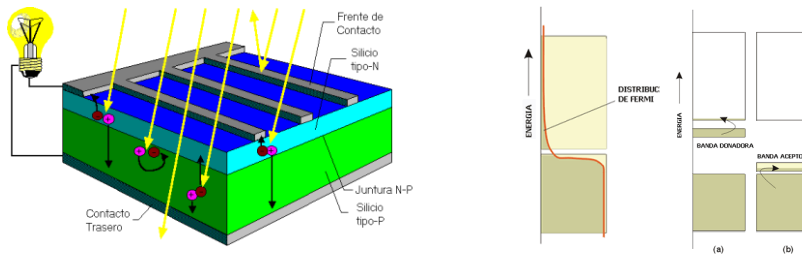
- ☒ La tecnología con más éxito es la basada en el Si multicristalino.



Cuota de mercado (2006) de los diferentes tipos de celdas solares

22

- ⊗ **Celda fotovoltaica:** dispositivo en el que un semiconductor de estado sólido posee una región de composición química variable, a la que se le asocia un gradiente de campo eléctrico el cual se utiliza para separar los pares hueco-electrón fotogenerados en la región.
- ⊗ Obtención de una gradación en la composición química :
 - ✓ Deposición conjunta de dos materiales distintos
 - ✓ Dopando un único semiconductor en un modo asimétrico

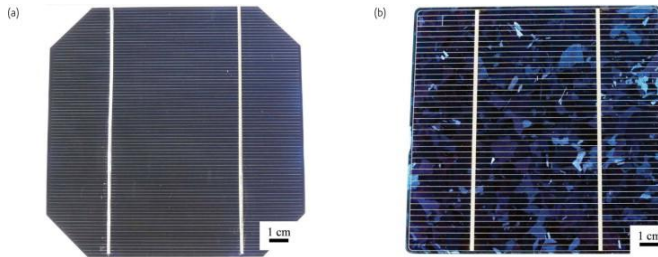


Representación esquemática de una celda solar de silicio

23

- ⊗ Las primeras celdas solares fueron desarrolladas por la compañía Bell Telephone en 1954, con una eficiencia del 4 % en conversión de energía, llegándose al final de esa década a eficiencias del 11 % → Aplicación en los satélites espaciales
- ⊗ Posteriormente se construyeron con monocristales de silicio: más caras, eficiencias del 15 – 25 %.
 - ✓ Las obleas han de tener un grosor superior a las 200 μm y superficie con cierta rugosidad.
- ⊗ En 1974 se utiliza silicio amorfo: eficiencia del 5 % en conversión de energía.
 - ✓ Posee una band-gap de 1.65 eV.
 - ✓ Absorbe la luz de un modo 40 veces más fuerte que Si monocristalino.
- ⊗ En el silicio amorfo, los transportadores tienen una movilidad muy baja y se recombinan rápidamente → se requiere de celdas muy delgadas.
 - ✓ Presentan eficiencias entorno al 10 % (calculadoras, televisores miniaturizados y cargadores de batería portátiles).
 - ✓ Se preparan depositando capas delgadas de Si amorfo mediante PECVD de gases que contienen silano, SiH_4 .
- ⊗ Las celdas solares de Si multicristalino se obtienen al verter Si fundido en un contenedor y dejarlo enfriar.

24

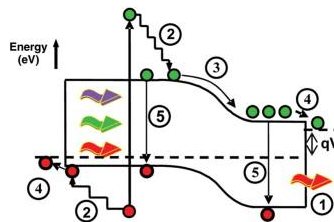
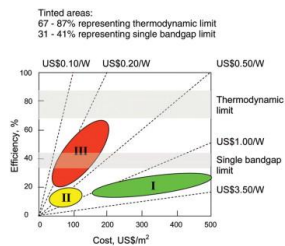


Celdas solares de (a) Si cristalino, y (b) multicristalino

25

Tercera generación de celdas fotovoltaicas

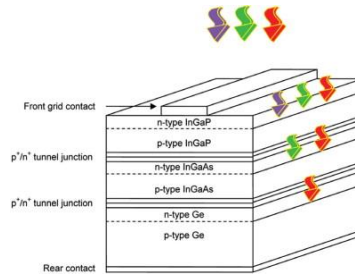
- ☒ Objetivo → reducir los costes a 0.5-0.2 dólares/W.
 - ✓ Mantener costes de producción
 - ✓ Mejorar las eficiencias mejorando las técnicas de deposición de capa delgada.
- ☒ ¿mecanismos de pérdida de energía en las celdas de band-gap única?
 - ✓ La incapacidad de absorber fotones con menos energía que la de la band-gap
 - ✓ La termalización del exceso de energía del fotón.



(Izquierda) Proyección de eficiencia y costes para celdas de primera (I), segunda (II) y tercera (III) generación. (Derecha) Procesos de pérdida en una celda solar estándar: (1) no-absorción de fotones inferiores a la band-gap; (2) pérdida de por termalización; (3) y (4) pérdidas de voltaje en uniones y contactos; (5) pérdida por recombinación

26

- ☒ Propuesta → Dispositivos con umbrales (niveles de energía): *celdas tandem*.
 - ✓ Aumentar el número de niveles de energía
 - ✓ Generar un par transportador múltiple para fotones de alta energía ó un único transportador para múltiples fotones de baja energía
 - ✓ Captura de transportadores antes de la termalización



Esquema simplificado de una celda solar tandem de tres band-gap. La band-gap de cada celda disminuye desde la parte frontal, originado el desdoblamiento del espectro y la selectividad del fotón.

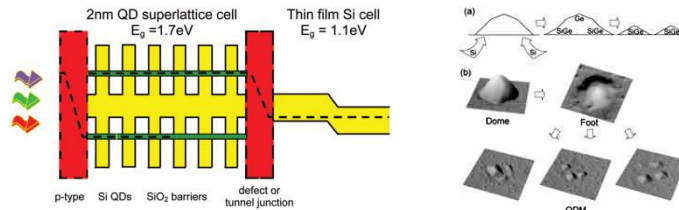
27

- ☒ Aspecto más interesante: *tanto el desdoblamiento del espectro solar como la selectividad del fotón se consiguen de forma automática*
- ☒ La mayor eficiencia de este dispositivo se consigue al optimizar:
 - ✓ La band-gap apropiada
 - ✓ Espesor
 - ✓ Profundidad de la unión
 - ✓ Características de dopaje
- ☒ La baja eficiencia de las celdas de **Si amorfo** se pueden mejorar → celda tandem con una o dos celdas inferiores de la aleación *a-Si:Ge* (de band-gap inferior).
 - ✓ Se preparan mediante la deposición de capas delgadas (CVD).
 - ✓ El coste de producción se minimiza
 - ✓ La eficiencias se pueden mejorar hasta conseguir un 10%.

28

6.2 Silicio: aplicaciones fotoelectrónicas, semiconductores

- ⊗ Alternativa: mantener la ventaja de los materiales cristalinos y la deposición de capas delgadas pero disminuir los costes del crecimiento epitaxial de materiales cristalinos (sistemas III-IV, y Si).
- ⊗ Objetivo → producir materiales basados en Si de mayor band-gap utilizando el *confinamiento de cuantos en nanoestructuras*. optimizar:
 - ✓ Preparación de huecos cuánticos (QW, *quantum well*) o puntos cuánticos (QD, *quantum dot*) de silicio.
 - ✓ Se disponen entre láminas de una material dieléctrico basado en compuestos de silicio: SiO_2 , Si_3N_4 , SiC.
 - ✓ Para QD de 2 nm se obtiene una bangap efectiva de 1.7 eV.



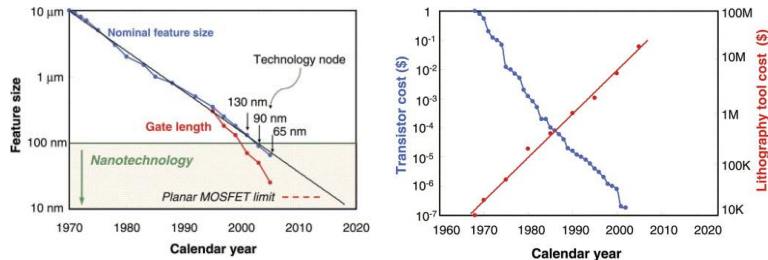
Celda tandem de nanoestructura de Si / capa delgada de Si.

29

6.2 Silicio: aplicaciones fotoelectrónicas, semiconductores

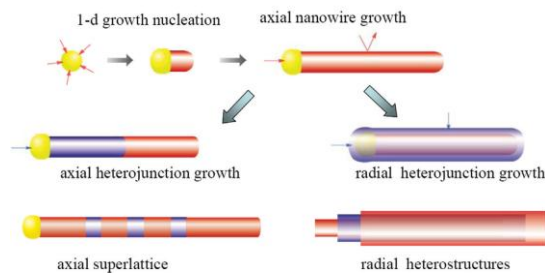
Microelectrónica

- ⊗ Evolución de los dispositivos microelectrónicos (últimos 40 años)
 - ✓ Disminución de tamaño: para un transistor de 10 μm a 30 nm
 - ✓ Mejora de reducción de costes, rendimiento y potencia.
 - ✓ Los semiconductores originales tipo Si bipolar se han ido sustituyendo por los semiconductores p- canal de óxido metálico complementarios, CMOS.
- ⊗ La disminución de tamaño de los CMOS está cerca de su fin (unos 10 nm)



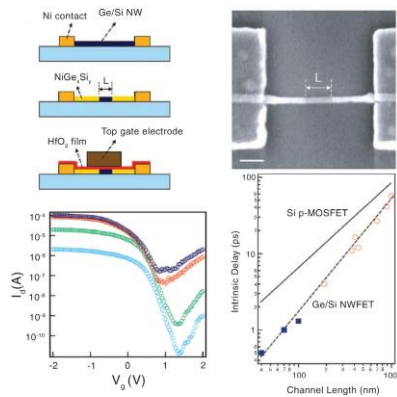
30

- ⊗ La disminución del tamaño de los transistores conlleva una serie de problemas asociados (vg. pequeñas *gate* originan fugas de corriente).
- ⊗ Las estructuras más interesantes son los nanohilos de semiconductores → , cristales únicos con diámetros de unos pocos nanómetros y longitudes de decenas de micrómetros.
 - ✓ Estructuras core/shell de elementos de los grupos 14, 13/15 y 12/16, estructuras de super-red y ramificadas.
 - ✓ Control preciso de la composición, morfología y propiedades eléctricas del nanohilo.
- ⊗ Esquema de crecimiento "bottom-up".



31

- ⊗ Obtención de dispositivos transistores tipo-p de ultra alto rendimiento. Comparados con nanohilos homogéneos de Si o Ge, los nanohilos con heteroestructuras Ge/Si core/shell ofrecen dos ventajas claves:
 - ✓ Se pueden formar contactos transparentes (efecto *Schottky* negativo) al canal de conducción
 - ✓ Se pueden suprimir las impurezas y dispersión en superficie



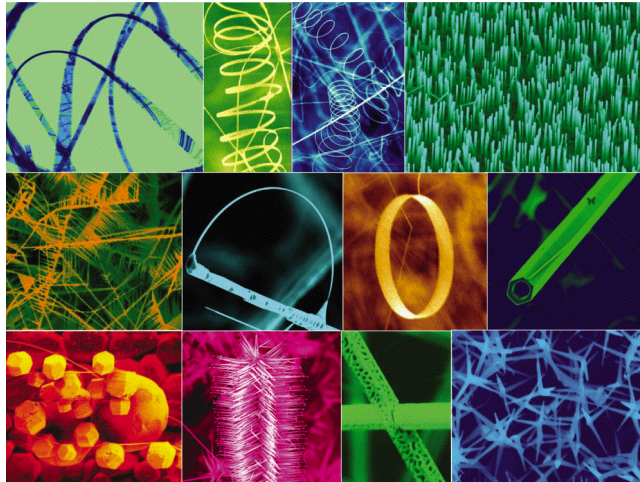
32

6.3 Nanoestructuras de ZnO

- ☒ El **óxido de cinc** es un material único:
 - ✓ Múltiples propiedades de semiconductor, piezoelectricidad y piroelectricidad
 - ✓ Puede cristalizar en nanoestructuras muy diferentes y únicas.
 - ✓ Aplicaciones potenciales: optoelectrónica, sensores, transductores, ciencia biomédica.
- ☒ Descubrimiento de las nanocintas de óxidos conductores → auge de la investigación de óxidos basados en nanoestructuras unidimensionales.
 - ✓ Aplicaciones únicas y nuevas en óptica, optoelectrónica, catálisis y piezoelectricidad.
 - ✓ Se han sintetizado para **óxidos** semiconductores de **Zn, Sn, In, Cd y Ga**.
 - ✓ Las nanocintas preparadas son puras, estructuralmente uniformes, de cristal único, en su mayoría libre de dislocaciones, y presentan una sección de corte de dimensiones constantes.
 - ✓ La morfología tipo cinta parece ser una característica común de esta familia de semiconductores.
 - ✓ Con estas nanocintas se han fabricado transistores de efecto de campo, nanosensores de gas ultrasensitivos, nanoresonadores, etc.

33

6.3 Nanoestructuras de ZnO



34

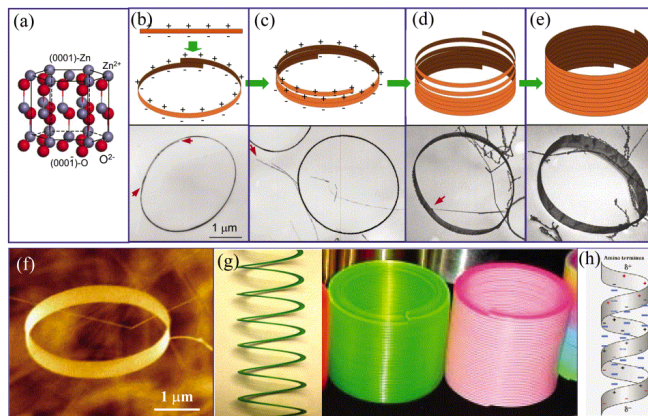
6.3 Nanoestructuras de ZnO

Nanohélices/nanomuelles, nanoanillos

- ☒ La familia con estructura wurtzita: **ZnO, GaN, AlN, ZnS y CdSe:**
 - ✓ Importantes para aplicaciones en optoelectrónica, laser y piezoelectricidad.
- ☒ Dos características importantes de esta estructura:
 - ✓ Simetría no central
 - ✓ Superficie polar
- ☒ La estructura se describe: *una serie de planos alternados compuestos de iones óxido e iones Zn^{2+} coordinados tetraédricamente, ordenados alternativamente a lo largo del eje c .*
- ☒ De la misma resulta:
 - ✓ Un momento de dipolo normal
 - ✓ Una polarización espontánea a lo largo del eje c
 - ✓ Una divergencia en la energía de superficie.
- ☒ Mediante el control de las materia primas e introduciendo impurezas, vgr. In, de puede preparar ZnO en nanoestructura de anillo :
 - ✓ Cristal único de forma circular.
 - ✓ El crecimiento de esta estructura se comprende al considerar las superficies polares de la nanocinta de ZnO.

35

6.3 Nanoestructuras de ZnO



Nanoanillos de cristal único. (a) Modelo de la estructura de ZnO con superficies polares (0001). (b-e) Proceso propuesto de crecimiento y formación del cristal único por auto-enrollamiento. (f) Imágenes SEM de un nanoanillo cristal único de ZnO. (g) Modelo del crecimiento sinuoso del nanoanillo. (h) Modelo de la carga de una proteína α -hélice, en analogía al modelo propuesto.

36

6.3 Nanoestructuras de ZnO

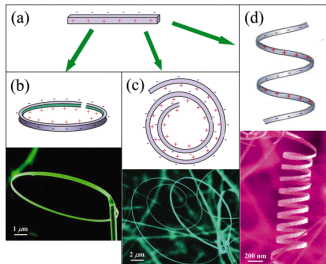
Mecanismo

- ⊗ El radio del bucle se determina por el plegamiento inicial de la nanocinta durante los inicios del crecimiento.
- ⊗ La energía total involucrada en el proceso proviene de las cargas polares, el área superficial y la deformación elástica.
- ⊗ Las interacciones electrostáticas a largo alcance parece ser que es la fuerza inicial que conduce al plegamiento de la nanocinta para formar el primer bucle y su posterior crecimiento.
- ⊗ El auto ensamblaje es espontáneo → auto-enrollamiento a lo largo del borde ocurre conforme crece la nanocinta.
- ⊗ La estructura enrollada se estabiliza por la reducción del área superficial y la formación de enlaces químicos entre los bucles.
- ⊗ El ancho del anillo aumenta conforme más bucles se enrollan a lo largo de su eje.
- ⊗ A temperaturas de 200-400 °C, ocurre una sinterización de todos los bucles de la nanocinta → **anillo**.
- ⊗ El enrollamiento perfectamente alineado en un radio único resulta energéticamente favorable.

37

6.3 Nanoestructuras de ZnO

- ⊗ La flexibilidad y dureza de las nanocintas es extremadamente alta gracias a sus dimensiones: 5-20 nm espesor, y larga relación de aspecto (1:4).
- ⊗ El efecto de polaridad predomina en la superficie de la nanocinta.
- ⊗ La nanocinta polar tiende a enrollarse y encerrarse dentro de un anillo para reducir la energía electrostática → **nanomuelles** y **nanohélices** :
 - ✓ Las estructuras son inducidas por una polarización espontánea, de resultados de una rotación de 90 ° respecto a la polarización.
 - ✓ Útiles para comprender fenómenos a nanoescala de piezoelectricidad y polarización inducida → Utilizar como sensores, transductores o resonadores a nanoescala.



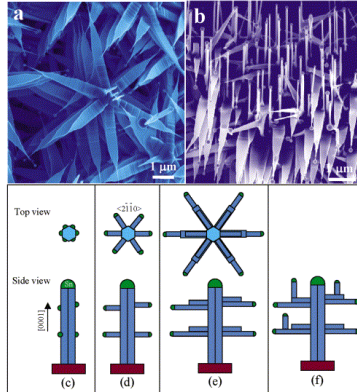
(a) Modelo de una nanocinta polar. Formación, inducida por la polaridad en superficie, de (b) nanoanillos, (c) nanoespirales, and (d) nanohélices of ZnO y sus procesos de formación.

38

6.3 Nanoestructuras de ZnO

Nanohélices alineadas

- ☒ La morfología de las estructura del óxido cambia radicalmente al variar los materiales precursores.
- ☒ Si se usa ZnO y SnO₂ en relación 1:1 se obtiene una estructura bastante compleja.



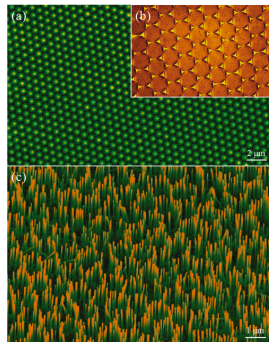
Nanohélices de ZnO. (a) Imagen SEM de crecimiento catalizado por Sn de nanohélices alineadas en seis direcciones cristalográficas equivalentes. (b-f) Crecimiento secundario de nanohilos.

39

6.3 Nanoestructuras de ZnO

Crecimiento de nanohilos alineados mediante plantilla

- ☒ El crecimiento de nanoestructuras unidimensionales es importante para aplicaciones en sensores, optoelectrónica y emisión de campo.
- ☒ El crecimiento de nanobastones ha sido bien descrito con el uso de la técnica VLS y el empleo de Au y Sn como catalizadores



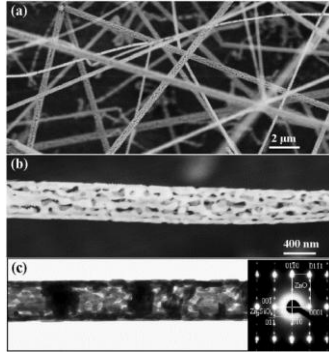
Crecimiento de nanohilos de ZnO con plantilla. (a) Monolámina de esferas de poliestireno autoensambladas que sirve como plantilla. (b) Patrón hexagonal de catalizador de Au sobre el sustrato. (c) Nanohilos alineados de ZnO crecidos en forma de panel de abeja.

40

6.3 Nanoestructuras de ZnO

Nanohilos de cristal único mesoporosos

- ☒ Se pueden preparar nanohilos de ZnO con longitud 100 μm – 1 mm, diámetro de 50-500 nm y paredes porosas.
- ☒ Aplicaciones potenciales: filtros, soportes de catalizadores, sensores de gases.



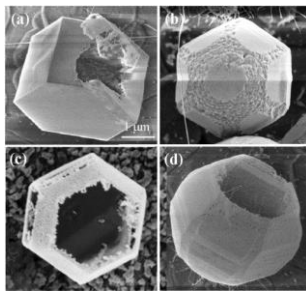
Nanohilos mesoporosos de ZnO. (a) Imagen SEM de nanohilo de ZnO de elevada porosidad crecido en un sustrato de Si recubierto con Sn. (b) Imagen SEM de alta resolución que muestra la morfología porosa (c) Imagen TEM que muestra que el hilo poroso de ZnO está recubierto de una capa delgada de Zn_2SiO_4 .

41

6.3 Nanoestructuras de ZnO

Cajas poliédricas

- ☒ Se pueden preparar para el ZnO con alto rendimiento y gran pureza.
- ☒ Los tambores poliédricos y las cajas esféricas, de formas geométricas únicas, se forman por auto-ensamblaje de nanocristales de ZnO que forma paredes mesoporosas.
- ☒ ZnO es bio-seguro y biocompatible, estas nanocajas se podría utilizar para dispensar fármacos.



Cajas poliédricas de ZnO

42

- N. Grobert, 10(1-2) *Materials Today* (2007) 28.
- Y. Ando, X. Zhao, T. Sugai, M. Kumar, 7(10) *Materials Today* (2004) 22.
- R.W. Miles, G. Zoppi, I. Forbes, 10(11) *Materials Today* (2007) 20.
- G. Conibeer, 10(11) *Materials Today* (2007) 42.
- S.E. Thompson, S. Parthasarathy, 9(6) *Materials Today* (2006) 20.
- Z.L. Wang, *Materials Today* 7(6) (2004) 26.