UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Design and implementation of a photolithography system to fabricate microdevices from thin films

Jhon Jairo Realpe [a], Gilberto Bolaños-Pantoja [a] & Juan Fernando Florez [b]

[a] *Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. jhrealpe@unicauca.edu.co, gbolanos@unicauca.edu.co*
[b] *Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. jflorez@unicauca.edu.co*

Received: November 14th, 2017. Received in revised form: February 12th, 2018. Accepted: March 15th, 2018.

Abstract
This article presents the design and implementation of a photolithography system to manufacture microdevices based on thin films. The system works with ultraviolet (UV) source of 380nm and allows to obtain 10-200 µm microstructures. The implementation was made with the product design and development process, where the technical specifications, generation, selection and proof of concepts of the system equipment modules were determined. A spincoater with an operating range of 500-6000 rpm and UV radiation source, based on LEDs, with ranges in power of 1-20mW/cm^2 and time of exposure 1-60s, were implemented. With optical microscopy and digital image processing, it was determined that the percentage relative error in their areas is less than 4% and the variability in their widths is less than two times the standard deviation.

Keywords: product design; photolithography; microdevice; thin films.

Diseño e implementación de un sistema de fotolitografía para fabricar microdispositivos a partir de películas delgadas

Resumen
Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema de fotolitografía para fabricar microdispositivos basados en películas delgadas. El sistema trabaja con una fuente ultravioleta (UV) de 380nm y permite obtener microestructuras de 10-200 µm. La implementación se hizo con el proceso de diseño y desarrollo de productos, donde se determinó las especificaciones técnicas, generación, selección y prueba de conceptos de los módulos de equipo del sistema. Se implementó un spincoater con rango de operación de 500-6000 rpm y una fuente de radiación UV basada en LEDs UV, con potencia de radiación de 1-20mW/cm^2 y tiempo de exposición de 1-60s. Se obtuvo micropuentes (mPs) de 30-105µm sobre películas delgadas de cobre. Con microscopía óptica y procesamiento digital de imágenes, se determinó que el error relativo porcentual en sus áreas es menor al 4% y la variabilidad en sus anchos es menor a dos veces la desviación estándar.

Palabras clave: diseño de productos; fotolitografía; microdispositivo; películas delgadas.

1. Introducción

La técnica de fotolitografía ha contribuido al desarrollo de dispositivos con base en los semiconductores, en las últimas cuatro décadas han alcanzado un alto nivel de sofisticación, permitiendo el desarrollo de la micro/nano electrónica, MEMs (Sistemas microelectromecánicos) NEMs (Sistemas nanoelectromecánicos), microfluídica, entre otros [1-3].

Las primeras técnicas de fabricación de circuitos integrados por la baja complejidad y costo son por contacto y proximidad con radiación UV, obteniéndose resoluciones de 1-10 µm. Pero se reemplazarían debido a las exigencias en la industria de los semiconductores [4]. Luego surge la técnica por proyección mejorando la resolución de los patrones impresos hasta el orden de los nanómetros, calidad de los micro/nano dispositivos y alta tasa de producción.

Mejoras en las fuentes de radiación, sistemas de lentes y

How to cite: Realpe, J.J., Bolaños-Pantoja, G. and Florez, J.F., Diseño e implementación de un sistema de fotolitografía para fabricar microdispositivos a partir de películas delgadas. DYNA, 85(205), pp. 294-301, June, 2018.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

resinas fotosensibles, se han dado por el esfuerzo de la industria, centros de investigación y la academia, con el fin de seguir lo planteado por la ley de Moore, donde el número de transistores en un circuito integrado se duplicará cada dos años [2].

Reducción en el tamaño de unidades lógicas (transistor) en un circuito integrado ha representado desafíos tecnológicos y económicos [4-7]. A cada reducción se le ha denominado "nodo" y está relacionado con la dimensión crítica (CD), parámetro que mide la calidad de las estructuras fabricadas a partir de su grosor, rugosidad y altura y determina el límite en la resolución de los sistemas de fotolitografía [5,6]. En los últimos 10 años se han desarrollado nodos que van desde los 45-10nm y se prevé que en el 2020 se alcanzará el nodo de 5nm [6]. De ahí la importancia de controlar todos estos parámetros que son operacionalmente imprescindibles. Por lo tanto, la producción de un nuevo nodo, implica cambios en instrumentación, materiales e infraestructura ocasionando un aumento en los costos de producción [6,8].

La instrumentación de mayor costo en los sistemas de fotolitografía son las fuentes de radiación, sofisticados arreglos de lentes, sistema electromecánicos para alinear la fotomáscara, equipos de esparcimiento de fotoresina de alta precisión, sistemas de metrología para inspeccionar las etapas de producción y la infraestructura donde se controla la temperatura, humedad, flujo y cantidad de partículas en el aire [3].

Por tal razón, el acceso a sistemas de fotolitografía e infraestructura a pequeños y medianos laboratorios de investigación es limitado debido a su elevado costo, imposibilitando la investigación en las disciplinas de micro/nano fabricación y otras áreas de ingeniería [9]. Para abordar este problema se ha desarrollado instrumentación adaptable a los recursos económicos e infraestructura como son fuentes de radiación basadas en LEDs UV [9,10] y equipos de esparcimiento de fotoresina [11,12]. Sin embargo, a la fecha no se han reportado sistemas de fotolitografía que integren esta instrumentación y dado que la industria de los semiconductores y centros de investigación continúan desarrollando nuevas técnicas de fotolitografía, es necesario acceder a instrumentación especializada y así contribuir al avance de la próxima generación de micro/nano dispositivos.

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un sistema de fotolitografía, siguiendo el proceso de diseño y desarrollo de productos donde se identifica materia prima y módulos de equipo que conforman el sistema, se determina las condiciones óptimas de fabricación de microdispositivos, se realiza caracterización con microscopía óptica para determinar la calidad de los microdispositivos, se muestran los resultados, discusión y conclusiones.

2. Técnica de fotolitografía

Consiste en transferir un patrón a la superficie de un sustrato o película delgada, a través del proceso: 1) limpieza del sustrato para eliminar compuestos orgánicos y partículas de polvo. 2) Esparcimiento de fotoresina sensible a la radiación UV en la superficie del sustrato. 3) Calentamiento suave, para mejorar la adhesión de la fotoresina en la superficie del sustrato. 4) Irradiar con UV la superficie de la capa de fotoresina sobre el sustrato a través

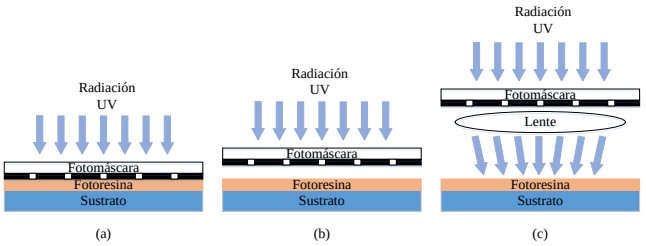

Figura 1. Técnicas de exposición UV. a) Contacto. b) proximidad. c) proyección.
Fuente: Modificado de [4].

de una fotomáscara con los patrones a imprimir mediante las técnicas: por contacto, donde la fotomáscara se presiona sobre sustrato, proximidad donde la fotomáscara está separada del sustrato o proyección donde se usa un sistema de lentes (Fig. 1). 5) Revelado donde se elimina las regiones que fueron irradiadas con UV. 6) Grabado de la superficie del sustrato en las regiones donde el material fotorresistente fue removido con el proceso de revelado, por medio de técnicas húmedas (solución ácida) o secas (plasma). 7) Remoción de fotoresina residual de la superficie del sustrato por técnicas húmedas o secas. 8) Inspección de la calidad de los patrones grabados con alguna técnica de microscopia [4,13].

3. Diseño e implementación del sistema de fotolitografía

Para diseñar e implementar el sistema de fotolitografía se sigue el proceso diseño y desarrollo de productos, ampliamente usado en el sector industrial para la fabricación de nuevos productos, que ha implementado distintas herramientas que dan seguimiento continuo a las actividades que realiza una empresa en el proceso de creación o mejora de un producto [14], a través de tres funciones: mercadotecnia, diseño y manufactura, integradas a la cadena de producción, que van desde la planeación del producto hasta su fabricación e inclusión en el mercado [14].

Se resalta la etapa diseño, ya que demanda más coordinación entre funciones y actividades, donde se usan recursos cognitivos como la solución de problemas, toma de decisiones, creatividad, máxima optimización de materia prima y tiempo [15]. Permitiendo desarrollar un artefacto, sistema o servicio, con características técnicas, funcionales y estéticas, que cumplen las necesidades planteadas por el cliente. Los recursos se organizan en actividades que facilitan acciones a ejecutar por el diseñador (Fig. 2).

Las actividades de desarrollo de concepto usadas para la implementación del sistema de fotolitografía son:

3.1. Identificar necesidades

El objetivo de esta fase es recopilar y determinar cuáles son las necesidades del cliente respecto al sistema de fotolitografía (Tabla 1).

3.2. Establecer especificaciones objetivo

Las necesidades identificadas se transforman en enunciados con un valor y métrica (valor numérico y

unidades respectivas) [16], para identificar las especificaciones técnicas (Tabla 2). La importancia relativa se define en función de las necesidades recogidas en la generación de la idea (donde 1 es el valor de mayor relevancia y 5 el de menor).

Es fundamental analizar el error en las dimensiones de las microdispositivos, es decir, cuanto pueden variar propiedades como la rugosidad y homogeneidad, sin que afecten sus propiedades eléctricas y mecánicas. Por lo que se adoptó el criterio sugerido por la ITRS (International Technology Roadmap Semiconductor) para controlar la calidad de los circuitos integrados y la repetibilidad del proceso de fabricación [4,17,18].

3.3. Selección del microdispositivo caso de estudio

Se seleccionó como dispositivo caso de estudio un mP, usado en el estudio de propiedades de transporte eléctrico (Fig. 3) [19,20].

3.4. Generación de conceptos

Se utilizó el diagrama de caja negra (Fig. 4) [14], que opera con flujos de material, energía y señales, para identificar problemas y subproblemas (Fig. 5). Las líneas finas y continuas denotan la transferencia y conversión de energía, las gruesas y continúas el flujo y transformación del material y la línea discontinua denota las señales de control y realimentación. Se enfocó en los subproblemas de esparcir fotoresina e irradiar con UV por su complejidad.

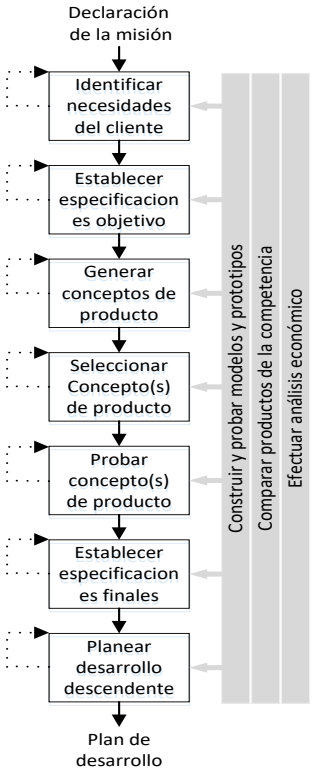

Figura. 2. Actividades del desarrollo de concepto.
Fuente: Modificado de [14].

Tabla 1.
Necesidades que debe satisfacer el sistema de fotolitografía.

Núm.	Producto	Necesidad	Importancia relativa
1	Sistema de fotolitografía	Repetibilidad	1
2	Sistema de fotolitografía	A partir de películas delgadas	1
3	Sistema de fotolitografía	Microdispositivos a escala micrométrica	1
4	Sistema de fotolitografía	Con base en la técnica de fotolitografía.	1

Fuente: Los autores.

Tabla 2.
Métricas para el sistema de fotolitografía.

Núm. Métrica	Núm. de necesidad	Métrica	Importancia relativa	Unidades
1	1	Error en las dimensiones de las microestructuras de los microdispositivos < 2σ	1	µm
2	2	Espesor de películas delgadas	1	nm
3	3	Rango dimensión de las microestructuras 10-200	1	µm
4	3, 4	Fotolitografía con fuente de radiación UV con longitud de onda en el rango 365-436	1	nm

Fuente: Los autores.

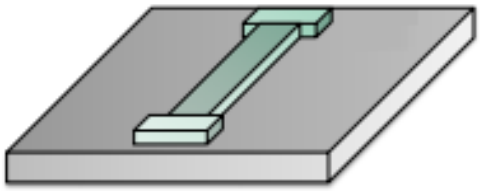

Figura 3. Microdispositivo caso de estudio.
Fuente: Los autores.

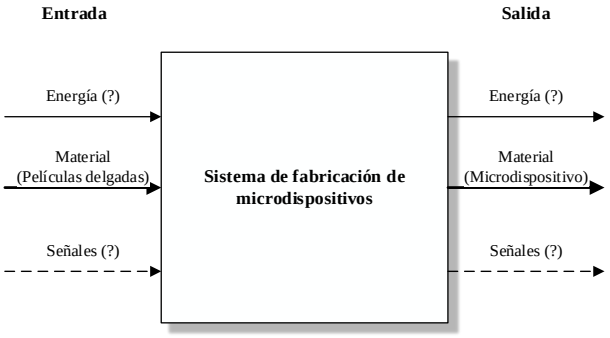

Figura 4. Diagrama de caja negra del sistema de fotolitografía.
Fuente: Los autores.

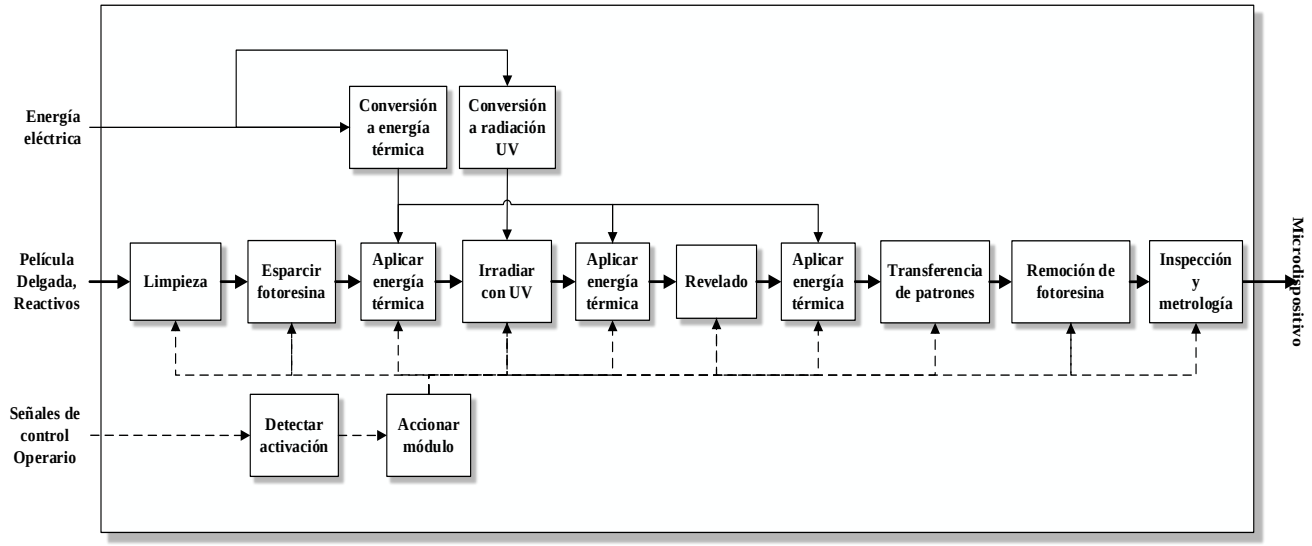

Figura 5. Subproblemas del sistema de fotolitografía.
Fuente: Los autores.

3.5. Selección de conceptos

Para dar la solución más óptima a los subproblemas, se hizo la búsqueda y selección de conceptos mediante la revisión en la literatura, búsqueda y comparación de instrumentación existente en el mercado.

Para el subproblema esparcir fotoresina se plantearon dos conceptos: un spray para depositar la fotoresina en la superficie de la película delgada, este proceso es sencillo de implementar pero el espesor de la capa de fotoresina depositada es variable y no homogéneo [21], afectando la repetibilidad en la fabricación de los microdispositivos.

Otro concepto es el spincoater donde se deposita la fotoresina sobre la película delgada, se hace rotar en el rango 1500-6000 rpm y por fuerza centrífuga esparcirla hasta el borde de la película delgada creando una capa fina y uniforme [2,3]. La fotoresina tiene características definidas, obteniéndose precisión en el espesor en la capa de fotoresina en función de la velocidad de rotación. Así el concepto más apropiado para el subproblema esparcimiento de fotoresina es el spincoater.

Para el subproblema irradiar con UV se plantea tres conceptos: la técnica de radiación por proyección, constituida por un arreglo de lentes, fuente de radiación UV y alineador de fotomáscaras. Actualmente es el sistema más utilizado para la fabricación de micro/nano dispositivos por su versatilidad, rendimiento en la producción y resolución de los patrones impresos [2,3]. Sin embargo los costos de implementación son elevados. La técnica de radiación por proximidad, consiste de una fuente de radiación UV y una fotomáscara separada de la película delgada con la fotoresina, no obstante la calidad y resolución en las microestructuras disminuye por efectos de difracción [2,3]. La técnica de radiación por contacto consiste en una fuente de radiación UV y una fotomáscara en contacto con la fotoresina sobre la película delgada. Se obtiene buena calidad en las microestructuras de los dispositivos ya que los efectos de la difracción son mínimos, la instrumentación no es compleja y los costos de implementación son bajos respecto a las técnicas anteriores [3,4]. Por lo tanto el concepto más apropiado para el subproblema irradiar con UV es la técnica por contacto.

3.6. Prueba e implementación de prototipos

Para el spincoater se diseñó e implementó un control de velocidad PID de un motor DC marca Pololu [22], en el rango de 500-6000 rpm, con error menor al 5% en el control y medición de velocidad y un módulo de potencia para su alimentación. Para el concepto de radiación con UV por contacto (Fuente de radiación UV) se usaron LEDs UV de 380nm con una potencia de radiación de 20mW/cm^2 de la empresa superbrightleds [23]. Se implementó una matriz de 10x10 LEDs y el control de potencia y tiempo de exposición. Cada concepto posee una interfaz de usuario constituido por teclado y pantalla LCD para programar y visualizar los parámetros de operación. El diseño electrónico se realizó en el entorno de desarrollo KiCad, la implementación sobre la plataforma de desarrollo electrónico arduino uno, fabricándose PCBs (Printed Circuit Board) para disponer los componentes electrónicos. Las especificaciones técnicas de los dos equipos se muestran en la Tabla 3. El diseño mecánico de los prototipos se desarrolló en el entorno Solid Edge versión estudiantil y se fabricaron prototipos en lámina y acrílico (Fig. 6).

3.7. Selección de fotoresina y película delgada

Se adquirió un kit de fotolitografía de la empresa Transene, está compuesto por fotoresina positiva (PC800), revelador (PC1800), rinse (PC2800), stripper (PC3800) y tiner (PC4800) [24].

Se utilizaron películas delgadas de cobre crecidas sobre sustrato de silicio por la técnica de sputtering DC [25].

Tabla 3.
Especificaciones técnicas de los módulos de equipo.

Spincoater	Equipo de Radiación UV
Rango de velocidades: 500-6000 rpm	Longitud de onda: 380nm
Error en la medida y control de velocidad menor al 5%.	Rango de potencia de radiación: 1-20mW/cm^2
Rata rampa: 100-1000 rpm/s	Tiempo de exposición: 1-60s

Fuente: Los autores.

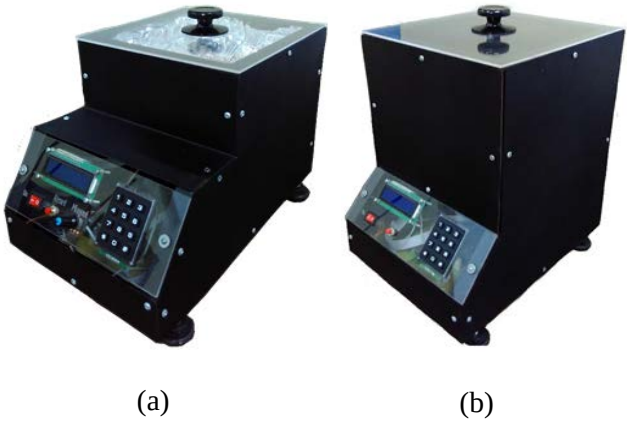

Figura 6. Prototipos finales (a) Spincoater. (b) Fuente de radiación UV.
Fuente: Los autores.

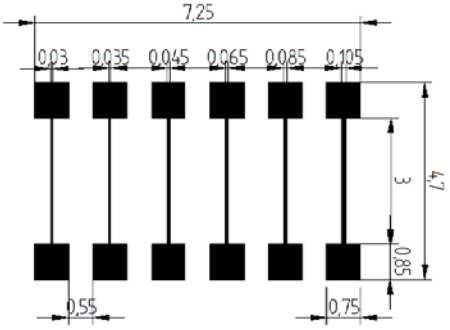

Figura 7. Diseño de la fotomáscara (unidades en mm).
Fuente: Los autores.

3.8. *Fabricación de la fotomáscara*

Para fabricar la fotomáscara se considera las condiciones: 1) Patrón geométrico un mP en campo claro (el patrón es negro con fondo claro) puesto que la fotoresina es positiva. 2) Que los mPs en la fotomáscara no excedan el área de 10x10 mm^2 ya que las películas delgadas crecidas sobre sustratos de silicio son menores a 10 mm de lado. 3) mPs con distintos anchos. Así se planteó el diseño de una fotomáscara con 6 mPs de 0.30-0.105 mm de ancho, 3 mm de longitud y nodos de 0.75 mm de ancho por 0.85 mm de alto, como contactos eléctricos (Fig. 7). El diseño se realizó con el software L-Edit versión estudiantil y se imprimió sobre acetato con impresión láser de alta resolución (25400dpi), en la empresa CAD/Art Services Inc [26].

3.9. *Integración de equipos*

El spincoater y la fuente de radiación UV se integraron al sistema de fotolitografía, que se ha denominado SysMicFUV-FB (Fig. 8) y está constituido por: (1) Soplador de aire, (2) Limpiador de ultrasonido, (3) Spincoater, (4) Plancha de calentamiento, (5) Medidor de temperatura, (6) Fuente de radiación UV, (7) Cuatro beaker, (8) Dos tarros de enjuague, (9) Mortero de ágata, (10) Pinzas, (11) Lámpara. Estos se organizan en 7 sistemas: limpieza, esparcimiento de fotoresina, calentamiento, radiación UV, revelado, transferencia de patrones y remoción de fotoresina.

4. Resultados y discusión

Para verificar la repetibilidad en la fabricación de microdispositivos con el sistema SysMicFUV-FB y dar cumplimiento a las especificaciones de diseño, se obtuvieron las condiciones de producción (Tabla 4) a partir de los parámetros sugeridos por el fabricante de la fotoresina [24], lo reportado en la literatura [27,28] y pruebas experimentales. Con lo cual se fabricó cuatro lotes de seis mPs cada uno sobre películas delgadas de cobre usando la fotomáscara de la Fig. 7.

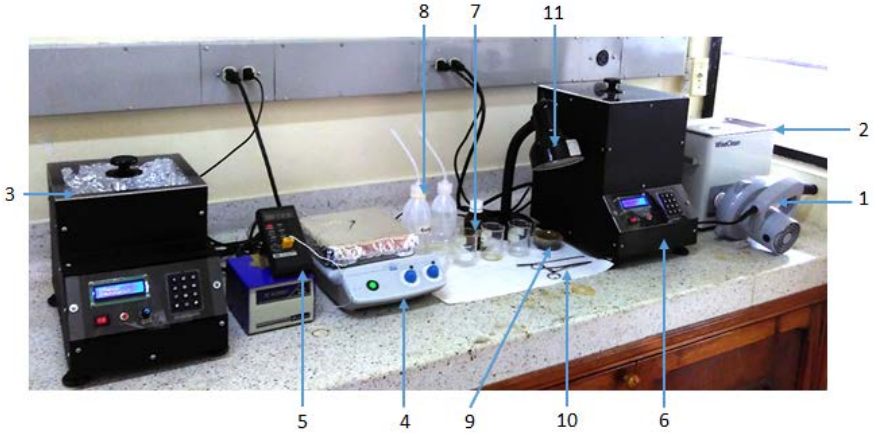

Figura 8. Descripción modular del sistema SysMicFUV-FB.
Fuente: Los autores.

Tabla 4.
Etapas del proceso de fabricación de mPs.

Etapa	Parámetros
Limpieza de película delgada de cobre	Limpiar la película delgada con acetona en ultrasonido por tres minutos a 40°C. Secar humedad con aire comprimido por 20s.
Esparcimiento de la fotoresina	Depositar de 3-5 gotas de fotoresina (PC800) en la película delgada de cobre sujetada al portasustrato del spincoater y programar una rampa de velocidad con: velocidad inicial: 400 rpm, velocidad estabilización: 3000 rpm, tiempo de estabilización: 40s, rampa de subida: 100 rpm/s, rampa de bajada: 100 rpm/s, velocidad final: 0 rpm/s
Calentamiento suave	Poner la película delgada de cobre en plancha de calentamiento a 80 °C por tres minutos. Retirar y dejar enfriar por dos minutos.
Radiación UV	Alinear película delgada sobre la fotomáscara en el sistema de radiación UV e irradiar con una potencia de 20mW/cm^2 y tiempo de exposición de 60s.
Revelado	Colocar la película delgada en el revelador (PC1800) agitando continuamente por 40s. Retirar y enjuagar en rinse (PC2800) por 10s. Lavar con agua destilada por 10s.
Inspección post revelado	Inspeccionar la calidad de los patrones impresos sobre la fotoresina con un microscopio óptico.
Transferencia de patrones	Colocar la película delgada en una solución de percloruro férrico al 0.1gr/mL agitando continuamente por 20s. Retirar y enjuagar con agua destilada por 20s.
Remoción de fotoresina	Colocar la película delgada en acetona agitando continuamente por 30s. Enjuagar con agua destilada por 20s.
Inspección post grabado	Inspeccionar la calidad de las microestructuras con un microscopio óptico.

Fuente: Los autores.

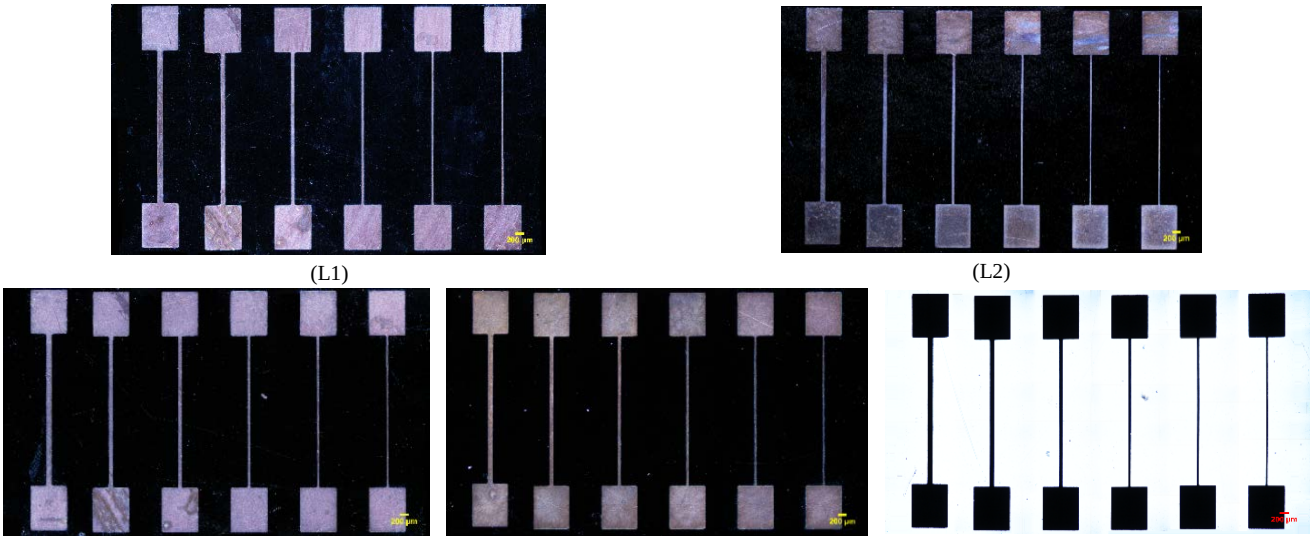

Figura 9. Micrografías de los lotes de mPs y la fotomáscara.
Fuente: Los autores.

4.1. Caracterización de los microdispositivos

La caracterización de los mPs se realizó con un sistema de microscopia óptica constituido por: microscopio óptico marca NIKON 80i, cámara digital marca DS-MV-U2, computador marca Dell, fuente variable de iluminación y el software NIS-Elements F, para configurar los parámetros de la cámara, captura y almacenamiento de las imágenes.

Con el software ImageJ [27] se realizó el procesamiento digital de imágenes determinando el área de las mPs y el ancho siguiendo los pasos:

Paso 1: Reconstrucción digital de la imagen. Se ha etiquetado a los lotes con L1-L4 y a la fotomáscara con FM1 (Fig. 9). Paso 2: Establecimiento de escala.

Paso 3: Conversión a escala de grises.
Paso 4: Segmentación.
Paso 5: Identificación del área de interés (ROI).
Paso 6. Medición del área de las mPs.
Paso 7. Medición del ancho de los mPs.

Se obtuvo el área de los mPs y la fotomáscara (Tabla 5), donde cada fila se ha etiquetado desde mP1-mP6 asociado a cada micropuente y las columnas hacen referencia a las medidas del ancho de cada mP en los 4 lotes fabricados.

Se calculó la repetibilidad del proceso de fabricación con el error relativo porcentual, planteando como medida patrón (valor teórico) el área de los mPs impresos en la fotomáscara (Tabla 6).

Tabla 5.
Medida del área en los mPs para los 4 lotes de microdispositivos y la fotomáscara.

		FM1	L1	L2	L3	L4
mP1(μm^2)x10^6	1.37	1.40	1.37	1.42	1.41
mP2(μm^2)x10^6	1.38	1.42	1.38	1.43	1.43
mP3(μm^2)x10^6	1.40	1.42	1.42	1.46	1.46
mP4(μm^2)x10^6	1.46	1.46	1.45	1.49	1.49
mP5(μm^2)x10^6	1.52	1.52	1.49	1.55	1.55
mP6(μm^2)x10^6	1.58	1.59	1.54	1.59	1.62

Fuente: Los autores.

Tabla 6.
Porcentaje de error en los mPs de cada microdispositivo.

	L1	L2	L3	L4
mP1 (%)	2.8	0.5	3.3	4.1
mP2 (%)	2.9	0.2	3.6	3.7
mP3 (%)	1.8	1.6	4.4	3.9
mP4 (%)	0.3	0.8	2.0	2.2
mP5 (%)	0.2	2.2	1.9	1.9
mP6 (%)	1.0	2.3	2.6	1.0

Fuente: Los autores.

Tabla 7.
Cálculo de promedio, desviación estándar y los valores más bajos y altos medidos en la agrupación de mPs.

	$\bar{X}$ (µm)	2σ (µm)	Diferencia entre $\bar{X}$ y el valor más bajo medido (µm)	Diferencia entre $\bar{X}$ y el valor más alto medido (µm)
mP1	29.9	2.50	2.4	2.5
mP2	34.7	2.75	2.1	2.5
mP3	44.8	2.79	2.4	2.6
mP4	64.8	2.25	1.8	2.0
mP5	85.0	2.42	2.0	1.9
mP6	105.1	2.62	2.3	2.1

Fuente: Los autores.

Se evidencia errores por encima del 3% en el área de los mPs P1, P2, P3 de MD1 y P1, P3 de MD3. También se determina que los errores son mayores para los mPs de áreas menores (P1-P3). Este comportamiento se debe a que la transferencia de patrones sobre la superficie de la película delgada de cobre se hace en un medio ácido, presentándose regiones donde el ataque químico es más selectivo. Además factores como la temperatura, agitación y procesos de interacción acido-superficie afectan las condiciones de grabado [4], [28-30]. Otra causa del error se atribuye a la oxidación de la superficie de los mPs por el contacto con el medio y por otro lado a la presencia de pequeños residuos de fotoresina en los bordes, lo que aumentaría el área de los micropuentes.

Se agruparon las mediciones de ancho en los mPs que comparten las mismas características, calculándose el valor promedio, desviación estándar, doble de la desviación estándar y lo diferencia entre los valores más bajos y altos medidos respecto al valor promedio (Tabla 7).

La diferencia entre el valor promedio y los valores máximos y mínimos en las mediciones de los mPs, así como la desviación estándar es mayor para mP1, mP2 y mP6. No obstante, la variabilidad en la anchura de los 6 mPs para los 4 lotes es menor al criterio de dos veces la desviación estándar. Con base en lo anterior se verifica que el sistema SysMicFUV-FB permite fabricar microestructuras con alto grado de repetibilidad y por tanto satisfacen las necesidades planteadas.

5. Conclusiones

En este trabajo se diseñó e implementó un sistema de fotolitografía por contacto aplicando el diseño y desarrollo de productos, lo que permitió la identificación de los módulos de equipo, especificaciones de diseño, generación, selección y prueba de conceptos y fabricación de dos prototipos: un spincoater basado en el control de velocidad de un motor DC y una fuente de radiación UV con base en un arreglo de LEDs UV con longitud de onda de 380nm. Se fabricaron cuatro lotes con 6 mPs cada uno, a partir de películas delgadas de cobre crecidas sobre sustrato de silicio, con la técnica de sputtering DC. La repetibilidad del proceso de fabricación se determinó a partir de la medición del área y el ancho de los micropuentes usando la técnica de microscopía óptica y procesamiento digital de imágenes. Donde se obtuvo que el error relativo porcentual en el área de los micropuentes es de 1-4%. Además, se determinó que la variabilidad de las microestructuras en los micropuentes es menor a 2σ. Los resultados sugieren que el sistema de fotolitografía desarrollado, permite la obtención de micropuentes y microcircuitos con alta tasa de producción, repetibilidad y calidad óptima y por lo tanto da cumplimiento a las especificaciones de diseño.

Referencias

[1] Zheng, Y., You, Z. and Shriram, R., Studies on room-temperature electric-field effect in ionic-liquid gated VO_2 three-terminal devices, J. Appl. Phys., 111(1), 014506, 2012. DOI: 10.1063/1.3665399.

[2] Pimpin, A. and Srituravanich, W., Review on micro and nanolithography techniques and their applications, Eng. J., 16(1), 19 P, 2011. DOI: 10.4186/ej.2012.16.1.37.

[3] Krishna, P.K., Srimanth, M.A. and Reddy, P.S., A review on contemporary practices in lithography, IOSR J. Appl. Chem., 7(4), pp. 27-31, 2014. DOI: 10.9790/5736-07422731.

[4] Madou, M.J., Manufacturing techniques for microfabrication and nanotechnology - Vol 2, 3ra ed., CRC Press, 2011.

[5] Neisser, M. and Wurm, S., ITRS lithography roadmap: 2015 challenges, Adv. Opt. Technol., 4(4), Jan. 2015. DOI: 10.1515/aot-2015-0036.

[6] Rothschild, M., A roadmap for optical lithography, Opt. Photonics News, 21(6), 26 P, Jun. 2010. DOI: 10.1364/OPN.21.6.000026.

[7] Rice, B., NIST TIP white paper: TIP critical national needs ideas: next generation lithography, as we push down to 11 nm lines and spaces, 2011. [online]. [accessed: 02-Feb-2018]. Available at:

https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/04/28/272_next_generation_lithography.pdf.
[8] Morris, M.A., Directed self-assembly of block copolymers for nanocircuitry fabrication, Microelectron. Eng., 132, pp. 207-217, 2015. DOI: 10.1016/j.mee.2014.08.009.
[9] Yapici, M.K. and Farhat, I., UV-LED exposure system for low-cost photolithography, en SPIE, 2014, vol. 9052, 90521T P. DOI: 10.1117/12.2046123.
[10] Kim, J., Paik, S., Herrault, F. and Allen, M., UV-LED lithography for 3-D high aspect ratio microstructure patterning, Solid-State Sensors, Actuators Microsystems Work., 2012, pp. 481-484.
[11] Gómez, R. and Ortiz, J., Low cost instrumentation for spin-coating deposition of thin films in an undergraduate laboratory, Latin-American J. Phys. Educ., 5(2), pp. 368-373, 2011. [date of reference: June 11th of 2011]. Available at: http://www.lajpe.org/june11/8_LAJPE_525_Ramon_Gomez_Preprint_corr_f.pdf
[12] Meftahul, M., Rashid, M. and Ataur, M., Design and fabrication of a simple cost effective spin coater for deposition of thin film, Adv. Environ. Biol., 8(3), pp. 729-733, 2014.
[13] Lin, B.J., Optical lithography. Bellingham, Washington USA: SPIE Publications, 2010.
[14] Ulrich, K. and Eppinger, S., Diseño y desarrollo de productos, 5ta ed. Mexico: Mc Graw Hill, 2013.
[15] Charry, G., Diseño en ingeniería, Aug-2016. [En linea]. [Accedido: 16-Aug-2016]. Disponible en: http://blog.utp.edu.co/giovannitorres/lecturasx/.
[16] Olsina, L., Métricas e indicadores: dos conceptos claves para medición y evaluación, 2003. [En linea]. [Accedido: 16-Aug-2016]. Disponible en: http://www.ciw.cl/recursos/Charla_Metricas_Indicadores.pdf
[17] Landis, S., Nano-lithography, 1ra ed. Great Britain: Wiley-ISTE, 2011.
[18] Ikegami, T., Yamaguchi, A. and Tanaka, M., Evolution y future of critical dimension measurement system for semiconductor processes, Hitachi High Technologies Inc, 2011. [online]. [accessed: February 02nd of 2018]. Available at: http://www.hitachi.com/rev/pdf/2011/r2011_05_104.pdf.
[19] Aurelian, C., Marc, F., Julie, C. and Maggy, C., Electric field-assisted metal insulator transition in vanadium dioxide (VO_2) thin films: optical switching behavior y anomalous far-infrared emissivity variation, Proc. SPIE, no. 9364, pp. 93640J1-J11, 2015. DOI: 10.1117/12.2076260.
[20] Malatto, L., Giménez, G. and Mangano, E., Thin-film VO_2 and NiCr resistors: a MEMS application. 7th Ibero-American Congress on Sensors (IBERSENSOR), Lisboa, PORTUGAL., 2010.
[21] Gonsalve, S., Tecnología y procesos de fabricación de microsistemas, Tesis de grado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2005.
[22] Pololu Robotics & Electroics, Motor with 64 CPR Encoder for 37D mm Metal Gearmotors (No Gearbox), 2016. [online]. [accessed: August 14th of 2016]. Available at: https://www.pololu.com/product/2821.
[23] https://www.superbrightleds.com/. [online]. [accessed: April 12th of 2017]. Available at: https://www.superbrightleds.com/moreinfo/component-leds/5mm-uv-led-15-degree-viewing-angle-380-nm-30mw/632/.
[24] Transist Photoresist Products, Aug-2016. [online]. [accessed: August 16th of 2016]. Available at: http://transene.com/transist/.
[25] Guerrero, A.M., Crecimiento de películas delgadas multicapa DE NiFe-Co con capas intermedias de Cu por la técnica de sputtering, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2016.
[26] CAD/Art Services, Inc. [online]. [accessed: April 15th of 2017]. Available at: http://www.outputcity.com.
[27] SU-8 2000 Permanent Epoxy Negative Photoresist. [online]. [accessed: July 25th of 2017]. Available at: http://microchem.com/pdf/SU-82000DataSheet2025thru2075Ver4.pdf.
[28] Pinto, V., Sousa, P., Cardoso, V. and Minas, G., Optimized SU-8 processing for low-cost microstructures fabrication without cleanroom facilities, Micromachines, 5(4), pp. 738-755, Sep. 2014. DOI: 10.3390/mi5030738.
[29] Broeke, J. and Mateos J.M., Image processing with ImageJ, 2da ed. Packt Publishing, 2015.
[30] Mack, C.A., Fundamental principles of optical lithography, 1ra ed. John Wiley & sons, Ltd., 2008.
[31] Levinson, H.J., Principles of lithography, Third Edition (SPIE Press Monograph, Vol. PM198), 3ra ed. SPIE Press, 2011.
[32] Franssila, S., Introduction to microfabrication, 2da ed. United Kindom: John Wiley & sons, Ltd., 2010.

J. Realpe, es Ing. Físico en 2011, MSc. en Ingeniería Física en 2017 de la Universidad del Cauca, Colombia. Se desempeña como investigador del grupo de Física de Bajas Temperaturas FISBATEM, de la Universidad del Cauca, Colombia. Sus áreas de interés son: instrumentación electrónica, programación de sistemas embebidos, diseño CAD, biosensores y microcircuitos y síntesis y caracterización de materiales en película delgada y en bloque.
ORCID: 0000-0001-7918-011X

G. Bolaños, es Lic. en Matemática y Física en 1985 de la Universidad de Nariño, Colombia. MSc. en Ciencias Físicas en 1992, PhD en Ciencias Físicas en 2000 de la Universidad del Valle, Colombia. Se desempeña como docente de planta, coordinador de la maestría en Ingeniería Física e investigador en la Universidad del Cauca, Colombia. Sus áreas de interés son: física del estado sólido, películas delgadas, materiales con propiedades magnéticas, semiconductoras y multiferróicas.
ORCID: 0000-0002-3080-9236

J. Florez, es Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones en 1997, Esp. en Informática Industrial en 1999, Esp. en Redes y Servicios Telemáticos en 1999 y MSc. en Ingeniería, énfasis en Electrónica y Telecomunicaciones en 2010 de la Universidad del Cauca, Colombia. Se desempeña como docente de Planta e investigador en la Universidad del Cauca, Colombia. Sus áreas de interés son: robótica, control, robótica móvil, lógica difusa, redes neuronales, instrumentación industrial, control automático de procesos e integración empresarial.
ORCID: 0000-0003-1646-4419

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64