

Herramientas para la nanofabricación

Los avances tecnológicos alcanzados en las últimas décadas hoy nos permiten observar la materia a escala nanométrica. Esta posibilidad despertó el interés en adquirir la habilidad de construir estructuras de dimensiones diminutas. Una estructura a escala nanométrica o “nanoestructura” puede ser una partícula, una película delgada, un alambre, cuya forma tiene dimensiones entre 1 y 100 nanómetros. Estos son límites arbitrarios, por ejemplo, el límite inferior es para distinguir entre nano-objetos y un pequeño número de átomos o átomos individuales. En la literatura, frecuentemente se habla de dimensiones al hacer referencia a nanoestructuras elementales, es decir, cero-dimensional (0-D), unidimensional (1-D) y bidimensional (2-D); y estas piezas elementales se utilizan para construir materiales nanoestructurados más complejos. Las dimensiones hacen referencia de manera intuitiva a los grados de libertad de movimiento de sus partículas cargadas a través de la estructura (por ejemplo electrones). Ejemplos de las nanoestructuras más pequeñas son los puntos cuánticos y las nanopartículas, de 0-D. El movimiento de las cargas en estas estructuras está inhibido en todas direcciones. Otras nanoestructuras, como un nanotubo de carbono o un nano-alambre de silicio, son 1-D. Los nanoalambres tiene 2 dimensiones dentro de la nanoescala y la tercera (el largo del tubo) – puede pertenecer a la micro- o macro-escala. Por último, películas delgadas, recubrimientos o capas, son 2-D. Pertenecen a la nanoescala en una sola dimensión (espesor) y permiten el pasaje de cargas a través de las otras dos dimensiones. La variedad de materiales nanoestructurados y sus potenciales aplicaciones es enorme, sin embargo, la construcción real es una ciencia emergente.

Avances recientes en técnicas para la manufactura permitieron crear estructuras cada vez más pequeñas. Mediante una aproximación de tipo “top-down” se puede moldear un material hasta transformarlo en formas más pequeñas. Es posible gastar y grabar pequeñas formas en una planchuela de silicio para hacer un chip de computadora. Las mejoras continuas en computación (velocidad, capacidad de almacenamiento) de los últimos 60 años ocurrieron principalmente gracias a la miniaturización. Las limitaciones que presentan las técnicas top-down actuales son una de las principales razones por las cuales muchos científicos están investigando cómo manufacturar a partir de aproximaciones del tipo “bottom-up”. Es así que estamos extrapolando los principios de la biología, las reacciones químicas y las fuerzas físicas, que son las técnicas de manufactura que utiliza la naturaleza para construir a escala nanométrica. Al manipular átomos y moléculas individuales, tenemos la posibilidad de crear estructuras más grandes de una manera más precisa. Una de las técnicas de tipo bottom-up más prometedoras es la denominada “auto-ensamblaje”. En la técnica de auto-ensamblaje, nano-objetos elementales, tales como moléculas y nanopartículas, se unen espontáneamente para formar estructuras más grandes, sin la intervención directa del hombre. Esta sección

describe las principales herramientas y técnicas utilizadas para fabricar estructuras a escala nanométrica.

Aproximaciones Top-down y Bottom-up

Las técnicas para fabricar nanoestructuras pueden dividirse en dos grupos principales: las metodologías top-down y bottom-up.

“Top-down” se refiere a los métodos en los que se comienza con una cantidad grande de material y se lo reduce para obtener objetos más pequeños. Las cantidades de material de partida son aquellas que se pueden observar al microscopio o a escala humana. Un árbol podría ser un material de partida, y escarba-dientes son ejemplos de estructuras más pequeñas manufacturadas a partir de él.

La aproximación top-down generalmente incluye varios pasos direccionados. Como un escultor que talla una losa en partes más pequeñas, los métodos top-down transforman objetos grandes cavando, gastando, moliendo, cortando y reduciendo su tamaño. Las técnicas de fabricación top-down se originaron como una continuación de las técnicas para microfabricación utilizadas en la industria de semiconductores, y se basan principalmente en métodos ópticos o fotolitográficos. Fueron impulsadas al intentar conectar un gran número de transistores individuales y otros componentes para fabricar dispositivos electrónicos tales como computadoras. En 1959, Jack Kilby de Texas Instruments y Robert Noyce de Fairchild Semiconductor lograron hacer estos componentes a partir de una única pieza de material, que luego se llamaría “circuitos integrados”. La fotolitografía es un proceso top-down desarrollado para crear circuitos integrados.

Por el contrario, las técnicas “bottom-up” comienzan con materiales a escala atómica o nanométrica. Utilizando grupos de átomos y moléculas como bloques de construcción, las técnicas bottom-up forman partículas más grandes, películas delgadas e incluso materiales nanoestructurados y patrones. Por ejemplo, del mismo modo en que una pared se hace con ladrillos y cemento, la técnica de auto-ensamblaje une enlaces químicos y fuerzas físicas como si fueran el cemento que une a los materiales nanométricos.

El auto-ensamblaje requiere poca intervención humana, aunque generalmente creamos las condiciones para poner el proceso en marcha, los patrones y nanoestructuras que se forman posteriormente son de efecto local. Empleamos meramente comportamientos físicos, químicos y biológicos para formar de manera automática estructuras ordenadas más grandes a partir de nano-objetos de menores dimensiones. Las síntesis química y biológica no requieren nuestra intervención directa una vez desencadenadas. Por ejemplo, los átomos de oro – en una solución adecuada - se adhieren unos a otros espontáneamente para formar nanopartículas de oro. Tales reacciones químicas permiten originar materiales con formas de dimensiones nanométricas. La creación de materiales macroscópicos también es posible mediante métodos bottom-up.

Con técnicas bottom-up también es posible ubicar uno a uno moléculas o átomos individuales. Inclusive podemos escribir palabras o frases que luego se pueden leer con un microscopio electrónico. Aunque muchas herramientas y técnicas demuestran que los métodos bottom-up son factibles, aún es un desafío poder llevar estas técnicas a escalas mayores. Para avanzar desde la fabricación en el laboratorio hasta la manufactura a gran escala, los métodos bottom-up deben demostrar su viabilidad comercial. El hecho de que toda la vida está hecha de auto-ensamblaje bottom-up hace que esta vía tenga un potencial extraordinario.

Listado de técnicas de nanofabricación:

Técnica	Top-down	Bottom-up	Paralelo
Fotolitografía	X		X
Litografía de haz de electrones	X		
Litografía de haz de iones focalizados	X		
Litografía por nano-impresión	X		X
Litografía blanda	X	X	X
Nanolitografía dip pen	X	X	X
Auto-ensamblaje		X	X
Manipulación atómica por SPM		X	

A continuación se resumen estas técnicas y se explica cómo crean, moldean o forman nanoestructuras y materiales.

Litografía

La litografía es una técnica de manufactura común que consiste en transferir un patrón y “grabarlo” sobre una superficie. En publicidad, la impresión offset es una técnica litográfica que transfiere una imagen a una hoja de papel mediante una serie de moldes. En la industria de semiconductores, la fotolitografía y la litografía de haz de electrones se utilizan para fabricar chips de computadoras. Fotolitografía, litografía de haz de electrones, litografía de haz de iones focalizados, litografía de nanoimpresión y litografía blanda son sólo algunas de las técnicas litográficas relevantes para la nanotecnología.

Fotolitografía y litografía de haz de electrones

La fotolitografía y la litografía de haz de electrones son técnicas de manufactura top-down, a nanoescala. Ambas se utilizan ampliamente en la industria de los semiconductores.

La fotolitografía utiliza una fotomáscara (generalmente hecha por litografía de haz de electrones), una fuente de luz de longitudes de onda en un rango estrecho, y una capa resistente sobre la superficie donde se va a transferir el patrón. La fotomáscara (protective mask en el esquema de la derecha) es una plantilla del patrón que se quiere transferir a la superficie, similar a un estencil. Las regiones transparentes de la fotomáscara exponen a la luz la capa protectora (resist), mientras que las regiones opacas no dejan pasar la luz. Al irradiar una fotomáscara con luz visible, ultravioleta o rayos X, la luz crea el patrón sobre la capa resistente. La capa protectora es un material sensible a la luz que ayuda a transferir una imagen del patrón sobre la superficie, temporariamente. La capa protectora puede ser positiva o negativa. Si es positiva, las áreas de esa capa que fueron irradiadas se disolverán al ser lavadas con agente químico revelador. En caso de ser negativa, se disolverá en todas partes, excepto donde fue irradiada. El patrón remanente, apantalla la superficie que está debajo, al mismo tiempo que se revelan las otras partes de la superficie. Estas áreas expuestas posteriormente se pueden grabar, bombardear con iones, rellenar con metales, tratar químicamente para crear el patrón deseado en la superficie. Una vez que se creó el patrón en la superficie, se puede remover la capa protectora, dejando así la superficie grabada. Estos pasos se pueden repetir tantas veces como sea necesario para manufacturar patrones más complejos, tales como los chips de computadoras.

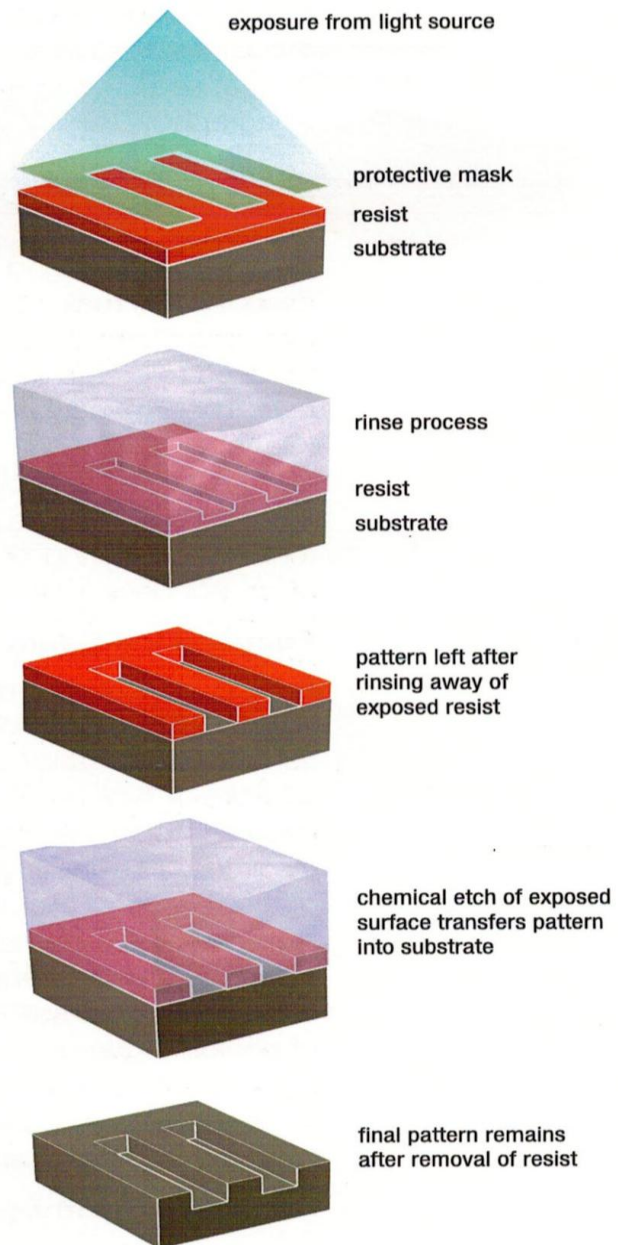


Figura 1. Fotolitografía. Representación esquemática de las etapas.

La fotolitografía se emplea para crear chips de memoria y de procesamiento para una amplia gama de dispositivos electrónicos. Originalmente la fotolitografía utilizaba luz

visible, luego, la luz de una lámpara de mercurio, y actualmente láseres excimer, con longitudes de onda de sólo 193 nm, que constituyen la fuente de radiación para manufacturar los chips de computadoras. La fotolitografía ofrece numerosas ventajas, como ser la habilidad de imprimir grandes áreas al mismo tiempo, lo que se suele denominar procesamiento paralelo.

A medida que las técnicas fotolitográficas fueron mejorando, los circuitos integrados fueron disminuyendo de tamaño. Esta tendencia se conoce como Ley de Moore. La Ley de Moore no es una ley en el sentido científico, sino una observación que se transformó en una guía para la industria de semiconductores. Lo que Gordon Moore (de Intel) observó, fue una tendencia en la que se duplicaba la densidad de transistores cada dos años. Otra versión de la Ley de Moore se enuncia diciendo que el número de transistores de un chip de CPU se duplicará cada 18 a 24 meses.

Con la ayuda de fotolitografía y técnicas conocidas como litografía de inmersión e impresión de doble exposición, los fabricantes de chip semiconductores ya han logrado realizar estructuras tan pequeñas como de 32 nanómetros a escala de producción y de 22 nanómetros en el laboratorio. Nuevas técnicas como la litografía ultravioleta extrema (EUV, por su sigla en inglés), también llamada litografía de rayos-X blanda, promete llegar a figuras de 16 nanómetros. EUV es diferente a las técnicas de fotolitografía antes descritas. Debido a que utiliza luz de longitudes de onda cortas, los espejos se pueden usar solamente para enfocar, a diferencia de las lentes que utilizan los métodos más convencionales. Si la Ley de Moore continuara, lograr la nueva marca de 11 nanómetros y menos, requerirá nuevos métodos y deberán ser diferentes a litografía que ha servido a la industria por más de 40 años.

La fotolitografía sirve para construir máquinas sencillas, imprimiendo y corroyendo pequeñas partes tales como engranajes. Estos sistemas micro-electromecánicos (comúnmente denominados MEMS), son generalmente más grandes que 100 nm, con engranajes de 1 micrón de diámetro o más. Si se combina la litografía con otras técnicas de manufactura especializadas, se pueden crear sistemas nano-electromecánicos (NEMS). Los NEMS son estructuras nanométricas que combinan circuitos electrónicos con dispositivos mecánicos, como por ejemplo una bomba nanofluídica.

La litografía de haz de electrones no requiere una fotomáscara. Este tipo de litografía utiliza un haz concentrado de electrones, generado a partir de un microscopio de barrido (SEM) en vez de una fuente de luz óptica. El haz de electrones directamente traza un patrón sobre un material protector. Aunque el SEM existe desde los años 1930, recién en los años 1960 se desarrollaron los materiales adecuados para ser grabados con electrones, haciendo posible la litografía de haz de electrones. Al igual que con la fotolitografía, existen capas protectoras positivas y negativas. Como en la fotolitografía, una vez que la capa protectora ha sido expuesta al haz de electrones, ésta se debe lavar con un revelador químico, dejando atrás el patrón protector. Luego, se realiza un subsecuente paso de desgaste, corrosión o bombardeo para grabar la superficie descubierta. Finalmente, la capa protectora remanente se remueve dejando la superficie grabada.

La litografía de haz de electrones tiene una mejor resolución que la fotolitografía. Como utiliza electrones con longitudes de onda mucho menores que las de la luz visible, la litografía de haz de electrones puede crear patrones de 10 nanómetros o menos. A diferencia de la fotolitografía, el haz de electrones no puede exponer el patrón completo de una sola vez; en cambio, debe ir trazándolo de manera secuencial. Lo que limita la resolución de la litografía de haz de electrones ya no es la longitud de onda de los electrones, sino el efecto de dispersión de los electrones en el material de la capa protectora. Las altas energías necesarias también dificultan focalizar el haz a medida que los electrones se repelen más entre sí. La litografía de haz de electrones es una técnica útil para fabricar las fotomáscaras que se utilizan en fotolitografía y las fotomáscaras de otras técnicas, como la litografía de nanoimpresión. A pesar de que hacer una máscara por este método lleva tiempo, ésta se puede utilizar una y otra vez con las otras técnicas litográficas. La litografía de haz de electrones también se puede utilizar para crear otros patrones nanométricos, como por ejemplo puntos cuánticos y nano-alambres. Estas nanoestructuras generalmente se hacen de silicio o arseniuro de galio (GaAs).

La velocidad y el costo de la litografía de haz de electrones limitan su uso en la industria. Los sistemas comerciales cuestan millones de dólares y producir materiales demanda un largo tiempo. Los procesos de manufactura actuales se apoyan en la litografía de haz de electrones solamente para hacer las fotomáscaras, pero no para la fabricación de otros dispositivos.

Litografía de iones focalizados / Focused ion beam (FIB) lithography.

Otro método top-down es la litografía FIB, que utiliza iones (en vez de electrones o luz) para crear patrones en superficie. El ion comúnmente elegido para trabajar en FIB es galio. Se lo prefiere porque permite minimizar los reemplazos de la fuente de iones. Las fuentes típicas que se utilizan en FIB pueden producir haces de iones de 5 nm de diámetro. Al utilizar iones galio, que son mucho más grandes que los electrones, la litografía FIB puede desgastar la superficie directamente, sin necesidad de utilizar una capa de protección. Debido al tamaño de los iones, se puede lograr un grabado de muy poca profundidad, removiendo unos pocos nanómetros de material. Un problema que puede presentar el FIB es que los iones de galio pueden quedar incrustados en el material que se está imprimiendo. De manera similar a la litografía de haz de electrones, FIB imprime haciendo líneas, y en este sentido no puede competir con el rendimiento de la fotolitografía. Los equipos más nuevos combinan las mejores propiedades de un SEM y de un FIB en un híbrido denominado FIB de haz dual. En un sistema de haz dual, el haz de electrones se puede utilizar por ejemplo para tomar imágenes y analizar la muestra, mientras el haz de iones va eliminando las capas de átomos de la superficie.

Litografía de nanoimpresión / nanoimprint lithography (NIL)

NIL también es una técnica de manufactura top-down. Consiste en estampar un patrón bi-dimensional directamente en un material protector. Como si fuera un marcador metálico que deja una impresión en una hoja de papel, NIL transfiere un patrón en relieve en una capa protectora usando una estampa maestra más dura. Durante la fabricación, la estampa maestra se imprime mecánicamente en el material protector. La estampa maestra empuja el material no deseado fuera de su camino y copia el patrón en el material protector, funcionamiento como si fuera un cortador para hacer galletitas.

Esa estampa más dura está generalmente hecha de silicio, nitruro de silicio, dióxido de silicio, metales o polímeros sintéticos como el vidrio acrílico, que pueden ser calentados antes de tocar la capa protectora. El método estándar para fabricar la estampa maestra que usa NIL, es la litografía de haz de electrones. Para transferir el patrón al material se utiliza un método llamado desgaste por iones reactivos. Como el nombre lo sugiere, el desgaste por iones reactivos utiliza un plasma (gases cargados) que reacciona químicamente y a la vez bombardea físicamente la superficie expuesta, corroyéndola.

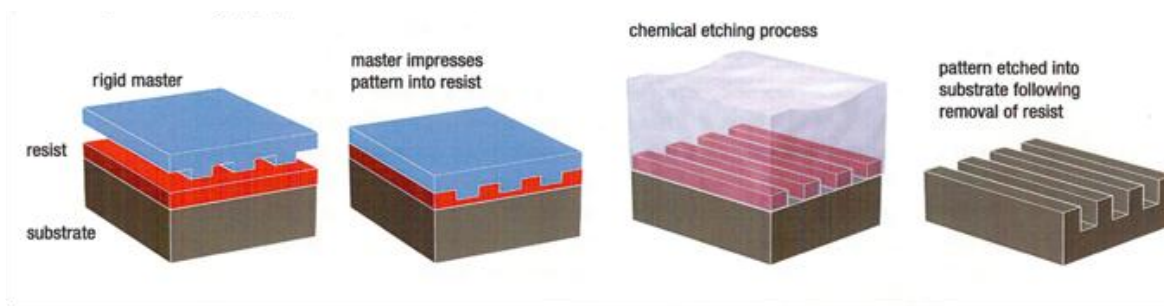


Figura 2. Litografía de nanoimpresión. Representación esquemática de las etapas.

Las estampas se pueden hacer mediante fotolitografía, siempre que las formaciones requeridas sean mayores a 100 nm. Para diseños más pequeños, se puede emplear la nanolitografía Dip-Pen.

A menudo el material protector es un polímero que, una vez impreso, es curado con calor o por irradiación de luz ultravioleta. La remoción de la estampa maestra es un paso crítico para el éxito de esta técnica. Si la estampa maestra deja una impresión pobre o si no se separa de manera limpia de la capa protectora, aparecerán defectos y/o impresiones difusas. De hecho, esta técnica simple y barata está limitada por ese tipo de fallas a niveles de alta producción. Una vez que se remueve la capa maestra, un paso secundario de desgaste por iones reactivos se utiliza a veces para limpiar áreas presionadas o residuos de capa protectora.

La litografía de nanoimpresión tiene una resolución muy fina. Esta técnica puede crear patrones con una resolución de 10 nanómetros. NIL no se limita a áreas pequeñas. Al utilizar una técnica de impresión paralela, NIL puede imprimir grandes áreas en un solo paso. De manera similar a una impresora offset que hace miles de copias a partir de una bandeja impresa, NIL puede realizar una superficie con patrones repetitivos. El potencial de este método puede verse en la versión microscópica de la litografía de impresión

utilizada para estampar los patrones de datos de discos compactos comerciales (CDs), discos de video digital (DVDs) y discos blu-ray (BDs).

A diferencia de la fotolitografía y la litografía de haz de electrones, NIL puede imprimir patrones en una amplia gama de materiales. Las películas de polímeros son las superficies más comunes, pero cultivos celulares, copolímeros, dispositivos magnéticos, películas delgadas orgánicas, recubrimientos plásticos fluoro-poliméricos son otros ejemplos. NIL ofrece el potencial de manufacturar una amplia gama de dispositivos electrónicos, ópticos, magnéticos y biológicos, que requieren detalles de nanoescala.

Litografía blanda

La litografía blanda utiliza un molde blando para imprimir la superficie, lo que la diferencia de la litografía de nanoimpresión que utiliza un patrón maestro rígido. El molde elástico de la litografía blanda está hecho generalmente de un polímero orgánico basado en silicio, el polidimetilsiloxano (PDMS). Una ventaja clave de la litografía blanda es la naturaleza flexible del molde. La litografía blanda puede imprimir sobre superficies desiguales, curvas, duras o blandas.

De manera similar a un sello de goma, el molde es capaz de aplicar una tinta hecha a partir de soluciones químicas varias. El molde deposita la solución en la superficie, dejando un patrón en las áreas que toca. Se puede colocar la tinta en la estampa de maneras diferentes. La estampa blanda puede absorber tintas (tales como alcanotioles) y por ende servir como reservorio. Aunque es útil, se debe tener cuidado de no dejar desparramar la tinta fuera de los futuros bordes. Las tintas también se pueden aplicar directamente al hacer tocar la estampa primero sobre una almohadilla embebido en tinta, y luego sobre la superficie. La litografía blanda también se suele llamar impresión de microcontacto, para estresar la habilidad de impresión directa sobre la superficie, así como también la diferencia con otras técnicas de litografía que transfieren primero un patrón a una capa protectora. El patrón resultante se adhiere a la superficie mediante atracciones moleculares, tales como la quimisorción entre las moléculas de la tinta y de la superficie. Las tintas se basan comúnmente en alquil-tioles, alquil-silanos, ADN, proteínas y metales.

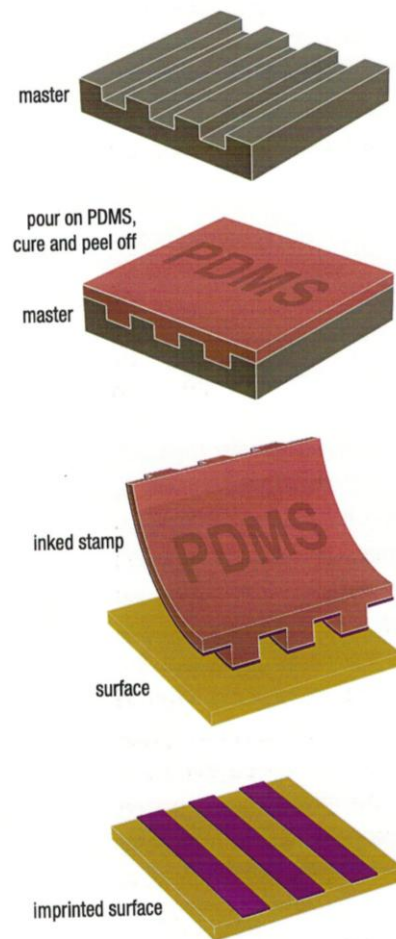


Figura 3. Litografía blanda.

La presencia de tinta residual sobre la superficie muchas veces afecta la calidad de la impresión. El molde blando también puede ser una fuente de distorsiones, haciendo que por ejemplo los patrones aumenten de tamaño.

La litografía blanda puede ser tanto una técnica bottom-up como top-down. El caso de funcionar como una técnica bottom-up, una monocapa se deposita sobre la superficie a ser impresa. Una monocapa es una película tal que su espesor es el de una sola capa de moléculas. Estas monocapas se pueden depositar sobre superficies varias, como ser metálicas, de vidrio o semiconductoras. Los estos patrones así realizados se pueden utilizar como una capa protectora para cubrir o dejar expuesta una región de la superficie en el caso de grabados y tratamientos top-down.

La litografía blanda es una técnica relativamente barata. Fabricar los moldes no es caro y éstos generalmente se descartan luego de poco uso. La variedad de tintas y superficies compatibles es otro beneficio. Los investigadores siguen indagando cómo transferir una amplia gama de moléculas a diferentes superficies por medio de esta técnica.

Manipulación mediante microscopios de sonda

Los microscopios de sonda pueden mover átomos y moléculas. La punta de un microscopio de fuerza atómica (AFM) o de uno de efecto túnel (STM) se puede utilizar para acomodar átomos o moléculas sobre una superficie.

En el caso de un método top-down, se desgasta físicamente la superficie con un AFM ya que la punta del AFM es capaz de rayar la superficie. Puntas extremadamente duras de platino-iridio o diamante son particularmente efectivas, aunque la agudeza y dureza de las puntas limita esta técnica. Al igual de un cuchillo que pierde filo, con el tiempo la punta pierde agudeza, lo que reduce su exactitud y su habilidad para crear nanoestructuras y patrones. Rayar la superficie con la punta de un AFM o acomodar moléculas individuales, es un proceso lento que resulta útil con fines científicos, pero no es una buena técnica de manufactura a gran escala.

Otra forma de trabajo es utilizar una punta de STM recubierta con un metal. Cuando se aplica el voltaje adecuado a la punta, los átomos del recubrimiento metálico se pueden transferir al sustrato. También se pueden transferir materiales del sustrato a la punta. De esta manera, los investigadores han podido depositar y remover montículos nanométricos de metales, como oro, platino y plata.

Otro método que se vale del STM, consiste en remover selectivamente los átomos de una superficie previamente preparada para tal fin. Una capa delgada de átomos de hidrógeno se puede ubicar sobre un disco de silicio. A esto se le llama pasivación por hidrógeno de la superficie. Al ubicar la punta del STM cerca de la superficie del silicio y aplicar un voltaje, los científicos pueden remover selectivamente los átomos de hidrógeno. Se pueden introducir moléculas varias en el STM, las que reaccionan para formar patrones sobre la superficie de silicio.

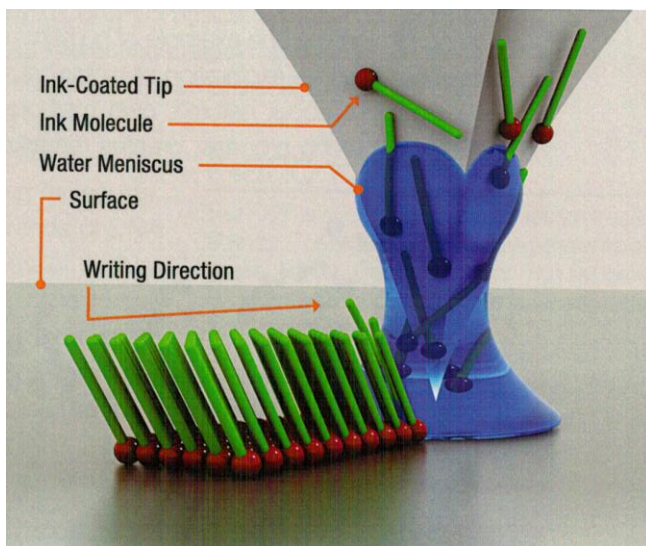
En 1989, Don Eigler, un físico de IBM, demostró el espectacular uso del STM como una herramienta de fabricación bottom-up. Él acomodó 35 átomos de xenón sobre una superficie de níquel, para escribir el nombre de la empresa. Sus esfuerzos demostraron que la manipulación atómica es posible. Al ubicar lentamente los átomos y moléculas individuales, un STM puede deletrear palabras, dibujar pictogramas y crear patrones, que pueden incluso confinar ondas electrónicas en corrales atómicos.

La precisión atómica de un STM también es su desventaja si se quiere aplicar a la manufactura en gran escala. Como en el caso de la litografía por haz de electrones, que utiliza un único haz de electrones, la punta individual del STM trabaja de manera secuencial, paso a paso, y necesita muchísimo tiempo para imprimir grandes áreas.

Nanolitografía Dip-Pen (DPN)

Tal como lo sugiere su nombre, DPN trabaja de manera similar a un lapicera a pluma, pero en micro- o nano-escala. Una o más nano-plumas con moléculas de tinta escriben directamente un patrón sobre la superficie. La nano-pluma generalmente toma la forma de una punta de AFM que termina teniendo un radio de unos 15 nm. Arreglos MEMS de 8 a 55.000 puntas se pueden utilizar para imprimir en paralelo, lo que permite hacer patrones grandes. DPN se puede utilizar tanto como un método de fabricación top-down o bottom-up. Por ejemplo, los patrones de capas protectoras positivas o negativas se pueden escribir para cubrir superficies, que serán desgastadas por técnicas top-down. Como técnica bottom-up, permite construir directamente patrones de moléculas.

En la DPN se puede utilizar muchos tipos de tintas. Las tintas más comunes incluyen moléculas y nanopartículas. Algunas de las más utilizadas son alcanotioles, lípidos, proteínas, ADN y nanopartículas metálicas. Algunas tintas se utilizan secas sobre la punta y otras en estado líquido. Incluso algunas tintas líquidas se pueden aplicar a la punta utilizando tinteros diminutos (micrométricos). Las superficies sobre las que DPN puede trabajar son igualmente variadas, y van del vidrio al oro. La gran variedad de plumas, tintas y superficies compatibles hace que la DPN sea un método muy prometedor para la nanofabricación.



Las superficies sobre las que DPN puede trabajar son igualmente variadas, y van del vidrio al oro. La gran variedad de plumas, tintas y superficies compatibles hace que la DPN sea un método muy prometedor para la nanofabricación.

Cuando una punta afilada se aproxima a la superficie, el vapor de agua del aire circundante se condensa naturalmente y se forma un puente de agua (menisco) entre la punta y la superficie. El menisco transporta la tinta desde la punta hasta la superficie. De esta manera, incluso las

Figura 4. Nanolitografía Dip-Pen. Representación de la punta de un AFM que “escribe” con moléculas, las que se auto-ensamblan a la superficie.

moléculas de una tinta seca pueden difundir a través del agua del menisco hasta la superficie. Controlando la humedad relativa se controla el tamaño del menisco. Esto afecta la cantidad de tinta (líquida o seca) que se transfiere. Niveles de humedad más elevados causan que más tinta fluya durante un período de tiempo menor. Niveles de humedad más bajos causan que se transfiera menos tinta.

A medida que la punta se mueve por la superficie, la tinta escribe un patrón. La DPN se puede utilizar para imprimir líneas o pequeños puntos similares a esos hechos por las impresoras de matriz de puntos. El tamaño de los patrones resultantes depende del movimiento de la punta, de la humedad relativa y de las propiedades conjuntas de la tinta y la superficie. La viscosidad de la tinta puede cambiar el tamaño de las partes del patrón. Una tinta más viscosa tardará más en transferir moléculas a la superficie. El tiempo que la punta toca la superficie también afecta la resolución. Cuanto menor es el tiempo que la punta está en contacto con la superficie, menos tinta se transferirá.

La DPN puede escribir en forma directa patrones arbitrarios sobre una superficie sin una capa protectora. DPN también puede utilizar múltiples puntas para crear un patrón complejo en un solo paso. Puntas individuales ubicadas apropiadamente pueden utilizar diferentes tintas al mismo tiempo. Los arreglos de puntas múltiples ofrecen mayor rendimiento y flexibilidad. En este sentido, supera las limitaciones de otros métodos que trabajan de manera secuencial o punto a punto.

Auto-ensamblaje

El auto-ensamblaje es una técnica de fabricación bottom-up. Es la construcción espontánea de estructuras a partir de bloques más pequeños. El auto-ensamblaje se vale de procesos químicos, físicos y biológicos para crear patrones y manufacturar estructuras.

El auto-ensamblaje biológico es un proceso que ocurre naturalmente en todos los organismos vivos. Al utilizar moléculas como bloques de construcción, la naturaleza ensambla células, que son las unidades básicas de la vida. Carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos son los bloques de construcción que dan forma y estructura a la vida.

El conocimiento científico de los bloques de construcción biológicos se incrementó muchísimo desde el descubrimiento de la estructura del ADN, en los años 1950` y del código genético en los 1960`. Nuestro mayor conocimiento nos condujo a poder alterar, replicar o controlar los métodos de fabricación de la propia naturaleza. La ingeniería genética de los vegetales es un ejemplo de la modificación humana a los procesos de auto-ensamblaje de la naturaleza. La continua exploración de las técnicas de auto-ensamblaje biológicas nos ayuda a conocer más sobre los métodos que utiliza la naturaleza. Por ejemplo, el plegamiento de las proteínas un proceso que ocurre naturalmente, crea estructuras biológicas de remarcada complejidad. Las células y los tejidos se forman a partir de esta manera. Los lípidos se auto-ensamblan en doble capas,

que forman las pareces celulares. La anemia de células falciformes, los tumores cancerígenos, y otras enfermedades también son el resultado de defectos estructurales que están causados por el plegamiento incorrecto de las proteínas. Develar los secretos de la naturaleza nos podría ayudar a reparar los defectos de las células o ingeniar ensamblajes de proteínas y circuitos moleculares que están contruidos con sus técnicas.

El auto-ensamblaje químico también puede crear nanoestructuras complejas. Las monocapas auto-ensambladas (self-assembled monolayers, SAM) son un ejemplo del auto-ensamblaje químico. Una SAM es una capa de moléculas orgánicas que se unen a una superficie sólida. Cada molécula tiene un grupo funcional que se une a la superficie. El resto de la molécula (o parte de ella) queda expuesto en la superficie, sirviendo de base para unir otras moléculas o materiales. En el capítulo 4 del curso Materiales Avanzados y Nanotecnología se profundizará este tema.

El auto-ensamblaje físico es igualmente importante. Se basa en atracciones a nivel molecular, tales como fuerzas de Van der Waals, interacciones electrostáticas y puentes de hidrógeno. Estas fuerzas son las responsables de la biodiversidad en la naturaleza. Sustancias biológicas, compuestos iónicos y materiales en general, se mantienen unidos por estas atracciones a nivel molecular. Son éstas las fuerzas que combinan cadenas de ADN en estructuras de doble hélice, y las que forman granos de sal a partir de sodio y cloro. Las mismas fuerzas que atraen moléculas también pueden romperlas. Por ejemplo, los investigadores han ensamblado cadenas peptídicas para suministrar fármacos. Nuestro cuerpo puede romper los péptidos y reciclar el envoltorio del fármaco. El auto-ensamblaje físico puede ayudarnos a crear sistemas más eficientes para el suministro de drogas. Los principios del auto-ensamblaje físico también podrían contribuir a otros rubros, como tecnología solar y producción de energías.

Bibliografía

Texto adaptado de: "Introduction to Nanoscale Science and Technology". Version 1. NanoInk, Inc. (2010). ISBN 978-0-9837896-0-4.