

# Fotolitografía

## Opción B

(a base de agua)



Center for Nanotechnology Education

Versión 082718



Este material está basado en trabajo apoyado por la Fundación Nacional de Ciencia bajo la Concesión Número 0802323 y 1204918. **Cualquier opinión, hallazgos, conclusiones o recomendaciones expresadas en este material son las del autor(es) y no necesariamente representan las opiniones de la Fundación Nacional de Ciencias.**



Este trabajo está licenciado por [“Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License”](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/).

Basado en un trabajo en [www.nano-link.org](http://www.nano-link.org).

# Fotolitografía

## Abstracto

Este módulo presenta una introducción y demostración de fotolitografía, proceso de copiar un patrón de alta resolución en múltiples sustratos. Los estudiantes replican los pasos clave en el proceso de fotolitografía y aprenden cómo estos procesos encajan en la fabricación de dispositivos de micro y nano escala, como son los circuitos integrados. Esta actividad utiliza productos químicos y procesos a base de agua, lo que permite su uso con estudiantes más jóvenes y / o en aulas y laboratorios sin extractor.

## Resultados

Después de completar este módulo, el estudiante logrará una comprensión básica del paso de transferencia de patrones dentro del proceso de litografía y aprenderá cómo se relaciona este proceso con la producción de dispositivos a escala micro y nano métrica.

## Pre requisitos

- Algunos conocimientos de química básica y estructura a nivel molecular.
- El módulo de fotolitografía se puede usar en cursos de química, electrónica y nanotecnología en los niveles de escuela intermedia, escuela superior y universidad.

## Conceptos Científicos

- Interacción de la luz con la materia

## Conceptos de Nanociencia

- La litografía es un método de fabricación de dispositivos a nano escala.

## Información de trasfondo

La fotolitografía es el proceso crucial que hace posible la producción de circuitos electrónicos integrados al igual que todos los dispositivos basados en ellos: computadoras, teléfonos celulares, cámaras digitales, calculadoras, sensores compactos, pantallas, controles industriales, prácticamente cualquier cosa que pueda describirse con la palabra "electrónica". La fotolitografía ha progresado en su capacidad para producir estructuras electrónicas más pequeñas y precisas, permitiendo el desarrollo de componentes electrónicos y mecánicos que actualmente se acercan a diez nanómetros de tamaño. La fotolitografía es, por lo tanto, uno de los principales contribuyentes a los avances en nanotecnología.

La fotolitografía se lleva a cabo una vez completado el diseño del circuito en el dispositivo electrónico. Para configurar el proceso de fotolitografía, la estructura tridimensional del dispositivo se divide en delgadas capas bidimensionales, cada una de las cuales se fabricará en un paso separado; el dispositivo terminado consistirá en características fabricadas una capa a la vez y cuidadosamente alineadas para asegurar la operación adecuada del dispositivo.

Los principales procesos de fotolitografía son:

- 1) Preparar un patrón de la capa del dispositivo que se va a fabricar, que identifique la posición de cada característica y el material del que se va a hacer (metales para cables conductores, compuestos cerámicos para aisladores y semiconductores como el silicio para formar transistores).
- 2) Miniaturizar el patrón para lograr la escala deseada del dispositivo, y reproducir numerosas copias del patrón en un molde de impresión, llamado foto máscara.
- 3) Depositar el material base (metal, semiconductor o aislante) para que la capa se fabrique sobre un sustrato conveniente, siendo este último una muestra delgada y pulida de silicio muy puro.
- 4) Transferir el patrón fotográficamente desde la foto máscara al material base mediante el uso de un polímero fotosensible llamado fotorresistor.
- 5) Marcar al sumergir la muestra estampada en un agente de grabado, donde cualquier material no protegido por la foto resistencia estampada se graba, dejando las características deseadas.
- 6) Eliminar la foto resistencia y limpiar la muestra, revelando un conjunto de copias exactas del patrón de capa del dispositivo original.

El proceso de depósito, transferencia, grabado y eliminación se repite capa por capa, tantas veces como sea necesario para construir la estructura completa del dispositivo. Miles de dispositivos electrónicos complejos que consisten en miles de millones de componentes electrónicos individuales se pueden hacer simultáneamente en una sola oblea utilizando este método, lo que permite hacer estructuras de circuito integrado muy complejas a bajo costo.

*Historia. La litografía (en griego para la palabra piedra [lithos] y para escribir [graphein]) fue inventada por Aloys Senefelder [1]. Aloys explicó la litografía en "Un curso completo de litografía", publicado en 1818 [2]. Aloys era actor y dramaturgo y quería vender sus obras de teatro, pero no pudo pagar los altos costos de la impresión utilizando los métodos actuales. Aloys descubrió que, al tratar adecuadamente la piedra caliza bávara con productos químicos, podría transferir una imagen tallada a un papel [1]. Más tarde, Nicéphore Niépce (1765-1833) se interesó en el trabajo de Aloys, pero la piedra litográfica era difícil de encontrar, y Niépce no tenía talento para el dibujo, por lo que decidió tratar de encontrar una forma de utilizar la luz para producir la imagen para él [3] Realizó muchos experimentos sobre reacciones químicas causadas por la luz para producir imágenes permanentes [4].*

*En 1816, Niépce estaba haciendo sus primeros experimentos en un proceso que llamó heliografía, o dibujo solar. Para 1826, desarrolló el proceso hasta el punto de poder producir una copia de un grabado existente al montarlo sobre una lámina de vidrio y dejar que la luz del sol lo atravesara sobre una placa de cobre o peltre recubierta con una solución de asfalto [3]. Estos experimentos llevaron a la invención de la fotografía [4]. Décadas más tarde, la foto máscara, seguida del procesamiento químico, formó el proceso de fotolitografía que hizo posible la fabricación de circuitos integrados (CI) y la ciencia de la miniaturización [5].*

*Cómo funciona la fotolitografía. La fotolitografía y la fotografía funcionan de manera muy similar [6]. La fotolitografía es un proceso en el cual un patrón se transfiere a la superficie de una lámina utilizando un polímero fotosensible en solución (foto resistente). Los polímeros cambian sus propiedades de solubilidad tras la exposición a la luz.*

Hay dos tipos de foto resistencia: negativa y positiva. La exposición a foto resistencias negativas provoca un cambio químico que hace que la resistencia sea insoluble en la solución reveladora, por lo que cuando la luz pasa a través de las aberturas de la foto máscara, conduce a áreas opacas en la resistencia desarrollada. Esto crea un patrón en la muestra que es el opuesto al de la máscara, es decir, una imagen negativa. Una fotorresistencia positiva funciona de la manera opuesta: la resistencia es insoluble en el desarrollador a menos que la luz la golpee, por lo que, si la luz pasa a través de un área abierta en la máscara y expone la resistencia, esa región se disuelve en el paso del revelador, lo que resulta en una apertura en la resistencia también (una imagen positiva). La foto resistencias positivas generalmente se usan en la fabricación de circuitos integrados porque exhiben una mejor resolución [7]. El patrón transferido se usa como una máscara de grabado, es decir, una capa protectora que evita el grabado químico o físico donde sea que esté la resistencia en la superficie. El patrón de resistencia también se puede usar para la implantación de iones, permitiendo que los iones energéticos penetren en el sustrato solo donde se desee [6, 8].

Los pasos que comprenden el proceso fotolitográfico son:

- limpieza de la superficie del sustrato de la muestra
- horneado de deshidratación, para expulsar el agua adsorbida en la superficie de la muestra
- aplicación de la fotorresistencia
- horneado suave, para establecer las propiedades de la fotorresistencia
- alineación de la foto máscara en la muestra
- exposición de la fotorresistencia
- desarrollo de la fotorresistencia
- inspección
- eliminación de resistencia soluble y limpieza de la muestra para los pasos posteriores
- repetición de los pasos anteriores (como sea necesario)

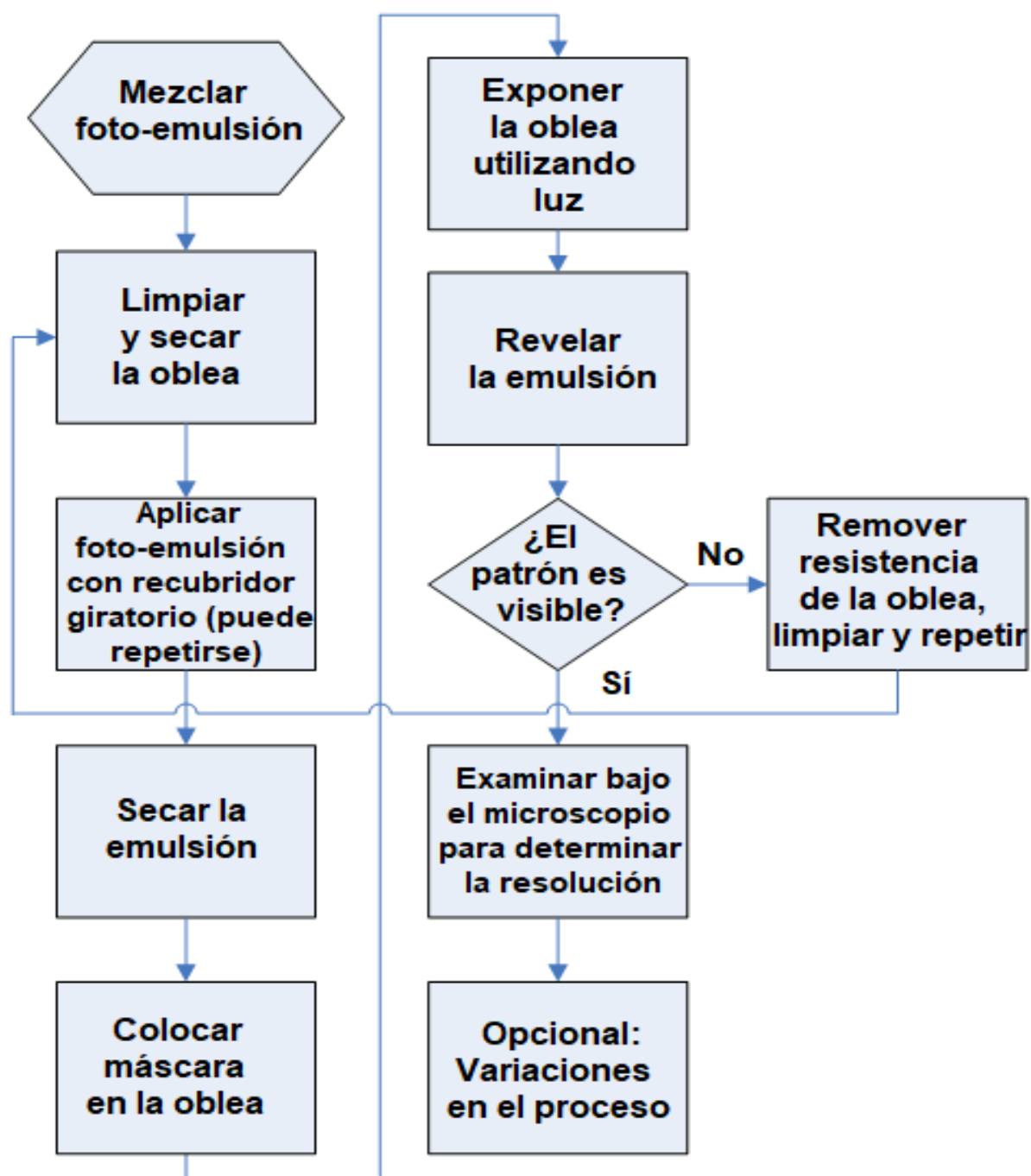
## Aplicaciones actuales y futuras

La fotolitografía es una de las tecnologías más ampliamente aplicadas que existen. Se utiliza para hacer los circuitos que se encuentran en toda la electrónica moderna. El número de transistores fabricados con fotolitografía cada año supera la población humana del mundo. Las técnicas de fotolitografía también se utilizan para fabricar sistemas micro electromecánicos (llamados MEMS) que se encuentran en una amplia variedad de dispositivos, incluidos sensores de gas, giroscopios de estado sólido, acelerómetros utilizados en automóviles y teléfonos inteligentes.

El futuro seguirá viendo la aplicación de la fotolitografía para fabricar micro electrónica, aunque la carrera por fabricar componentes electrónicos cada vez más pequeños puede forzar un cambio a una tecnología alternativa, como la litografía de haz de electrones o la litografía de impresión.

## Actividad de aprendizaje: Fotolitografía

### Flujograma de la actividad



## Sobre esta versión

La actividad de fotolitografía puede realizarse usando dos procedimientos químicos diferentes, a base de solvente y a base de agua. El enfoque basado en solventes (titulado Opción A en el sitio web de Nano-Link) produce una excelente transferencia de patrones con alta resolución, pero requiere una fotorresistencia solvente altamente volátil, un conjunto de solventes para la limpieza y una campana extractora para eliminar los vapores de estos.

Este método, Opción B, utiliza un material fotosensible a base de agua que elimina la necesidad de escape de aire y permite la limpieza del agua. Sin embargo, la resolución del patrón transferido puede ser algo menor (los detalles no se transferirán fielmente).

## Materiales y equipo

### ***Materiales de uso casero***

- Guantes de plástico ligeros.
- Aire comprimido limpio (p. Ej., Aire comprimido “Dust-off”)
- Toallitas de laboratorio sin pelusa
- Goteros de plástico desechables
- Agua destilada y/o filtrada
- Disolventes: acetona, isopropanol (también se puede usar alcohol isopropanol al 70%)
- Revelador químico, 100 mL de concentrado. Esto debe diluirse 5:1 con agua destilada para obtener 600 mL de revelador (suficiente para desarrollar 30 muestras). Hoja de datos de seguridad provista.
- Foto-emulsión líquida. Guarde la emulsión en su botella opaca hasta que esté lista para usar.

### ***Equipo y suministros***

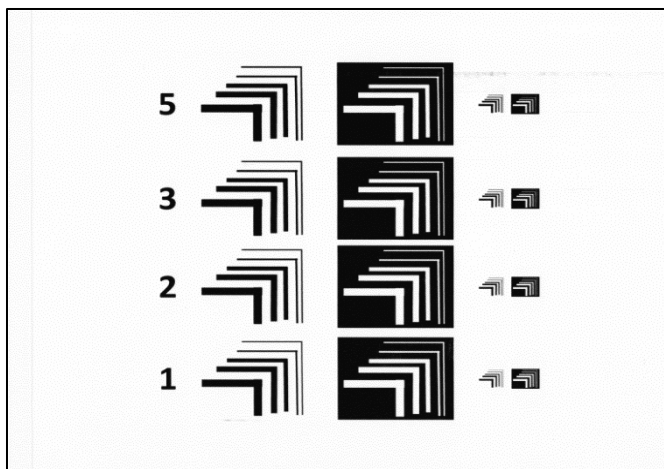
- 10 muestras de silicio pulido (se pueden limpiar y re utilizar muchas veces)
- Foto máscara transparente con patrón para transferir
- Recubierto giratorio “Spin Coater”
- Caja de plástico transparente
- Gafas protectoras
- Pinzas
- Cronómetro digital
- Una o dos placas de calentamiento, preferiblemente con lecturas de temperatura
- Una o dos lámparas de escritorio con una bombilla fluorescente compacta de 45W
- Opcional: un microscopio óptico capaz de utilizar luz reflejada (no transmitida)

### ***Fuentes de materiales y químicos especializados***

- La acetona y el isopropanol puro (IPA) se pueden obtener en ferreterías locales o tiendas de artículos para el hogar. Se puede usar alcohol para frotar con al menos 70% de isopropanol en lugar de IPA puro; esto está disponible en una farmacia o tienda de comestibles.

### Preparación (antes de la actividad)

1. Cubra la caja de contención con toallas de papel.
2. Coloque una capa de centrifugado en el centro de cada una de las cajas de contención. Alinéelo de modo que el centro del disco giratorio esté justo debajo del orificio en la tapa de la caja. Enchufe el recubridor de giro.
3. Instale las lámparas de escritorio con la bombilla hacia abajo, a unos 25 cm por encima de la mesa.
4. Instale y precaliente las planchas de calentamiento. Si la plancha caliente tiene una lectura de temperatura, ajústela a 60 grados C.



**Figura 1.** Imagen escaneada de sobreimpresión 5x utilizando una impresora de inyección de tinta para producir una máscara altamente opaca (tamaño original de 8 x 11 pulgadas).

**(Opcional) Hacer tu propia foto máscara.** Como parte del kit de actividades, Nano-Link proporciona 1-2 máscaras de fotolitografía con patrones que contienen características muy pequeñas. A elección del maestro, se puede hacer una foto máscara localmente al producir un patrón con un programa de dibujo por computadora, luego imprimir ese patrón en una película de transparencia de poliéster usando una copiadora xerográfica o una impresora láser / de inyección de tinta. Los patrones de máscara potenciales incluyen los nombres de los estudiantes y el nombre de la escuela, escritos en una tipografía de 1 mm de altura o menos. Su máscara personalizada también puede usar líneas muy finas o una serie de cuadrados de tamaño decreciente. Estos se utilizarán al final de la actividad para determinar cuantitativamente la resolución de la transferencia del patrón. Consulte la Figura 1 para ver un ejemplo de un patrón de prueba.

Cuando se utilizan algunas impresoras para producir estas transparencias, el patrón puede ser insuficientemente opaco para garantizar un efecto de enmascaramiento limpio. Para obtener un patrón completamente opaco, la misma hoja de transparencia se puede imprimir repetidamente con el patrón pasándolo a través de la impresora más de una vez. Al alinear cuidadosamente las guías de papel, la misma transparencia se puede sobreimprimir cinco veces o más sin una degradación grave de la imagen. Si utiliza una impresora de inyección de tinta, permita que la tinta se seque por completo (al menos 5 minutos) entre pasadas. Con este método, se pueden producir imágenes limpias con características de tamaño inferior a 0.1 mm. Es posible que no necesite hacer cinco sobreimpresiones; algunos experimentos revelarán cuántos intentos se requieren con su equipo.



## Seguridad

- Evitar el contacto con la foto resistencia; Use agua y jabón para eliminar cualquier material que toque la piel.
- Se requieren gafas de seguridad a prueba de salpicaduras y guantes ligeros para el manejo de las muestras y reactantes.
- Tenga cuidado al manipular las muestras de silicio; son frágiles y pueden romperse en fragmentos afilados si se caen.

## **Fotolitografía—Opción B**

### Procedimiento

**1. Limpieza y secado del sustrato.** Para aplicar una buena capa de fotorresistencia, es esencial que el sustrato esté libre de aceites, suciedad o capas fotorresistentes anteriores. En una instalación de fabricación de semiconductores (fab), las muestras (obleas) se limpian sumergiéndolas en una serie de solventes. En este laboratorio, usará obleas pre-limpiadas, que solo necesitan una limpieza y secado ligero en la superficie de la misma.

1.1. Coloque una muestra (oblea) previamente limpiada en una toalla de laboratorio seca y limpia.

1.2. Aplique una pequeña cantidad de isopropanol sobre la muestra (oblea) y limpie suavemente con una toalla de laboratorio. Permita que el alcohol se seque de la oblea.

1.3. Seque el frente de la muestra (oblea) con aire comprimido.

**2. Preparación de la foto emulsión.** El kit de emulsión consiste: foto emulsión (botella grande) y el sensibilizador (botella pequeña). Los dos componentes deben mezclarse frescos antes de cada uso.

2.1. El sensibilizador se envía como un polvo seco que debe mezclarse con agua antes de su uso. Si aún no lo ha hecho, prepare el sensibilizador llenando la botella hasta la mitad con agua desionizada. Mezcle bien y guarde el sensibilizador no utilizado en el refrigerador.

2.2. Mida 15 mL de foto emulsión en un vaso de precipitados. La emulsión es muy viscosa, así que vierta con cuidado.

2.3. Agregue 2 mL de sensibilizador y revuelva. El color azul inicial de la emulsión debería volverse verdoso.

2.4. Agregue 10 mL de agua a la emulsión para reducir la viscosidad y prepárela para el recubrimiento por giro.

**3. Aplicación de la emulsión.** La foto emulsión debe aplicarse en una capa delgada y uniforme para garantizar el éxito en los pasos de procesamiento posteriores. Aquí usamos una sencilla capa de rotación para extender la emulsión en un grosor de aproximadamente 0.2 mm.

3.1. Cubra la caja de contención con toallas de papel para atrapar el exceso de emulsión. Coloque la ruleta dentro de la caja de contención.

3.2. Coloque una muestra (oblea) en el dispositivo giratorio para que el borde plano de la oblea esté al lado de uno de los pequeños tornillos de nylon en el disco giratorio. Gire la muestra unos 20 grados para que el borde exterior quede debajo de las tres clavijas.

3.3. Coloque la ruleta de modo que su centro esté directamente debajo del orificio en la tapa de la caja de contención. Coloque la tapa en la caja para verificar la alineación y ajústela si es necesario.

3.4. Con la tapa puesta, encienda la rueda giratoria y permita que funcione unos 30 segundos para alcanzar la velocidad máxima.

3.5. Mientras la rueda gira a gran velocidad, extraiga suficiente foto emulsión para llenar un gotero desechable (aproximadamente 3 mL).

3.6. Cuando la ruleta haya alcanzado la velocidad máxima, inserte el gotero en el orificio de la tapa de la caja. Intente colocar el gotero directamente sobre el centro de la oblea giratoria.

3.7. Aplique toda la emulsión del gotero sobre la oblea en un movimiento continuo (es decir, no se detenga y comience, pero aplique todo el contenido del gotero a la vez) para garantizar un recubrimiento uniforme. Repita este proceso dos veces más para formar una capa gruesa de la foto emulsión. Después de la última aplicación de emulsión, permita que la rueda funcione 30 segundos, luego apáguela y deje que gire hasta detenerse.

3.8. Seque la muestra (oblea) recubierta colocándola sobre una plancha de calentamiento (~ 60 °C) Durante aproximadamente 10-15 segundos para remover la humedad.

**4. Exposición.** En este paso, el patrón en la máscara se transfiere a la oblea por interacción de la luz con la emulsión fotosensible. Al final de este paso, la imagen es virtual, es decir, no es visible hasta que se desarrolla.

4.1. Coloque la muestra (oblea) sobre una superficie no reflectante.

4.2. Coloque la foto máscara directamente sobre la oblea. **ASEGÚRESE DE QUE EL LADO CORRECTO DE LA MÁSCARA ESTÉ ABAJO.** Esto significa que el lado en el que se imprime el patrón debe estar en la posición hacia abajo, más cerca de la superficie de la oblea.

4.3. Exponga la muestra (oblea) según las instrucciones del kit de emulsión. Use la lámpara con una bombilla fluorescente compacta de 45W. Coloque la bombilla ~ 20 cm por encima de la muestra y exponga durante 7 a 8 minutos.

**5. Desarrollo de la emulsión.** Esto revela el patrón que has hecho.

5.1. Lave la muestra (oblea) con agua de grifo tibia ( $\sim 38^{\circ}\text{C}$ ) durante 1-2 minutos para eliminar la emulsión sin reaccionar y revelar el patrón.

5.2. Seque la oblea con aire limpio si está disponible, o simplemente deje que se seque al aire.

## **6. Inspección**

6.1. Inspeccione visualmente los patrones en la muestra (oblea). Verifique qué tan fiel se transfirió el patrón de la máscara a la oblea.

6.2. Busque signos de

- sub exposición: el patrón se transfiere de forma incompleta
- sobre exposición: el patrón está "quemado", es decir, las características son más anchas de lo que deberían ser
- sobre desarrollo: se ha eliminado demasiado material fotorresistente de los bordes de las entidades
- sub desarrollo: restos de fotorresistencia en las áreas donde debería haberse eliminado.

6.3. Usando un microscopio óptico, examine las mejores estructuras presentes en su muestra y compárelas con las de la foto máscara. Determine la característica más pequeña que se transfirió fielmente a la oblea. Si hay una cámara montada en el osciloscopio, recopile una imagen del patrón en la muestra (oblea). Consulte con su instructor qué medidas de resolución utilizar.

6.4. Retire la foto emulsión por inmersión en agua tibia del grifo y limpie con una toalla de papel, o use el removedor de emulsión. La oblea limpia se puede reutilizar.

**7. Variación en las condiciones del proceso.** ¿Se puede mejorar la transferencia de patrones cambiando el proceso?

7.1. Usando la misma emulsión y la fuente de luz, ajuste uno de los siguientes parámetros de la siguiente manera:

- Exposición a la luz: disminuya la exposición a la luz de 5 minutos y aumente a 10 minutos.
- Concentración de foto emulsión: diluya aún más la foto emulsión 1:1 con agua y observe los efectos sobre la calidad de la imagen.

7.2. Repita los pasos 2 a 5 (aplicación, secado, exposición, desarrollo y control de calidad) anteriores. Inspeccione el nuevo patrón en su muestra (oblea) y determine el tamaño de la característica más pequeña transferida.

7.3. Limpie y seque su oblea y notifique a su instructor.

## Preguntas de discusión

1. ¿Qué paso del proceso de fotolitografía fue el más difícil para usted? ¿Por qué?
2. ¿Encontró que al manipular el tiempo de exposición o de revelado cambió el patrón resultante? ¿En qué manera?
3. A veces, los estudiantes no logran obtener ninguna imagen en la muestra (oblea). ¿Qué podría haber salido mal para evitar que un patrón se transfiera a la misma?
4. Además de los procesos que utilizamos en esta actividad. ¿Qué otros pasos serían necesarios para hacer que tú dispositivo funcione (electrónico o mecánico)?

## Reconocimientos

- Modulo desarrollado por Dr. James Marti, Científico Principal, “University of Minnesota”, Minneapolis, MN.
- Basado en investigaciones de Dr. Maryam Jalali, “University of Minnesota”, Minneapolis, MN.
- Importantes contribuciones realizadas por el Sr. Samuel Levenson del Harper College (Palatine IL)
- Traducido al español por Rodfal A. Rodríguez y María T. Rivera de Cupey María Montessori School, San Juan, PR.

## Recursos

### *Videos*

- “How Do They Make Silicon Wafers and Computer Chips?": [www.youtube.com/watch?v=aWVywhzuHnQ](http://www.youtube.com/watch?v=aWVywhzuHnQ)
- “The Fabrication of Integrated Circuits”: [www.youtube.com/watch?v=35jWSQXku74](http://www.youtube.com/watch?v=35jWSQXku74)

### *Artículos*

- 1) [www.robinsonlibrary.com/finearts/print/lithography/senefelder.htm](http://www.robinsonlibrary.com/finearts/print/lithography/senefelder.htm)
- 2) [http://litografia.pl/en/lito\\_senefelder.html](http://litografia.pl/en/lito_senefelder.html)
- 3) [www.nndb.com/people/948/000205333/](http://www.nndb.com/people/948/000205333/)
- 4) J. Madou, “Fundamentals of Microfabrication: the science of miniaturization,” CRC Press, 2002.
- 5) S. Franssila, “Introduction to Microfabrication,” John Wiley & Sons, LTD, 2004
- 6) D. J. Elliot, “Integrated Circuit Fabrication Technology,” McGraw-Hill Book Company, 1982.
- 7) S. A. Campbell, “Fabrication Engineering at the Micro and Nanoscale,” Oxford, 2008.

## Apéndice: Alineación a los estándares

### *Alineación con “Next Generation Science Standards”*

<b>TABLA 1. “ALIGNED PRACTICES, DISCIPLINARY CORE IDEAS, AND CROSSCUTTING CONCEPTS”</b>		
<b>“PRACTICE”</b> <i>HS. Obtención, evaluación y comunicación de información: comunique información científica y técnica (por ejemplo, sobre el proceso de desarrollo y el diseño y desempeño de un proceso o sistema propuesto) en múltiples formatos.</i> <i>Parcial en los materiales para estudiantes</i>	<b>“DCI”</b> <i>HS.PS2.B: Tipos de interacciones: la atracción y la repulsión entre cargas eléctricas a escala atómica explican la estructura, las propiedades y las transformaciones de la materia, así como las fuerzas de contacto entre los objetos (materiales).</i> <i>Parcial en los materiales para maestros y estudiantes</i>	<b>“CROSSCUTTING CONCEPT”</b> <i>HS. Estructura y función: investigar o diseñar nuevos sistemas o estructuras requiere un examen detallado de las propiedades de diferentes materiales, las estructuras de diferentes componentes y las conexiones de los componentes para revelar su función y / o resolver un problema.</i> <i>Parcial en los materiales para estudiantes</i>

### *Alineación con “Common Core State Standards for English Language Arts/Literacy and Mathematics”*

<b>TABLA 2. “ALIGNED COMMON CORE STANDARDS FOR ENGLISH LANGUAGE ARTS &amp; LITERACY”</b>
CCR.L.6 Adquirir un vocabulario amplio y utilizar con precisión frases académicas generales y específicas (que demuestren dominio suficiente) para leer, escribir, hablar y escuchar a nivel de preparación universitaria y profesional. Demostrar independencia en la recopilación de vocabulario (conocimiento) al encontrar un término desconocido importante para la comprensión o la expresión. <i>Parcial en los materiales para maestros y estudiantes</i>
RST.11–12.3: Siga con precisión un procedimiento complejo de varios pasos cuando realice experimentos, tome medidas o realice tareas técnicas; analizar los resultados específicos basados en explicaciones en el texto. <i>Parcial en los materiales para estudiantes</i>