

CAPÍTULO II
DESARROLLO TEÓRICO

2. DESARROLLO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de fabricación relacionados con los sistemas micro electro-mecánicos (MEMS) y los sectores de la microelectrónica se basan en tecnologías planas y 2D. Esto conlleva que se produzcan componentes o productos dentro o sobre obleas planas.

Los componentes MEMS parten de una oblea preparada normalmente de silicio, limpia y oxidada. Una vez preparada, las obleas se procesan generando estructuras en capas diferentes. Esta estructura consiste en proyectar mediante técnicas fotográficas la estructura deseada sobre una capa fotosensible que cubra la oblea, seguido de un proceso químico o físico que elimina o añade material con el fin de crear una estructura. El diagrama básico del proceso de micromecanizado MEMS se muestra en la Figura 2.

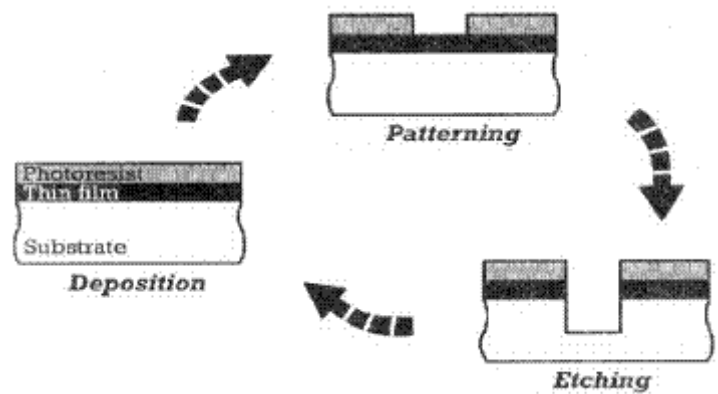


Figura 2. Etapas micromecanizado

Se pueden distinguir 3 etapas diferentes correspondientes a la deposición, fotolitografía y al grabado.

En la primera etapa de deposición, se deposita, según la técnica de deposición utilizada, una película delgada de algún tipo de material, según sea el caso. El electroplating es una de estas técnicas de deposición, aparte del resto de técnicas que ya se han nombrado anteriormente en el apartado 1.4.

Por lo general, la deposición del material, va seguido de un proceso de litografía. En este proceso litográfico se transfiere un patrón a un material fotosensible, previamente depositado, por exposición selectiva a una fuente de radiación como la luz. El material fotosensible, conocido como fotorresina, experimenta cambios en sus propiedades físicas cuando es expuesto a una fuente de radiación. Haciendo uso de una máscara, y exponiéndolo a dicha fuente de radiación, se consigue que la región expuesta cambie sus propiedades, pudiendo eliminar posteriormente una de las zonas, según el tipo de resina.

Una vez definido un patrón sobre la superficie, la siguiente etapa consiste en el proceso de grabado.

Hay dos tipos de proceso de grabado, el grabado húmedo y el seco. En el primer caso, el material se disuelve cuando se sumerge en una solución química. En el segundo, el material se pulveriza o disuelve utilizando vapor de iones reactivos o un grabado de fase vapor.

Este proceso se puede repetir varias veces hasta conseguir la estructura deseada.

Nuestro objetivo no es otro que definir este mismo proceso de micromecanizado de MEMS pero adaptado a la peculiaridad de usar un método de deposición de metal que no está estandarizado y del que no existen útiles en el laboratorio para llevarlo a cabo.

En el estudio llevado a cabo para conseguir definir un proceso estándar que consiga la definición de pistas de cobre sobre sustratos, han sido necesario el uso de diferentes etapas de deposición, eliminación...

En los próximos apartados se describe de manera teórica las diferentes etapas que intervienen en el proceso de fabricación que se define en este proyecto.

2.2. ELECTROPLATING

2.2.1. PRINCIPIOS DEL CHAPADO

El electroplating es una técnica de chapado sobre piezas metálicas. Consiste en depositar partículas de metal cargadas positivamente (ions) moviéndose por una solución conductora, atrayéndolas hacia un objeto al que se ha dado una carga negativa.

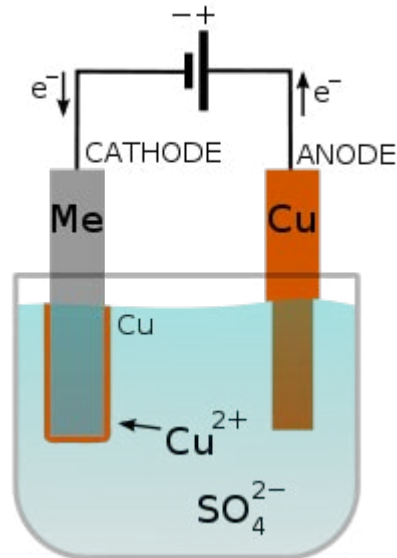


Figura 3. Proceso electroplating

Usando esta técnica de chapado por inmersión, el objeto a chapar (cátodo) es conectado al negativo de la fuente de alimentación, dándole carga negativa, y una chapa de metal, normalmente hecha del metal de chapado (ánodo) es conectado al positivo de la fuente de alimentación, dándole carga positiva. En la Figura 3 se ve claramente el esquema de trabajo de esta técnica.

Los iones positivos fluyen del ánodo hacia el objeto a chapar, a través de la solución de chapado (el electrolito), y son depositados en la superficie del objeto. El grosor de la lámina de metal depositado sobre la superficie, depende directamente del tiempo de chapado definido.

Existen diferentes tipos de chapado según la necesidad y según el material que se quiera depositar sobre el objeto a chapar.

- Capa 'strike' de Cianido de Cobre
- Chapado ácido de cobre
- Chapado de Níquel
- Chapado en Cromo

La capa de ataque de Cianido de cobre es un método barato de proveer una rápida cobertura para el Níquel, pero como es solo una fina capa tiene que hacerse con el ácido de cobre.

El ácido de cobre puede chapar capas de más de $\frac{1}{4}$ " de grueso y como es un metal blando, puede ser pulido para darle un bonito lustro.

Este es el paso donde los chapadores profesionales gastan su tiempo para darle el acabado "show quality chrome".

El chapado de Níquel es la capa protectora más dura. Este níquel es lo que se suele ver frecuentemente "pelándose" en un viejo parachoques. Como es un duro metal, y es más difícil de pulir o abrasionar, es muy esencial que todas las reparaciones y retoques sean hechas antes del paso de chapado.

El níquel, dándole tiempo, se deshace pesadamente dando un acabado liso y cargado. Puede incluso "resucitarlo" con un ligero pulido de cromo, pero es por eso que se aplica el cromo.

El chapado de cromo decorativo es una capa muy fina de chapado. Puede ser aplicada directamente a muchos metales, pero es extremadamente poroso y puede dejar de cubrir la parte sensible a la oxidación en poco tiempo. Solo proveyendo unas capas inferiores adecuadas de níquel y/o cobre puede evitarse este fenómeno.

2.2.2. PROCESO

El ánodo y el cátodo en el electroplating están ambos conectados a una fuente de alimentación externa. El ánodo está conectado al positivo de la fuente de alimentación, y el cátodo se conecta al negativo de la fuente de alimentación externa. Cuando la fuente de alimentación se activa, el metal del ánodo se oxida en el estado de cero valencia para formar cationes con carga positiva. Estos cationes se asocian con los iones de la solución. Los cationes se reducen en el cátodo para depositar en el

estado metálico de valencia cero. Por ejemplo, en una solución ácida, el cobre se oxida en el ánodo de cobre por la pérdida de dos electrones. El cobre se asocia con los iones del SO_4^{2-} en la solución para formar sulfato de cobre. En el cátodo, el cobre se reduce a cobre metálico mediante la obtención de dos electrones. El resultado es la transferencia efectiva de cobre de la fuente de ánodo a una placa que cubre el cátodo.

El chapado es más un elemento metálico, que una aleación. Sin embargo, algunas aleaciones pueden ser electrodepositadas, especialmente cobre y estaño.

Muchos baños de chapado incluyen cianuros de otros metales, por ejemplo cianuro de potasio, además de los cianuros del metal a depositar. Estos cianuros libres facilitan la corrosión del ánodo, ayudando a mantener un nivel constante de iones metálicos y contribuyen a la conductividad. Además, productos químicos no metálicos tales como los carbonatos y fosfatos se pueden añadir para aumentar la conductividad.

2.2.3. LUGAR DE TRABAJO

Para llevar a cabo el proceso de electroplating, es muy importante preparar correctamente el lugar de trabajo ya que se trabaja con elementos y sustancias ácidas que provocan reacciones químicas y olores. Es conveniente que el lugar de trabajo esté provisionado de suelo de cemento, buena ventilación, agua corriente y buena iluminación para poder inspeccionar el trabajo a fondo.

Si se requiere un equipamiento de pulido para tratar el objeto después de chapar, es conveniente que esta operación y los útiles estén alejados del lugar de trabajo. El motivo es simplemente para evitar contaminar la solución de los tanques con restos de partículas de metal que se puedan esparcir por el aire.

En cuanto a la temperatura e iluminación, es conveniente tener una buena iluminación para poder inspeccionar el trabajo a fondo y la temperatura ideal de la sala debe de encontrarse entre 20 - 22°C.

En la Figura 4 puede observarse un esquema de una sala preparada para llevar a cabo el proceso de chapado de los distintos materiales comentados anteriormente (cobre, níquel, cromo...)

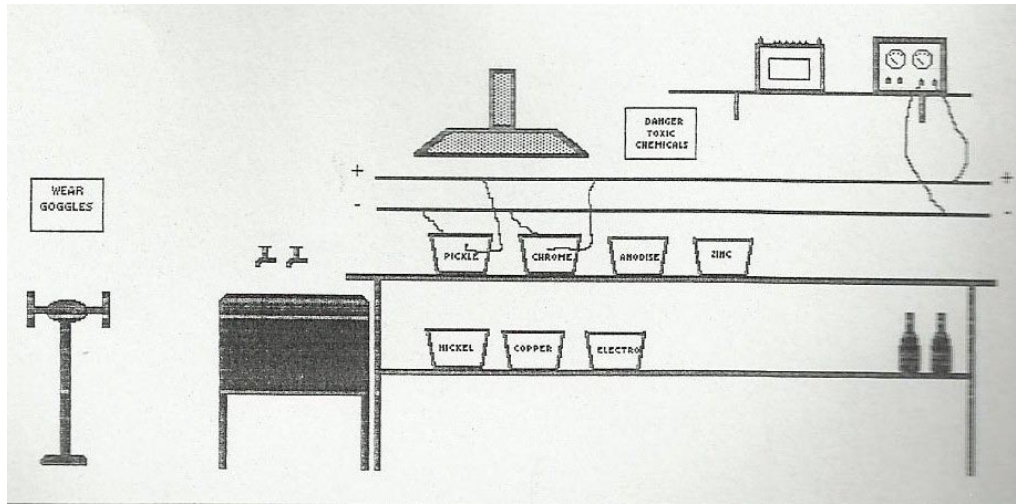


Figura 4. Esquema zona de trabajo electroplating

2.2.4. CABLEADO DE LAS PIEZAS

Las conexiones entre la fuente de alimentación y el objeto a chapar es un punto a tener muy en cuenta. Esto es debido a que hay que cuidar muy bien que objetos se introducen dentro del recipiente, ya que cualquier agente externo que se introduzca dentro del líquido conductor, puede propiciar chapados contaminados.

El hilo de latón es probablemente el mejor que se puede usar. Una de las principales características es que no se oxida tan rápido como el cobre o el acero. Debido a que el hilo de latón es difícil de conseguir, normalmente se usa cable de cobre, sin efectos adversos.

Para procesos de cromado se debe de usar cables gruesos o duplicar el cableado, ya que este proceso usa un gran amperaje, que podría fundir un cable fino.

No se debe usar cable de acero o cable de acero cobreado, ya que no es un buen conductor.

Cuando se anodiza, proceso inverso al chapado, es conveniente usar únicamente cable de aluminio desde la barra del tanque hasta la pieza. El cable

necesita estar fijado de manera segura a la pieza, ya que si no, produce una capa aislante de anodizado, lo que provoca que deje de ser conductivo, con lo que la pieza no recibe más corriente y cesa el proceso.

Cada pieza debe ser cuidadosamente examinada para encontrar el sitio adecuado donde fijar el cable de conexión, ya que debe colgarla de la barra del tanque. Existe la posibilidad de que en cada parte que toque el cable, el proceso de chapado deje marca.

Cuando se desea chapar en cromo, los cables deben de ser gruesos y de un solo hilo. Puede incluso necesitar pasar varios cables alrededor del objeto, para asegurar que se le conduce suficiente corriente. Con estos cables rígidos de un solo hilo, se pueden hacer ganchos que cuelguen de la barra del tanque. Eliminando el aislante solo en los extremos, puede hacer ganchos que no interfieran en el chapado y como consecuencia poder reusarlos.

Todas las fijaciones a las piezas deben ser seguras, especialmente cuando trabaje con corrientes altas y en procesos como el chapado en cromo y el anodizado.

En cuanto a las placas de metal usadas para chapar objetos, estas son llamadas ánodos cuando son usadas en un tanque de chapado y cátodos cuando son usadas en un tanque de deschapado o de anodizado. Los ánodos van siempre conectados al positivo de la fuente de alimentación, y los cátodos al negativo de la fuente de alimentación.

Para colocar las placas de metal es imperativo necesario no dejar que ningún cable/clips, etc.... se sumerja en la solución de chapado. Cualquier objeto extraño puede ser disuelto por la acción del chapado y el resultado puede ser un electrolito contaminado.

La distancia a la que se debe de colocar las placas de metal y el objeto a chapar es otro de los puntos importante. Mantener la distancia entre ambos entre 3" y 9" es lo recomendado. Colocarlo más o menos cerca depende del tipo de chapado que se esté realizando. Por ejemplo, en el caso de chapado en cromo, los ánodos deben de situarse alrededor del objeto a chapar ya que el cromo tiene poca fuerza de tiro.

Los ánodos dan las líneas de fuerza similarmente a un campo magnético. Estas líneas viajan en línea casi recta del ánodo a la pieza, pero, como los campos de fuerzas electromagnéticas, se curvan ligeramente. Por lo que un objeto que está siendo chapado de cara a un solo ánodo, generalmente solo chapará del lado de cara al ánodo. Como las líneas de fuerza se curvan, algo del lado exterior de la pieza será también chapado. Este fenómeno puede variar de pieza en pieza, también depende del tipo de chapado que se haga. Generalmente el chapado de Zinc chapará toda la parte trasera de la pieza, mientras que el cromo no, ya que tiene poco tiro.

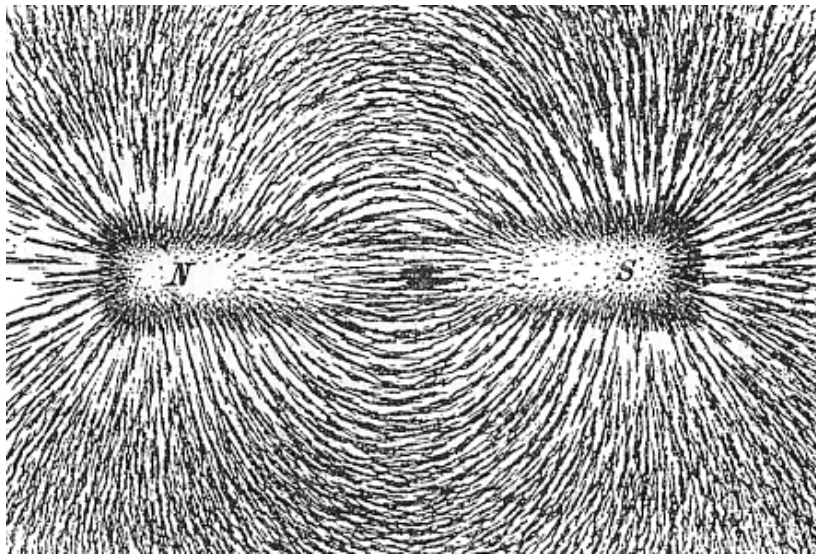


Figura 5. Líneas de fuerza campo magnético

Hay distintas configuraciones para colocar el ánodo. El tanque C muestra los ánodos colgados en el centro del tanque, y doblados alrededor para mantener su equidistancia a la pieza. Esto es útil especialmente cuando chape una pieza pequeña. Si los ánodos se dejan como en la posición del tanque A, la distancia puede ser demasiada, con lo que el ánodo de cromo no podrá “tirar” con fuerza a través de la pieza, resultando parches en la pieza. Los ánodos del tanque C pueden hacerse como un tubo, con la pieza colgando en el centro.

La configuración del tanque B puede ser usada cuando la pieza tiene muchos rincones, asegurando que las líneas de fuerza van en todas direcciones. En el tanque D, se observa que las líneas de fuerza son atraídas solo hacia un lado del objeto, con lo que el lado a la sombra del ánodo no será chapado.

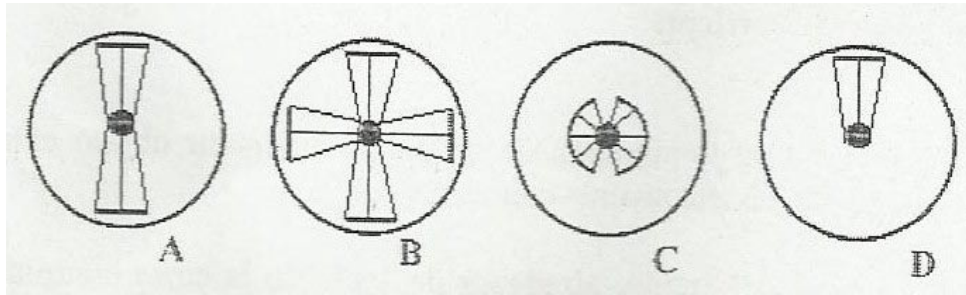


Figura 6. Posición de ánodos respecto a objeto a chapar

2.2.5. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Existen muchos tipos y medidas de fuentes de alimentación. A continuación se muestran algunos tipos de fuentes y se indica cual es adecuada para el electrochapado y anodizado y cual no.

Fuentes de alimentación o Rectificadores

El término rectificador se usa para describir fuentes de alimentación del siglo XIX. Los “electrónicos” no se habían aún inventado, por lo que las fuentes de alimentación tal y como las conocemos, no existían.

A pesar de no haber sido usado en 100 años, el nombre rectificador es pegadizo, y las fuentes de alimentación usadas para el chapado y el anodizado, se llaman así en la industria.

Fuentes de alimentación reguladas y no reguladas

Una fuente de alimentación regulada, tiene un circuito que aguanta la salida a un valor determinado cuando la carga en la fuente de alimentación cambia. Una no regulada, no tiene este circuito por lo que su salida cambia cuando cambia la carga. Un ejemplo común de fuente de alimentación regulada es la de su ordenador. Un cargador de baterías de automoción, puede ser un buen ejemplo de fuente de alimentación no regulada.

Fuentes de alimentación regulable y no regulable

Una fuente de alimentación regulable tiene un control que permite al usuario ajustar su salida, y una fuente de alimentación no ajustable no. Las fuentes de alimentación de los ordenadores y la de los cargadores de baterías son ejemplos de fuentes que no lo son. Todos los rectificadores de chapado y anodizado son ajustables, como los de laboratorio de electrónica. Para todos los procesos de anodizado y chapado, se requiere una fuente de alimentación regulable.

Regular la fuente de alimentación, métodos CV y CC

Hay dos métodos de regulación de uso común, tensión constante (CV) y corriente constante (CC). La regulación de voltaje constante tiene la capacidad de medir su propio voltaje de salida, y un circuito que compara esto a un set de referencia de voltaje por el usuario. La regulación es adquirida por la fuente de alimentación ajustando constantemente su voltaje de salida ajustándolo al requerido por el usuario. De ahí el nombre de voltaje constante. Puede operar hasta su capacidad máxima de corriente, llamada límite de corriente.

La regulación de corriente constante significa que mide su corriente de salida, y tiene un circuito para comparar esta corriente con la seleccionada por el usuario ajustándola a la selección efectuada. De ahí el nombre de corriente constante. Esta regulación se mantiene hasta su capacidad máxima de salida, llamada máximo voltaje. Las fuentes de alimentación de laboratorio suelen tener ambos tipos de regulación y pueden operar en CC y CV

Fuentes de alimentación para chapado

Una fuente de alimentación de corriente constante es claramente la mejor manera y más fácil para cualquier aplicación de chapado. Muchos de los problemas eléctricos con los que se encuentran los nuevos chapadores se pueden prevenir completamente usando corriente constante. El último de estos problemas no es chapar a corriente constante; a medida que el proceso continúa, pequeños cambios en las características eléctricas de la instalación de chapado pueden ocurrir, lo que causa significantes cambios en la corriente de chapado.

Esto puede producir un grosor de chapado inesperado y una pobre adhesión del chapado. Estos cambios son imprevisibles, y con esta operación de CC la fuente de alimentación los compensa automáticamente, no requiriendo acción alguna o ajustes por parte del chapador. Por esta razón, es recomendable el uso de cualquier fuente de alimentación CC para aplicaciones de electrochapado.

Fuentes de alimentación para anodizado

Una fuente de alimentación de CC tiene también grandes beneficios para el anodizado. Como el film del anodizado es un aislante, los cambios durante el proceso son más grandes que en el chapado. La operación CC ofrece un anodizado uniforme sin poros en todo el metal de base. Esto incluso favorece la penetración, y la supresión de poros ofrece un mejor aspecto y una capa resistente de anodizado ya que los poros se han eliminado con los cambios de corriente. Por esta razón, es recomendable el uso de cualquier fuente de alimentación CC para aplicaciones de anodizado.

Baterías y bombillas como fuentes de alimentación

Durante muchos años se han usado bombillas para controlar la alimentación por baterías. Este método es muy simple y efectivo, y barato, pero el control es muy restringido. La técnica fue primeramente usada para operaciones de chapado de poco tamaño, usando menos de 3 amperios. Las nuevas fuentes de alimentación de 3 Amperios son económicas, por lo que ya no se recomienda el uso de este método.

2.2.6. BOMBA AGITADORA

Durante la operación de chapado, una pequeña cantidad de hidrógeno se forma en la pieza trabajada. Si esta no se elimina, el chapado se forma alrededor de las burbujas, dejando pequeños cráteres. Es también importante una administración constante de solución fresca sobre la superficie de la pieza que se va a chapar. Un agitación vigoroso mejora cualquier proceso de chapado.

Las bombas filtro-agitador son requeridas normalmente en tanques de cromo, de todos modos, si se chapa piezas en cromo duro donde existen áreas sombreadas difíciles, un suministro constante de solución de chapado fresca mejorara el chapado.

A parte de disponer de una bomba agitadora para evitar que la solución se estanque, la posición en la que se sumerge las piezas también hay que tenerla en cuenta. Hay que tener en cuenta posibles apertura, huecos o curvas que pueda tener el objeto a chapar. Hay que evitar que las burbujas de hidrógeno queden atrapadas en alguna parte del objeto durante el proceso.

En la Figura 7 puede verse claramente los problemas que se comentan para distintos tipos de piezas y formas.

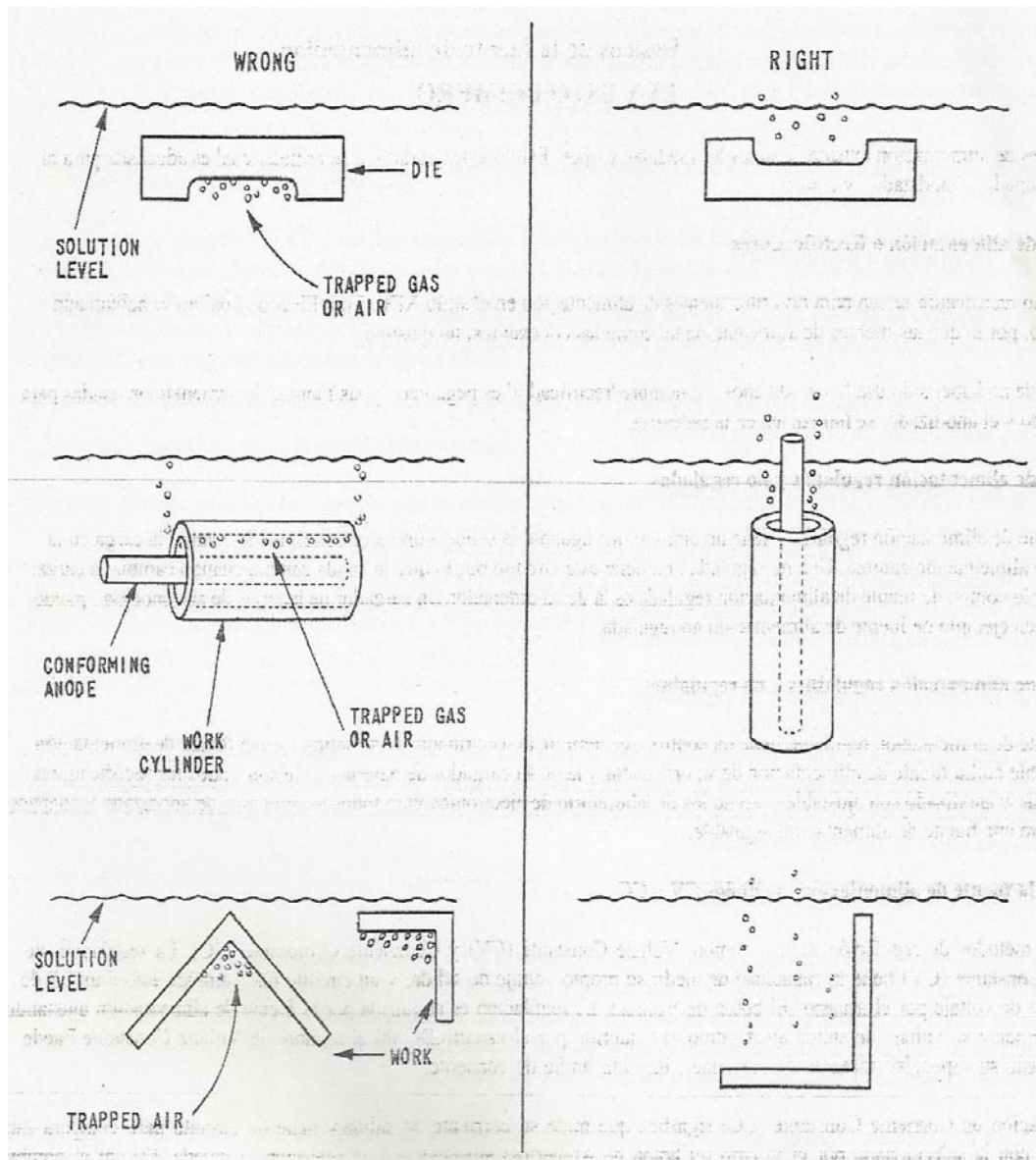


Figura 7. Posición correcta de piezas para proceso de chapado

2.2.7. TEMPERATURA Y PH SOLUCIÓN

Las soluciones que se usan para llevar a cabo los chapados requieren de un control de la temperatura, así como del PH de la solución.

Para ello es necesario por un lado, disponer de un termo estator para fijar y controlar la temperatura. La colocación tanto del termo estator como del sensor de temperatura se debe de realizar lo mas alejado posible entre ellas, para así obtener una medida real de la temperatura dentro del recipiente. En el caso de estar muy próximas, la medida de la temperatura no es real, ya que solamente se habrá alcanzado la temperatura deseada en la zona donde está el termo estator.

en cuanto al PH, es necesario controlar los niveles mediante un medidor digital de PH. La mayoría de las soluciones pueden ser ajustadas usando ácido sulfúrico o muriático para disminuir el PH del líquido conductos o amoniaco para aumentarlo.

Cuando se prepara la solución, primeramente hay que verificar que el PH del agua destilada sea 7. Una vez realizada la solución hay que verificar de nuevo el PH según las indicaciones dadas por el fabricante para cada tipo de chapado.

2.3. SPUTTERING

2.3.1. INTRODUCCIÓN

El proceso de sputtering o pulverización catódica es principalmente un proceso de bombardeo iónico, que consigue la deposición en fase de vapor, sobre un sustrato, del material bombardeado, llamado blanco. Con él, se consigue depositar películas delgadas sobre materiales.

En esta técnica, los iones formados en un plasma, son acelerados hacia el material que se desea depositar mediante un campo eléctrico. El plasma está formado por gases de proceso, en este caso argón y oxígeno, ionizados por el fuerte campo eléctrico. El alto voltaje entre el cátodo y el ánodo provoca que los iones del gas, golpeen el blanco con la energía suficiente para arrancar átomos de la superficie del cátodo mediante un proceso de transferencia de momento. Cuando el ión golpea la superficie del material, transfiere parte de su energía a los átomos que lo forman, y se produce entonces una colisión en cascada. Las múltiples colisiones hacen posible que

algunos átomos del material adquieran la suficiente energía para abandonar la superficie, alcanzar el sustrato y adherirse a él.

La mayor parte de la energía proporcionada por los iones incidentes, se transforma en calor, siendo este disipado mediante un circuito de refrigeración que evita el sobrecalentamiento del cátodo.

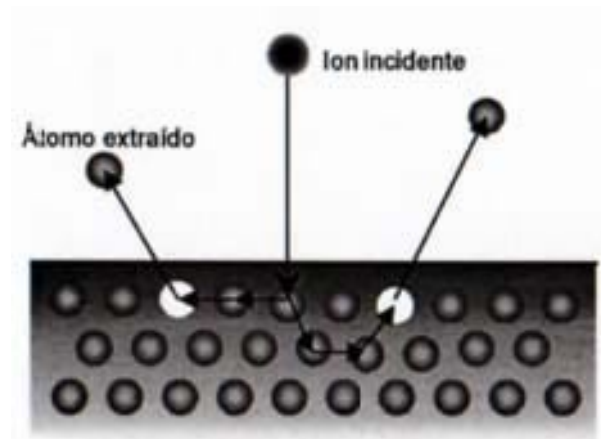


Figura 8. Proceso de Sputtering

Los gases de proceso utilizados son argón (un gas inerte) y oxígeno. La función del oxígeno será la de ir variando su concentración en el proceso, poder obtener el material depositado con mayor proporción de oxígeno o menor, lo cual incidirá en sus finales características de las capas.

2.3.2. TÉCNICAS DE SPUTTERING

Bajo la palabra Sputtering englobamos a un gran número de técnicas, que van desde la simple descarga DC en materiales conductores, al más sofisticado de los magnetrones de Sputtering funcionando en RF.

SPUTTERING DC CON DIODOS

La configuración de sputtering más sencilla es la correspondiente a un diodo formado por dos electrodos inmersos en un gas a baja presión, a los que se aplica un alto potencial DC, generando de esta forma una descarga eléctrica.

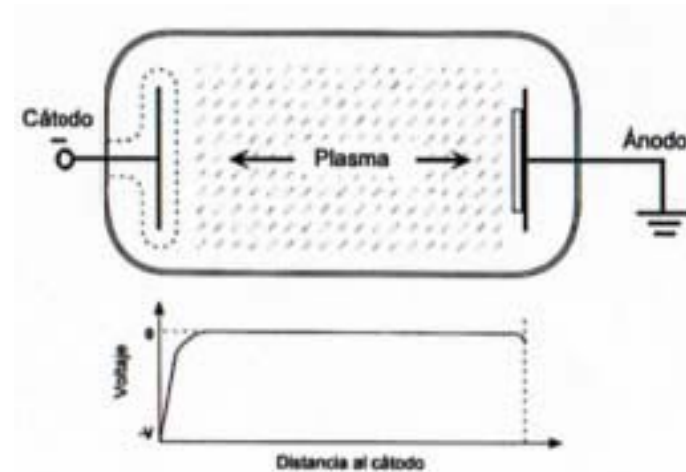


Figura 9. Sputtering DC con diodos. Variación del voltaje en función de la distancia del cátodo.

Debido a la fuerte diferencia de potencial entre los dos electrodos, se produce la ionización del gas de proceso. En esta configuración, la intensidad del campo eléctrico en las cercanías del cátodo es elevada, de forma que la caída de potencial se produce prácticamente en una región próxima a la superficie del cátodo. En esta pequeña zona los iones del plasma son acelerados hacia el cátodo. El resto del espacio comprendido entre el cátodo y el ánodo lo ocupa el plasma, siendo el gradiente de potencial en esta zona prácticamente nulo. Las dimensiones de esta pequeña zona suele ser del orden del recorrido libre medio de los electrones en el gas.

Cuando los iones chocan con el cátodo, además de la erosión del material se producen otros efectos, como son, la emisión de iones secundarios, la emisión de radiación, la emisión de electrones secundarios, etc. Parte de los electrones generados se recombinan con los iones y provocan la emisión de luz en la superficie del cátodo. La emisión de electrones secundarios contribuye a aumentar el grado de ionización del plasma y por tanto provoca que el bombardeo sea más intenso.

SPUTTERING ASISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO

La descarga normal en un diodo no es una buena fuente de iones ya que el porcentaje de átomos ionizados no es elevado. Para aumentar el ritmo de deposición es necesario aumentar la proporción de ionización del gas de proceso. Esto se consigue mediante la aplicación de campos magnéticos perpendiculares al campo eléctrico que genera la descarga. De esta forma, los electrones secundarios generados en el

bombardeo quedan confinados en una región cercana a la superficie del cátodo y son forzados a recorrer trayectorias helicoidales, paralelas a la superficie del cátodo, consiguiendo así ionizar a su paso una mayor proporción de átomos del gas de proceso (debido al choque entre los átomos del gas de proceso y los electrones) con el consiguiente aumento de la corriente iónica y el resultado de un mayor ritmo de deposición. El campo magnético esta creado por unos imanes situados en línea en el cuerpo del cátodo.

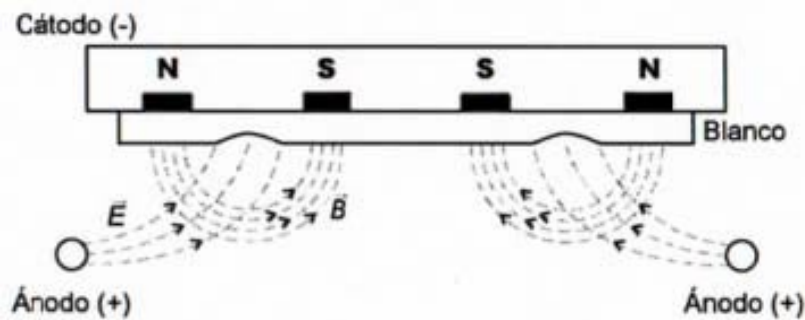


Figura 10. Esquema de funcionamiento del sputtering asistido por campo magnético

Una desventaja del sputtering asistido por campo magnético es que la erosión del material no es uniforme y hay un gran desaprovechamiento del material. Esto es debido a que el sputtering es más intenso donde las líneas de campo magnético son paralelas a la superficie del cátodo. El resultado visible es que el blanco se erosiona en forma de V.



Figura 11. Zonas de desgaste del blanco

El sputtering asistido por campo magnético permite la deposición a presiones más bajas que las anteriores. Estas son de un orden de magnitud inferior (10^{-3} mbar en argón).

SPUTTERING REACTIVO Y NO REACTIVO

Se denomina sputtering no reactivo a aquel en el cual el gas de proceso no reacciona químicamente con el material de deposición. Habitualmente como gas inerte se utiliza el argón ya que consigue rendimientos altos y es una opción más económica que otros tipos de gases.

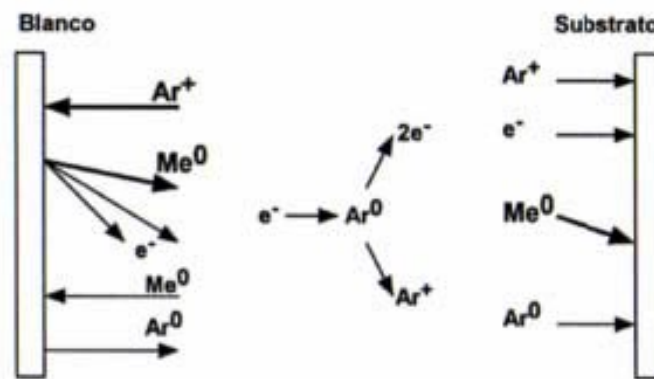


Figura 12. Esquema funcionamiento sputtering reactivo

Si el proceso se realiza en presencia de un gas reactivo el sputtering es de tipo reactivo. En este caso la presencia de oxígeno ionizado provoca la oxidación del material depositado sobre el sustrato obteniendo así la deposición de capas dieléctricas cuyas propiedades dependen de la concentración de gas reactivo en la cámara durante el proceso. Además cuando la presencia del gas reactivo en la cámara es abundante, provoca que el compuesto se forme también sobre el cátodo, modificando de esta forma las características de la descarga y de la deposición. Habitualmente en este tipo de procesos se utiliza una mezcla de dos tipos de gas con concentraciones diferentes. Uno es un gas inerte (argón) y el otro es el gas reactivo deseado. La razón de ello es que los gases reactivos habituales son menos efectivos en el proceso de sputtering.

La proporción del gas reactivo es un parámetro muy importante, no sólo para la estequiometría de la capa depositada y por la mayor o menor efectividad del proceso de sputtering, sino también porque la formación de compuesto sobre el cátodo da

lugar a una disminución del ritmo de deposición y a la variación de otros parámetros del sistema como por ejemplo la variación del voltaje de descarga. Además las propiedades ópticas, eléctricas etc. del compuesto depositado sobre el sustrato pueden variar con este parámetro.

La formación de compuesto sobre el cátodo es una de las razones de la existencia de diferentes modos de deposición en el sputtering reactivo. La aparición de estos modos se comprende examinando los distintos procesos que ocurren en una deposición reactiva.

Como ejemplo podemos tomar la deposición en presencia de oxígeno. Las moléculas de oxígeno y argón son ionizadas por la descarga eléctrica, siendo atraídas hacia el cátodo. Cuando las moléculas de argón colisionan con el blanco el material presente en este sale despedido hacia el sustrato donde se deposita. Si la concentración de oxígeno que hay en la cámara no es muy alta, el material depositado en el sustrato reacciona con el oxígeno formándose parcialmente compuestos oxidados. Si la concentración de oxígeno es mayor que la necesaria para oxidar completamente la capa depositada, parte de este oxígeno también reacciona en la superficie del cátodo.

2.3.3. BLANCO

Uno de los principales inconvenientes del Sputtering es que, en ciertas configuraciones, como el sputtering por magnetrones, el material del blanco se aprovecha poco. En el sputtering con magnetrones el plasma es confinado en una región concreta del espacio, debido a la interacción entre los campos magnéticos y eléctricos, lo cual provoca un ataque desigual. En la actualidad existen diseños de magnetrones en los cuales se giran el blanco de la superficie del blanco (Ver figura adjunta). Esto da lugar a una característica muesca en la zona que es más atacada. Típicamente, en un magnetrón convencional, se estima que sólo se ataca entre un 25% y un 30% del total del blanco y/o los imanes de forma que la zona de ataque va variando sobre la superficie del blanco.



Figura 13. Blanco

2.3.4. USOS

Este fenómeno se usa de forma extensiva en la industria de los semiconductores para depositar películas finas de diversos materiales sobre obleas de silicio. Se puede usar también para aplicar capas finas sobre cristal para aplicaciones ópticas. El proceso se puede llevar a cabo a temperaturas muy bajas, lo que hace el método ideal para depositar puerta, fuente y drenador en transistores de película fina, así como contactos en diodos PIN. De hecho, el uso del sputtering para depositar películas finas sobre un substrato es seguramente una de sus aplicaciones más importantes hoy en día.

Una ventaja importante del sputtering es que las películas depositadas tienen la misma concentración que el material del blanco. Esto puede parecer sorprendente, ya que mencionamos antes que el rendimiento de pulverización depende del peso atómico de las especies involucradas. Por tanto, uno esperaría que uno de los componentes de la aleación se deposite más rápido que otros, llevando a un cambio de la concentración de la película resultante. A pesar de que es cierto que los componentes se pulverizan a velocidades diferentes, lo que compensa de forma efectiva la diferencia de velocidades de abrasión. Así, las películas depositadas tienen la misma composición que el blanco. Esto contrasta con las técnicas evaporativas, en la que un componente se evapora a menudo de forma preferencial, con el resultado de una película depositada con una composición distinta al material fuente.

Otra aplicación del sputtering es la erosión del material blanco. Un ejemplo ocurre en la espectroscopia de masas de iones secundarios, donde el blanco se pulveriza a velocidad constante. A medida que esto ocurre, la concentración e identidad de los átomos evaporados se determina por espectroscopia de masas. De este modo, se puede determinar la composición del material investigado e identificar concentraciones extremadamente bajas de impurezas. Además, como la pulverización va atacando a capas cada vez más profundas, es posible obtener un perfil de concentración en función de la profundidad.

2.4. FOTOLITOGRAFÍA

2.4.1. INTRODUCCIÓN

La fotolitografía es un método de deposición de resina sobre sustratos. Consiste en la deposición de una resina que posteriormente será tratada con luz ultravioleta y que servirá para definir un patrón en sucesivas deposiciones.

Para realizar el proceso de la fotolitografía, además de conocer los pasos que constituyen el proceso fotolitográfico se necesita elegir adecuadamente materiales básicos como el material sustrato, resina y el fotolito o máscara a utilizar.

2.4.2. LIMPIEZA PREVIA

Esta etapa es una de las más importantes ya que es necesario que sobre la superficie del sustrato se elimine todo tipo de contaminante para evitar que los residuos que pueda haber, interaccionen con la resina y produzca imperfecciones.

Algunas de los residuos que pueden aparecer sobre el sustrato son:

- Polvo de mecanizado
- Polvo de ambiente
- Partículas abrasivas
- Hilos de paños
- Residuos de fotorresina procedentes de fotolitografías previas
- Bacterias
- Residuos de solventes
- Residuos de agua

- Residuos de fotorresinas o reveladores
- Acetona
- Silicona

Otro tipo de residuos es la grasa que puede aparecer sobre el sustrato. Para eliminar dicha grasa es necesario seguir una serie de pasos:

- Sumergir en acetona durante 5 minutos con agitación por ultrasonidos.
- Sumergir en metanol durante 5 minutos con agitación por ultrasonidos.
- Sumergir en agua destilada durante 5 minutos con agitación por ultrasonidos.
- Enjuagar bajo un flujo continuo de agua destilada durante 30 segundos.

2.4.3. MÁSCARAS

La máscara o fotolito, es una plantilla que se usa para generar un modelo deseado sobre sustratos en los que anteriormente se ha depositado una fina película de resina.

La polaridad de la máscara define si esta es de campo claro o de campo oscuro dependiendo si la resina es negativa o positiva respectivamente.



Figura 15. Mascara de campo oscuro

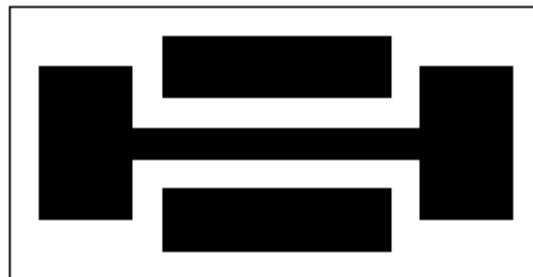


Figura 14. Máscara de campo claro

La máscara se coloca directamente sobre la superficie del sustrato, al que se le ha añadido una fina capa de resina y este se introduce dentro de la insoladora y se expone a radiación ultravioleta durante un periodo de tiempo. Durante este tiempo la luz ultravioleta, dependiendo de la polarización de la resina y la máscara utilizada, cambia las propiedades de la resina. Este cambio de propiedades hace que posteriormente, se pueda eliminar la resina de determinadas zonas según la máscara utilizada.

2.4.4. RESINA

La fotorresina es un compuesto que cambia sus propiedades debido a la exposición de esta a luz ultravioleta. Este cambio de propiedades, hace que sea muy utilizado para definir estructuras sobre diferentes sustratos.

El proceso básicamente consiste en depositar una fina capa de resina sobre el sustrato, colocar la máscara sobre esta y exponer el sustrato a luz ultravioleta. Posteriormente se usa un revelador que elimina la resina de determinadas zonas, consiguiendo definir la estructura deseada.

Existen 2 tipos de resina según esta sea positiva o negativa.

- Fotorresina positiva: Las regiones expuestas resultan más solubles y se eliminan en el proceso de revelado, es decir, se transfiere el esquema grabado en la máscara.

Este tipo de fotorresina está compuesto básicamente por tres componentes:

- o Compuesto fotosensible, que es soluble en el compuesto utilizado para el revelado, después de absorber radiación y cambiar su estructura química.
 - o Resina base para conseguir adherencia al sustrato
 - o Solvente orgánico para mantener la resina en forma líquida y manejable. La densidad, junto con la velocidad de rotación del spin coater, determinarán el espesor deseado y según este espesor se determina el tiempo de exposición a luz ultravioleta.
- Fotorresina negativa: las regiones expuestas resultan menos solubles, es decir, se transfiere el negativo del esquema grabado en la máscara.

Este tipo de resina negativa son polímeros combinados con un compuesto fotosensible. La absorción de luz se transforma en energía química para iniciar la reacción de polimerización, lo que la hace insoluble en el revelador.

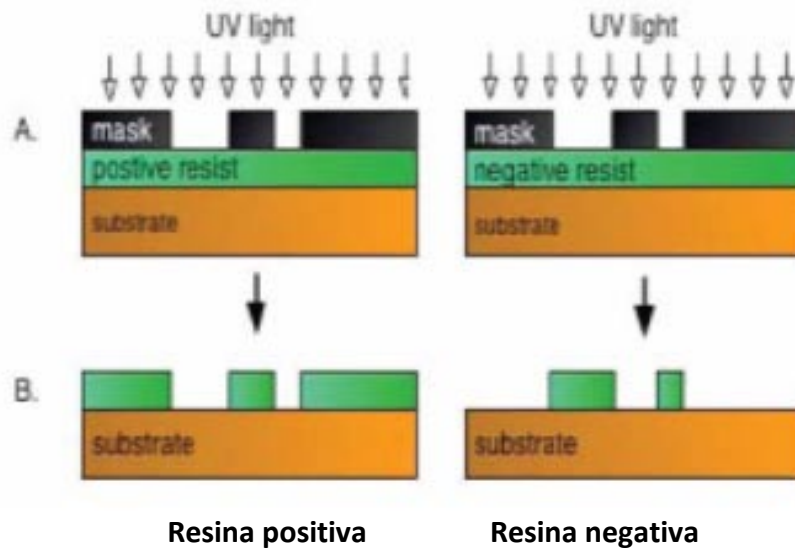


Figura 16. Esquema funcionamiento fotolitografía según polaridad resina.

A continuación se muestra una tabla en la que se comparan algunas propiedades básicas entre los 2 tipos de resinas, positiva y negativa.

CARACTERÍSTICAS	TIPO FOTOESSINA	
	POSITIVA	NEGATIVA
Adhesión	Razonable	Excelente
Resolución	Alta	Baja
Tiempo exposición	Lento	Rápido
Aclarado	En agua	En disolvente
Revelador	Sensible a la temperatura	Insensible a la temperatura
Tipo máscara	Campo	
Ambiente	En aire	En nitrógeno
Eliminador	Acetona	Disolvente
Máscara	Campo oscuro	Campo claro
Coste	Cara	Barata
Velocidad revelado		Rápido

Tabla 1. Comparación fotorresina positiva y negativa

2.4.5. DEPOSICIÓN DE RESINA

La deposición de la resina sobre el sustrato es una de las etapas más importantes a la vez de críticas. La capacidad de depositar finas capa de material así como su correcta deposición son un punto muy importante, ya que el correcto grabado de las estructuras metálicas depende de esta etapa.

Existen diferentes formas de depositar una capa de material sobre un sustrato. La deposición puede ser química o física.

- Deposición química.
 - o Chemical Vapor Deposition (CVD)
 - o Oxidación térmica

Estos procesos se basan en la creación de materiales sólidos a partir de un gas y/o un líquido o del material sustrato. El producto sólido, normalmente, no es el único producto de la reacción. Los subproductos pueden ser gas, líquidos e incluso otros sólidos.

- Deposición física.
 - o Physical Vapor Deposition (PVD)
 - o Sputtering
 - o Epitaxy
 - o Casting

La característica común de ambos es que el material depositado es físicamente desplazado sobre la superficie del sustrato.

El método de deposición más usado para la deposición de resina sobre sustrato es el Casting. En este proceso el material a depositar debe de estar disuelto en un solvente, es decir, debe de ser líquido. En nuestro caso el material sustrato es una resina fotosensible. Existen dos formas de depositarlas, spinning o spraying.

El spraying consiste en pulverizar la fotorresina sobre el sustrato, manteniendo el pulverizador durante su aplicación a una cierta distancia sobre esta y durante un tiempo determinado. Una vez aplicada la fotorresina con el pulverizador, el solvente se evapora y sobre el sustrato permanece una fina capa de la misma.

El spinning o también llamado Spin Coating es el método más usado durante las últimas décadas para la aplicación de películas finas. El proceso consiste en la deposición de una pequeña cantidad de resina en el centro del sustrato para posteriormente hacerla girar. La aceleración centrífuga hace que la resina se extienda y obtengamos la fina capa de sustrato sobre la oblea. El espesor de la película y otras propiedades dependen de la naturaleza de la resina (viscosidad, velocidad de secado, porcentaje de sólidos, tensión superficial, etc.) y de los parámetros elegidos durante el proceso de giro. Factores como la velocidad de rotación, aceleración y vapores, contribuyen a la definición de las propiedades de la película depositada.

Una de los principales factores del Spin Coating es la capacidad de repetición. Pequeñas variaciones en los parámetros que definen el proceso de giro pueden dar grandes variaciones en la película extendida. A continuación se detallan algunos efectos de estas variaciones.

2.4.5.1. Descripción del proceso de Spin Coating

El proceso de spin coating consiste básicamente en la deposición de una pequeña cantidad de resina en el centro del sustrato con ayuda de una pipeta o jeringuilla y posteriormente hacer girar la oblea a alta velocidad. La forma de aplicar la resina puede ser estática o dinámica.

La diferencia entre los 2 tipos de deposiciones es clara. La deposición estática consiste en depositar la resina en el centro del sustrato y posteriormente hacerla girar, mientras que la deposición dinámica consiste en depositar igualmente la resina en el centro del sustrato pero en una fase inicial en la que la oblea se está moviendo a bajas revoluciones (en torno a 500 rpm).

La cantidad de resina a depositar sobre la oblea depende de varios factores:

- Superficie de la oblea.
- Viscosidad de la resina.

Cuanto mayor sea la superficie a cubrir y mayor sea la viscosidad de la resina, mayor cantidad de resina habrá que depositar sobre la oblea para conseguir cubrir toda la superficie cuando hagamos girar a elevada velocidad.

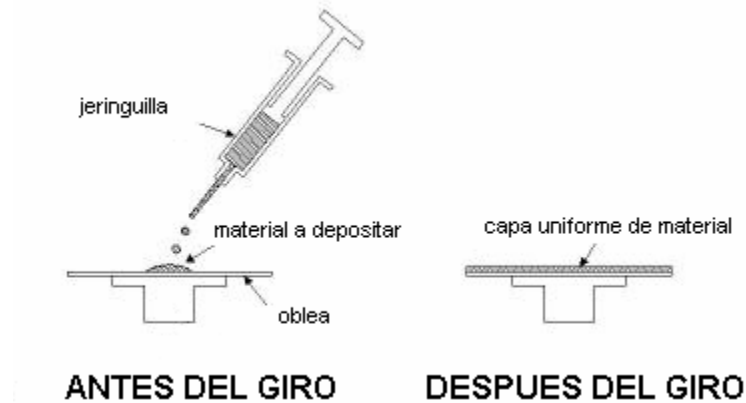


Figura 17. Aplicación estática de la resina

El espesor final de la película es función de la velocidad de giro, de la concentración de la solución, del peso molecular (relacionada con la viscosidad de la resina) y del tiempo de giro. Existe una expresión empírica que relaciona estos datos:

$$T = \frac{K \cdot C^{\beta} \cdot \eta^{\gamma}}{\omega^{\alpha}}$$

Donde

T es el espesor final de la película

C es la concentración de la resina en g/100ml de solución

η es la viscosidad intrínseca de la resina

ω son las revoluciones por minuto (rpm)

En general, altas velocidades y grandes tiempos de giro dan como resultado películas más finas. El proceso de Spin Coating conlleva un gran número de variables que tienden a cancelarse y promediarse durante el proceso de giro, por ello es mejor dar tiempo suficiente para que esto ocurra.

A veces se realiza una etapa de secado tras la etapa de elevada velocidad de giro para secar la película sin disminuirla substancialmente. Esto puede ser ventajoso

en el caso de películas gruesas, ya que largos tiempos de secado proporcionan estabilidad física a la película antes de su manejo. Con la etapa de secado se eliminan problemas tales como el goteo de resina procedente del sustrato, que puede ocurrir cuando sacamos la oblea del dispositivo que le confiere el giro en la etapa anterior. En este caso, una velocidad de giro más suave, del orden del 25% de la velocidad de giro que denominamos elevada, bastará generalmente para ayudar a secar la película sin cambios significativos en su espesor.

2.4.5.2. Parámetros del Spin Coating

Uno de los factores más importantes del Spin Coating es la velocidad de giro. Tanto la velocidad del sustrato (rpm) como la velocidad y turbulencia característica del aire inmediatamente sobre el mismo afectan a la intensidad de la fuerza centrífuga aplicada a la resina líquida. En particular, la etapa de elevada velocidad de giro define el espesor final de la película. Variaciones relativamente pequeñas del orden de 50 rpm dan como resultados cambios de espesor de un 10%.

El espesor de la película es en gran parte un balance entre la fuerza aplicada para llevar la resina hasta los bordes del sustrato y la velocidad de secado, ambas afectadas por la viscosidad de la resina. A medida que la resina se seca, la viscosidad aumenta hasta que la fuerza radial del proceso de giro no es capaz de hacer que la resina se mueva de forma apreciable sobre la superficie. En este punto, el espesor de la película no disminuye significativamente con el aumento del tiempo de giro.

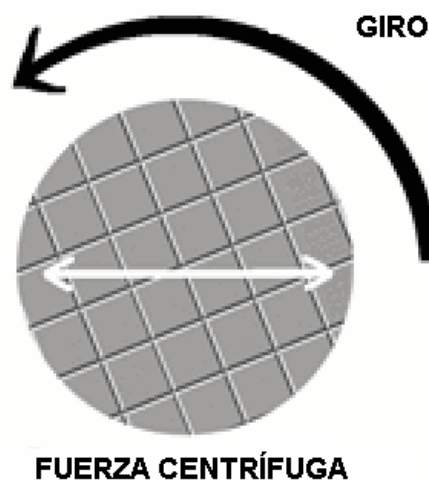


Figura 18. Acciones físicas

Otro de los parámetros básicos a definir, es la aceleración del sustrato hasta la velocidad de giro final puede también afectar a las propiedades de la película. Desde que la resina comienza a secarse durante la primera parte del ciclo de giro, es importante controlar con exactitud la aceleración. En algunos procesos, el 50% del solvente que contiene la resina se perderá por evaporación a los pocos segundos de comenzar el proceso.

La aceleración siempre juega un papel importante en las características de la capa de sustrato modelado. En muchos casos el sustrato conservará características topográficas de procesos anteriores, por lo tanto es importante que la capa quede uniforme a pesar de estas características.



Figura 19. Evolución óptima de la aceleración

Mientras que el proceso de giro proporciona generalmente una fuerza exterior radial a la resina, es la aceleración la que proporciona una fuerza que hace girar la resina. Este giro ayuda en la aplicación de la resina alrededor de la topografía para que no quede ninguna zona del sustrato sin fluido.

Otra característica de este tipo de procesos es el escape de vapores. La velocidad de secado de la resina fluida durante el proceso de giro es definida tanto por la naturaleza de la propia resina (de la volatilidad del conjunto de solventes usados) como por el aire que ronda el sustrato durante el proceso de giro. Así como un paño húmedo se seca más rápidamente en un día seco de viento que durante un día húmedo, la capa de resina se secará dependiendo de las condiciones ambientales que le rodean. Es conocido de antemano que la temperatura del aire y su grado de

humedad juegan un papel importante en la determinación de las propiedades de la resina extendida. También es muy importante que el flujo de aire y las turbulencias asociadas al mismo sean minimizados o al menos mantenidos constantes sobre el propio sustrato durante el proceso de giro.

2.4.6. SPIN COATER

El dispositivo en el que se realiza el proceso de Spin Coating se denomina Spin Coater. Todos los Spin Coater están diseñados de modo que presentan una especie de recipiente en forma de bol como se puede ver en la Figura 20. En realidad no existe un ambiente hermético, la tapa permite extraer una mínima cantidad de vapor durante el proceso de giro. En la parte inferior del Spin Coater hay una salida que combinada con la tapa superior del mismo forman un conjunto que reduce al mínimo las turbulencias indeseadas en el aire. Este sistema presenta dos ventajas:

- Permite un secado lento de la resina fluida.
- Minimiza susceptiblemente las variaciones de humedad en el ambiente.

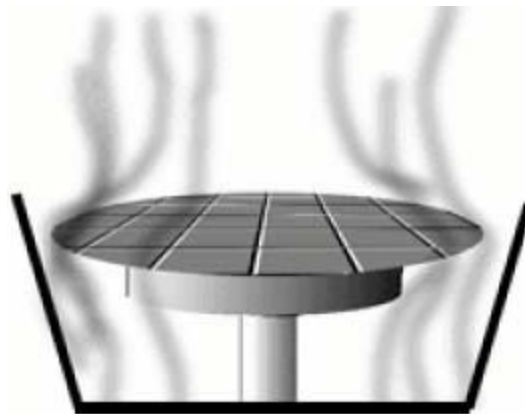


Figura 20. Spin Coater

La velocidad de secado y por tanto el espesor final de la película están también afectados por la humedad del ambiente. Variaciones pequeñas en el porcentaje de humedad del ambiente pueden dar como resultados grandes cambios en el espesor final de la película. Al realizarse el giro en un recipiente cerrado, los vapores de los solventes de la propia resina son retenidos en el ambiente del recipiente y tienden a contrarrestar los efectos de variaciones de poca importancia en la humedad. Al final

del proceso de giro, cuando la tapa es levantada para sacar el sustrato, se mantiene el escape completo para contener y eliminar los vapores de los disolventes.

Otra de las ventajas del diseño de este recipiente cerrado es que se reducen susceptiblemente las variaciones en el flujo de aire que rodea el sustrato que gira. En una típica sala blanca, por ejemplo, hay algunos factores que afectan a las propiedades de este flujo de aire inferior. Las turbulencias y las corrientes de Foucault suelen ser resultado del elevado flujo de aire. Cambios de poca importancia en la naturaleza del ambiente pueden crear drásticas alteraciones en el flujo de aire inferior. Cerrando el recipiente con una tapa de superficie lisa, las variaciones y la turbulencia causada por los operarios y otros equipos son eliminadas del proceso de giro.

El soporte giratorio donde se coloca el sustrato, existe una apertura conectada a una bomba de vacío, para mantener sujeto el sustrato sobre el soporte y evitar que este se desprenda durante el proceso. Esto se muestra en la Figura 21.

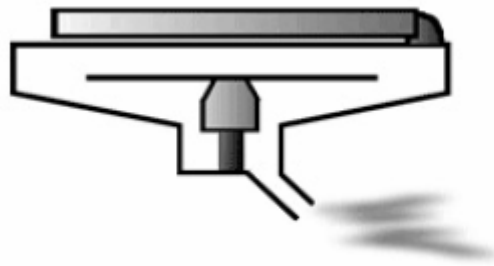


Figura 21. Flujo de aire inferior.

2.4.6.1. Resultados según las variables del proceso

Se representa la tendencia general de varios parámetros del proceso. Para la mayoría de las resinas, el espesor final de la película es inversamente proporcional a la velocidad y tiempo de giro.

El espesor final de la película es también, en parte, proporcional al volumen de vapor extraído a pesar de que la uniformidad se verá afectada si el flujo extraído es demasiado alto, ya que la turbulencia causa un secado no uniforme de la película durante el giro.

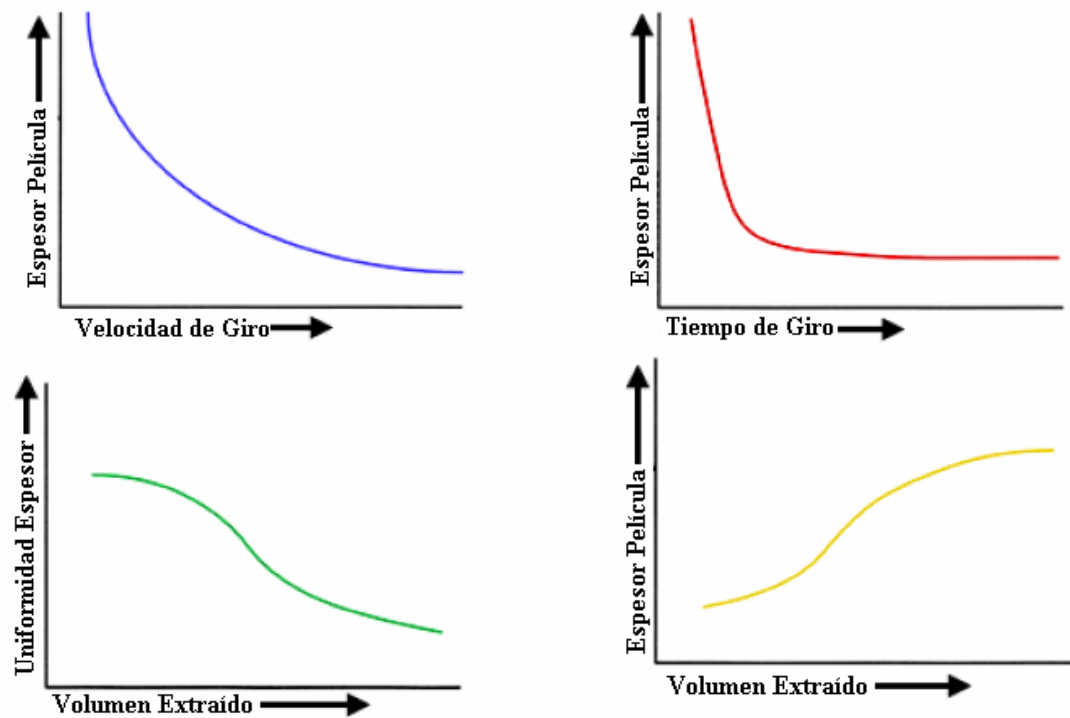


Figura 22. Tendencias de varios parámetros del proceso fotolitográfico.

Imperfecciones Spin Coater

Como se explico anteriormente, hay varios factores importantes que afectan al proceso de creación de la película. Entre estos están la velocidad de giro, aceleración, tiempo de giro y volumen extraído.

Los parámetros del proceso varían en gran medida con el tipo de resina y sustrato utilizado de modo que no hay unas reglas fijas para el proceso de Spin coating, solo hay unas pautas generales.

A continuación se describe una lista de posibles problemas específicos del proceso de Spin Coating, la causa a la cual puede deberse y como solucionarlo.

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN
Película demasiado delgada	- Velocidad de giro demasiado alta - Tiempo de giro demasiado largo - Elección inapropiada de la resina	- Seleccionar una velocidad menor - Disminuir la duración de la etapa de alta velocidad - Contactar con el fabricante de la resina

Película demasiado gruesa	- Velocidad de giro demasiado baja - Tiempo de giro demasiado corto - Volumen extraído demasiado alto - Elección inapropiada de la resina	- Seleccionar una velocidad mayor - Aumentar la duración de la etapa de alta velocidad - Ajuste de la tapa - Contactar con el fabricante de la resina
Burbujas de aire en la superficie de la oblea	- El dispositivo que dispensa la resina lo hace de forma entrecortada, tiene defectos o restos de usos anteriores.	- Comprobar que no se deposite burbujas y explotar con una jeringuilla la que se pueda depositar.
Cometas, rayas o llamadas	- Velocidad de aplicación del fluido demasiado alta - Velocidad de extracción de vapores del recipiente demasiado alta - Elevada permanencia de la resina en la oblea previa al giro - Velocidad de giro y aceleración demasiado altas - Existencia de partículas duras en la superficie del sustrato cuyo diámetro es mayor que el espesor de la resina El fluido no está siendo dispensado en el centro de la superficie del sustrato	- Depositar con mayor precaución y sobre el centro de la oblea la resina - Seleccionar una velocidad de extracción de vapores menor - Disminuir la velocidad y aceleración de giro
Forma de torbellino	- Velocidad de extracción del recipiente demasiado alta - El fluido toca la superficie del sustrato fuera del centro - Velocidad de giro y aceleración demasiado altas	
Circulo centrado	- Problemas de giro del Spin Coater - Circulo es del mismo tamaño que la zona inicial donde se añade la resina puede deberse a una elevada permanencia de la misma antes del giro	- Comprobar que el Spin Coater gira - Configurar los parámetros antes de depositar la resina para que el tiempo de espera entre depositar y girar sea mínimo
Área sin resina	- Insuficiente volumen dispensado	- Depositar mas resina en la superficie de la oblea
Hoyos del tamaño de la cabeza de un alfiler	- Burbujas de aire - Partículas en la resina - Existencia de partículas en la superficie del sustrato antes de depositar la resina	- Depositar con precaución la resina - comprobar correcta limpieza de la oblea antes de depositar la resina

Baja reproducibilidad	- Extracción o ambiente variable - Substrato centrado inadecuadamente - Volumen de resina insuficiente - Aplicación inapropiada de la resina - Balance inestable de la velocidad y tiempo de giro	- Ajustar tapa de extracción hasta cierre completo - Centrar el substrato antes de comenzar - Aumentar el volumen de la resina - Contactar con el fabricante de la resina - Aumentar la velocidad / disminuir el tiempo o viceversa
Baja calidad de la película	- Volumen extraído demasiado alto - Aceleración demasiado alta - Balance inestable en los parámetros velocidad / tiempo - Volumen de resina insuficiente - Aplicación inapropiada de la resina	- Ajustar la tapa de extracción - Seleccionar menor aceleración - Aumentar la velocidad / disminuir el tiempo o viceversa - Aumentar el volumen de la resina - Contactar con el fabricante de la resina

Tabla 2. Imperfecciones fotolitografía

A continuación se muestran imágenes de algunos de las posibles imperfecciones que se han comentado anteriormente en la Tabla 2.

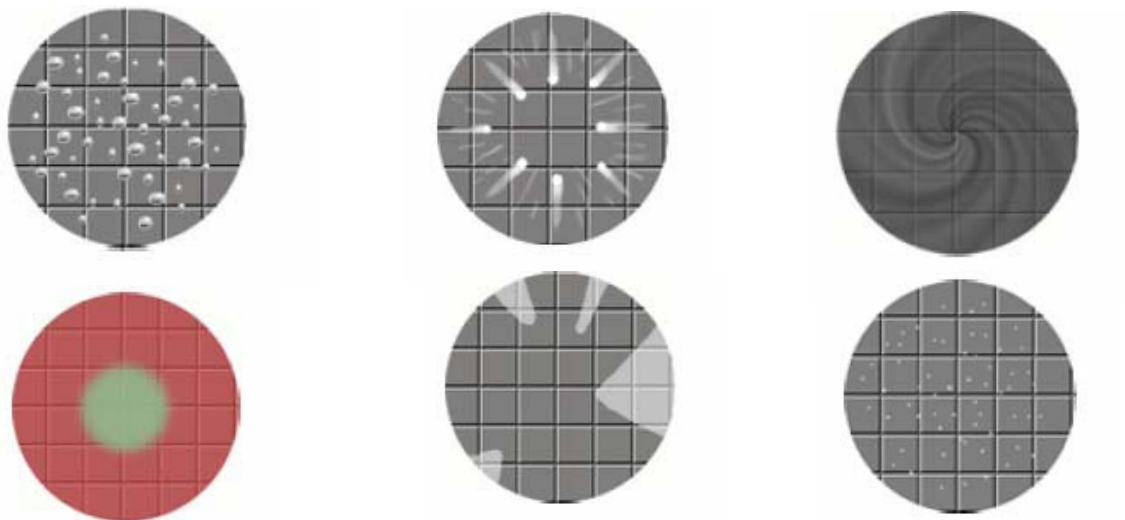


Figura 23. De izquierda a derecha. Burbuja de aire en la superficie, cometa o rayas, Torbellino, círculo centrado, áreas sin resina y hoyos.