

Energy Requirements in the Nanoscale Manufacturing Process

Requerimientos de Energía en los Procesos de Fabricación a Nanoescala

Placido T. Ferreira
University of Illinois, USA
sjbailey@illinois.edu

(Artículo de REFLEXIÓN. Recibido el 11-07-2010. Aprobado el 10-10-2010)

Abstract – *This paper describes the major nanoscale manufacturing technologies, and requirements are discussed qualitatively, with respect to energy demand, its key processes. These requirements relate to the process used in semiconductor manufacturing; also describes shortcomings in the understanding of these processes to produce nanoscale, research community which identifies them as short-term goals. Finally, we propose a framework for systematic analysis of energy use in nanoscale manufacturing processes.*

Keywords: *Nanoscale, demand for energy, manufacturing technologies.*

Resumen – En este artículo se describen las principales tecnologías de fabricación a nanoescala, y se examinan cualitativamente los requerimientos, que tienen con respecto a la demanda de energía, sus procesos fundamentales. Estos requerimientos se relacionan con los procesos aplicados en la fabricación de semiconductores; también se describen las falencias en la comprensión de estos procesos para la producción a nanoescala, cuya comunidad investigadora los identifica como objetivos a corto plazo. Por último, se propone un marco para el análisis sistemático del uso de energía en los procesos de fabricación a nanoescala.

Palabras clave: Nanoescala, demanda de energía, tecnologías de fabricación.

1. Introducción

La fabricación a nanoescala se define como el control y la manipulación de materiales con una precisión de uno a unos cientos de nanómetros en al menos una dimensión (NNI, 2009). Como los materiales manifiestan comportamientos fundamentalmente diferentes en esta escala, los nuevos productos se pueden desarrollar con características de rendimiento mejoradas. Los métodos de fabricación a nanoescala eficientes y escalables están obligados a aprovechar los beneficios de la nanotecnología para masificar su utilización. Como el uso de esta fabricación presenta un notable incremento, es necesario medir y gestionar la eficiencia energética de sus procesos, ya que el consumo de energía direcciona tanto la eficiencia medioambiental como la económica del proceso de fabricación.

Los dispositivos a nanoescala han demostrado sustancial ahorro de energía en sus fases de utilización (Lloyd and Lave, 2003) (Lloyd *et al.*, 2005). Sin embargo, el incremento en las exigencias de precisión eleva los costos de

fabricación, particularmente los de uso de energía (Taniguchi, 1992). Por lo tanto, para que los dispositivos a nanoescala sean eficientes para ahorrar energía a través de su ciclo de producción y de vida, es necesario seleccionar cuidadosamente la tecnología de fabricación a utilizar. Además, monitorear la energía también permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y la productividad del método de fabricación.

En este trabajo se revisan las principales clases de métodos de fabricación a nanoescala y se identifican los requerimientos directos e indirectos de los procesos para su aplicación. Posteriormente se describe una comparación cualitativa de los requerimientos de los procesos y la demanda de energía asociada con los métodos. Para promover el desarrollo de este emergente campo, se sugiere un plan de trabajo para el estudio integral del uso de energía en la fabricación a nanoescala.

2. Tecnologías de fabricación a nanoescala

La fabricación a nanoescala se puede ver como la evolución de los procesos de fabricación de semiconductores, por lo que también debe resolver muchas de las cuestiones que éstos enfrentan relacionadas con la energía: amplios procesos de requerimientos de energía, complejidad extrema, un proceso amplio y purificado de entrada de materiales, y la vulnerabilidad a los contaminantes. Otras consideraciones adicionales para ciertas tecnologías específicas de nanoprocésamiento son: baja capacidad, metrología integrada, requerimientos de temperatura extrema, y vacío.

En trabajos previos se comparan los métodos convencionales frente a la siguiente generación litográfica –NGL, por ejemplo en (Chen and P'epin, 2001) (Tseng and Notargiacomo, 2005). En esta sección se describen varios métodos de fabricación a nanoescala y se categorizan las tecnologías de fabricación de acuerdo con sus mecanismos de componentes básicos, ya que éstos direccionan el uso de la energía.

Las tecnologías de fabricación a nanoescala pueden clasificarse a grandes rasgos en métodos arriba-abajo y métodos abajo-arriba. Los de arriba-abajo se refieren a métodos sustractivos e

incluyen el grabado, el mecanizado o el moldeo de partes más grandes a un tamaño deseado; los de abajo-arriba describen la formación de materiales o dispositivos aditivos a partir de moléculas o átomos individuales.

2.1 Tecnologías arriba-abajo

1. *Litografía*. Esta tecnología abarca un amplio rango de procesos de fabricación que emplean selectivamente rayos de fotones, electrones o iones para modificar las propiedades mecánicas de un material o la capa de enmascaramiento resistente.

Los procesos litográficos consisten de tres fases principales: la generación del patrón, la exposición y el desarrollo de características. Los patrones comúnmente se generan en una máscara que se utilizan en la fase de exposición para crear características de un molde o de una oblea a la vez. La escritura o litografía sin máscara es posible cuando el tamaño del campo, o el diámetro del haz, no es más grande que el tamaño de la característica. Finalmente, el material se revela, comúnmente mediante ataque químico, para exponer las características deseadas.

La *fotolitografía* o litografía óptica utiliza la luz para endurecer o ablandar un polímero fotosensible, que se utiliza como una máscara de grabado. El límite de resolución *Rayleigh* establece que sólo la luz ultra violeta extrema –EUV– y algunas ultravioleta profundas –DUV–, tienen longitudes de onda lo suficientemente cortas como para producir características a escala nanométrica (Nishi and Doering, 2000). La luz EUV con longitudes de onda inferiores a 31nm requiere de equipo especializado, como lentes de cuarzo, que absorban en lugar de que refracten dicha longitud de onda.

Muchos de los métodos experimentales nuevos tienen como objetivo superar el límite *Rayleigh*. La longitud de onda de la luz se puede modificar mediante interferencia de múltiples fuentes o con la luz que pasa a través de varios medios. La litografía de imágenes plasmónicas –PIL–, por ejemplo, utiliza la longitud de onda corta de las ondas superficiales, o plasmones, para obtener una resolución de 60nm usando una lámpara de mercurio de 365nm (Fang et al., 2005).

De acuerdo con el International Technology Roadmap for Semiconductors –ITRS–, la resolución que se puede alcanzar en los procesos fotolitográficos convencionales está aumentando rápidamente, y la longitud de la

puerta después del grabado se proyecta reducir de los 32nm de hoy a 20nm (SIA, 2009).

La *litografía de rayos X* –XRL– ofrece mayor resolución que la fotolitografía utilizando longitudes de onda que van desde 0.03nm a 3nm. Los rayos X pueden penetrar muchos materiales de máscara comunes e incluso materiales especializados que a menudo requieren refrigeración para su funcionamiento. LGA –*Lithographi Glvanoformung Abformung* en alemán– es un proceso de litografía de rayos X capaz de relacionar aspectos amplios utilizando galvanoplastia. Con los rayos XRL es posible lograr características por debajo de 15nm.

La *litografía de haz de electrones*, o e-beam, es una tecnología de escritura directa. Su resolución no está limitada por el límite de difracción de la luz, sino por el diámetro del haz y la dispersión de los electrones. Los microscopios electrónicos de barrido –SEM– son los equipos más utilizados en la litografía e-beam. Esta litografía es una tecnología muy madura que se utiliza para crear máscaras de litografía usadas en la fabricación de semiconductores convencionales, y con ella se pueden alcanzar características con dimensiones por debajo de 10nm.

La *litografía de haz iónico* o litografía de haz de iones focalizados –FIB– es capaz de remover directamente el material combinando la generación de patrones, la exposición y desarrollo de características en un sólo paso del proceso. Los haces de iones se forman al cargar sustancias como helio, oxígeno, boro y fósforo. Debido a que los iones pesados dispersan menos que los electrones, esta litografía es capaz de generar la mayor resolución para todos los procesos en esta categoría.

2. *Tecnologías de Impresión*. La litografía de nanoimpresión –NIL– también es conocida como litografía de nanorelieve o litografía blanda. Una capa termoplástica suave, de silicio fundido o de líquido foto-resistente, se presiona o se vierte sobre un molde y posteriormente se endurece con el calor o luz ultravioleta (Chou, 2001) (Colburn et al., 2001) (Li et al., 2003). A menudo, se requiere el grabado de iones reactivos anisotrópico para remover solamente las características deseadas.

Las características se pueden dejar como están o tomar las de otro material y depositarlas en los vacíos del patrón. Los moldes frecuente se utilizan entre 1 y 30 veces, momento en el que aparece la degradación en el tiempo. Con la

litográfica de impresión es posible alcanzar resoluciones de menos de 5nm y tiene potencial para fabricaciones de alto rendimiento.

3. *Operaciones de punto simple.* Estas operaciones se refieren a la eliminación de materiales usando microscopía de sonda de barrido, más comúnmente microscopía de fuerza atómica –AFM– o microscopía de túnel de barrido –STM. Estos enfoques se diferencian de los otros enfoques de arriba-abajo por que el material se elimina en una serie de formas átomo a átomo.

Los microscopios de sonda de barrido se puede emplear con pulsos de voltaje, deposición de vapor químico –CVD–, electrodeposición local o técnicas de nanolitografía *dip-pen* –DPN. Estos procesos requieren condiciones extremas de presión y temperatura. Este enfoque puede ser excesivamente extenso, a pesar de que es capaz de resoluciones a escala atómica.

2.2 Tecnologías abajo-arriba

1. *Procesos de vapor.* La *deposición de vapor químico* –CVD– utiliza la deposición de gas reactivo en la superficie de un sustrato abajo-arriba así como en la fabricación arriba-abajo. Se pueden producir nanocables, nanocables compuestos, y nanotubos de carbono –CNT– utilizando CVD, a menudo en presencia de un catalizador. Por ejemplo, los CNTs se producen por CVD de un material de origen hidrocarbonado a temperaturas entre 600°C y 1000°C en un medio vacío o inerte con un catalizador de metales de transición (Bhushan, 2004). Los nanocables de oro se pueden formar mediante el depósito de vapor de oro en DNA suavizado en un proceso denominado de plantilla auto-ensamblada (Tseng and Notargiacomo, 2005).

Los *procesos de vapor-líquido-sólido* –VLS– implican la introducción de una materia prima gaseosa en un catalizador líquido para formar un sólido cristalino. Los VLS se producen a presión atmosférica normal y se utilizan para formar nanocables, que son líneas ultra finas compuestas por un único material.

El proceso de VLS se puede explicar simplemente como un proceso CVD con nanopartículas del catalizador en el sustrato. Los nanocables de Si, Ge, GaAs, GaP, InP, InAs, ZnS, ZnSe, CdS, CdSe, ZnO, MgO y SiO₂, así como los nanotubos de carbono individuales y multicapas –SWNT, MWNT–, son productos de VLS. Las nanopartículas del catalizador en un sustrato se calientan en un horno, al que se introduce una fuente de vapor

para producir y continuamente depositar una aleación eutéctica. La demanda de energía para la producción de cada tipo de nanocable varía con la temperatura eutéctica de la aleación y la tasa de expansión del cable.

Los nanotubos de carbono también se pueden formar por VLS con el uso de un catalizador. Los métodos de formación CNT más ampliamente aplicados incluyen sublimación del grafito sólido a través de ablación láser, y descarga de arco eléctrico o energía solar. En la ablación láser, la sublimación se produce utilizando un láser en un horno de alta temperatura –1200°C– en vacío, en un medio inerte –generalmente helio–, a veces en presencia de un catalizador. Los CNTs también se forman mediante arco eléctrico en condiciones similares, siempre en presencia de un catalizador. Los hornos solares alcanzan temperaturas del rango de 3700°C con luz solar focalizada, donde se encuentra una fuente de grafito sólida con un catalizador bajo vacío sublimado y depósitos en las paredes de la cámara (Bhushan, 2004).

En la *epitaxia de haces moleculares* –MBE–, los flujos de gas ultra puro a alta temperatura y vacío ultra alto –UHV– se dirigen sobre un sustrato de cristal único. Estos flujos se utilizan para formar los puntos cuánticos o cables, desde cristales de 10 a 10⁵ átomos de espesor (Bhushan, 2004).

2. *Procesos solamente líquidos.* Las mono capas auto-ensambladas se pueden formar por el método Langmuir-Blodgett, donde un sustrato sólido se sumerge en un líquido cubierto por una fina capa de surfactante, o por giro de fundición a presión. Estas películas pueden ser procesadas usando litografía *e-beam* u otras técnicas arriba-abajo.
3. *Procesos plasma/iónica.* La implantación de iones individuales utiliza una dosis baja de un haz de energía para implantar iones en una superficie de cristal en vacío alto, y puede ser utilizado para formar puntos cuánticos.

Los CVD de plasma intensificado –PECVD– emplean el mismo mecanismo que los ECV, pero utilizan un gas cargado que permite formar películas a temperaturas más bajas.

4. *Procesos de impresión.* La impresión por nanocontacto –nCP– o impresión por nanotransferencia –nTP– se relaciona con los procesos de impresión arriba-abajo. Aquí, un material deseado se evapora en un sello o molde y luego se transfiere a un sustrato planar (Loo *et al.*, 2002) (Jo *et al.*, 2005). La resolución del nCP pueden ser de hasta 40nm.

5. *Operaciones de un solo punto.* El mecanismo de microscopía de sonda de escaneo abajo-arriba se relaciona estrechamente con la microscopía de sonda de escaneo de extracción de material. La microscopía de sonda de escaneo fue ampliamente utilizada en 1991 para formar las letras "IBM" con 35 átomos de xenón.

El volumen de interacción entre la sonda y la muestra limita la resolución de la microscopía de sonda de escaneo, sin embargo puede considerarse como la más precisa de todas las tecnologías de fabricación a nanoescala. Sin embargo, el proceso puede ser poco confiable y de bajo rendimiento.

3. Procesos de requerimientos de energía

Cada una de las tecnologías de fabricación descritas tiene requisitos específicos para operar. Estos requisitos se dividen entre los que se puede medir por unidad de producto y los que se asignan a una planta de producción. Llamamos a estos requisitos de procesos directos e indirectos, respectivamente. En esta sección se discuten los requisitos del proceso principal junto con su demanda energética.

Como muchas de las tecnologías de fabricación se encuentran aún en etapa de desarrollo, lo que dificulta obtener datos acerca del consumo de energía. Existen, sin embargo, estudios de tecnologías maduras de fabricación de semiconductores bien documentados (Williams *et al.*, 2002) (Murphy *et al.*, 2003) (Williams, 2004). Debido a las similitudes entre los semiconductores y las tecnologías de fabricación a nanoescala, es conveniente utilizar algunos de estos datos como las estimaciones de límite inferior para el uso de energía en la fabricación a nanoescala. Sin embargo, existen numerosas lagunas en el conocimiento disponible que también se identifican a continuación. Estas áreas deben ser el foco de la comunidad para analizar el ciclo de vida de la nanotecnología.

3.1 Requerimientos directos

Los requerimientos directos son los que se aplican directamente en el proceso o el punto de uso –POU. El consumo de energía se puede medir directamente desde el equipo experimental, pero debe considerarse debido a la potencialmente incrementada eficiencia de la producción a escala. También debe tenerse en cuenta que estamos interesados en la energía suministrada a los equipos del proceso en lugar de la energía utilizada en el proceso o la energía primaria generada.

1. *Control de presión.* Las bombas son utilizadas para mantener las condiciones de vacío requeridas por muchos métodos de fabricación. Las condiciones de vacío son

cruciales para reducir al mínimo los contaminantes en las partes que se producen, así como para extender la dirección libre promedio o anisotropía de los materiales depositados.

Se puede lograr presiones de hasta 10^{-3} torr con bombas de desbaste, mecánicas o solas. Las presiones inferiores a este umbral requieren una difusión o bomba turbo en serie con la bomba de desbaste. Por lo tanto, el uso de energía en el control de la presión depende de las presiones requeridas para cada proceso. Los requisitos de la máquina básica difieren muy poco de aquellos de fabricación de semiconductores. Sin embargo, como el rendimiento de muchos procesos a nanoescala es relativamente bajo, la máquina debe operar durante un ciclo de trabajo más largo. Por lo tanto, cuando se compara con la fabricación de semiconductores, el uso de la energía de control de presión tendrá una escala a la inversa del rendimiento de las operaciones a nanoescala.

2. *Control de Temperatura.* Las cámaras específicas de temperaturas altas o bajas son necesarias para muchos procesos a nanoescala. Las temperaturas del horno, que van desde los 400°C a 1400°C , son necesarias para la oxidación, la deposición de películas delgadas, la difusión, el recocido, y los procesos de sinterización; mientras que las temperaturas del horno a 100°C se utilizan para secar y endurecer las resinas fotosensibles y otros sustratos de enmascaramiento. Las temperaturas frías son necesarias para los procesos que requieren de gran pureza, incluyendo la microscopía de sonda de escaneo, los procesos de plasma, el grabado, y la implantación de iones. Estos procesos pueden tener éxito sólo en la ausencia de fuentes de energía cinética no controlada; por lo tanto se requieren condiciones de vacío y de temperatura baja. Mientras que las temperaturas calientes y frías se alcanzan a través de los mismos mecanismos de la fabricación de semiconductores, los gastos de energía volverán a nivelarse con el rendimiento.

3. *Generación de fotones.* La luz ultravioleta se utiliza para suavizar o endurecer la fotoresistencia, cuya resolución es inversamente dependiente de la longitud de onda de la fuente de luz. Sin embargo, mientras más corta sea la longitud de onda, más energía se transmite en el fotón:

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda.

Una bombilla de lámpara de arco promedio puede disipar entre 500W y 1000W. Dado que las longitudes de onda EUV son de orden de magnitud menor que la de las fuentes de luz óptica, tienen aproximadamente un orden de magnitud más de energía intensiva.

4. *Generación de plasma/iones.* las fuentes de plasma se utiliza para grabar y depositar material e implantar los iones en un sustrato. La generación y control de plasma es energía intensiva y puede consumir de 50W a 50kW dependiendo de la aplicación. Debido a las bajas energías del haz se utilizan para la implantación de iones únicos o para implantar iones a pequeña escala, los requerimientos energéticos de los procesos a nanoescala asociados con este requerimiento serán menores con respecto a los utilizados en la fabricación de semiconductores.
5. *Metrología y mecánica de precisión.* Si bien el rendimiento y la capacidad del proceso son todavía relativamente bajos, a menudo es necesaria la inspección parte a parte. Puede basarse en las mismas herramientas de la microscopía de sonda de escaneo y de los ensayos repetidos utilizados en la creación de función. La Tabla 1 recoge los distintos tipos de equipos de metrología necesarios en las diferentes escalas de resolución.

TABLA 1
Características de los instrumentos de metrología entre 0.3nm y 100nm [4]

Resolución	Herramienta ejemplo de metrología
100nm	Instrumentos de medición láser, fibras ópticas, Talysurfs, Talyronds
10nm	Instrumentos de medida láser de alta precisión (Doppler, multi-reflexión), Talysteps
1nm	Microscopios de escaneo de electrones, microscopios de transmisión de electrones, equipo de difracción de electrones, analizadores de iones
0.3nm	Micro analizadores de Rayos X, analizadores de Auger, ESCAR

Fuente: Autor

Se requieren más trabajos en la caracterización, tanto de la fiabilidad como en el uso energético de los equipos de alta precisión utilizados en metrología y la misma fabricación. El estudio de los requerimientos de la metrología para un sistema de producción, como una función del tamaño de la característica y la escala de producción, es otra prioridad.

3.2 Requerimientos indirectos

Las instalaciones proporcionan una capa de "protección" para los procesos de fabricación, pero en entornos experimentales pueden no estar disponibles las instalaciones apropiadas. Sin embargo, a escalas de producción, se convierte

en un factor crítico para mantener unas condiciones bien controladas por fuera de las cámaras de proceso. Los procesos heredan las condiciones de pureza y ambientales de las instalaciones y por lo tanto es esencial mantener esas instalaciones en estas condiciones base. Esto no sólo lleva el peso de los requerimientos directos, sino que reduce el riesgo de defectos debido a la contaminación.

Continuamente se debe suministrar numerosos materiales a la cámara de procesos, incluyendo aire de habitación limpia, agua ultra pura, y procesos de agua refrigerada. Todo esto debe ser recapturado para ser condicionado y redistribuido o tratado y re-liberado. En una instalación moderna de fabricación de semiconductores, gran parte del consumo de energía se destina a los procesos de instalaciones de apoyo a escala.

1. *Purificación.* Para todos los procesos de fabricación a nanoescala se necesita aire ultra-puro, agua y productos químicos, y para eliminar los contaminantes del aire en el ambiente de trabajo se necesitan ventiladores de circulación de sala limpia. También se utiliza aire ajustado –MUA– para presurizar el área de trabajo, manteniendo los contaminantes alejados. El agua ultra pura o desionizada –DI– se utiliza en numerosas etapas de limpieza. En la fabricación de semiconductores como en nanotecnología, se utilizan una gama cada vez mayor de productos químicos de alta pureza.

Los tipos de aire de sala limpia disponibles más importantes son los componentes necesarios, tanto en la fabricación a nano escala como en la de semiconductores, y el uso de la energía asociada con las dos es comparable, aunque depende también de la productividad.

Una cuestión particularmente pertinente para la fabricación a nano escala es cómo asear sin afectar las características. El agua desionizada se puede utilizar de manera diferente en la fabricación a nano escala y en la fabricación de semiconductores. Esta es un área que necesita mayor estudio.

Mientras que algunos consumibles marcan la diferencia entre la fabricación de semiconductores y a nano escala, muchos otros se están desarrollando exclusivamente para esta última. La purificación química en las instalaciones es un factor importante en el uso de la energía, por lo que requiere un estudio amplio y continuo a medida que este campo progrese. Esto es distinto de la energía integrada en el proceso consumible, que es otra de las prioridades para la comunidad investigadora.

2. *Control de Temperatura.* El agua del proceso de enfriamiento –PCW– debe circular continuamente para mantener la temperatura deseada. El consumo de agua en el proceso de enfriamiento para la fabricación a nano escala es similar a la de los semiconductores, escalada con el proceso de generación de calor y el rendimiento.

3. *Supresión.* Los productos químicos nocivos o regulados se tratan en dos pasos: una vez en el punto de uso –POU– y nuevamente en la escala de las instalaciones. Debido a que ambos pasos se producen fuera de los procesos reales, se consideran dentro de los requerimientos de las instalaciones.

El foco de reducción del POU se centra en la eliminación o separación de perfluorocomponentes –PFC– por quema y depuración, tratamiento del plasma y depuración, o filtración respectivamente (Krishnan *et al.*, 2004). Las instalaciones de reducción consisten en una gama más amplia de emisiones que la reducción del POU. En toda eliminación secundaria se produce neutralización de residuos ácidos, combustión de compuestos orgánicos volátiles –COV–, neutralización de amoníaco, y de tratamiento de aguas residuales fluoradas.

Las especies de los productos químicos, el grado en que se utilizan y su subsecuente disminución en la fabricación a nano escala, es un área importante de trabajo futuro. Las cualidades y el consumo de energía asociadas al proceso de salida, será una consideración prioritaria para cualquier estudio completo de la fabricación a nano escala.

4. Discusión

Teniendo en cuenta estos requerimientos de proceso intensivos de energía, vamos a echar un vistazo a sus demandas relacionadas con las clases de tecnología de fabricación. El consumo total de energía de un método es conducido a medida que sus requerimientos de proceso se utilizan.

En la Tabla 2 se presenta una evaluación cualitativa de los requerimientos del proceso para cada clase de tecnología de fabricación. Estos requerimientos, en algunos casos, dependen de los parámetros del material o proceso utilizado en la fabricación. Por ejemplo, la impresión litográfica emplea calor o curación UV. Esta distinción afecta las demandas relativas de los procesos para la generación de fotones, y el control de temperatura directo e indirecto. La reducción de la litografía de haz de iones es dependiente de la química y es posible que emita metales pesados. La reducción de CVD es un

proceso dependiente y sus emisiones pueden contener perfluorocarburos o contaminantes del aire peligrosos. La ocurrencia de procesos VLS reduce un amplio rango de temperaturas –desde 1200°C para la ablación con láser hasta 3700°C para la formación CNT de horno solar–, por lo que el grado de control de la temperatura necesaria es un proceso dependiente.

En la Tabla 2, también se puede observar que los procesos arriba-abajo y abajo-arriba, con mecanismos similares, tienen requerimientos de proceso similares, y por lo tanto es probable que las demandas de energía sean similares. Si los resultados de procesos dependientes se promedian para una clase de fabricación, nos encontramos con que los procesos de impresión y de plasma/iones tienen menos requerimientos, mientras que las operaciones de punto simple, CVD, VLS y MBE, tienen más requerimientos.

Si promediamos todos los resultados para las tecnología de fabricación arriba-abajo frente a las abajo-arriba, la asignación de valores a partir de cero para los "no/débil requerimiento" con tres de "requerimiento muy fuerte", nos encontramos con que los resultados de los procesos arriba-abajo promedian 1.3, mientras que el de los procesos abajo-arriba es 1.4. Esta diferencia es marginal pero sugiere una hipótesis para explorar en futuros trabajos: los procesos de fabricación abajo-arriba utilizan energía más intensivamente que los arriba-abajo.

5. Trabajo futuro

En la sección 4 se presentaron los elementos básicos de un análisis de energía sistemático para los métodos de fabricación a nano escala. Debido a que el uso de energía por área depende de la precisión y el rendimiento de cada proceso, los requerimientos de proceso sirven como un acercamiento para el uso de energía real. Como un marco para un estudio detallado y cuantitativo de los requisitos de energía para la fabricación a nano escala se propone lo siguiente:

- Desarrollar un conjunto integral de requerimientos para todas las clases de fabricación, incluyendo los consumibles más importantes y los equipos de proceso.
- Estimar el rendimiento para cada clase de tecnología en los diferentes niveles de precisión, con base en las proyecciones de la industria y las tendencias.
- Evaluar el rango de precisión posible a través de cada método de fabricación
- Cuantificar el consumo de energía asociado con cada requerimiento de proceso, como una función de precisión para cada una de las clases de procesos.

- Cuantificar la energía embebida en los materiales y equipos, utilizando una combinación de procesos con base en una valoración del ciclo de vida de las entradas y salidas de los datos de energía.
- Identificar los factores de escala en la demanda de energía como funciones de resolución para cada método, y comparar resultados extrapolados con los datos

disponibles actualmente de la industria de los semiconductores.

Usando este modelo se puede lograr una rigurosa comprensión del consumo de energía en los métodos de fabricación a nano escala. Este marco también se puede integrar en un análisis más amplio del ciclo de vida de la fabricación a nano escala. El trabajo futuro consecuente consiste en desarrollar el modelo como se describe en el marco.

TABLA 2
Requerimientos de proceso para las clases de tecnología de fabricación

Tecnología de fabricación	Directos				Indirectos				
	Control de presión	Control de Temp.	Generación plasma/iones	Generación de fotones	Mecánica y Metrología	Purificación	Control de Temp.	Supresión	
Arriba-abajo	Fotolitografía	2	0	0	3	1	3	0	1
	Litografía de rayos X	2	0	0	3	1	3	1	1
	Litografía de has de electrones	2	0	0	3	2	3	0	1
	Litografía de has de iones	3	0	3	0	2	1	0	1, 3
	Impresión	0	0, 2	0	0, 2	1	3	0, 2	1
	Operaciones punto simple	3	3	0	0	3	1	3	0
Abajo-arriba	Procesos CVD	3	1, 3	3	0	1	1	0, 3	1, 3
	Procesos vapor-líquido-sólido	2, 3	2, 3	0	0	3	1	2, 3	1, 3
	Epitaxia de heces moleculares	3	2	0	0	3	1	2	1, 3
	Procesos sólo líquidos	1	0, 1	0	0	3	1	0, 1	1, 3
	Procesos plasma/iones	3	0	3	0	1	1	0	0
	Impresión	0	0, 2	0	0, 2	1	3	0, 2	1
	Operaciones punto simple	3	3	0	0	3	1	3	0

Fuente: Autor

0: Requerimiento débil

1: Requerimiento moderado

2: Requerimiento fuerte

3: Requerimiento muy fuerte

Varios valores indican un rango de requisitos dependientes de los parámetros de los procesos

Referencias

- Bhushan, B. (Ed.) (2004). Handbook of Nanotechnology. London: Springer. 1222 p.
- Chen, Y. & P'epin, A. (2001). Nanofabrication: Conventional and nonconventional methods. Electrophoresis, Vol. 22, pp. 187–207.
- Chou, S. (2001). Nano-imprint lithography and lithographically induced selfassembly. Material Research Society (MRS) Bulletin, Vol. 26, pp. 512–517.
- Colburn, M., Bailey, T., Choi, B., Ekerdt, J., Sreenivasan, S. & Willson, C. (2001). Development and advantages of step-and-flash lithography. Solid State Technology, Vol. 44.7, pp. 67–78.
- Fang, N., Lee, H., Sun, C. & Zhang, X. (2005). Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. Science, Vol. 308, pp. 534–537.
- Jo, J., Jeong, J. H., Kim, K. Y., Lee, E. S. & Choi, C. G. (2005). Hybrid nanocontact printing (hncp) process technology. Proceedings of The International Society for Optical Engineering (SPIE), San Diego, CA, USA, Vol. 5645, pp. 372-378.
- Krishnan, N., Raoux, S. & Dornfeld, D. (2004). Quantifying the environmental footprint of semiconductor equipment using the environmental value systems analysis (env-s). IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 17, pp. 554–561.
- Li, H. W., Muir, B. V. O., Fichet, G. & Huck, W. T. S. (2003). Nanocontact printing: A route to sub-50-nm-scale chemical and biological patterning. Langmuir, Vol. 19, pp. 1963–1965.

- Lloyd, S. & Lave, L. (2003). Life cycle economic and environmental implications of using nanocomposites in automóviles. *Environmental Science & Technology*, Vol. 37, No. 15, pp. 3458–3466.
- Lloyd, S., Lave, L. B. & Matthews, H.S. (2005). Life cycle benefits of using nanotechnology to stabilize platinum-group metal particles in automotive catalysts. *Environmental Science & Technology*, Vol. 39, pp. 1384–1392.
- Loo, Y., Willett, R. W., Baldwin, B. & Rogers, J. (2002). Additive, nanoscale patterning of metal films with a stamp and a surface chemistry mediated transfer process: Applications in plastic electronics. *Applied Physics Letters*, Vol. 81, pp. 562–564.
- Murphy, C. F., Kenig, G., Allen, D. T., Laurent, J. & Dyer, D. (2003). Development of parametric material, energy, and emission inventories for wafer fabrication in the semiconductor industry. *Environmental Science & Technology*, Vol. 37, No. 23, pp. 5373–5382.
- National Nanotechnology Initiative –NNI. What is Nanotechnology. In <http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>. Accessed Oct. 17/2009.
- Nishi, Y. and Doering, R. (Eds.) (2000). *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. New York: CRC Press. 1157 p.
- Semiconductor Industry Associations –SIA. (2009). *International technology roadmap for semiconductors. ITRS 2009 Edition*.
- Taniguchi, N. (1992). Future trends of nanotechnology. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 1–7.
- Tseng, A. & Notargiacomo, A. (2005). Nanoscale fabrication by nonconventional approaches. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 5, pp. 683–702.
- Williams, E. (2004). Energy intensity of computer manufacturing: Hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environmental Science & Technology*, Vol. 38, pp. 6166–6174.
- Williams, E., Ayres, R. & Heller, M. (2002). The 1.7 kilogram microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices. *Environmental Science & Technology*, Vol. 36, pp. 5504–5510. 