

Director del capítulo
Michael E. Williams

83

Sumario

Perfil general <i>Michael E. Williams</i>	83.2
Fabricación de semiconductores de silicio <i>David G. Baldwin, James R. Rubin y Afsaneh Gerami</i>	83.3
Indicadores de cristal líquido <i>David G. Baldwin, James R. Rubin y Afsaneh Gerami</i>	83.20
Fabricación de semiconductores III-V <i>David G. Baldwin, Afsaneh Gerami y James R. Rubin</i>	83.22
Instalación de placas de circuito impreso y ordenadores <i>Michael E. Williams</i>	83.27
Efectos sobre la salud y pautas patológicas <i>Donald V. Lassiter</i>	83.33
Cuestiones ambientales y de salud pública <i>Corky Chew</i>	83.37

● PERFIL GENERAL

Michael E. Williams

La diversidad de procesos y productos en el sector de la microelectrónica y los semiconductores es inmensa. El debate sobre salud y seguridad en el trabajo de este capítulo se centra en la producción de circuitos integrados (CI) de semiconductores (tanto en productos basados en silicio como en compuestos de valencia III-V), la producción de tarjetas de conexionado impreso (PWB), el montaje de tarjetas de circuito impreso (PCB) y el montaje de ordenadores.

El sector se compone de numerosos segmentos importantes. La Electronics Industry Association utiliza el desglose siguiente en los informes sobre las tendencias, ventas y empleo relativos al sector:

- componentes electrónicos;
- electrónica de consumo;
- telecomunicaciones;
- comunicaciones para la defensa;
- ordenadores y periféricos;
- electrónica industrial;
- electrónica médica.

En los componentes electrónicos se incluyen los tubos electrónicos (p. ej., tubos receptores, de aplicaciones especiales y de televisión), productos de estado sólido [(p. ej., transistores, diodos, CI, diodos luminiscentes (LED) e indicadores de cristal líquido (LCD)] y componentes pasivos y varios (como condensadores, resistencias, bobinas, transformadores y conmutadores).

La electrónica de consumo comprende los aparatos de televisión y otros productos de audio y vídeo domésticos y portátiles, junto con equipos ofimáticos, como ordenadores personales, máquinas de transmisión de facsímiles y contestadores telefónicos. También se incluyen en este apartado el hardware y software de juegos electrónicos, los sistemas de seguridad de viviendas, las cassettes vírgenes de audio y vídeo y los discos flexibles, los accesorios electrónicos y las baterías.

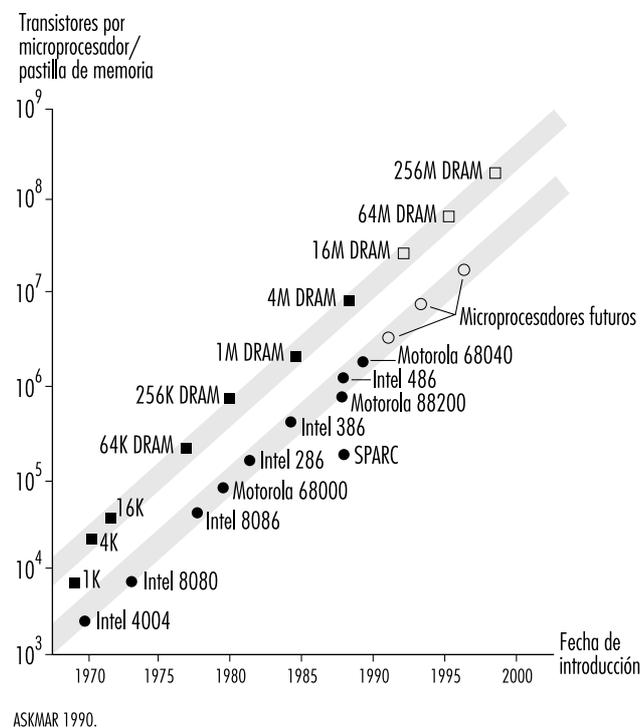
Además de ordenadores para todo uso y especializados, entre los ordenadores y periféricos se incluye el equipo de almacenamiento auxiliar, el equipo de entrada/salida (p. ej., teclados, ratones, dispositivos de exploración óptica e impresoras), terminales, etc. Como las telecomunicaciones, comunicaciones para la defensa y en la electrónica industrial y médica utilizan parte de la misma tecnología, estos segmentos incluyen también equipo especializado.

La aparición del sector de la microelectrónica ha ejercido un efecto profundo en la evolución y estructura de la economía mundial. En el ritmo del cambio en los países industrializados del mundo han influido enormemente los avances en este sector, sobre todo por la evolución del circuito integrado. Este ritmo de cambio puede observarse en el gráfico que representa la evolución temporal del número de transistores por pastilla de circuito integrado (véase la Figura 83.1).

Es significativa la importancia económica de las ventas mundiales de semiconductores. La Figura 83.2 es una proyección de las ventas mundiales y regionales de semiconductores de 1993 a 1998 realizada por la Semiconductor Industry Association.

Los sectores de CI de semiconductores y de montaje de ordenadores/electrónica son únicos, comparados con la mayoría de las demás categorías industriales, en la composición relativa de sus plantillas de producción. Las naves de fabricación de semiconductores tienen un tanto por ciento elevado de

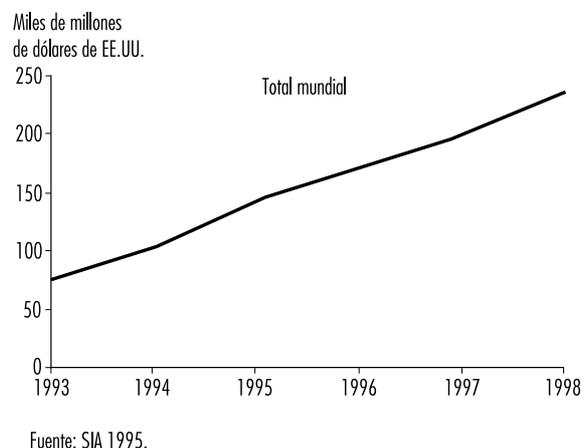
Figura 83.1 • Evolución temporal del número de transistores por pastilla de circuito integrado (1970 a 2000).



ASKMAR 1990.

trabajadoras que hacen funcionar el equipo de proceso. Las tareas que han de realizar las trabajadoras no exigen por lo general levantar grandes pesos ni poseer una fuerza física excesiva. También es típico que muchas de las tareas a ejecutar necesiten habilidades motoras delicadas y atención a los detalles. Los trabajadores masculinos predominan en las tareas de mantenimiento, en funciones de ingeniería y en la gestión. Una composición similar se encuentra en el segmento de montaje de ordenadores/electrónica de este sector. Otra característica inusual de este sector es la concentración de la fabricación en la zona de Asia/Pacífico del mundo. Esta tendencia se acentúa

Figura 83.2 • Previsión de ventas mundiales de semiconductores, 1993 a 1998.



Fuente: SIA 1995.

Figura 83.3 • Sala limpia en una zona de tecnología avanzada donde los operadores trabajan en la fabricación de semiconductores.



Asyst Technology, Inc.

especialmente en los procesos de *montaje final* o *back-end* del sector de semiconductores, que consisten en situar en posición y fijar la pastilla del circuito integrado ya fabricado (conocida técnicamente con el nombre de *dado*) sobre un soporte de pastilla y un marco de conductores. Este proceso exige el posicionamiento preciso de la pastilla, por lo general mediante un microscopio, y habilidades motoras muy finas. También en esta parte del proceso predominan las trabajadoras, y la mayoría de la producción mundial se encuentra concentrada en el arco del Pacífico, con grandes concentraciones en Taiwan, Malasia, Tailandia, Indonesia y Filipinas, y un número creciente en China y Vietnam.

Las naves de fabricación de CI de semiconductores poseen diversas propiedades y características poco habituales peculiares a este sector. Ello se debe a que el procesamiento de los CI exige unos regímenes y requisitos de control de partículas extremadamente rigurosos. Una zona moderna típica dedicada a la fabricación de CI puede recibir la calificación de sala limpia Clase 1 ó menor. Como método de comparación, sabemos que una zona expuesta al medio ambiente exterior tendría una calificación mayor que Clase 500.000; la habitación normal de una vivienda pertenecería a una clase en torno a la Clase 100.000; y una zona de montaje final de semiconductores sería de Clase 10.000 aproximadamente. Para lograr ese nivel de control de partículas es preciso que el trabajador de fabricación se encuentre encerrado por completo en *trajes de conejo* provistos de sistemas de suministro de aire y de filtros para controlar los niveles de partículas generadas por los trabajadores en la zona de fabricación. Los ocupantes humanos de zonas de fabricación se consideran generadores muy potentes de partículas finas procedentes del aire que exhalan, de la muda de piel y cabello y de su ropa y calzado. Este requisito de vestir ropa cerrada y los procedimientos de trabajo aislado han contribuido a que los trabajadores sientan que trabajan en un ambiente "inhóspito". Véase la Figura 83.3. Asimismo, en la zona fotolitográfica, el proceso comprende la exposición de la oblea a una solución fotoactiva, seguida de la formación de un patrón de imagen sobre la superficie de la oblea mediante luz ultravioleta. Para atenuar la luz ultravioleta (UV) no deseada en esta zona de procesamiento, se utilizan luces amarillas especiales (que no emiten el componente de la longitud de onda UV presente normalmente en la iluminación interior). Estas luces amarillas contribuyen a que los trabajadores tengan la sensación de que están en un ambiente de trabajo diferente y a veces pueden ejercer un efecto desorientador sobre algunos individuos.

FABRICACION DE SEMICONDUCTORES DE SILICIO

David G. Baldwin, James R. Rubin y Afaneh Gerami

Resumen del proceso

La descripción del procesamiento de dispositivos semiconductores de silicio, ya sean dispositivos discretos (un semiconductor que contiene un solo dispositivo activo, como por ejemplo un transistor) o CI (conjuntos interconectados de elementos activos y pasivos en un sustrato semiconductor único, capaz de realizar una función de circuito electrónico como mínimo), implica mencionar numerosas operaciones muy técnicas y específicas, y tiene por objeto dar a conocer un marco y una explicación básicos de los pasos principales seguidos en la fabricación de un dispositivo semiconductor de silicio y los problemas de salud y seguridad medioambiental (SSM) asociados.

La fabricación de un CI consta de una secuencia de procesos que pueden repetirse muchas veces antes de terminar un circuito. Los CI más sencillos utilizan 6 máscaras o más para completar procesos de modelado, pero lo corriente es que se empleen de 10 a 24 máscaras. La fabricación de un microcircuito comienza con una oblea de silicio ultrapuro de 10 a 30 centímetros de diámetro. El silicio absolutamente puro es casi un aislante, pero determinadas impurezas, llamadas *impurificadores*, añadidas en cantidades de 10 a 100 partes por millón, convierten al silicio en conductor de electricidad.

Un circuito integrado puede constar de millones de transistores (también diodos, resistencias y condensadores) hechos de silicio con impurezas, todos ellos conectados mediante el patrón de conductores adecuado para crear lógica del ordenador, su memoria u otro tipo de circuito. Sobre una oblea pueden hacerse centenares de microcircuitos.

Hay seis pasos principales del proceso de fabricación que se aplican de manera universal a todos los dispositivos semiconductores de silicio: oxidación, litografía, grabado, impurificación, deposición química de vapor y metalización. Estos pasos van seguidos de las operaciones de montaje, prueba, marcado, embalado y expedición.

Oxidación

En general, el primer paso en el procesamiento de dispositivos semiconductores consiste en la oxidación de la superficie exterior de la oblea para hacer crecer una capa delgada (de alrededor de una micra) de dióxido de silicio (SiO_2). Esta capa protege en primer lugar la superficie de impurezas y sirve además de máscara en el proceso de difusión posterior. La capacidad de hacer crecer una capa protectora y químicamente estable de dióxido de silicio sobre silicio convierte a las obleas de silicio en el sustrato de semiconductores de uso más extendido.

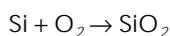
La oxidación, que se suele llamar oxidación térmica, es un proceso por lotes que tiene lugar en un horno de difusión a alta temperatura. La capa protectora de dióxido de silicio se forma en atmósferas que contienen oxígeno (O_2) (oxidación seca) u oxígeno combinado con vapor de agua (H_2O) (oxidación húmeda). La temperatura del horno varía de 800 a 1.300 °C. También pueden añadirse compuestos de cloro en forma de cloruro de hidrógeno (HCl) que ayuden a controlar las impurezas no deseadas.

En las instalaciones de fabricación más modernas existe una tendencia al uso de hornos de oxidación verticales, que permiten controlar mejor la contaminación dentro de límites estrictos, admiten un mayor tamaño de las obleas y consiguen más

uniformidad en el procesamiento. Permiten utilizar equipo más pequeño, que ocupa menos del precioso espacio en planta de la sala limpia.

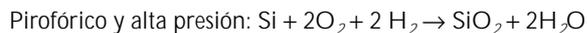
Oxidación seca

Antes de ser sometidas a oxidación, las obleas de silicio se limpian con un detergente diluido en agua y se enjuagan con xileno, alcohol isopropílico u otros disolventes. Las obleas limpiadas se secan, se cargan en un soporte de obleas de cuarzo denominado *bote* y se depositan en el extremo del operador (*extremo de carga*) del tubo o celda del horno de difusión de cuarzo. El extremo de entrada del tubo (*extremo fuente*) suministra oxígeno de gran pureza o una mezcla de oxígeno y nitrógeno. El flujo del oxígeno "seco" al interior del tubo de cuarzo se controla para garantizar que exista un exceso de oxígeno que facilite el crecimiento del dióxido de silicio sobre la superficie de la oblea de silicio. La reacción química básica es:



Oxidación húmeda

Cuando el agente oxidante es el agua, se suelen utilizar cuatro métodos para introducir vapor de agua—pirofórico, alta presión, borboteador e instantáneo. Las reacciones químicas básicas son:



La *oxidación pirofórica* consiste en la introducción y combustión de una mezcla gaseosa hidrógeno/oxígeno. Estos sistemas se denominan en general sistemas de *hidrógeno quemado* o de *antorcha*. El vapor de agua se produce cuando por el extremo de entrada del tubo se introducen las cantidades adecuadas de hidrógeno y oxígeno y se deja que reaccionen. Es preciso controlar la mezcla con precisión para garantizar una combustión correcta y evitar la acumulación de gas hidrógeno explosivo.

La *oxidación a alta presión* (HiPox) recibe el nombre técnico de sistema de piro-síntesis del agua y genera vapor de agua mediante la reacción de hidrógeno y oxígeno ultrapuros. El vapor de agua se bombea después a una cámara de alta presión y se presuriza a 10 atmósferas, lo que acelera el proceso de oxidación húmeda. También puede utilizarse agua desionizada como fuente de vapor de agua.

En la *oxidación en borboteador*, se deposita agua desionizada en un recipiente llamado *borboteador*, donde se mantiene a una temperatura constante por debajo de su punto de ebullición de 100 °C con ayuda de una envuelta calefactora. Por el lado de entrada del borboteador se introduce gas nitrógeno u oxígeno, que se satura con vapor de agua a medida que sube por el agua y emerge por la salida hacia el horno de difusión. Los sistemas de borboteador parecen ser el método de oxidación más extendido.

En la *oxidación instantánea*, se procede al goteo continuo de agua desionizada en la superficie caliente del fondo de un recipiente de cuarzo, donde el agua se evapora en seguida al chocar con la superficie caliente. Una corriente de gas portador de nitrógeno u oxígeno pasa por encima del agua en evaporación y arrastra el vapor de agua hasta el horno de difusión.

Litografía

La litografía, conocida también como fotolitografía o enmascaramiento, es un método de formar patrones exactos sobre la oblea oxidada. El microcircuito electrónico se construye capa por capa, y cada una de éstas recibe un patrón de una máscara especificada en el diseño del circuito.

Los oficios de impresión desarrollaron los antecedentes verdaderos de los procesos actuales de microfabricación de dispo-

sitivos semiconductores. Estos avances son los relativos a la fabricación de planchas de impresión, por lo común metálicas, sobre las que la eliminación de material mediante mordientes químicos produce un patrón en relieve superficial. Esta misma técnica básica es la utilizada en la producción de las *máscaras maestras* empleadas en la fabricación de cada capa del procesamiento de un dispositivo.

Los proyectistas de circuitos digitalizan el sistema de circuitos básico de cada capa. Este esquema computarizado permite la generación rápida de los sistemas de circuitos de la máscara y facilita la realización de los cambios que puedan ser necesarios. Esta técnica se conoce como diseño asistido por ordenador (CAD). Con ayuda de potentes algoritmos de ordenador, estos sistemas de diseño en línea permiten al proyectista disponer y modificar el sistema de circuitos sobre la misma pantalla de visualización con funciones de gráficos interactivas.

El dibujo final, o máscara, de cada capa de circuitos es creada por un plotter, o generador de patrones, controlado por ordenador. Estos dibujos obtenidos con el plotter se reducen después al tamaño real del circuito, una máscara maestra practicada sobre vidrio con relieve en cromo, y luego se reproducen en una placa de trabajo que sirve para la impresión por contacto o proyección sobre la oblea.

Estas máscaras delimitan el modelo de las zonas conductoras y aisladoras que se transfieren a la oblea mediante fotolitografía. La mayoría de las empresas no fabrican sus propias máscaras, sino que utilizan las suministradas por un fabricante de máscaras.

Limpieza

La necesidad de que la superficie exterior de la oblea se encuentre libre de partículas y contaminación exige una limpieza frecuente. Los métodos de limpieza principales son:

- lavado con agua desionizada y detergente;
- disolvente: alcohol isopropílico (IPA), acetona, etanol, terpenos;
- ácido: fluorhídrico (HF), sulfúrico (H₂SO₄) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂), clorhídrico (HCl), nítrico (HNO₃) y mezclas;
- cáustico: hidróxido de amonio (NH₄OH).

Aplicación de protector

Las obleas se recubren con un material protector de polímero basado en disolvente y luego se hacen girar a gran velocidad en una *centrifugadora*, que distribuye el protector en una capa delgada y uniforme. Luego se evaporan los disolventes, que dejan una película de polímero. Todos los materiales protectores dependen de los cambios inducidos por la radiación (sobre todo ultravioleta) en la solubilidad de un polímero orgánico sintético en el enjuagado con un revelador determinado. Los materiales protectores se clasifican en negativos o positivos, según su solubilidad en el revelador disminuya (negativos) o aumente (positivos) con la exposición a la radiación. En la Tabla 83.1 se identifica la constitución de componentes de diversos sistemas de fotoprotección.

Como la mayoría de los fotoprotectores son sensibles a la luz ultravioleta (UV), la zona de procesamiento se ilumina con luces amarillas especiales que carecen de las longitudes de onda UV, que serían perturbadoras (véase la Figura 83.4).

Los protectores de UV negativos y positivos son los más empleados en el sector, pero los protectores de haces de electrones y de rayos X están ganando cuota de mercado por sus mayores resoluciones. Las preocupaciones en materia de salud en litografía se centran ante todo en los peligros reproductivos potenciales que se asocian a determinados protectores positivos (p. ej., acetato de etilenglicol monoetil éter como portador) que en la actualidad se están eliminando en el sector. Los olores

Tabla 83.1 • Sistemas de fotoprotección.

Ultravioleta			
Cercano (350–450 nm)	Negativos	PB	Goma alifática de base azida (isopreno)
		S	acetato de <i>n</i> -butilo, xileno, <i>n</i> -metil-2-pirrolidona, etilbenceno
		D	Xileno, hidrocarburos alifáticos, acetato de <i>n</i> -butilo, disolvente de Stoddard (producto de la destilación del petróleo)
	Positivos	PB	Orto-diazocetona
		S	Acetato de éter-monometil-glicol-propileno, lactato de etilo, metoxi-propionato de metilo, etoxi-propionato de etilo, acetato de <i>n</i> -butilo, xileno, clorotolueno
		D	Hidróxido sódico, silicatos, hidróxido potásico
Lejano (200–250 nm)	Protectores principalmente positivos		
Haz de electrones (en torno a 100 nm)			
	Negativos	PB	Copolimero-acrilato de etilo y metacrilato de glicidilo (COP)
		S	n/a
		D	n/a
	Positivos	PB	Polimetilmetacrilato, polifluoralquilmecacrilato, polialquialdehído, poli-ciano etilacrilato
		S	Acetato de éter-monometil-glicol-propileno
		D	Alcalinos o IPA, acetato de etilo o metil-isobutil cetona (MIBK)
Rayos X (0,5–5 nm)			
	Negativos	PB	Copolimero-acrilato de etilo y metacrilato de glicidilo (COP)
		S	n/a
		D	n/a
	Positivos	PB	Polimeilmecacrilato, orto-diazocetona, (poli) hexafluorobutilmetacrilato, (poli) buteno-1-sulfona
		S	Acetato de éter-monometil-glicol-propileno
		D	n/a

PB = base de polímeros; S = disolvente; D = revelador.

ocasionales de los protectores negativos (p. ej., el xileno) también preocupan a los trabajadores. El conjunto de estas preocupaciones hace que los higienistas industriales del sector de semiconductores empleen bastante tiempo en el muestreo de las operaciones de fotoprotección. Aunque el muestreo es útil para caracterizar estas operaciones, se sabe que las exposiciones normales durante las operaciones de centrifugación y revelado suelen ser inferiores al 5 % de la exposición profesional normal debido al contenido en el aire de los disolventes utilizados en el proceso (Scarpace y cols. 1989).

Durante 1 hora de funcionamiento de un sistema de centrifugación, se observó una exposición de 6,3 ppm al acetato de etilenglicol monoetil éter. Esta exposición se debió sobre todo a prácticas de trabajo deficientes durante la operación de mantenimiento (Baldwin, Rubin y Horowitz 1993).

Secado y precocido

Tras haber aplicado el protector, las obleas se transportan por una guía o se llevan a mano desde la centrifugadora a un horno con temperatura controlada y atmósfera de nitrógeno. Una temperatura moderada (de 70 a 90 °C) provoca el endurecimiento (cocido suave) de la fotoprotección y la evaporación de los restos de disolventes.

Para garantizar la adherencia de la capa de protector a la oblea, se aplica a ésta una imprimación de hexametildisilazano (HMDS). El imprimador liga el agua molecular existente en la superficie de la oblea. El HMDS se aplica directamente en un

proceso de inmersión o giro o mediante una imprimación al vapor que ofrece ventajas de proceso y coste sobre los demás métodos.

Alineación de máscara y exposición

La máscara y la oblea se sitúan en estrecha proximidad con la ayuda de un equipo óptico/mecánico de precisión, y la imagen de la máscara se alinea con cualquier posible patrón ya existente en la oblea debajo de la capa de fotoprotección. La primera máscara no necesita alineación. En tecnologías más antiguas, la alineación de las capas sucesivas se hace posible con ayuda de un "biscopio" (microscopio de doble lente) y controles de precisión para poner en posición la oblea en relación con la máscara. En tecnologías más modernas, la alineación es automática con ayuda de puntos de referencia sobre las obleas.

Una vez lograda la alineación, una luz ultravioleta de gran intensidad, procedente de una fuente constituida por una lámpara de vapor de mercurio o una lámpara de arco, atraviesa la máscara y expone el protector de los lugares no protegidos por las regiones opacas de la máscara.

Los diversos métodos de alineación y exposición de la oblea son la exposición a un torrente de luz UV (por contacto o proximidad), la exposición UV mediante lente de proyección para reducción (proyección), fase UV y repetición de exposición para reducción (proyección), exposición a un torrente de rayos X (proximidad) y exposición a un haz de electrones (escritura directa). El método principal utilizado consiste en la exposición

Figura 83.4 • Equipo fotolitográfico de "sala amarilla" en una sala limpia de tecnología avanzada.



ASYST Technology, Inc.

a radiación UV con lámparas de vapor de mercurio y de arco mediante alineadores por proximidad o proyección. Los protectores de UV están diseñados para reaccionar a un espectro amplio de longitudes de onda UV, o formulados para reaccionar con preferencia a una o más de las líneas principales del espectro emitido desde la lámpara (p. ej., línea g a 435 nm, línea h a 405 nm y línea i a 365 nm).

Las longitudes de onda predominantes de luz UV que ahora se utilizan en fotoenmascaramiento son de 365 nm o más, pero los espectros de lámparas UV también contienen una energía significativa en la región de longitudes de onda que puede afectar a la salud, que es la región actínica por debajo de 315 nm. Lo normal es que la intensidad de la radiación UV que escapa del equipo sea inferior a la procedente de la luz solar en la región actínica y también a las normas establecidas para la exposición profesional al espectro UV.

Durante el mantenimiento, la alineación de la lámpara UV exige en ocasiones encenderla fuera de la cabina del equipo o sin los filtros protectores normales. Los niveles de exposición durante esta operación pueden rebasar los límites de exposición profesionales, pero la ropa normal utilizada en salas limpias (p. ej., delantales, guantes de vinilo, máscaras faciales y gafas de seguridad de policarbonato con inhibidor de UV) suele ser adecuada para atenuar la luz UV hasta niveles inferiores a los límites de exposición (Baldwin y Stewart 1989).

Mientras que las longitudes de onda predominantes de las lámparas ultravioletas utilizadas en fotolitografía son de 365 nm o mayores, la búsqueda de características más pequeñas en los CI avanzados conduce al empleo de fuentes de exposición con longitudes de onda menores, como radiación UV lejana y

rayos X. Una nueva tecnología a este efecto es el uso de láseres de fluoruro de criptón utilizados en los procesadores paso a paso. Estos procesadores emplean una longitud de onda de 248 nm con salidas de láser de gran potencia. Pero las cabinas de estos sistemas encierran el haz durante el funcionamiento normal.

Como ocurre con otros equipos que contienen sistemas láser de gran potencia utilizados en la fabricación de semiconductores, la preocupación principal deriva de la necesidad de inactivar los bloqueos internos del sistema durante la alineación del haz. Los láseres de gran potencia son también uno de los peligros eléctricos más importantes en el sector de semiconductores. Incluso después de apagado, en este instrumento persiste una posibilidad de descarga considerable. Escher, Weathers y Labonville (1993) han publicado consideraciones sobre el diseño de controles y seguridad para estos sistemas.

Una fuente de exposición de tecnología avanzada utilizada en litografía son los rayos X. Los niveles de emisión de las fuentes de rayos X para litografía pueden dar lugar a tasas de dosis que se aproximan a 50 millisievert (5 rem) anuales en el centro del equipo. Para reducir al mínimo la exposición, se recomienda restringir el acceso a las zonas interiores de las paredes blindadas (Rooney y Leavey 1989).

Revelado

Durante el paso de revelado, las superficies del protector no polimerizadas son disueltas y eliminadas. A la superficie de la oblea cubierta por el protector se aplica un revelador a base de disolventes mediante la inmersión, el rociado o la atomización. Las soluciones de revelador se identifican en la Tabla 83.1. Después del revelador suele aplicarse un lavado con disolvente (acetato de *n*-butilo, alcohol isopropílico, acetona, etc.) para eliminar cualquier material residual. El protector que permanece tras el revelado protege las capas individuales durante el proceso posterior.

Cocido

Después de la alineación, exposición y revelado del protector, las obleas se llevan a otro horno de temperatura controlada con atmósfera de nitrógeno. La mayor temperatura del horno (de 120 a 135 °C) origina el curado de la fotoprotección y su polimerización completa sobre la superficie de la oblea (cocido de endurecimiento).

Arranque de la fotoprotección

La oblea revelada se somete después a un grabado selectivo mediante sustancias químicas húmedas o secas (véase "Grabado" a continuación). Los restos de fotoprotector tienen que eliminarse de la oblea antes de continuar el proceso. Para ello, se emplean soluciones químicas húmedas en baños con temperatura controlada, un incinerador de plasma o un producto químico seco. En la Tabla 83.2 se identifican los agentes químicos húmedos y secos. A continuación se explica el grabado en seco por plasma químico, en que se utilizan el mismo equipo y los mismos principios de operación que para la incineración por plasma.

Grabado

El grabado elimina las capas de dióxido de silicio (SiO₂), los metales y el polisilicio, así como los protectores, de conformidad con los patrones deseados, delimitados por la protección. Las dos categorías principales de grabado son el grabado químico húmedo y el seco. El grabado húmedo es el más utilizado y consiste en el empleo de soluciones que contienen los mordientes (por lo común una mezcla de ácidos) en la concentración deseada, que reaccionan con los materiales a eliminar. El grabado seco consiste en el empleo de gases reactivos en condiciones de vacío en una cámara de alta energía, que también elimina las capas deseadas no cubiertas por el protector.

Tabla 83.2 • Disolventes de fotoprotección.

Grabado químico húmedo
Acidos
Sulfúrico (H ₂ SO ₄) y crómico (CrO ₃)
Sulfúrico (H ₂ SO ₄) y persulfato amónico ((NH ₄) ₂ S ₂ O ₈)
Sulfúrico (H ₂ SO ₄) y peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)
Orgánicos
Fenoles, ácidos sulfúricos, triclorobenceno, percloroetileno
Eteres de glicol, etanolamina, trietanolamina
Hidróxido y silicatos de sodio (protector positivo)
Grabado químico seco
Incineración por plasma (denudación)
Fuente de RF (radiofrecuencia)—Frecuencia de 13,56 MHz ó 2.450 MHz
Fuente de oxígeno (O ₂)
Sistemas de bomba de vacío
—Lubricada por aceite con trampa de nitrógeno líquido (tecnología antigua)
—Lubricada con líquidos de perfluoropoliéter inertes (tecnología más moderna)
—Bomba seca (última tecnología)

Grabado químico húmedo

Las soluciones para grabado químico húmedo se alojan en baños de temperatura controlada polipropileno (poli-pro), polipropileno resistente a la llama (FRPP) o cloruro de polivinilo (PVC). Los baños suelen estar equipados con extracción localizada del tipo anular o con ranuras de salida de gases en la parte posterior de cada campana de extracción. Campanas verticales de flujo laminar suministran aire sin partículas filtrado de modo uniforme a la superficie superior de los baños de grabado. En la Tabla 83.3 se presentan las soluciones corrientes de reactivos húmedos para ataque químico en relación con la capa superficial que se graba.

Las campanas de suministro de aire montadas en vertical, cuando se emplean junto con escudos antisalpicaduras y extracción localizada, pueden crear turbulencias del aire en determinadas zonas del área de grabado químico húmedo, lo que puede originar una disminución de la eficacia de la extracción localizada para capturar y encaminar los contaminantes desprendidos al aire desde los baños de grabado en funcionamiento.

La causa principal de preocupación en el grabado húmedo es la posibilidad de que la piel entre en contacto con los ácidos concentrados. Si bien todos los ácidos empleados en grabado pueden provocar quemaduras, preocupa sobre todo la exposición al ácido fluorhídrico (HF). El tiempo que transcurre entre el contacto con la piel y la aparición de dolor (hasta 24 horas para soluciones de HF inferiores al 20 % y de 1 a 8 horas para soluciones del 20 al 50 %) puede retrasar el tratamiento y permitir que las quemaduras sean más graves de lo esperado (Hathaway y cols. 1991).

Las quemaduras por ácido han sido desde siempre un problema especial del sector. Pero la incidencia del contacto de la piel con ácidos se ha reducido en los últimos años. Parte de esta reducción se ha debido a las mejoras relativas a los productos utilizados en el proceso de grabado, como el cambio al grabado seco, la utilización de más robótica y la instalación de sistemas de dispensación de sustancias químicas. La reducción de la tasa de quemaduras por ácidos puede atribuirse también a la mejora de las técnicas de manipulación, a la extensión del empleo de equipo de protección personal, al mejor diseño de las etapas húmedas y a la mejora de la formación—todo lo cual

exige una atención permanente si se quiere disminuir más aún esta tasa de accidentes (Baldwin y Williams 1996).

Grabado químico seco

El grabado con productos químicos secos es un campo de interés y aplicación crecientes por su capacidad de controlar mejor el proceso de grabado y reducir los niveles de contaminación. El procesamiento químico en seco consigue el ataque eficaz de las capas deseadas mediante el empleo de gases químicamente reactivos o mediante bombardeo físico.

Se han desarrollado sistemas de grabado con plasma químicamente reactivo que consiguen un grabado eficaz en silicio, dióxido de silicio, nitruro de silicio, aluminio, tantalio, compuestos de tantalio, cromo, wolframio, oro y vidrio. Se utilizan dos sistemas de reactor para el grabado con plasma—el de barril, o cilíndrico, y el de placa en paralelo, o planar.

Tabla 83.3 • Reactivos para grabado químico húmedo.

Material a grabar	Mordientes	
Silicio		
Silicio policristalino (Si)	Acidos fluorhídrico, nítrico, acético y yodo Hidróxido potásico Diamina de etileno/pirocatequina Fluoruro amónico, ácidos acético glacial y nítrico	
Dióxido de silicio (SiO ₂)	Grabado amortiguado con óxido (BOE) - Fluorhídrico y fluoruro amónico BOE, etilenglicol, éter de monometilo Fluorhídrico y nítrico (grabado P)	
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)	Acidos fosfórico y fluorhídrico	
Grabado de óxido CVD o de relleno	Fluoruro amónico, ácidos acético y fluorhídrico	
Metales		
Aluminio (Al)	Acidos fosfórico, nítrico, acético y clorhídrico Hidróxido sódico, hidróxido potásico	
Cromo—Níquel (Cr/Ni)	Nitrato cérico-amónico y ácido nítrico Acidos clorhídrico y nítrico (<i>agua regia</i>)	
Oro (Au)	Acidos clorhídrico y nítrico (<i>agua regia</i>) Yoduro potásico (KI) Cianuro potásico (KCN) y peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) Cloruro férrico (FeCl ₃) y ácido clorhídrico	
Plata (Ag)	Nitrato férrico (FeNO ₃) y etilenglicol Acido nítrico	
Compuesto	Fórmula	Concentración estándar (%)
Acido acético	CH ₃ COOH	36
Fluoruro de amonio	NH ₄ F	40
Acido acético glacial	CH ₃ COOH	99,5
Acido clorhídrico	HCl	36
Acido fluorhídrico	HF	49
Acido nítrico	HNO ₃	67
Acido fosfórico	H ₃ PO ₄	85
Hidróxido potásico	KOH	50 ó 10
Hidróxido sódico	NaOH	50 ó 10
Acido sulfúrico	H ₂ SO ₄	96

Ambos se basan en los mismos principios y sólo se diferencian en la configuración.

Un plasma es similar a un gas, salvo en que algunos de los átomos o moléculas del plasma están ionizados y pueden contener un número notable de radicales libres. El reactor típico consta de una cámara de vacío que contiene la oblea y que suele ser de aluminio, vidrio o cuarzo; de una fuente de energía de radiofrecuencia (RF)—por lo común de 450 kHz, 13,56 MHz ó 40,5 MHz y de un módulo de control que regula el tiempo del proceso, la composición del gas reactivo, el caudal de gas y el nivel de potencia de la RF. Además, en serie con la cámara del reactor se encuentra una fuente de vacío constituida por una bomba preliminar lubricada con aceite (tecnología antigua) o sin lubricación (última tecnología). Las obleas se cargan en el reactor, sueltas o en cassettes, una bomba evacua la cámara y entonces se introduce el gas reactivo (por lo general tetrafluoruro de carbono). El gas ionizado forma el plasma de grabado, que reacciona con las obleas para producir productos volátiles que se bombean hacia el exterior. La introducción de gas reactivo fresco en la cámara mantiene la actividad de grabado. En la Tabla 83.4 se identifican los materiales y gases en plasma que se emplean para el grabado de diversas capas.

Otro método que se desarrolla en la actualidad para el grabado es una corriente de microondas. Utiliza una descarga de microondas de gran densidad de energía para producir átomos metaestables de larga vida que graban el material casi como si éste se sumergiera en ácido.

Los procesos físicos de grabado son similares al chorro de arena en que se utilizan átomos de gas argón para el bombardeo físico de la capa que se desea grabar. Para retirar el material desalojado se emplea una bomba de vacío. El grabado por iones reactivos consiste en una combinación de grabado en seco químico y físico.

El proceso de pulverización consiste en el choque de iones y en transferencia de energía. Este sistema de grabado incorpora un sistema de pulverización por el cual la oblea a grabar se acopla a un electrodo negativo o blanco en un circuito de descarga luminiscente. El material de la oblea se pulveriza mediante bombardeo con iones positivos, por lo general de argón, que produce el desalojo de los átomos superficiales. La energía es suministrada por una fuente de RF a 450 kHz. Un sistema de vacío en serie permite controlar la presión y eliminar el reactivo.

El grabado y fresado por haz de iones es un proceso de grabado suave que emplea un haz de iones de baja energía. El sistema de haz de iones consta de una fuente para generar el haz de iones, una cámara de trabajo en la que se realiza el grabado o fresado, dotada de una placa de blanco para mantener las obleas en el haz de iones, un sistema de bomba de vacío y la electrónica e instrumentos complementarios. El haz de iones se extrae de un gas ionizado (argón o argón/oxígeno) o plasma, que se genera mediante la descarga eléctrica. Esta se obtiene al aplicar una tensión entre un cátodo de filamento caliente que emite electrones y un ánodo cilíndrico situado en el diámetro exterior de la región de descarga.

El fresado por haz de iones se ejecuta en el intervalo de baja energía del bombardeo iónico, donde sólo tienen lugar interacciones superficiales. Estos iones, por lo común en el intervalo de 500 a 1.000 eV, chocan contra un blanco y *arrancan* átomos superficiales por rotura de las fuerzas que enlazan el átomo con su vecino. El grabado por haz de iones se realiza en una escala energética algo superior, lo que supone un desalojo más brusco de los átomos superficiales.

El grabado con iones reactivos (RIE) es una combinación de sistemas de grabado por pulverización física y reactivos químicos

Tabla 83.4 • Gases mordientes en plasma y materiales grabados.

Material	Gas
Silicio	
Polisilicio (poliSi) y Silicio	CF + O ₂ , CCl ₄ o CF ₃ Cl, CF ₄ y HCl
Dióxido de silicio (SiO ₂)	C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , CF ₄ , SiF ₄ , C ₅ F ₁₂ , CHF ₃ , CCl ₂ F ₂ , SF ₆ , HF
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)	CF ₄ + Ar, CF ₄ + O ₂ , CF ₄ + H ₂
Metales	
Aluminio (Al)	CCl ₄ o BCl ₃ + He o Ar
Cromo (Cr)	CCl ₄
Oxido de cromo (CrO ₃)	Cl ₂ + Ar o CCl ₄ + Ar
Arseniuro de galio (GaAs)	CCl ₂ F ₂
Vanadio (V)	CF ₄
Titanio (Ti)	CF ₄
Tántalo (Ta)	CF ₄
Molibdeno (Mo)	CF ₄
Wolframio (W)	CF ₄

a bajas presiones. El RIE utiliza bombardeo iónico para lograr un grabado direccional, y también un gas químicamente reactivo, tetrafluoruro de carbono (CF₄) o tetracloruro de carbono (CCl₄), para mantener una buena selectividad de la capa de grabado. Se coloca una oblea en una cámara con atmósfera de un compuesto gaseoso químicamente reactivo a baja presión, en torno a 0,1 torr (1,3 × 10⁻⁴ atmósferas). Una descarga eléctrica crea un plasma de "radicales libres" (iones) reactivos con energía de algunos centenares de electrovoltios. Los iones inciden verticalmente sobre la superficie de la oblea, donde reaccionan para formar sustancias volátiles que se eliminan mediante un sistema de vacío a baja presión en serie.

Los grabadores secos poseen a veces un ciclo de limpieza cuya misión es eliminar los depósitos que se acumulan en el interior de las cámaras de reacción. Entre los compuestos originales empleados para generar plasmas del ciclo de limpieza se cuentan el trifluoruro de nitrógeno (NF₃), el hexafluoretano (C₂F₆) y el octafluoropropano (C₃F₈).

Estos tres gases empleados en el proceso de limpieza, y muchos de los gases utilizados en grabado, forman la piedra angular de un problema medioambiental al que se enfrenta el sector de semiconductores que surgió a mediados de la década de 1990. Se comprobó que varios de los gases muy fluorados tenían una influencia significativa en el calentamiento global (o efecto invernadero). (Estos gases se conocen también como PFC, compuestos perfluorados.) La larga vida atmosférica, la elevada capacidad de influir en el calentamiento global y el aumento significativo del uso de algunos PFC, como NF₃, C₂F₆, C₃F₈, CF₄, trifluorometano (CHF₃) y hexafluoruro sulfúrico (SF₆), obligaron al sector de semiconductores a indagar medios para reducir sus emisiones.

Las emisiones atmosféricas de PFC procedentes del sector de semiconductores se han debido a la escasa eficiencia de los aparatos (muchos consumían sólo del 10 al 40 % del gas utilizado) y a un equipo inadecuado de atenuación de emisiones a la atmósfera. Los depuradores húmedos no son eficaces para eliminar los PFC, y las inspecciones de numerosas unidades de combustión encontraron una eficiencia insuficiente en la

destrucción de algunos gases, en especial el CF_4 . Muchas de estas unidades de combustión descomponían el C_2F_6 y el C_3F_8 en CF_4 . Asimismo, el elevado coste de adquisición de estos dispositivos de reducción, su demanda de energía, su liberación de otros gases de calentamiento global y sus subproductos de combustión, algunos de ellos contaminantes peligrosos del aire, indicaban que la reducción en la combustión no era un método útil para controlar las emisiones de PFC.

En relación con los grabadores en seco, el interés medioambiental se ha puesto en hacer más eficientes las herramientas del proceso, en identificar y desarrollar alternativas menos contaminantes del medio ambiente que estos gases reactivos en seco y en la recuperación/reciclado de los gases emitidos.

El principal interés en la higiene del trabajo en relación con los equipos grabadores en seco se ha puesto en las exposiciones potenciales del personal de mantenimiento que trabaja en las cámaras de reacción, en las bombas y en otros equipos auxiliares que pueden contener residuos producidos en las reacciones. La complejidad de los grabadores de plasma en metal y la dificultad de caracterizar los olores asociados a su mantenimiento los ha convertido en objeto de muchas investigaciones.

Los productos de reacción formados en aparatos grabadores de plasma en metal son una mezcla compleja de compuestos clorados y fluorados. El mantenimiento de los grabadores en metal implica a menudo realizar operaciones de corta duración que generan olores intensos. Se observó que el hexacloroetano era la causa principal de los olores en un tipo de grabador en aluminio (Helb y cols. 1983). En otro, el cloruro de cianógeno era el problema principal: los niveles de exposición fueron 11 veces superiores al límite de exposición profesional de 0.3 ppm (Baldwin 1985). En otros tipos de grabadores diferentes, es el cloruro de hidrógeno el asociado al olor; la exposición máxima medida fue de 68 ppm (Baldwin, Rubin y Horowitz 1993). Para información adicional sobre este tema, véase Mueller y Kunesch (1989).

La complejidad de las sustancias químicas presentes en los escapes de los grabadores en metal ha inducido a los investigadores a desarrollar métodos experimentales para averiguar la toxicidad de estas mezclas (Bauer y cols. 1992a). La aplicación de estos métodos en experimentos con roedores indica que algunas de estas mezclas químicas son supuestos mutágenos (Bauer y cols. 1992b) y toxinas para el aparato reproductor (Schmidt y cols. 1995).

Dado que los grabadores en seco trabajan como sistemas cerrados, lo normal es que la exposición química de los operadores del equipo no tenga lugar mientras el sistema esté cerrado. Una rara excepción ocurre cuando el ciclo de purga de los mordientes de lotes más antiguos no es bastante largo para eliminar de manera adecuada los gases reactivos. Se ha informado de exposiciones breves, pero irritantes, a compuestos de flúor que se encuentran por debajo del límite de detección de los procedimientos normales de vigilancia de higiene industrial cuando las puertas de estos grabadores están abiertas. Este defecto puede corregirse normalmente con sólo aumentar la duración del ciclo de purga antes de abrir la puerta de la cámara de grabado.

La principal preocupación en relación con la exposición de operadores a la energía de RF se refiere al grabado e incineración por plasma (Cohen 1986; Jones 1988). Los casos típicos de fuga de energía de RF pueden ser originados por:

- puertas mal alineadas;
- grietas y orificios en las cabinas;
- tableros metálicos y cables eléctricos que actúan como antenas por puesta a masa incorrecta del grabador;

- inexistencia de una pantalla atenuadora en la ventana de visión del grabador (Jones 1988; Horowitz 1992).

La exposición a RF puede ocurrir también durante el mantenimiento de grabadores, en particular si se ha quitado la cabina del equipo. En la parte superior de un modelo antiguo de grabador de plasma con la tapa quitada para mantenimiento se encontró una exposición de 12,9 mW/cm² (Horowitz 1992). La fuga real de radiación de RF en la zona donde se sitúa el operador era por lo general inferior a 4,9 mW/cm².

Impurificación

La formación de una unión eléctrica entre regiones *p* y *n* de una oblea individual de silicio cristalino es el elemento esencial para el funcionamiento de todos los dispositivos semiconductores. Las uniones permiten el paso de corriente en un sentido con mucha más facilidad que en el otro. Constituyen la base de los efectos de diodo y transistor en todos los semiconductores. En un circuito integrado, es preciso introducir un número controlado de impurezas elementales o adulterantes en determinadas regiones grabadas del sustrato de silicio, u oblea. Para ello se puede recurrir a técnicas de difusión o implantación iónica. Con independencia de la técnica empleada, las impurezas o adulterantes utilizados para la producción de uniones semiconductoras son siempre los mismos. La Tabla 83.5 identifica los componentes principales que se utilizan para la impurificación, su estado físico, tipo eléctrico (*p* o *n*) y la técnica básica de unión que se utiliza—difusión o implantación iónica.

Las exposiciones químicas en el trabajo normal de los operadores de hornos de difusión y de unidades de implantación de iones son bajas—por lo general inferiores al límite de detección especificado en los procedimientos de muestreo estándar de higiene industrial. Las preocupaciones relativas a los efectos químicos de este proceso se centran en la posibilidad de liberación de gases tóxicos.

Ya en el decenio de 1970, los fabricantes progresistas de semiconductores comenzaron a instalar los primeros sistemas continuos de vigilancia de gases inflamables y tóxicos. El objetivo esencial de esta vigilancia era detectar vertidos accidentales de los gases impurificadores más tóxicos con umbrales de olor por encima de sus límites de exposición en el trabajo (p. ej., arsina y diborano).

La mayoría de los monitores de aire de higiene industrial en el sector de semiconductores se utilizan para la detección de fugas de gases inflamables y tóxicos. Pero algunas instalaciones emplean también sistemas de vigilancia continua para:

- analizar las emisiones por conductos de salida (chimenea);
- cuantificar concentraciones de sustancias químicas volátiles en el aire ambiente;
- identificar y cuantificar olores en la áreas de fabricación.

Las tecnologías más utilizadas en el sector de semiconductores para este tipo de vigilancia son la detección colorimétrica de gases (p. ej., el detector continuo de gases MDA), los sensores electroquímicos (p. ej., monitores "sensidyne") y la transformada de Fourier en el infrarrojo (p. ej., ACM de Telos) (Baldwin y Williams 1996).

Difusión

Difusión es un término empleado para describir el movimiento de las impurezas desde las regiones de alta concentración en el extremo de la fuente del horno de difusión hasta regiones de concentración más baja en la oblea de silicio. La difusión es el método más extendido para la formación de uniones.

Tabla 83.5 • Impurificadores de formación de uniones para difusión e implantación iónica.

Elemento	Compuesto	Fórmula	Estado	Técnica
Tipo n				
Antimonio	Trióxido de antimonio	Sb ₂ O ₃	Sólido	Difusión
	Tricloruro de antimonio	SbCl ₃	Líquido	Difusión
Arsénico	Trióxido de arsénico	As ₂ O ₃	Sólido	Difusión
	Trióxido de arsénico	As ₂ O ₃	Líquido	Difusión—en giro
	Arsina	AsH ₃	Gas	Difusión e implantación de iones
	Pentafluoruro de arsénico	AsF ₅	Gas	Implantación de iones
Fósforo	Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	Sólido	Difusión
	Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	Líquido	Difusión—en giro
	Tribromuro de fósforo	PBr ₃	Líquido	Difusión
	Tricloruro de fósforo	PCl ₃	Líquido	Difusión
	Oxicloruro de fósforo	POCl ₃	Líquido	Difusión
	Fosfina	PH ₃	Gas	Implantación de iones
	Pentafluoruro de fósforo	PF ₅	Gas	Implantación de iones
	Tipo p			
Boro	Nitruro de boro	BN	Sólido	Difusión
	Tribromuro de boro	BBr ₃	Líquido	Difusión
	Trióxido de boro	B ₂ O ₃	Sólido	Difusión
	Trióxido de boro	B ₂ O ₃	Líquido	Difusión—en giro
	Trietilborato	B(COC ₂ H ₅) ₃	Líquido	Difusión—en giro
	Tetrabromuro de silicio	SiBr ₄	Líquido	Difusión
	Tricloruro de boro	BCl ₃	Líquido	Implantación de iones por difusión
	Trifluoruro de boro	BF ₃	Gas	Implantación de iones
	Diborano	B ₂ H ₆	Gas	Implantación de iones

Esta técnica consiste en someter una oblea a una atmósfera caldeada en el horno de difusión. El horno contiene las impurezas deseadas en forma de vapor y da lugar a la creación de regiones con actividad eléctrica dopada, *p* o *n*. Las impurezas utilizadas con más frecuencia son el boro para el tipo *p*; y el fósforo (P), arsénico (As) o antimonio (Sb) para el tipo *n* (véase la Tabla 83.5).

La operación típica consiste en apilar las obleas en un soporte de cuarzo o cápsula y colocarlas en el horno de difusión. Este contiene un tubo largo de cuarzo y un mecanismo que permite el control exacto de la temperatura. El control de la temperatura es de extrema importancia, puesto que las tasas de difusión de las diversas impurezas del silicio dependen primordialmente de la temperatura. Las temperaturas empleadas oscilan entre 900 y 1.300 °C y dependen de la impureza concreta y del proceso.

El calentamiento de la oblea de silicio hasta una temperatura alta permite que los átomos de impurezas se difundan poco a poco a través de la estructura cristalina. Las impurezas se desplazan más despacio por el dióxido de silicio que a través del propio silicio, fenómeno que facilita a la delgada capa de óxido servir de máscara y por lo tanto permite que la impureza penetre en el silicio sólo en los lugares donde no está protegido. Una vez que se han acumulado impurezas suficientes, las obleas se retiran del horno y la difusión se detiene.

Para disponer del máximo de control, la mayoría de las difusiones se ejecutan en dos pasos—*depósito previo* y *penetración*. El depósito previo, o difusión con fuente constante, es el primer

paso y tiene lugar en un horno cuya temperatura se selecciona para conseguir el mejor control de las cantidades de impureza. La temperatura determina la solubilidad de la impureza. Después de un tratamiento comparativamente breve para el depósito previo, la oblea se transporta a un segundo horno, por lo general a mayor temperatura, donde un segundo tratamiento en caliente hace penetrar las impurezas hasta la profundidad de difusión deseada en la retícula de la oblea de silicio.

Las fuentes de impurezas empleadas en el paso de depósito previo están en tres estados físicos distintos: gaseoso, líquido y sólido. La Tabla 83.5 identifica los diversos tipos de impurezas que son fuentes de difusión y sus estados físicos.

Los gases se suministran en general desde botellas de gas con controles o reguladores de presión, válvulas de cierre y diversos accesorios de purga, y se distribuyen por tuberías metálicas de pequeño diámetro.

Los líquidos se suelen suministrar desde borboteadores, que saturan una corriente de gas portador, normalmente nitrógeno, con los vapores del impurificador líquido, como se describe en la sección sobre oxidación húmeda. Otra forma de suministrar líquidos es utilizar el aparato de *giro* con las impurezas. Esto implica colocar una impureza sólida disuelta en un líquido disolvente portador y después verter la solución sobre la oblea y hacerla girar, de manera similar a la aplicación de fotoprotectores.

Las fuentes sólidas pueden adoptar la forma de oblea de nitruro de boro, que se encierra entre dos obleas de silicio que se

quieren impurificar y el conjunto se coloca después en un horno de difusión. Las impurezas sólidas también pueden colocarse, en forma de polvo o perla, en una *bomba de cuarzo* (tríóxido de arsénico), verterse a mano en el extremo de entrada de un tubo de difusión o cargarse en un horno fuente separado, en serie con el horno principal de difusión.

Algunos informes han señalado que, en ausencia de controles adecuados, se produjeron exposiciones a arsénico superiores a 0,01 mg/m³ durante la limpieza de un horno de deposición (Wade y cols. 1981) y durante la limpieza de cámaras que alojaban implantadores de iones de fuentes sólidas (McCarthy 1985; Baldwin, King y Scarpace 1988). Estas exposiciones se originaron cuando no se tomaron precauciones para limitar la cantidad de polvo en el aire. Pero cuando los residuos se mantuvieron húmedos durante la limpieza, las exposiciones se redujeron a valores muy por debajo del límite de exposición a las suspensiones en aire.

En las tecnologías de difusión más antiguas, existen peligros para la seguridad durante el desmontaje, la limpieza y la instalación de tubos en el horno. Los peligros son las cortaduras con piezas rotas de cuarzo y las quemaduras con ácido durante la limpieza manual. En tecnologías más modernas, estos peligros han disminuido mediante la limpieza *in situ* de las tuberías, que elimina gran parte de la manipulación.

Los operadores de hornos de difusión son quienes están más expuestos a los campos electromagnéticos de baja frecuencia (p. ej., 50 a 60 hertz) propios de la sala limpia en fabricación de semiconductores. Se han conocido exposiciones medias superiores a 0,5 microteslas (5 miligauss) durante el funcionamiento real de los hornos (Crawford y cols. 1993). Este estudio también puso de relieve que en el personal de sala limpia que trabajaba en la proximidad de hornos de difusión se determinaron exposiciones medias cuyos valores superaban con claridad a las de otros trabajadores de sala limpia. Este resultado fue coherente con las mediciones puntuales comunicadas por Rosenthal y Abdollahzadeh (1991), quienes observaron que en la proximidad de los hornos de difusión (a 5 cm de distancia) se obtenían lecturas de hasta 10 a 15 microteslas, mientras que los campos circundantes caían con la distancia menos que los estudiados cerca de otros equipos de sala limpia; incluso a 1,80 metros de distancia de los hornos de difusión, las densidades de flujo medidas fueron de 1,2 a 2 microteslas (Crawford y cols. 1993). Estos niveles de emisión están bastante por debajo de los límites de exposición actuales de seguridad en el trabajo establecidos por la Organización Mundial de la Salud y de los fijados por países individuales.

Implantación iónica

La implantación iónica es el método más moderno de introducir elementos de impurezas a la temperatura ambiente en obleas de silicio para la formación de uniones. Átomos de impureza ionizados (es decir, átomos a los que se han arrancado uno o más de sus electrones) son acelerados mediante el paso por una diferencia de potencial de decenas de miles de voltios hasta adquirir una energía elevada. Al final de sus recorridos, chocan contra la oblea y se embuten a distintas profundidades, que dependen de su masa y su energía. Como en la difusión tradicional, una capa de óxido modelada o un patrón de fotoprotección forman una máscara selectiva en la oblea frente a los iones.

Un sistema típico de implantación iónica consta de una fuente de iones (fuente de impurezas en estado gaseoso, por lo general en botellas miniatura), equipo de análisis, acelerador, lente de enfoque, trampa del haz neutro, cámara de proceso con escáner y sistema de vacío (que suele estar formado por tres conjuntos separados de bombas preliminares en serie y de difusión, de aceite). La corriente de electrones se genera a partir de un

filamento calentado por resistencia, de la descarga de un arco o de un haz de electrones de cátodo frío.

Por lo general, después de realizado el implante en las obleas, se realiza un paso de cementación a alta temperatura (900 a 1.000 °C) mediante el fortalecimiento con un haz de láser o cementación por impulsos con el haz de electrones de una fuente. El proceso de cementación ayuda a reparar el daño causado a la superficie exterior de la oblea implantada por el bombardeo con iones de impurezas.

Con la llegada de un sistema seguro de suministro de las botellas de gas de arsina, fosfina y trifluoruro de boro utilizadas en los implantadores de iones, las posibilidades de liberación catastrófica de estos gases se han reducido en gran medida. Estas pequeñas botellas de gas se llenan con un compuesto al que se adsorben la arsina, la fosfina y el trifluoruro de boro. Los gases se extraen de la botellas mediante la formación de vacío.

Los implantadores de iones son uno de los peligros eléctricos más importantes en el sector de semiconductores. Aunque estén apagados, en el instrumento existe un potencial importante de descarga que ha de ser disipado antes de trabajar dentro del implantador. Una revisión cuidadosa de las operaciones de mantenimiento y de los peligros eléctricos está justificada en todos los equipos recién instalados, pero especialmente en los implantadores de iones.

Durante el mantenimiento de las criobombas de los implantadores de iones se han encontrado exposiciones a hidruros (probablemente a una mezcla de arsina y fosfina) de hasta 60 ppm (Baldwin, Rubin y Horowitz 1993). También pueden haberse desprendido altas concentraciones de arsina y fosfina de piezas contaminadas de implantadores que se han desmontado durante el mantenimiento preventivo (Flipp, Hunsaker y Herring 1992).

Para limpiar superficies de trabajo contaminadas por arsénico en zonas de implantación iónica se utilizan depuradores portátiles de vacío con filtros de aire particulado de alta eficacia (HEPA). Se han medido exposiciones superiores a 1.000 µg/m³ cuando se ha procedido a la depuración incorrecta de las extracciones de los HEPA. Las extracciones de los HEPA, cuando se descargan en el lugar de trabajo, pueden difundir también el olor característico, como de hidruro, asociado a la limpieza de la línea del haz en los implantadores de iones (Baldwin, Rubin y Horowitz 1993).

Si bien constituye una preocupación, no se han publicado informes de exposiciones significativas a las impurezas gaseosas durante los cambios de aceite de las bombas de vacío empleadas con impurezas—quizás porque lo normal es hacerlo en sistema cerrado. La falta de informes de exposición puede ser también consecuencia de los bajos niveles de desprendimiento de hidruros del aceite usado.

El resultado de un estudio de campo en que se calentaron 700 ml de aceite usado en la bomba preliminar de un implantador de iones en el que se utilizaban arsina y fosfina fue que sólo mostró concentraciones detectables de hidruros en el aire del volumen principal de la bomba cuando la temperatura del aceite superó los 70 °C (Baldwin, King y Scarpace 1988). Como las temperaturas normales de funcionamiento de las bombas preliminares mecánicas son de 60 a 80 °C, este estudio no reveló que hubiera una exposición potencial significativa.

Durante la implantación iónica, se forman rayos X derivados de la operación. La mayoría de los implantadores están diseñados con suficiente blindaje en su armario (que incluye planchas de plomo colocadas en lugares estratégicos en torno al alojamiento de la fuente de iones y puertas de acceso adyacentes) para mantener la exposición de los trabajadores por debajo de 2,5 microsievvert (0,25 milirem) por hora (Maletskos y Hanley 1983). Pero se encontró que un modelo antiguo de

implantador tenía una fuga de rayos X superior a 20 microsievert por hora ($\mu\text{Sv/hr}$) en la superficie de la unidad (Baldwin, King y Scarpace 1988). Estos niveles se redujeron a menos de $2,5 \mu\text{Sv/hr}$ después de instalar el blindaje adicional de plomo. Se observó que otro modelo antiguo de implantador de iones tenía fuga de rayos X alrededor de una puerta de acceso (hasta $15 \mu\text{Sv/hr}$) y en un punto de visión (hasta $3 \mu\text{Sv/hr}$). Se añadió un blindaje de plomo extra para atenuar posibles exposiciones (Baldwin, Rubin y Horowitz 1993).

Además de exposiciones a rayos X procedentes de los implantadores de iones, se ha postulado la posibilidad de formación de neutrones si el implantador trabaja por encima de 8 millones de electrovoltios (MeV) o se emplea gas deuterio como fuente de iones (Rogers 1994). Sin embargo, los implantadores suelen estar diseñados para trabajar bastante por debajo de 8 MeV, y el empleo del deuterio no es corriente en el sector (Baldwin y Williams 1996).

Depósito de vapores de sustancias químicas

El depósito de vapores de sustancias químicas (CVD) consiste en la formación de capas adicionales de material sobre la superficie de la oblea de silicio. Las unidades de CVD trabajan en general como un sistema cerrado, y por consiguiente la exposición de los trabajadores a agentes químicos es pequeña o nula. No obstante, puede originarse una breve exposición a cloruro de hidrógeno, superior a 5 ppm, cuando se limpian determinados depuradores previos de CVD (Baldwin y Stewart 1989). En los procesos actuales se suelen emplear dos categorías amplias de deposición—la CVD epitaxial y el tipo más general de CVD no epitaxial.

Depósito epitaxial de vapores de sustancias químicas

El crecimiento epitaxial es la deposición perfectamente controlada de una sola película delgada de material que posee la misma estructura cristalina que el sustrato existente en la capa de la oblea. Sirve de matriz para fabricar componentes semiconductores en procesos de difusión sucesivos. La mayoría de las películas epitaxiales crecen sobre sustratos del mismo material, como por ejemplo silicio sobre silicio, en un proceso conocido por homoepitaxia. El crecimiento de capas de materiales diferentes sobre un sustrato, como silicio sobre zafiro, se llama procesamiento de dispositivos CI por heteroepitaxia.

Se utilizan tres técnicas principales para hacer crecer capas epitaxiales: de fase de vapor, de fase líquida y de haz molecular. La epitaxia de fase líquida y la de haz molecular se usan sobre todo en el procesamiento de dispositivos III-V (p. ej., GaAs). Estos se explican en el artículo "Fabricación de semiconductores III-V".

La epitaxia en fase de vapor se utiliza para hacer crecer una película mediante la CVD de moléculas a temperaturas de 900 a $1.300 \text{ }^\circ\text{C}$. Vapores que contienen el silicio y cantidades controladas de impurezas tipo p o n en un gas portador (por lo general hidrógeno) se hacen pasar sobre obleas calentadas para depositar capas de silicio impuro. El proceso se realiza por lo general a la presión atmosférica.

La Tabla 83.6 identifica los cuatro tipos principales de epitaxia en fase de vapor, los parámetros y las reacciones químicas que tienen lugar. La secuencia de depósito que se sigue en un proceso epitaxial normal comprende:

- *limpieza del sustrato* —lavado físico, desengrase con disolvente, limpieza con ácido (es corriente la secuencia: sulfúrico, nítrico y clorhídrico, y fluorhídrico) y operación de secado;
- *carga de las obleas*;

Tabla 83.6 • Categorías principales de epitaxia del silicio en fase de vapor.

Parámetros	
Presión	Atmosférica
Temperatura	900–1300 °C
Fuentes de silicio	Silano (SiH_4), tetracloruro de silicio (SiCl_4), triclorosilano (SiHCl_3) y diclorosilano (SiH_2Cl_2)
Gases impurificadores	Arsina (AsH_3), fosfina (PH_3), diborano (B_2H_6)
Concentración de gases impurificadores	≈100 ppm
Gas mordiente	Cloruro de hidrógeno (HCl)
Concentración del gas mordiente	≈1–4%
Gases portadores	Hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2)
Fuente de calor	Radiofrecuencia (RF) o rayos infrarrojos (IR)
Tipos de epitaxia en fase de vapor	
Reducción del tetracloruro de silicio con hidrógeno (1.150–1.300 °C)	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$
Descomposición pirolítica del silano (1.000–1.100 °C)	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$
Reducción del triclorosilano con hidrógeno	$\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl}$
Reducción del diclorosilano	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 \rightarrow \text{Si} + 2\text{HCl}$

- *calentamiento*—purificación con nitrógeno y calentamiento hasta alrededor de $500 \text{ }^\circ\text{C}$, tras lo cual se usa el gas hidrógeno y generadores de RF calientan las obleas por inducción;
- *grabado con cloruro de hidrógeno (HCl)*—se alimenta la cámara del reactor con HCl en la concentración usual del 1 al 4 %;
- *depósito*—se dosifican los gases de la fuente de silicio y de impurezas y se depositan sobre la superficie de la oblea;
- *enfriamiento*—el gas hidrógeno se cambia por nitrógeno, de nuevo a $500 \text{ }^\circ\text{C}$;
- *descarga*.

Depósito no epitaxial de vapores de sustancias químicas

Mientras que el crecimiento epitaxial es una forma muy específica de CVD en la que la capa depositada tiene una estructura cristalina con la misma orientación que la capa de sustrato, la CVD no epitaxial consiste en la formación de un compuesto estable sobre un sustrato calentado mediante la reacción térmica o la descomposición de compuestos gaseosos.

La CVD puede emplearse para depositar numerosos materiales, pero en el proceso de semiconductores de silicio los materiales que suelen encontrarse, además de silicio epitaxial, son:

- silicio policristalino (poli Si);
- dióxido de silicio (SiO_2)—con y sin impurezas; vidrio con impurezas p);
- nitruro de silicio (Si_3N_4).

Cada uno de estos materiales puede depositarse de diversas maneras, y cada uno tiene muchas aplicaciones.

En la Tabla 83.7 se recogen las tres categorías principales de CVD, utilizando la temperatura de trabajo como mecanismo de diferenciación.

En casi todos los equipos de CVD se encuentran los componentes siguientes:

- cámara de reacción;
- sección de control de gases;

Tabla 83.7 • Categorías principales de la deposición química del silicio en forma de vapor (CVD).

Parámetros			
Presión	Atmosférica (APCVD) o baja presión (LPCVD)		
Temperatura	500–1.100 °C		
Fuentes de silicio y nitruros	Silano (SiH ₄), tetracloruro de silicio (SiCl ₄), amoníaco (NH ₃), óxido nitroso (N ₂ O)		
Fuentes dopadoras	Arsina (AsH ₃), fosfina (PH ₃), diborano (B ₂ H ₆)		
Gases portadores	Nitrógeno (N ₂), hidrógeno (H ₂)		
Fuente de calor	Sistema de paredes frías—radiofrecuencia (RF) o infrarrojos (IR) Sistema de paredes calientes—resistencia térmica		
Tipo de CVD	Reacción	Gas portador	Temperatura
Temperatura media (≈ 600–1.100 °C)			
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)	3SiH ₄ + 4 NH ₃ → Si ₃ N ₄ + 12H ₂	H ₂	900–1.100 °C
Poli-silicio (poliSi)	SiH ₄ + Calor → Si + 2H ₂	H ₂	850–1.000 °C
		N ₂	600–700 °C
Dióxido de silicio (SiO ₂)	SiH ₄ + 4CO ₂ → SiO ₂ + 4CO + 2H ₂ O	N ₂	500–900 °C
	2H ₂ + SiCl ₄ + CO ₂ → SiO ₂ + 4HCl *	H ₂	800–1.000 °C
	SiH ₄ + CO → SiO ₂ + 2H ₂ *	H ₂	600–900 °C
Baja temperatura (≈ <600°C) Silox, Pyrox, Vapox y Nitrox**			
Dióxido de silicio (SiO ₂) puro o dopado con p			
Silox	SiH ₄ + 2O ₂ + Dopador → SiO ₂ + 2H ₂ O	N ₂	200–500 °C
Pyrox	SiH ₄ + 2O ₂ + Dopador → SiO ₂ + 2H ₂ O	N ₂	<600 °C
Vapox	SiH ₄ + 2O ₂ + Dopador → SiO ₂ + 2H ₂ O	N ₂	<600 °C
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)			
Nitrox	3SiH ₄ + 4NH ₃ (o N ₂ O*) → Si ₃ N ₄ + 12H ₂	N ₂	600–700 °C
Potenciado con plasma a baja temperatura (pasivación) (<600°C)			
Utilización de radiofrecuencia (RF) o deposición electrónica del reactivo			
Dióxido de silicio (SiO ₂)	SiH ₄ + 2O ₂ → SiO ₂ + 2H ₂ O		
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)	3SiH ₄ + 4NH ₃ (or N ₂ O*) → Si ₃ N ₄ + 12H ₂		

* Nota: Las reacciones no están en equilibrio estequiométrico.

**Nombres genéricos, patentados o registrados de sistemas de reactores químicos CVD

- control de tiempo y secuencia;
- fuente de calor para sustratos;
- manipulación del efluente.

En esencia, el proceso de CVD comprende el suministro de cantidades controladas de los gases fuente de silicio o nitruro, junto con gases portadores, como nitrógeno y/o hidrógeno, e impurezas gaseosas si se desea, para su reacción química en la cámara del reactor. Se aplica calor para suministrar la energía necesaria para la reacción química, y además se controlan las temperaturas superficiales del reactor y de las obleas. Una vez terminada la reacción, el gas fuente que no reaccionó más el gas portador se extraen por el sistema de manipulación de efluentes y se liberan en la atmósfera.

La pasivación es un tipo funcional de CVD. Consiste en el crecimiento de una capa protectora de óxido sobre la superficie de la oblea de silicio, y por lo general es el último paso de fabricación antes del procesamiento posterior a la fabricación. La capa proporciona estabilidad eléctrica al aislar la superficie del circuito integrado de las condiciones químicas y eléctricas del medio ambiente.

Metalización

Una vez fabricados los dispositivos en el sustrato de silicio, tienen que conectarse para ejecutar funciones de circuito. Este proceso se denomina metalización, y es un medio de alambrar o interconectar las capas superiores de los circuitos integrados mediante el depósito de patrones complejos de materiales conductores, que encaminan la energía eléctrica en el interior de los circuitos.

El amplio proceso de metalización se diferencia en función del tamaño y el espesor de la capas de metales y otros materiales que se depositan. Estos son:

- *película delgada*—película de espesor aproximado de una micra o menos;
- *película gruesa*—película de espesor aproximado de 10 micras o más;
- *plaqueado*—películas de espesor variable desde delgada hasta gruesa, pero en general películas gruesas.

Los metales más corrientes empleados para la metalización de semiconductores de silicio son: aluminio, níquel, cromo o una

aleación llamada cromo-níquel, oro, germanio, cobre, plata, titanio, wolframio, platino y tántalo.

También pueden evaporarse o depositarse películas delgadas o gruesas sobre diversos sustratos de cerámica o vidrio. Algunos ejemplos de estos sustratos son: alúmina (96 % Al_2O_3), berilia (99 % BeO), vidrio de borosilicato, pirocerámica y cuarzo (SiO_2).

Película delgada

La metalización de película delgada se aplica a menudo mediante la técnica de depósito o evaporación en alto vacío o con vacío parcial. Los tipos principales de evaporación en alto vacío son con haz de electrones, instantánea y resistiva, mientras que la deposición con vacío parcial se ejecuta sobre todo por pulverización.

Para realizar cualquier tipo de metalización de película delgada al vacío, el sistema suele constar de los componentes básicos siguientes:

- una cámara que puede evacuarse para conseguir un vacío suficiente para el depósito;
- una bomba (o bombas) de vacío para reducir los gases ambientales en la cámara;
- instrumentación para la vigilancia del nivel de vacío y de otros parámetros;
- un método de depositar o evaporar las capas del material metalizador.

La *evaporación por haz de electrones*, llamada a veces *E-beam*, utiliza un haz de electrones enfocado para calentar el material de metalización. Se genera un haz de electrones de alta intensidad de manera similar al creado en el tubo de un televisor. Una corriente de electrones es acelerada mediante un campo eléctrico, generalmente de 5 a 10 kV, y enfocada sobre el material a evaporar. El haz de electrones enfocado funde el material contenido en un bloque refrigerado por agua con una depresión grande llamada crisol. El material fundido se vaporiza en la cámara de vacío y se condensa sobre las obleas frías y sobre toda la superficie de la cámara. Después se ejecutan las operaciones estándar de fotoprotección, exposición, revelado y grabado húmedo o seco para delinear la intrincada circuitería metalizada.

La *evaporación instantánea* es otra técnica aplicada para la deposición de películas delgadas metalizadas. Este método se emplea sobre todo cuando es preciso evaporar al mismo tiempo la mezcla de dos materiales (aleaciones). Algunos ejemplos de películas con dos componentes son: níquel/cromo (cromo-níquel), monóxido de cromo/silicio (SiO) y aluminio/silicio.

En la evaporación instantánea, una barra de cerámica se calienta mediante una resistencia térmica y después se pone en contacto con el filamento o barra caliente una bobina de alambre de alimentación continua, una corriente de gránulos o un polvo dosificado por medios vibratorios. Los metales vaporizados recubren entonces la cámara interior y las superficies de la oblea.

La *evaporación resistiva* (conocida también por evaporación en filamento) es la forma de depósito más sencilla y barata. La evaporación se consigue por el aumento gradual de la corriente que circula por un filamento hasta que empiezan por fundirse los bucles del material a evaporar, y humedecen el filamento. Una vez humedecido el filamento, la corriente que lo atraviesa se aumenta hasta que se produce evaporación. La ventaja principal de la evaporación resistiva es la extensa variedad de materiales que pueden evaporarse.

A veces se realiza trabajo de mantenimiento sobre la superficie interior de las cámaras de depósito del evaporador por haz de electrones, llamadas jarras acampanadas. Cuando los técnicos de mantenimiento tienen la cabeza dentro de las jarras

acampanadas, pueden originarse exposiciones importantes. La eliminación de los residuos metálicos que se depositan en la superficie interior de las jarras puede originar tales exposiciones. Por ejemplo, se han medido exposiciones de técnicos muy por encima del límite de exposición en el aire para la plata durante la eliminación de residuos de un evaporador utilizado para depositar plata (Baldwin y Stewart 1989).

La limpieza de los residuos de las jarras acampanadas con disolventes orgánicos para limpieza también puede dar lugar a una elevada exposición al disolvente. Se han producido exposiciones de técnicos a metanol por encima de 250 ppm durante este tipo de limpieza. Esta exposición puede eliminarse si se utiliza agua como disolvente de limpieza en lugar de metanol (Baldwin y Stewart 1989).

El proceso de *depósito por pulverización* tiene lugar en una atmósfera de gas a baja presión o en vacío parcial, con empleo de corriente eléctrica continua (DC, o pulverización catódica) o tensiones de RF como fuente de alta energía. En la pulverización, se introducen iones del gas inerte argón en una cámara de vacío después de haberse alcanzado un nivel de vacío satisfactorio mediante el uso de una bomba preliminar. Al aplicar la alta tensión, que suele ser de 5.000 V, se forma un campo eléctrico entre dos placas con cargas opuestas. Esta descarga de alta energía ioniza los átomos de gas argón y hace que se desplacen y aceleren hacia una de las placas de la cámara, llamada blanco. Cuando los iones de argón chocan con el blanco, hecho del material que se desea depositar, desalojan, o pulverizan, estos átomos o moléculas. Los átomos desalojados del material de metalización se depositan entonces, en forma de película delgada, sobre los sustratos de silicio que miran al blanco.

Se ha observado que la fuga de RF desde los costados y partes traseras de muchas unidades de pulverización antiguas superan el límite de exposición de los trabajadores (Baldwin y Stewart 1989). Casi toda la fuga era atribuible a grietas de los armarios causadas por el desmontaje repetido de los paneles de mantenimiento. En modelos más modernos del mismo fabricante, paneles con malla de alambre a lo largo de las juntas impiden fugas importantes. Los pulverizadores antiguos se pueden modificar con malla de alambre o, como alternativa, puede emplearse cinta de cobre para cubrir las juntas a fin de reducir la fuga.

Película gruesa

La estructura y la dimensión de la mayoría de las películas gruesas no son compatibles con la metalización de circuitos integrados de silicio, sobre todo por limitaciones de tamaño. Las películas gruesas se usan en su mayoría para la metalización de estructuras electrónicas híbridas, como en la fabricación de LCD.

El proceso de serigrafía es el método predominante en la aplicación de película gruesa. Los materiales que se suelen utilizar en película gruesa son paladio, plata, dióxido de titanio y vidrio, oro-platino y vidrio, oro-vidrio y plata-vidrio.

Las películas gruesas resistivas se depositan y modelan normalmente sobre un sustrato cerámico con ayuda de técnicas serigráficas. El *cermet* es una forma de película gruesa resistiva compuesta por una suspensión de partículas metálicas conductoras en una matriz cerámica con una resina orgánica como relleno. Las estructuras cermet típicas se componen de cromo, plata u óxido de plomo en una matriz de monóxido o dióxido de silicio.

Plaqueado

Para formar películas metálicas sobre sustratos semiconductores se utilizan dos tipos básicos de técnicas de plaqueado: galvanotecnica y plaqueado químico.

En la *galvanotecnia*, el sustrato a plaequear se coloca en el cátodo, o terminal con cargas negativas, de la cuba de plaequeado y se sumerge en una solución electrolítica. Un electrodo hecho del metal de recubrimiento actúa como ánodo, o terminal con cargas positivas. Cuando se hace pasar una corriente continua por la solución, los iones metálicos que se disuelven en la solución desde el ánodo, emigran con sus cargas positivas hasta depositarse sobre el cátodo (sustrato). Este método de plaequeado se usa para formar películas conductoras de oro o cobre.

En el *plaequeado químico*, se aplican la reducción y la oxidación simultáneas del metal que formará el plaequeado para depositar un átomo o molécula metálica libre. Como este método no exige conducción eléctrica durante el proceso de plaequeado, puede emplearse con sustratos de tipo aislante. Níquel, cobre y oro son los metales más corrientes que se depositan de esta manera.

Aleación/cementación

Después de haber depositado y grabado las interconexiones metalizadas, puede efectuarse un paso final de aleación y cementación. La aleación consiste en colocar los sustratos metalizados, por lo general con aluminio, en un horno de difusión de baja temperatura para garantizar un contacto de baja resistencia entre el aluminio metálico y el sustrato de silicio. Por último, bien durante el paso de aleación o en los sucesivos, las obleas se suelen exponer a una mezcla de gases que contiene hidrógeno en un horno de difusión a la temperatura de 400 a 500 °C. El paso de cementación está concebido para optimizar y estabilizar las características del dispositivo al combinar el hidrógeno con átomos no ligados en la interfase silicio-dióxido de silicio o cerca de ella.

Recubrimiento y metalización trasera

Hay también un paso de metalización opcional denominado recubrimiento trasero. El lado posterior de la oblea puede ser recubierto o nivelado con ayuda de una solución abrasiva húmeda y presión. Puede depositarse un metal, como el oro, en el lado posterior de la oblea por pulverización. Este acabado hace más fácil la conexión del dado separado a la montura en el montaje final.

Montaje y prueba

El procesamiento siguiente a la fabricación, que comprende el empaquetado externo, las conexiones, encapsulado, montaje y prueba, se efectúa por lo general en instalaciones de producción independientes que muchas veces radican en países del Sureste de Asia, donde estos trabajos que exigen mano de obra intensiva son más baratos de ejecutar. Además, los requisitos de ventilación para control del proceso y de las partículas suelen ser diferentes (no los de sala limpia) en el procesamiento posterior a la fabricación. Estos pasos finales del proceso de fabricación comprenden operaciones que incluyen la soldadura, desengrase, prueba con sustancias químicas y fuentes de radiación y recorte y marcado con láseres.

En condiciones normales, la soldadura durante la fabricación de semiconductores no origina altas exposiciones al plomo. Para prevenir daños térmicos al circuito integrado, la temperatura de soldadura se mantiene inferior a la temperatura en que pueden formarse humos de plomo fundido (430 °C). Sin embargo, la limpieza del equipo de soldadura mediante raspado o cepillado de los residuos con contenido de plomo puede originar exposiciones al plomo superiores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Baldwin y Stewart 1989). También se han producido exposiciones al plomo de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cuando se han empleado técnicas inadecuadas de eliminación de desechos durante operaciones de soldadura por ola (Baldwin y Williams 1996).

Una preocupación creciente en relación con las operaciones de soldadura es la irritación respiratoria y el asma derivadas de la exposición a los productos de pirólisis de los fundentes para soldar, en particular durante la soldadura manual o las operaciones de retoque, puesto que nunca ha estado generalizada la ventilación aspirante en los recintos donde se ejecutan (al contrario que en las operaciones de soldadura por ola, que desde hace algunos decenios se suelen realizar en armarios cerrados que cuentan con extracción de gases) (Goh y Ng 1987). Véanse más detalles en el artículo "Montaje de placas de circuito impreso y ordenadores".

Como la colofonia contenida en el fundente para soldar es un sensibilizador, todas las exposiciones al fundente deben reducirse al mínimo posible, con independencia de los resultados que den los muestreos del aire. En particular, las instalaciones de soldadura nuevas deben contar con ventilación aspirante local cuando se vayan a efectuar soldaduras durante periodos de tiempo prolongados (p. ej., superiores a 2 horas).

Los humos generados en la soldadura manual ascienden por convección y entran en las vías respiratorias del trabajador cuando se inclina sobre el punto de soldadura. La manera más eficaz de controlar este peligro, y la más utilizada, es la ventilación aspirante de alta velocidad y bajo volumen en la punta del soldador.

Los dispositivos que devuelven aire filtrado al recinto de trabajo pueden originar, si la eficiencia del filtrado es inadecuada, una contaminación secundaria que puede afectar a las personas presentes en el recinto aunque no se dediquen a la soldadura. El aire filtrado no debe devolverse al recinto de trabajo a menos que la cantidad de soldadura sea pequeña y el recinto tenga una buena ventilación general por dilución.

Clasificación y prueba de obleas

Una vez terminada la fabricación de obleas, cada una de ellas es sometida a un proceso de clasificación en el que se comprueba el funcionamiento eléctrico de la circuitería integrada de cada pastilla mediante sondas controladas por ordenador. Una oblea individual puede contener desde cien hasta muchos centenares de dados o pastillas independientes que han de ser comprobadas. Conocidos ya los resultados de la prueba, las pastillas se marcan físicamente con resina epoxídica monocomponente suministrada por un dispositivo automático. Para identificar y clasificar las pastillas que no cumplen las especificaciones eléctricas deseadas se emplean los colores rojo y azul.

Separación de pastillas

Una vez probados, marcados y clasificados los dispositivos o circuitos integrados en la oblea, es preciso proceder a la separación física individual de las pastillas que se encuentran agrupadas en la oblea. Se han ideado numerosos métodos para separar e individualizar las pastillas—trazado con diamante, trazado con láser y aserrado con rueda de diamante.

El trazado con diamante, el método más antiguo utilizado, consiste en pasar una punta con diamantes incrustados, de forma muy precisa, por la línea del trazado o "calle" de la oblea que separa las pastillas individuales en la superficie de la oblea. La imperfección en la estructura cristalina provocada por el trazado permite doblar y fracturar la oblea a lo largo de esa línea.

El trazado con láser es una técnica de separación de pastillas relativamente reciente. Un láser pulsado muy potente de neodimio-itrio genera un haz que practica en la oblea de silicio una ranura que sigue la línea del trazado. La ranura se convierte en la línea de rotura de la oblea.

Un método de separación de pastillas muy extendido es el aserrado en húmedo—cortar sustratos a lo largo de la calle con

una sierra circular de diamante de gran velocidad. El aserrado del sustrato de silicio puede ser de corte parcial (trazado) o completo (dados). El aserrado genera una lechada húmeda con el material arrancado de la calle.

Sujetar y conectar pastillas

La pastilla o dado individual tiene que quedar sujeta a una montura y a un marco de conductores metálicos. Las monturas suelen estar hechas de material aislante cerámico o plástico. Los materiales de las monturas cerámicas son por lo general de alúmina (Al_2O_3), pero también pueden ser de berilia (BeO) o esteatita (MgO-SiO_2). Los materiales de las monturas de plástico son de resina termoplástica o termoendurecible.

En general, la sujeción de la pastilla se efectúa por uno de tres tipos distintos de fijación: eutéctica, preforma y epoxídica. La fijación eutéctica de pastillas consiste en utilizar una aleación de soldadura fuerte eutéctica, como la de oro-silicio. En este método, se efectúa el depósito previo de una capa de oro metálico en la parte posterior de la pastilla. Mediante el calentamiento de la montura por encima de la temperatura eutéctica ($370\text{ }^\circ\text{C}$ para oro-silicio) y la colocación de la pastilla sobre la montura, se forma un enlace entre ésta y la pastilla.

La unión con preforma consiste en emplear una pequeña pieza de composición especial (preforma) que se adhiera a pastilla y montura. Se coloca una preforma sobre el área de la montura donde se quiere sujetar la pastilla y se deja que se funda. Entonces se frota la pastilla por esa zona hasta que queda sujeta, y a continuación se enfría la montura.

La unión epoxídica consiste en aplicar un pegamento epoxídico para fijar la pastilla a la montura. Se vierte una gota de epoxia en la montura y encima se coloca la pastilla. Puede ser preciso cocer después la montura a una temperatura elevada para que la epoxia adquiera la dureza adecuada.

Una vez lograda la sujeción física de la pastilla a la montura, es preciso establecer las conexiones eléctricas entre el circuito integrado y los conductores de la montura. Esta operación se ejecuta por técnicas de termocompresión, ultrasónicas o termosónicas, que conectan hilos de oro o aluminio entre las áreas de contacto de la pastilla de silicio y de los conductores de la montura.

La unión por termocompresión se emplea a menudo con hilo de oro y consiste en calentar la montura hasta unos $300\text{ }^\circ\text{C}$ y formar la unión entre el hilo y las patillas de conexión mediante la aplicación de calor y presión. Se utilizan dos tipos principales de unión por termocompresión—*unión con bola* y *unión con cuña*. En la unión con bola, que sólo se utiliza con hilo de oro, éste es suministrado desde un tubo capilar, después es comprimido, y después fundido por una llama de hidrógeno. La llama forma además una nueva bola en el extremo del hilo, bola que será aprovechada en el ciclo de conexión siguiente. La unión con cuña exige utilizar una herramienta de unión en forma de cuña y un microscopio, que ayuda a colocar en su posición exacta la pastilla de silicio y la montura sobre la patilla de conexión. El proceso se ejecuta en una atmósfera inerte.

La unión ultrasónica emplea un impulso energético de alta frecuencia ultrasónica para inducir un efecto de frotamiento que forma una unión entre el hilo y la patilla de conexión. La unión ultrasónica se realiza sobre todo con hilo de aluminio, y muchos la prefieren a la de termocompresión porque no exige el calentamiento de la pastilla de circuitos durante la operación de conexión.

La unión termosónica es un cambio tecnológico reciente en la conexión con hilo de oro. En ella se utiliza una combinación de energías ultrasónica y térmica, y exige menos calor que la unión por termocompresión.

Encapsulado

El objetivo esencial del encapsulado es acomodar un circuito integrado en una montura que cumpla los requisitos eléctricos, térmicos, químicos y físicos asociados a la aplicación del circuito integrado.

Las monturas más extendidas son la de conductores radiales, la montura plana y la doble en línea (DIP). Las monturas de conductores radiales se fabrican casi todas de Kovar, que es una aleación de hierro, níquel y cobalto, con sellos de vidrio duro y conductores de Kovar. Las monturas planas tienen un marco de conductores metálicos, por lo general de una aleación de aluminio combinada con componentes cerámicos, de vidrio y metálicos. Las monturas dobles en línea son las más corrientes y a menudo utilizan cerámica o plásticos moldeados.

Las monturas de plástico moldeado para semiconductores se producen sobre todo por dos procesos diferentes—*moldeo por transferencia* y *moldeo por inyección*. El moldeo por transferencia es el método de encapsulado en plástico predominante. En él, las pastillas se montan sobre marcos de conductores sin cortar y después se cargan en moldes por lotes. Porciones en polvo o bolas de compuestos de plástico termoendurecible para moldeo se funden en una olla caliente y después son impulsados (transferidos) a presión hasta los moldes cargados. Los sistemas de formar porciones en polvo o bolas con compuestos de plástico para moldeo pueden utilizarse con epoxia, silicona o silicona/resinas epoxídicas. El sistema suele consistir en una mezcla de:

- *resinas termoendurecibles*—epoxia, silicona o silicona/epoxia;
- *endurecedores*—novolacas epoxídicas y anhídridos epoxídicos;
- *sustancias de relleno*— dióxido de silicio (SiO_2) amalgamado en sílice o cristalino y alúmina (Al_2O_3), por lo general en la proporción de 50-70 % en peso;
- *pirorretardante*—trióxido de antimonio (Sb_2O_3) por lo general en la proporción de 1-5 % en peso.

El moldeo por inyección emplea un compuesto termoplástico o termoendurecible para moldeo que se calienta hasta su punto de fusión en una botella a temperatura controlada y se hace pasar a presión por una boquilla hasta el molde. La resina se solidifica en seguida, se abre el molde y la montura encapsulada sale expulsada. En el moldeo por inyección se utiliza una extensa variedad de compuestos de plástico. Las resinas epoxídicas y a base de sulfuro de polifenileno (PPS) son las últimas sustancias que se han incorporado al encapsulado de semiconductores.

Los encapsulados finales de dispositivos semiconductores de silicio se clasifican en función de su resistencia a las fugas o capacidad de aislar el circuito integrado de su medio ambiente. Se distingue entre el sellado hermético (estanco al aire) y el no hermético.

Prueba de fugas y envejecimiento

La *prueba de fugas* es un procedimiento desarrollado para comprobar la capacidad real de sellado o hermeticidad del dispositivo encapsulado. Hay dos formas corrientes de realizarla: la detección de fugas con helio y la detección de fugas con trazador radiactivo.

En la detección de fugas con helio, las monturas terminadas se colocan en una atmósfera de helio a presión durante cierto tiempo. El helio puede penetrar a la montura por las imperfecciones del encapsulado. Una vez sacada de la cámara de presurización con helio, la montura es transferida a la cámara de un espectrómetro de masas y se comprueba si hay fugas de helio por las imperfecciones de la montura.

En el segundo método, el helio es sustituido por un gas trazador radiactivo, que suele ser el criptón 85 (Kr 85), y se

miden las fugas del gas radiactivo de la montura. En condiciones normales, la exposición del personal debida a este proceso es inferior a 5 milisievert (500 milirem) al año (Baldwin y Stewart 1989). Los controles de estos sistemas suelen ser:

- aislamiento en habitaciones con el acceso restringido al personal necesario únicamente;
- carteles de aviso de radiación en las puertas de entrada a las habitaciones donde haya Kr 85;
- monitores para la vigilancia permanente de la radiación con alarmas y parada/aislamiento automáticos;
- sistema de ventilación de salida propio y habitación con presión negativa;
- vigilancia de exposiciones con dosimetría personal (p. ej., película dosimétrica de radiación);
- mantenimiento periódico de alarmas y cierres;
- inspecciones periódicas en busca de fugas de material radiactivo;
- formación en seguridad de los operadores y técnicos;
- garantizar que las exposiciones a la radiación se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible (ALARA).

También se inspeccionan los materiales que entran en contacto con el Kr 85 (p. ej., los CI expuestos, aceite usado de bombas, válvulas y juntas tóricas) para cerciorarse de que no emiten radiación a niveles excesivos debido al gas residual que pueda quedar en ellos antes de sacarlos de la zona controlada. Leach-Marshall (1991) suministra información detallada sobre exposiciones y controles de los sistemas detectores de fugas mínimas de Kr 85.

El *envejecimiento* es una operación de esfuerzos térmicos y eléctricos para determinar la fiabilidad del dispositivo final encapsulado. Los dispositivos se depositan en un horno con control de temperatura durante un período de tiempo prolongado en la atmósfera ambiente o en una atmósfera inerte de nitrógeno. Las temperaturas oscilan entre 125 °C y 200 °C (150 °C es la media), y los períodos de tiempo entre unas pocas horas y 1.000 horas (48 horas en promedio).

Prueba final

Para la calificación final del rendimiento del dispositivo semiconductor de silicio una vez encapsulado, se realiza una prueba eléctrica final. Como el número y la complejidad de las pruebas necesarias es muy grande, un ordenador se encarga de ejecutar y evaluar la prueba de numerosos parámetros importantes para el funcionamiento del dispositivo.

Marcaje y empaquetado

La identificación física del dispositivo final encapsulado se consigue con uno de los muchos sistemas de marcaje. Las dos categorías principales de marcaje de componentes son la impresión con contacto y sin contacto. La impresión con contacto recurre por lo común a una técnica de *offset* giratoria con ayuda de tintas basadas en disolventes. La impresión sin contacto, que transfiere marcas sin establecer contacto físico, comprende la impresión con chorro de tinta o tóner, en la que se utilizan tintas basadas en disolventes o marcaje con láser.

Los disolventes empleados como portadores de las tintas de impresión y como predepuradores se componen casi siempre de una mezcla de alcoholes (etanol) y ésteres (acetato de etilo). La mayoría de los sistemas de marcaje de componentes diferentes del marcaje con láser emplean tintas que exigen un paso adicional de fijado o curado. Estos métodos de curado son: curado al aire, curado por calor (calentamiento directo o rayos infrarrojos) y curado a los rayos ultravioletas. Las tintas para curado con rayos ultravioleta no contienen disolventes.

Los sistemas de marcaje con láser utilizan un láser de dióxido de carbono (CO₂) de gran potencia o un láser de gran potencia de neodimio-itrinio. Estos láseres suelen estar incorporados al equipo y tienen armarios de seguridad que rodean el camino del haz y el punto en que el haz entra en contacto con el blanco. Esta disposición elimina los peligros del haz de láser durante las operaciones normales, pero la preocupación aparece cuando se anulan los bloqueos de seguridad. La operación más corriente en que es necesario quitar las protecciones que encierran el haz y anular los bloqueos es la alineación del haz de láser.

Durante estas operaciones de mantenimiento, en teoría deben abandonar la sala donde se encuentre el láser todas las personas, salvo los técnicos de mantenimiento necesarios. Se deberán cerrar con llave las puertas de acceso a la sala y se pondrán en ellas avisos con los signos de seguridad láser. No obstante, los láseres de gran potencia utilizados en la fabricación de semiconductores están situados a menudo en naves de fabricación grandes abiertas, lo que hace inviable el traslado del personal ajeno al mantenimiento mientras éste se realiza. En estos casos se suele establecer una zona de control provisional. Lo normal es que estas zonas de control estén rodeadas de cortinas especiales para láser o pantallas de soldeo capaces de resistir el contacto directo con el haz de láser. La entrada a la zona de control provisional se suele efectuar atravesando un laberinto en el que se pone un signo de aviso siempre que se anulen los cortacircuitos del láser. Otras precauciones de seguridad durante la alineación del haz son similares a las exigidas para la operación de un láser de gran potencia y haz abierto (p. ej., formación, protección de los ojos, procedimientos escritos, etc.).

Los láseres de gran potencia son también uno de los peligros eléctricos más importantes en el sector de semiconductores. Incluso después de cortada la alimentación, existe un potencial importante de descarga en el instrumento, que ha de ser disipado antes de trabajar dentro del armario.

Junto con los peligros del haz y eléctricos, también se debe poner gran atención en las operaciones de mantenimiento de los sistemas de marcaje con láser a causa del potencial de contaminación química por el piroretardante trióxido de antimonio y el berilio (las monturas cerámicas que contienen este compuesto estarán rotuladas). Durante el marcaje con láseres de gran potencia pueden generarse humos, con lo que se depositarán residuos sobre las superficies del equipo y en los filtros de extracción de humos.

En el pasado se han empleado desengrasantes para limpiar semiconductores antes de marcarlos con códigos de identificación. Es fácil que se originen exposiciones a disolventes por encima del límite de exposición profesional aerotransportada aplicable si un operador coloca la cabeza debajo de las bobinas de refrigeración que provocan la recondensación de vapores, como puede suceder cuando el operador intenta recuperar piezas caídas o cuando un técnico limpia residuos del fondo de la unidad (Baldwin y Stewart 1989). El empleo de desengrasantes ha experimentado una gran reducción en el sector de semiconductores por las restricciones en la utilización de sustancias destructoras del ozono, como los hidrocarburos clorofluorados y los disolventes clorados.

Análisis de fallos y garantía de calidad

Los laboratorios de análisis de fallos y de la calidad están especializados en realizar diversas operaciones para garantizar la fiabilidad de los dispositivos. Algunas de las operaciones efectuadas en estos laboratorios presentan posibilidades de exposición del trabajador. Entre ellas se cuentan:

- *pruebas de marcaje* que utilizan diversas mezclas disolventes y corrosivas en vasos calentados en chapas calefactoras. Es

preciso contar con ventilación aspirante local (LEV) en forma de chimenea metálica con las velocidades nominales adecuadas para controlar emisiones transitorias. Las soluciones de monoetanolamina pueden dar lugar a exposiciones que superen su límite de exposición en el aire (Baldwin y Williams 1996).

- *prueba de burbujas/fugas* con utilización de hidrocarburos fluorados de alto peso molecular (nombre registrado, Fluorinerts).
- *unidades de montura por rayos X.*

El cobalto 60 (hasta 26.000 curios) se utiliza en irradiadores con objeto de comprobar la capacidad de los CI para resistir la exposición a la radiación gamma en aplicaciones militares y espaciales. En condiciones normales, las exposiciones personales debidas a esta operación son inferiores a 5 milisievert (500 millirem) por año (Baldwin y Stewart 1989). Los controles de esta operación un tanto especializada son similares a los utilizados en los sistemas de precisión para medir fugas de Kr 85 (p. ej., sala aislada, monitores permanentes de la radiación, vigilancia de la exposición personal, etc.).

En el proceso de análisis de fallos se utilizan pequeñas fuentes alfa "con licencia específica" (p. ej., micro y milicurios de americio 241). Estas fuentes se cubren con un capa protectora delgada, denominada ventana, que permite la emisión de partículas alfa desde la fuente para comprobar la capacidad de funcionamiento del circuito integrado cuando es bombardeado por partículas alfa. Lo normal es que las fuentes se sometan a una inspección periódica (p. ej., semestral) en busca de fugas de material radiactivo, que pueden producirse si la ventana protectora sufre daños. Cualquier fuga detectable suele desencadenar el desmontaje inmediato de la fuente y su devolución al fabricante.

Se utilizan sistemas de rayos X en armario para comprobar el espesor de recubrimientos metálicos y para detectar defectos (p. ej., burbujas de aire en monturas de compuestos de moldeo). Aunque estas unidades no son una fuente de fuga importante, se suelen someter a comprobación periódica (p. ej., anual) con un medidor de mano para reconocimiento de fugas de rayos X, y se inspeccionan para garantizar que los cortacircuitos de puerta funcionan correctamente.

Expedición

La expedición es la última operación en la que intervienen los fabricantes de casi todos dispositivos semiconductores de silicio. Los fabricantes que a su vez son proveedores venden sus productos a otros fabricantes de productos finales, mientras que los fabricantes que producen para sí mismos utilizan los dispositivos en sus propios productos finales.

Estudio de la salud

En cada paso del proceso se utiliza un conjunto determinado de sustancias químicas y aparatos que originan preocupaciones específicas en materia de salud y seguridad ambiental (SSA). Además de preocupaciones asociadas a pasos concretos del procesamiento de dispositivos semiconductores de silicio, un estudio epidemiológico investigó los efectos sobre la salud en los trabajadores del sector de semiconductores (Schenker y cols. 1992). Véase también la exposición del artículo "Efectos sobre la salud y patrones de enfermedad".

La conclusión principal del estudio fue que el trabajo en instalaciones de fabricación de semiconductores se asocia a un aumento de la tasa de abortos espontáneos (AE). En el componente histórico del estudio, el número de embarazos estudiados en trabajadoras de fabricación y ajenas a la fabricación fue casi igual (447 y 444, respectivamente), pero hubo más abortos espontáneos en fabricación (n=67) que en los procesos ajenos a

la fabricación (n=46). Una vez realizado el ajuste por diversos factores que podrían ser causa de sesgo (edad, raza, tabaquismo, estrés, situación socioeconómica e historia de embarazos), el riesgo relativo (RR) de la fabricación frente a la no fabricación fue de 1,43 (intervalo de confianza al 95 %=0,95-2,09).

Los investigadores asociaron la mayor tasa de AE con la exposición a determinados éteres de glicol a base de etileno (EGE) empleados en la fabricación de semiconductores. Los éteres de glicol específicos que figuraban en el estudio y que se sospecha que causan efectos adversos en la reproducción son:

- 2-metoxietanol (CAS 109-86-4);
- acetato de 2-metoxietilo (CAS 110-49-6);
- acetato de 2-etoxietilo (CAS 111-15-9).

Aunque no formaban parte del estudio, otros dos éteres de glicol utilizados en el sector, el 2-etoxietanol (CAS 110-80-5) y el éter dimetil glicol dietileno (CAS 111-96-6), ejercen efectos tóxicos similares y han sido prohibidos por algunos fabricantes de semiconductores.

Además del aumento de la tasa de AE asociada a la exposición a determinados éteres de glicol, el estudio llegó también a las conclusiones siguientes:

- Existía una correlación inconstante entre la exposición a fluoruros (en grabado) y el AE.
- El estrés declarado por las mujeres que trabajaban en procesos de fabricación era un potente factor de riesgo independiente de AE.
- Las mujeres que trabajaban en procesos de fabricación tardaban más tiempo en quedarse embarazadas que las ocupadas en procesos ajenos a la fabricación.
- Los trabajadores de fabricación mostraban un aumento de los síntomas respiratorios (irritación de ojos, nariz y garganta y sibilancia) en comparación con los de procesos ajenos a la fabricación.
- Aparecían síntomas musculoesqueléticos en la extremidad superior distal, como dolores en mano, muñeca, codo y antebrazo, asociados al trabajo en naves de fabricación.
- Se comunicaron con más frecuencia la dermatitis y caída del cabello (alopecia) en los trabajadores de fabricación que en los demás.

Revisión del equipo

La complejidad del equipo de fabricación de semiconductores, junto con los continuos avances en los procesos de fabricación, convierte a la revisión previa a la instalación de nuevos equipos de proceso en una medida importante para reducir al mínimo los riesgos para la SSA. Hay dos procesos de revisión de equipos que ayudan a garantizar que un equipo nuevo de producción de semiconductores posea los controles de SSA adecuados: la marca CE y las normas internacionales relativas a equipo y materiales de semiconductores (SEMI).

La marca CE es una declaración del fabricante de que el equipo que la lleva cumple los requisitos de todas las directivas aplicables de la Unión Europea (UE). Las directivas que se consideran más aplicables al equipo de fabricación de semiconductores son la Directiva de maquinaria (DM), la Directiva de compatibilidad electromagnética (CEM) y la Directiva de baja tensión (DBT).

En el caso de la Directiva de CEM, es preciso contar con los servicios de una entidad competente (organización con autorización oficial de un Estado miembro de la UE) que defina los requisitos de ensayo y apruebe los resultados de la inspección. La DM y la DBT pueden ser evaluadas por el fabricante o por un organismo encargado (organización con autorización oficial

de un Estado miembro de la UE). Con independencia del camino elegido (evaluación propia o por terceros), el importador de la partida será el responsable de que el producto importado tenga la marca CE. Puede utilizar la información de la entidad tercera o de la autoevaluación como base de su convencimiento de que el equipo cumple los requisitos de las directivas aplicables, pero en último término preparará la declaración de conformidad y agregará la marca CE por sí mismo.

La asociación internacional de equipo y materiales de semiconductores (SEMI) es una entidad que representa a los proveedores de equipo y materiales de semiconductores e indicadores planos. Entre sus actividades se cuenta el desarrollo de normas técnicas voluntarias por acuerdo mutuo entre proveedores y clientes, encaminadas a mejorar la calidad y la fiabilidad permanente de los productos a precio razonable.

Hay dos normas SEMI que se aplican en concreto a las preocupaciones relativas a la SSA de equipo nuevo, que son la SEMI S2 y la SEMI S8. La SEMI S2-93, *Directrices de seguridad para equipo de fabricación de semiconductores*, establece unas consideraciones mínimas de SSA basadas en el rendimiento para el equipo utilizado en la fabricación de semiconductores. La SEMI S8-95, *Supplier Ergonomic Success Criteria User's Guide* (Guía del usuario sobre criterios de éxito ergonómico de proveedores), amplía la sección de la SEMI S2 dedicada a ergonomía.

Muchos fabricantes de semiconductores exigen la certificación por terceros de que un equipo nuevo cumple los requisitos de la SEMI S2. Las directrices para interpretar la SEMI S2-93 y la SEMI S8-95 están contenidas en una publicación del consorcio del sector SEMATECH (SEMATECH 1996). Puede obtenerse más información sobre SEMI en la red mundial (<http://www.semi.org>).

Manipulación de sustancias químicas

Distribución de líquidos

Desde que los sistemas automáticos de distribución de sustancias químicas han pasado de ser una excepción a convertirse en la norma, el número de quemaduras químicas de los trabajadores ha disminuido. No obstante, en estos sistemas automáticos de distribución es preciso instalar medidas de salvaguarda adecuadas, entre ellas:

- detección de fugas y cierre automático en la fuente de suministro y en las cajas de unión;
- doble confinamiento de conductos si la sustancia química se considera peligrosa;
- sensores de alto nivel en puntos terminales (vasija de baño o instrumento);
- parada temporizada de bombas (permite que sólo sea bombeada una cantidad específica a un emplazamiento antes de la parada automática).

Distribución de gases

La seguridad en la distribución de gases ha experimentado una mejora notable a lo largo del tiempo con la llegada de nuevos tipos de válvulas de botella, la limitación del caudal en los orificios incorporados a la botella, los paneles automáticos de purga de gas, la detección de caudales excesivos con el cierre consiguiente y el perfeccionamiento del equipo de detección de fugas. Por su propiedad pirofórica y su empleo generalizado como sustancia de alimentación, el gas silano representa el peligro más significativo de explosión en el sector. Pero los incidentes con silano se han hecho más predecibles con las nuevas investigaciones efectuadas por Factory Mutual y SEMATECH. Gracias a los orificios de flujo reducido, las presiones de suministro y las

tasas de ventilación adecuadas, se han eliminado la mayoría de los incidentes de explosión (SEMATECH 1995).

En los últimos años se han producido varios incidentes de seguridad por la mezcla no controlada de gases incompatibles. Estos incidentes han obligado a los fabricantes de semiconductores a revisar con frecuencia las instalaciones de tuberías de gas y las cajas de gases auxiliares para impedir la mezcla y/o el retorno incorrecto de gases.

Los asuntos relativos a las sustancias químicas son los que suelen generar las mayores preocupaciones en la fabricación de semiconductores. No obstante, la mayoría de las lesiones y muertes en el sector se deben a peligros ajenos a las sustancias químicas.

Seguridad eléctrica

Hay numerosos peligros eléctricos relacionados con el equipo empleado en este sector. Los cortacircuitos de seguridad desempeñan un papel importante en la seguridad eléctrica, pero son anulados muchas veces por los técnicos de mantenimiento. Numerosas intervenciones de mantenimiento suelen efectuarse mientras el equipo sigue con alimentación, ya sea total o parcial. Los peligros eléctricos más importantes son los asociados con los implantadores de iones y las fuentes de láser. Aunque la alimentación esté cortada, en el instrumento existe un potencial importante de descarga, que ha de ser disipado antes de trabajar dentro del instrumento. El proceso de revisión de la SEMI S2 en Estados Unidos y la marca CE en Europa han contribuido a mejorar la seguridad eléctrica de equipo nuevo, pero las operaciones de mantenimiento no siempre se consideran debidamente. Es preciso efectuar una revisión cuidadosa de las operaciones de mantenimiento y de los peligros eléctricos en todo el equipo recién instalado.

El segundo lugar en la lista de peligros eléctricos lo ocupa el conjunto de equipos que genera energía de RF durante los procesos de grabado, pulverización y limpieza de cámaras. Necesitan blindaje y puesta a tierra adecuados para reducir al mínimo el riesgo de quemaduras de RF.

Estos peligros eléctricos y los numerosos aparatos que no se apagan durante las operaciones de mantenimiento exigen que los técnicos de mantenimiento utilicen otros medios para protegerse, como son los procedimientos de bloqueo/etiquetado. Los peligros eléctricos no son las únicas fuentes de energía cuyos peligros se pretende eliminar con el bloqueo/etiquetado. Otras fuentes de energía son los conductos presurizados, muchos de ellos con gases o líquidos peligrosos, y los mandos neumáticos. Los mecanismos de desconexión de estas fuentes de energía han de estar en lugares de fácil acceso—dentro del área de *fab* (fabricación) o montaje en la que operará el trabajador, y no en lugares menos accesibles, como en dependencias auxiliares.

Ergonomía

La interacción entre el trabajador y los aparatos sigue provocando lesiones. Las distensiones y esguinces musculares son bastante corrientes en el sector de semiconductores, sobre todo en los técnicos de mantenimiento. Es frecuente que el acceso a bombas, tapas de cámaras, etc. no se haya diseñado bien durante la fabricación del instrumento y durante su colocación en la fábrica. Las bombas deben estar colocadas sobre ruedas o en cajones o bandejas deslizantes. Para la realización de muchas operaciones es preciso incorporar dispositivos elevadores.

La simple manipulación de obleas origina peligros ergonómicos, sobre todo en instalaciones antiguas. Las más modernas suelen manejar obleas de mayor tamaño, por lo que exigen sistemas de manipulación más automatizados. Muchos de estos sistemas de manipulación de obleas se consideran dispositivos robóticos, y los aspectos relativos a la seguridad con estos

sistemas han de tenerse en cuenta en el momento de su diseño e instalación (ANSI 1986).

Seguridad contra incendios

Además del gas silano, que ya ha sido considerado, el gas hidrógeno tiene la capacidad de representar un peligro de incendio importante. Pero es mejor conocido, y en el sector no se han visto muchos casos graves donde haya intervenido el hidrógeno.

Los peligros de incendio más graves están relacionados ahora con los *bancos húmedos* o baños de grabado. Los materiales plásticos que más se emplean en su construcción (cloruro de polivinilo, polipropileno y polipropileno ignífugo) han intervenido todos en incendios de fábricas. La fuente de ignición puede ser el calefactor de un baño de grabado o plaqueado, los mandos eléctricos montados directamente sobre el plástico o un aparato adyacente. Si se declara un incendio en uno de estos elementos de plástico, la contaminación de partículas y los productos de combustión corrosivos se extienden por toda la zona de fabricación. La pérdida económica es alta por el tiempo de parada de la fabricación mientras se restablecen las condiciones de sala limpia en la zona y el equipo afectados. Es frecuente que algunos equipos caros no se puedan descontaminar como es debido y haya que adquirir equipo nuevo. Por consiguiente, es primordial que la prevención y la protección contra incendios sean adecuadas.

La prevención de incendios puede abordarse con materiales de construcción diferentes, no combustibles. El acero inoxidable es el material de construcción preferido para estos bancos húmedos, pero a veces el proceso no "aceptará" un aparato metálico. Hay plásticos con menor potencial de generar incendios/humos, pero todavía no se han ensayado lo suficiente para determinar si serán compatibles con los procesos de fabricación de semiconductores.

En cuanto a la protección contra incendios, estos aparatos han de estar protegidos mediante dispositivos de aspersión no obstruidos. La colocación de filtros HEPA sobre bancos húmedos bloquea muchas veces las cabezas aspersoras. Si ocurre así, se instalan cabezas aspersoras adicionales debajo de los filtros. Muchas empresas exigen también que se instale un sistema de detección y supresión de incendios dentro de las cavidades de sobrepresión situadas sobre estos aparatos, donde empiezan muchos incendios.

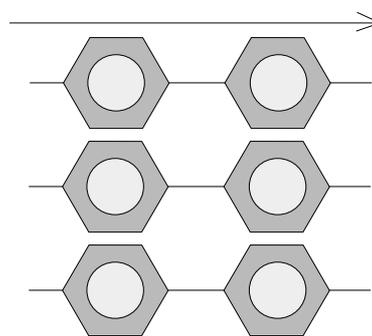
● INDICADORES DE CRISTAL LIQUIDO

David G. Baldwin, James R. Rubin y Afsaneh Gerami

Desde el decenio de 1970 están comercializados los indicadores de cristal líquido (LCD), de uso común en relojes, calculadoras, radios y otros productos que necesitan indicadores y tres o cuatro caracteres alfanuméricos. Mejoras recientes de los materiales de cristal líquido permiten fabricar indicadores de gran tamaño. Si bien los LCD son sólo una pequeña parte del sector de semiconductores, su importancia ha aumentado con su empleo en paneles indicadores planos para ordenadores portátiles, ordenadores de viaje muy ligeros y procesadores de texto dedicados. Se espera que la importancia de los LCD siga aumentando a medida que puedan llegar a sustituir al último tubo de vacío que todavía es de uso corriente en electrónica—el tubo de rayos catódicos (TRC) (O'Mara 1993).

La fabricación de los LCD es un proceso muy especializado. Los resultados de la vigilancia de la higiene industrial indican niveles de contaminantes aéreos muy bajos para las diversas

Figura 83.5 • Moléculas básicas de los polímeros de cristal líquido.



exposiciones a disolventes estudiadas (Wade y cols. 1981). En general, los tipos y cantidades de sustancias químicas tóxicas, corrosivas e inflamables en estado sólido, líquido y gaseoso, y de agentes físicos peligrosos que se utilizan son limitados en comparación con otros tipos de fabricación de semiconductores.

Los materiales de cristal líquido son moléculas en forma de varilla como las del ejemplo de Cianobifenilo mostradas en la Figura 83.5. Estas moléculas poseen la propiedad de hacer girar la dirección de la luz polarizada que las atraviesa. Aunque las moléculas son transparentes a la luz visible, un recipiente con el material líquido aparece lechoso o translúcido, en lugar de transparente. Este fenómeno se debe a que los ejes largos de las moléculas están alineados según ángulos aleatorios, de manera que la luz se dispersa al azar. Una celda indicadora de cristal líquido se dispone de manera que las moléculas sigan una alineación específica, que puede variarse con un campo eléctrico externo, lo que permite cambiar la polarización de la luz entrante.

En la fabricación de paneles indicadores planos, dos sustratos de vidrio se procesan por separado y después se acoplan juntos. El sustrato frontal se modela para crear un conjunto de filtros de colores. El sustrato trasero de vidrio se modela para formar transistores de película delgada y las líneas metálicas de interconexión. Estas dos placas se acoplan en el proceso de montaje y, si es preciso, se trocean y separan en indicadores individuales. En el hueco dejado entre las dos placas de vidrio se inyecta material de cristal líquido. Los indicadores son inspeccionados y comprobados y a cada placa de vidrio se le aplica una película polarizadora.

Son numerosos los procesos individuales que se necesitan para fabricar paneles indicadores planos. Exigen equipo, materiales y procesos especializados. A continuación se esbozan determinados procesos clave.

Preparación del sustrato de vidrio

El sustrato de vidrio es un componente esencial y costoso del indicador. En cada fase del proceso se precisa un control muy estricto de las propiedades ópticas y mecánicas del material, en especial cuando interviene calentamiento.

Fabricación del vidrio

Se utilizan dos procesos para fabricar vidrio muy delgado con dimensiones muy precisas y propiedades mecánicas reproducibles. El proceso de fusión, desarrollado por Corning, utiliza una varilla de entrada de vidrio que se funde en una cubeta en forma de cuña y rebosa por encima y sobre los lados de la cubeta. Al caer por ambos lados de la cubeta, el vidrio fundido se junta en una sola lámina en el fondo de la cubeta y puede ser arrasado hacia abajo como lámina uniforme. El espesor de la lámina

es controlado por la velocidad de arrastre del vidrio. Pueden obtenerse anchuras de hasta casi 1 m.

Otros fabricantes de vidrio con las dimensiones adecuadas para hacer sustratos de LCD utilizan el método de flotación, en el que se permite que el vidrio fundido fluya para caer en un lecho de estaño fundido. El vidrio no se disuelve en el estaño metálico ni reacciona con él, sino que flota sobre su superficie. Este fenómeno permite que la gravedad alise la superficie y que las dos caras queden paralelas. (Véase el Capítulo *Vidrio, cerámica y materiales afines*.)

Se dispone de sustratos de numerosos tamaños, hasta de 450 × 550 mm y mayores. El espesor típico del vidrio en los paneles indicadores planos es de 1,1 mm. En algunos indicadores pequeños, como los de buscapersonas, teléfonos, juegos y otros, se emplea vidrio más delgado.

Cortado, biselado y pulido

Después del proceso de fusión o flotación, los sustratos de vidrio se cortan a su tamaño, que por un lado suele ser de alrededor de 1 m. El proceso de formado va seguido de distintas operaciones mecánicas, que dependen de la aplicación última del material.

Como el vidrio es frágil y se desportilla o raja fácilmente por los bordes, éstos se biselan, achaflanar o reciben otro tratamiento equivalente que reduzca el astillado durante la manipulación. Las tensiones térmicas en las grietas de los bordes se acumulan durante el procesamiento del sustrato y conducen a la rotura. La rotura del vidrio es un problema importante durante su producción. Además de la posibilidad de ocasionar cortes y desgarros a los trabajadores, representa una pérdida de beneficio, y los fragmentos de vidrio podrían quedar en el equipo y provocar a su vez contaminación por partículas o arañazos a otros sustratos.

Al aumentar el tamaño del sustrato se incrementan las dificultades para pulir el vidrio. Los sustratos grandes se colocan en soportes con ayuda de cera u otro adhesivo y se pulen con una pasta de material abrasivo. A este proceso de pulido le debe seguir una limpieza química completa para eliminar los posibles restos de cera u otros residuos orgánicos, así como los contaminantes metálicos contenidos en la sustancia abrasiva o de pulido.

Limpieza

Se utilizan procesos de limpieza en sustratos de vidrio desnudo y en sustratos recubiertos de películas orgánicas, como filtros de color, películas de orientación de poliimidas, etc. También los sustratos con películas de semiconductores, aisladores y metales necesitan limpieza en determinados puntos del proceso de fabricación. Se necesita limpieza como mínimo antes de cada paso de enmascaramiento en la fabricación de filtros de color o de transistores de película delgada.

En casi todas las limpiezas de panel plano se emplea una combinación de métodos físicos y químicos, con la utilización selectiva de métodos secos. Después del ataque químico o de la limpieza, los sustratos suelen secarse mediante alcohol isopropílico. (Véase la Tabla 83.8.)

Formación de filtros de color

La formación de filtros de color sobre el sustrato frontal del vidrio comprende algunos de los pasos de acabado y preparación del vidrio comunes a los paneles frontal y trasero, como son los procesos de biselado y pulimentado. Hay operaciones que se realizan varias veces sobre el sustrato, como las de modelado, recubrimiento y curado. Existen muchos puntos de semejanza con el procesamiento de las obleas de silicio. Los sustratos de vidrio suelen manipularse en sistemas transportadores para su limpieza y recubrimiento.

Modelado de filtros de color

En la creación de filtros de color para diversos tipos de paneles indicadores planos se emplean distintos materiales y métodos de aplicación. Puede utilizarse un colorante o un pigmento, que pueden depositarse y modelarse de varios modos. En uno de los métodos, se deposita gelatina que después se tiñe en operaciones fotolitográficas sucesivas, con ayuda de equipo de impresión por proximidad y fotoprotectores estándar. En otro, se emplean pigmentos dispersados en el fotoprotector. Otros métodos de formar filtros de color son la electrodeposición, el grabado y la impresión.

Deposición de ITO

Tras la formación de filtros de color, el paso final es la deposición por pulverización de un material de electrodo transparente. Para ello se emplea el óxido de indio y estaño (ITO), que en realidad es una mezcla de los óxidos In_2O_3 y SnO_2 . Este material es el único idóneo para la aplicación de un conductor transparente a los LCD. Se necesita una película delgada de ITO en las dos caras del indicador. La formación de las películas de ITO se realiza por evaporación y pulverización al vacío.

Las películas delgadas de ITO son fáciles de grabar con sustancias químicas húmedas como el ácido clorhídrico, pero a medida que la separación de los electrodos se hace más pequeña y los detalles se hacen más finos, puede ser necesario el grabado en seco para evitar el rebaje de las líneas a causa del exceso de ataque.

Formación de transistores en película delgada

La formación de transistores en película delgada es muy similar a la fabricación de un circuito integrado.

Deposición de película delgada

Los sustratos inician el proceso de fabricación con un paso de aplicación de película delgada. Las películas delgadas se depositan mediante CVD o deposición física de vapores (PVD). La CVD reforzada con plasma, conocida también por descarga luminiscente, se utiliza para el silicio amorfo, el nitruro de silicio y el dióxido de silicio.

Modelado del dispositivo

Una vez depositada la película delgada, se aplica un fotoprotector y se modela la imagen para permitir el grabado de la película delgada en las dimensiones apropiadas. Se depositan y graban un serie de películas delgadas, igual que en la fabricación de circuitos integrados.

Aplicación y frotación de la película de orientación

Sobre ambos sustratos, el superior y el inferior, se deposita una película delgada de polímero para la orientación de las moléculas de cristal líquido en la superficie del vidrio. Esta película de

Tabla 83.8 • Limpieza de paneles indicadores planos.

Limpieza física	Limpieza en seco	Limpieza química
Frotar con cepillo	Ozono ultravioleta	Disolvente orgánico*
Al chorro	Plasma (óxido)	Detergente neutro
Ultrasónica	Plasma (no óxido)	
Megasónica	Láser	Agua pura

* Los disolventes orgánicos comunes usados en la limpieza química son: acetona, metanol, etanol, n-propanol, isómeros del xileno, tricloroetileno, tetracloroetileno.

orientación, de un espesor aproximado de 0,1 μm , puede ser una poliimida u otro polímero "duro". Después de la deposición y el cocido, la película se frota con tejido en una dirección específica, lo que deja surcos apenas detectables en la superficie. La frotación puede hacerse con una sola pasada de un paño sobre una correa, alimentada desde un rodillo situado a un lado, que pasa bajo un rodillo en contacto con el sustrato, hasta otro rodillo al otro lado. El sustrato se desplaza debajo del paño en el mismo sentido que éste. En otros métodos, se emplea un cepillo móvil que se desplaza por el sustrato. El pelo del material de frotación es importante. Los surcos sirven para ayudar a las moléculas de cristal líquido a alinearse en la superficie del sustrato y a adoptar el ángulo de inclinación adecuado.

La película de orientación puede depositarse por recubrimiento con giro o por impresión. El método de impresión es más eficiente en aprovechamiento del material; del 70 al 80 % de la poliimida es transferida desde el rodillo de impresión a la superficie del sustrato.

Montaje

Cuando ha finalizado el paso de frotación del sustrato, se inicia una secuencia automatizada en la cadena de montaje, que comprende:

- aplicación de adhesivo (necesario para sellar los paneles);
- aplicación de separador;
- colocación y alineación óptica de una placa respecto de la otra;
- exposición (calor o UV) para endurecer el adhesivo y unir entre sí las dos placas de vidrio.

El transporte automático de ambas placas, la superior y la inferior, se realiza por la misma cadena. Una placa recibe el adhesivo, y la segunda placa es introducida en la estación del aplicador de separadores.

Inyección de cristal líquido

En el caso de que en el sustrato se haya construido más de un indicador, los indicadores son separados ahora mediante cortes. En este momento, el material constituyente del cristal líquido puede introducirse en el hueco existente entre los sustratos a través de un orificio que se dejó en el material de sellado. Este orificio de entrada se sella a continuación y queda preparado para la inspección final. Los materiales de cristal líquido se suministran a menudo en forma de dos o tres sistemas componentes que se mezclan en la inyección. Los sistemas de inyección se ocupan de la mezcla y de purgar la celda para impedir que durante el proceso de llenado queden burbujas atrapadas.

Inspección y prueba

La inspección y la prueba funcional se efectúan después del montaje y de la inyección del cristal líquido. La mayoría de los defectos se deben a partículas (incluidos los defectos de punto y línea) y a problemas del hueco de la celda.

Fijación del polarizador

El paso final de la fabricación del indicador de cristal líquido propiamente dicho es la aplicación del polarizador en el exterior de cada placa de vidrio. Las películas polarizadoras son películas mixtas que contienen la capa de adhesivo sensible a la presión necesaria para fijar el polarizador al vidrio. Se aplican con ayuda de máquinas automatizadas que distribuyen el material desde rollos u hojas ya cortadas. Las máquinas son variantes de las máquinas de etiquetar desarrolladas para otros sectores. La película polarizadora se fija a ambas caras del indicador.

En algunos casos, antes del polarizador se aplica una película de compensación. Las películas de compensación son películas de polímero (p. ej., policarbonato y metacrilato de polimetilo)

que están estiradas en una dirección. Este estirado modifica las propiedades ópticas de la película.

Un indicador terminado tendrá de ordinario circuitos integrados de mando montados en uno de los sustratos de vidrio o cerca de él, que por lo general suele ser la cara de transistores de película delgada.

Peligros

La rotura del vidrio es un peligro importante en la fabricación de LCD. Pueden producirse cortes y laceraciones. Otra preocupación es la exposición a las sustancias químicas empleadas en la limpieza.

FABRICACION DE SEMICONDUCTORES III-V

David G. Baldwin, Afshaneh Gerami y James R. Rubin

El silicio ha dominado tradicionalmente el desarrollo de la tecnología de los CI como material semiconductor fundamental. En los últimos años, la atención principal sobre una alternativa al silicio como material de sustrato se ha centrado en los compuestos III-V, como el arseniuro de galio (GaAs). En tanto material semiconductor, el GaAs presenta mejores características que el silicio, como una movilidad de electrones de 5 a 6 veces superior. Esta característica, junto con las propiedades potenciales de semiaislante que posee el GaAs, conduce a un mayor rendimiento en el doble aspecto de la velocidad y el consumo de energía.

El GaAs tiene una estructura de blanda de zinc formada por dos submallas cúbicas centradas en las caras e interpenetradas que están relacionadas con el crecimiento de material en lingote de alta calidad. La tecnología necesaria en el crecimiento de GaAs es bastante más complicada que la empleada para el silicio, puesto que intervienen un complicado equilibrio bifásico y un componente muy volátil, el arsénico (As). Es necesario el control de la presión de vapor del As en el sistema de crecimiento del lingote para mantener la estequiometría exacta del compuesto GaAs durante el proceso de crecimiento. Hay dos categorías principales de producción de indicadores y dispositivos de semiconductores III-V cuyos procedimientos de procesamiento tienen viabilidad económica: los indicadores de LED y los dispositivos de CI de microondas.

Los LED se fabrican a partir de GaAs monocristalino en el que se forman uniones p-n por la adición de agentes impurificadores idóneos—que por lo general son telurio, zinc o silicio. Sobre el sustrato se hacen crecer capas epitaxiales de materiales III-V ternarios y cuaternarios, como fosfuro de galio y arsénico (GaAsP), que dan por resultado una banda de emisión de longitudes de onda específicas en el espectro visible para indicadores, o en el espectro infrarrojo para emisores o detectores. Por ejemplo, la recombinación directa de los electrones y huecos p-n da lugar a luz roja con un pico en torno a 650 nm. Los diodos emisores de luz verde están compuestos por lo general de fosfuro de galio (GaP). En este artículo se explican las etapas del proceso de los LED.

Los dispositivos de CI de microondas son una forma especializada de circuito integrado; se utilizan como amplificadores de alta frecuencia (de 2 a 18 GHz) para radar, telecomunicaciones y telemetría, así como en los amplificadores de octava y multioc-tava que se emplean en sistemas electrónicos militares. Los fabricantes de dispositivos de CI de microondas suelen comprar sustrato de GaAs monocristalino, con o sin capa epitaxial, de proveedores externos (como hacen los fabricantes de dispositivos

de silicio). Las etapas importantes del proceso son el depósito epitaxial en fase líquida, procesos de fabricación y posteriores a la fabricación similares a la fabricación de los dispositivos de silicio. Las etapas del proceso que exigen una descripción adicional a la del procedimiento para obtener LED se explican también en este artículo.

Fabricación de obleas

De manera similar al proceso de crecimiento de los lingotes de silicio, piezas elementales de galio y arsénico, junto con pequeñas cantidades de impurezas—silicio, telurio o zinc—se hacen reaccionar a temperaturas elevadas para formar lingotes de GaAs monocristalino impurificado. Se utilizan tres métodos generales de producción de lingotes:

- Bridgeman horizontal o vertical;
- congelación escalonada horizontal o vertical;
- encapsulado líquido Czochralski (LEC) a alta o baja presión.

El compuesto de GaAs policristalino se forma en condiciones normales por la reacción de vapor de As con Ga metálico a altas temperaturas en ampollas selladas de cuarzo. Por lo general, un depósito de As situado en un extremo de la ampolla se calienta hasta 618 °C. Así se genera dentro de la ampolla una presión de vapor de As de 1 atmósfera aproximadamente, requisito previo para obtener GaAs estequiométrico. El vapor de As reacciona con el Ga metálico mantenido a 1.238 °C y situado en el otro extremo de la ampolla, en una cápsula de cuarzo o de nitruro de boro pirolítico (PBN). Cuando el arsénico ha reaccionado por completo, se forma una carga policristalina, que se utiliza para el crecimiento monocristalino mediante enfriamiento programado (congelación escalonada) o mediante el desplazamiento físico de la ampolla o del horno hasta conseguir gradientes de temperatura adecuados para el crecimiento (Bridgeman). Este método indirecto (transporte del arsénico) para obtener la composición y el crecimiento del GaAs se utiliza debido a la alta presión de vapor del arsénico en el punto de fusión del GaAs, de unas 20 atmósferas a 812 °C y de 60 atmósferas a 1.238 °C, respectivamente.

Otro método para la producción comercial de GaAs monocristalino a granel es la técnica LEC. Un horno Czochralski para el estirado de cristales se carga con trozos de GaAs en un crisol en cámara de grafito. El GaAs se funde luego a temperaturas próximas a 1.238 °C, y el cristal se estira en una atmósfera presurizada que puede variar según el fabricante desde pocas hasta 100 atmósferas. La masa fundida está encapsulada por completo en un vidrio viscoso, B₂O₃, que impide su disociación, puesto que la presión de vapor del As queda igualada o superada por la de un gas inerte (que suele ser argón o nitrógeno) aplicado en la cámara de estirado. Una alternativa es sintetizar GaAs monocristalino *in situ* mediante la inyección del As en el Ga fundido o la combinación directa de As y Ga a alta presión.

La fabricación de obleas de GaAs es el proceso de fabricación de semiconductores en el que existe el mayor potencial de exposiciones químicas importantes en el trabajo diario. Si bien la elaboración de obleas de GaAs está limitada a un pequeño porcentaje de fabricantes de semiconductores, es precisa una atención especial en este campo. Las grandes cantidades de As utilizadas en el proceso, las numerosas etapas del mismo y el bajo límite de exposición ambiental establecido para el arsénico dificultan el control de estas exposiciones. Artículos de Harrison (1986); Lenihan, Sheehy y Jones (1989); McIntyre y Sherin (1989) y Sheehy y Jones (1993) suministran información adicional sobre los peligros y controles de este proceso.

Síntesis de lingotes policristalinos

Carga y sellado de la ampolla

Trozos de As elemental (99.9999 %) se pesan y cargan en una cápsula de cuarzo dentro de una vitrina de manipulación con guantes ventilada. Del mismo modo, el Ga (99.9999 %) puro líquido y las impurezas también se pesan y cargan en una o varias cápsulas de cuarzo o nitruro de boro pirolítico (PBN). Las cápsulas se cargan en una ampolla de cuarzo cilíndrica larga. (En las técnicas de Bridgeman y de congelación escalonada, se introduce también un cristal formador con la orientación cristalográfica deseada, mientras que en la técnica LEC de dos etapas, en la que sólo se necesita en esta fase GaAs policristalino, éste se sintetiza sin el cristal formador.)

Las ampollas de cuarzo se colocan en un horno a baja temperatura y se calientan mientras la ampolla se purga con hidrógeno (H₂), en un proceso conocido como reacción de reducción con hidrógeno, para eliminar los óxidos. Después de una segunda purga con un gas inerte como el argón, las ampollas de cuarzo se conectan a un montaje de bomba de vacío, son evacuadas y los extremos de las ampollas se calientan y sellan con una antorcha de hidrógeno/oxígeno. Se crea así una ampolla de cuarzo cargada y sellada, lista para el crecimiento en el horno. El sistema de purga con hidrógeno y de antorcha de hidrógeno/oxígeno presenta un peligro potencial de incendio/explosión si no se emplean los dispositivos y equipo de seguridad apropiados (Wade y cols. 1981).

Como el arsénico se somete a calentamiento, este sistema se mantiene con ventilación por aspiración. En el conducto de gases de salida de este sistema pueden formarse depósitos de óxido de arsénico. Hay que tomar precauciones para evitar la exposición y la contaminación si los conductos se obstruyesen por cualquier causa.

El almacenamiento y la manipulación de trozos de arsénico es un riesgo. Por motivos de seguridad, el arsénico se mantiene a menudo bajo llave y con un estricto control de existencias. También es habitual guardar el arsénico en un armario resistente al fuego dentro del almacén para impedir que sea afectado en caso de incendio.

Crecimiento en horno

Los métodos de Bridgeman y de congelación escalonada para el crecimiento del lingote monocristalino utilizan ambos las ampollas de cuarzo cargadas y selladas en el interior de un horno a alta temperatura cuyos vapores son evacuados hacia un sistema depurador húmedo. Los principales peligros de exposición durante el crecimiento en el horno se refieren al potencial de implosión o explosión de la ampolla de cuarzo durante el crecimiento del lingote. Esta situación se presenta en ocasiones esporádicas e infrecuentes, y es debida a uno de los motivos siguientes:

- la presión parcial del vapor de As originada por las altas temperaturas aplicadas en el proceso de crecimiento;
- desvitrificación de la ampolla de cuarzo, que crea grietas finas, y la posibilidad consiguiente de despresurización de la ampolla;
- carencia de dispositivos exactos para el control de la alta temperatura en la fuente calefactora —por lo común del tipo de resistencias—, que origina una presurización excesiva de la ampolla de cuarzo;
- mal funcionamiento o fallo del termopar, con el resultado de presurización excesiva de la ampolla de cuarzo;
- exceso de As o escasez de Ga en el tubo de la ampolla, que causan una presión de As extremadamente alta capaz de provocar la despresurización catastrófica de la ampolla.

El sistema horizontal de Bridgeman consta de un horno multizona en el que la ampolla sellada de cuarzo tiene zonas a distintas temperaturas—el extremo "frío" del arsénico a 618 °C y la cápsula de cuarzo con galio/impureza/cristal formador que contiene la masa fundida a 1.238 °C. El principio básico del sistema horizontal de Bridgeman implica atravesar dos zonas calentadas (una por encima del punto de fusión del GaAs y otra por debajo de él) en una cápsula de GaAs para conseguir la congelación controlada con precisión del GaAs fundido. El cristal formador, mantenido en todo momento dentro de la zona de congelación, suministra la estructura de partida del cristal inicial, que define la dirección y la orientación de la estructura cristalina en la cápsula. La cápsula de cuarzo y la ampolla de Ga y As se suspenden en la cámara calefactora mediante un juego de envueltas de carburo de silicio llamadas tubos de apoyo, que se sitúan en el sistema del calefactor de resistencias para recorrer mecánicamente toda la distancia de la ampolla. Además, el sistema del horno descansa en una mesa que debe estar inclinada durante el crecimiento para permitir la interfase adecuada entre la masa fundida del GaAs sintetizado y el cristal inicial o formador.

En el método de gradiente de congelación, un horno multizona de alta temperatura que utiliza calefacción por resistencias se mantiene de 1.200 a 1.300 °C (1.237 °C es el punto de fusión/solidificación del GaAs). La duración total del proceso de crecimiento del lingote es de unos 3 días y comprende los pasos siguientes:

- calentamiento del horno hasta la temperatura requerida;
- síntesis del GaAs;
- cristal formador o inicial de la masa fundida;
- enfriamiento/crecimiento del cristal.

La ampolla de cuarzo también se inclina durante el proceso de crecimiento con ayuda de un torno manual del tipo de tijeras.

Rotura de la ampolla

Después que el lingote de GaAs monocristalino ha crecido en la ampolla sellada de cuarzo, ésta debe abrirse para sacar la ampolla de cuarzo que contiene el lingote más el cristal formador. La operación puede efectuarse por uno de los métodos siguientes:

- corte del extremo sellado de las ampollas con una sierra circular en húmedo;
- calentamiento y rotura de la ampolla con un soplete de hidrógeno/oxígeno;
- rotura de la ampolla cargada con un martillo mientras el extractor de aire se mantiene en funcionamiento para controlar el arsénico del aire.

Las ampollas de cuarzo se reciclan mediante la disolución húmeda del arsénico condensado en la superficie interior con agua regia (HCl, HNO₃) o ácido sulfúrico/peróxido de hidrógeno (H₂SO₄/H₂O₂).

Chorroado/limpieza del lingote

Con objeto de ver los defectos policristalinos y eliminar los óxidos y contaminantes exteriores, el lingote de GaAs monocristalino tiene que limpiarse al chorro de perlas. La operación se efectúa con chorro de carburo de silicio o alúmina calcinada en una cámara de manipulación con guantes bien ventilada. La limpieza húmeda se realiza mediante enjuagues de *agua regia* o alcohol (alcohol isopropílico y/o metanol) en baños químicos provistos de ventilación de extracción localizada.

Crecimiento del lingote monocristalino

El lingote de GaAs policristalino recuperado de la ampolla se rompe en trozos, se pesa y se coloca en un crisol de cuarzo o de PBN, y sobre su parte superior se coloca un disco de óxido de boro. El crisol se deposita luego dentro de un cultivador (estirador) de cristal presurizado en un gas inerte y se calienta a 1.238 °C. A esta temperatura, el GaAs se funde y el óxido de boro, más ligero, se convierte en un encapsulador líquido que impide que el arsénico se disocie de la masa fundida. Se introduce en ésta un cristal formador o inicial por debajo de la cubierta líquida, y bajo contrarrotación se retira poco a poco de la masa fundida, con lo cual se solidifica a medida que abandona la "zona caliente". Este proceso lleva alrededor de 24 horas, en función del tamaño de la carga y del diámetro del cristal.

Una vez terminado el ciclo de crecimiento, se abre el cultivador de cristales para recuperar el lingote monocristalino y para proceder a la limpieza. Cierta cantidad de arsénico escapa de la masa fundida aunque esté cubierta con la capa líquida. Durante este paso del proceso puede haber una exposición significativa al arsénico suspendido en el aire. Para controlarla, el cultivador de cristales se enfría a menos de 100 °C, lo que provoca el depósito de partículas finas de arsénico sobre la superficie interior del cultivador de cristales. Este enfriamiento ayuda a reducir al mínimo la cantidad de arsénico que queda en suspensión en el aire.

Los depósitos pesados de residuos con contenido de arsénico se dejan en el interior del cultivador de cristales. La eliminación de los residuos en las operaciones normales de mantenimiento preventivo puede originar concentraciones notables de arsénico en el aire (Lenihan, Sheehy y Jones 1989; Baldwin y Stewart 1989; McIntyre y Sherin 1989). Los controles utilizados en esta operación de mantenimiento incluyen a menudo ventilación de extracción localizada, ropa desechable y protección respiratoria.

Cuando se retira el lingote, el cultivador se desmonta. Se utiliza un vacío HEPA para recoger partículas de arsénico de todas las piezas del cultivador. Después de hacer el vacío, las piezas de acero inoxidable se frotan con una mezcla de hidróxido de amonio/peróxido de hidrógeno para eliminar cualquier resto de arsénico, y se vuelve a montar el cultivador.

Fabricación de obleas

Difracción de rayos X

La orientación cristalina del lingote de GaAs se determina con ayuda de una unidad de difracción de rayos X, como en el proceso de fabricación de lingotes de silicio. También puede utilizarse un láser de baja potencia en un montaje de producción para determinar la orientación cristalina; pero el método de difracción de rayos X es más exacto y el preferido.

Cuando se emplea difracción de rayos X, el haz de rayos X suele estar totalmente encerrado en una cámara protectora que se inspecciona cada cierto tiempo en busca de fugas de radiación. En determinadas circunstancias, no es práctico el encierro total del haz de rayos X en un recinto cerrado. En tal caso, puede exigirse a los operadores que lleven anillos detectores de radiación y se establecen controles semejantes a los adoptados cuando se usan láseres de gran potencia (p. ej., habitación cerrada con el acceso limitado, formación de operadores, encerrar el haz en la medida de lo posible, etc.) (Baldwin y Williams 1996).

Recorte, rectificad y troceado del lingote

Los extremos o colas del lingote monocristalino se recortan con una sierra de diamantes de una sola hoja lubricada con agua a la que se añaden diversos refrigerantes. El lingote monocristalino se coloca después en un torno que le da forma cilíndrica de

diámetro uniforme. Este es el proceso de rectificado, que también es un proceso húmedo.

Después de ser recortados y rectificadas, los lingotes de GaAs se montan con epoxi o cera en un soporte de grafito y se sierran en obleas individuales con sierras automáticas de hojas incrustadas de diamantes en el diámetro interior (ID). Esta operación húmeda se lleva a cabo con ayuda de lubricantes y genera una pasta de GaAs, que es recogida, centrifugada y tratada con fluoruro de calcio para precipitar el arsénico. Se comprueba que la porción flotante no contiene exceso de arsénico, y el lodo se prensa en forma de tarta y se desecha como residuo peligroso. Algunos fabricantes envían la pasta recogida de los procesos de recorte, rectificado y troceado para recuperar el Ga.

Pueden formarse arsina y fosfina en la reacción del GaAs y del fósforo de indio con la humedad del aire, con otros arseniuros y fosfuros o cuando, durante el procesamiento, el arseniuro de galio y el fósforo de indio se mezclan con ácidos; se han medido 92 ppm de arsina y 176 ppm de fosfina a 5 centímetros de distancia de las hojas de troceado utilizadas para cortar lingotes de GaAs y de fósforo de indio (Mosovsky y cols. 1992, Rainer y cols. 1993).

Lavado de obleas

Una vez que las obleas de GaAs se han desmontado del soporte de grafito, se limpian por inmersión sucesiva en baños de productos químicos que contienen soluciones de ácido sulfúrico/peróxido de hidrógeno o ácido acético y alcoholes.

Perfilado de bordes

El perfilado de bordes es también un proceso húmedo realizado en las obleas ya cortadas para formar alrededor de cada oblea un borde que la haga menos propensa a la rotura. Como el corte en la superficie de la oblea es delgado, sólo se genera una pequeña cantidad de pasta.

Pulimentado y bruñido

Las obleas se montan con cera sobre una placa de pulir o rectificar, con ayuda de una placa calentadora, y se pulen en una máquina que desarrolla una velocidad y presión especificadas. Se vierte una solución de pulimentado en la superficie a pulir (una pasta de óxido de aluminio, glicerina y agua). Tras un breve período de pulimentado, cuando se ha conseguido el espesor deseado, las obleas se enjuagan y se montan en una máquina de bruñido mecánico. Este se realiza con una pasta de bicarbonato sódico, cloro al 5 %, agua (o hipoclorito sódico) y sílice coloidal. Las obleas se desmontan después sobre una placa calentadora, la cera se quita con disolventes y las obleas quedan limpias.

Epitaxia

Las obleas de GaAs monocristalino se utilizan como sustratos para el crecimiento de capas muy delgadas del mismo compuesto III-V o de otros que tengan las propiedades electrónicas u ópticas deseadas. Esta operación ha de ejecutarse de manera que en la capa cultivada continúe la estructura cristalina del sustrato. Este crecimiento cristalino, en que el sustrato determina la cristalinidad y orientación de la capa cultivada, se denomina epitaxia, y son numerosas las técnicas de crecimiento epitaxial utilizadas en la producción de indicadores y dispositivos III-V. Las técnicas más corrientes son:

- epitaxia en fase líquida (LPE);
- epitaxia con haz molecular (MBE);
- epitaxia en fase de vapor (VPE);
- condensación de vapores de sustancias químicas organometálicas (MOCVD)—también llamada epitaxia organometálica en fase de vapor (OMVPE).

Epitaxia en fase líquida

En la LPE, una capa de material III-V con impurezas se hace crecer directamente sobre la superficie del sustrato de GaAs con ayuda de un soporte de grafito que contiene cámaras separadas para el material que se depositará en las obleas. Se añaden a la cámara superior del soporte cantidades pesadas de los materiales a depositar, mientras que las obleas se colocan en una cámara más baja. El montaje se coloca en un tubo de reacción de cuarzo en atmósfera de hidrógeno. Se calienta el tubo hasta fundir los materiales a depositar, y cuando la fusión se equilibra, la sección superior del soporte se desliza hasta situarla encima de la oblea. Se reduce entonces la temperatura del horno para formar la capa epitaxial.

La LPE se utiliza sobre todo en epitaxia de los CI por microondas y en la fabricación de LED de longitudes de onda determinadas. El riesgo principal de este proceso de LPE es el empleo de gas hidrógeno muy inflamable en el sistema, riesgo que puede mitigarse si existen buenos controles técnicos y sistemas de alarma inmediata.

Epitaxia con haz molecular

La epitaxia al vacío en forma de MBE es una técnica que ha mostrado poseer una gran versatilidad. La MBE de GaAs consta de un sistema de ultravacío que contiene fuentes de haces atómicos o moleculares de Ga y As y de una oblea calentada como sustrato. Las fuentes de haces moleculares suelen ser contenedores de Ga líquido o de As sólido, con un orificio frente a la oblea. Cuando el horno de efusión (o contenedor) se calienta, por el orificio salen átomos de Ga o moléculas de As. El crecimiento del GaAs tiene lugar por lo general a una temperatura del sustrato superior a 450 °C.

Durante el mantenimiento de los sistemas MBE con fuente de sólido puede haber exposiciones altas a la arsina. En un estudio se detectaron concentraciones de 0,08 ppm en el aire cuando la cámara de la unidad de MBE se abría para el mantenimiento. La hipótesis de los autores era que la generación transitoria de arsina puede deberse a una reacción entre partículas muy finas de arsénico y vapor de agua, en la que el aluminio actuaría como catalizador (Asom y cols. 1991).

Epitaxia en fase de vapor

Las obleas desengrasadas y bruñidas se someten a un paso de ataque químico y limpieza antes de la epitaxia. Se trata de una operación de decapado secuencial con sustancias químicas húmedas en la que se utilizan ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno y agua en una proporción 5:1:1; un lavado con agua desionizada, y una limpieza/secado con alcohol isopropílico. También se realiza una inspección visual.

Dos son las técnicas principales de VPE aplicadas, basadas en dos sustancias químicas diferentes:

- los halógenos-III (GaCl_3) y halógenos-V (AsCl_3) o hidrógeno-V (AsH_3 y PH_3);
- los organometálicos III e hidrógeno-V, como $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ y AsH_3 —OMVPE.

La termoquímica de estas técnicas es muy diferente. Las reacciones normales de halógenos van de "calientes" a "frías", y en ellas el halógeno-III se genera en una zona caliente por reacción del elemento III con HCl, y luego se difunde hacia la zona fría, donde reacciona con la variedad V para formar material III-V. La química metalorgánica es un proceso "de paredes calientes" en el que el compuesto metalorgánico III "agrieta" o piroliza el grupo orgánico y el resto del elemento III y el hidruro V reaccionan para formar III-V.

En la VPE, el sustrato de GaAs se coloca en una cámara de calor en una atmósfera de hidrógeno. La cámara se calienta mediante RF o resistencias. Se hace borbotear el HCl a través de una cápsula de Ga para formar cloruro de galio, que luego reacciona con AsH₃ y PH₃ cerca de la superficie de la obleas para dar GaAsP, que se deposita como capa epitaxial sobre el sustrato. Se pueden añadir varias impurezas (según el producto y la fórmula aplicada). Entre ellas se cuentan pequeñas concentraciones de telururos, selenuros y sulfuros.

Una técnica extendida para la VPE en el procesamiento de LED es el sistema de halógeno-III e hidrógeno-V (hidruro). Consiste en un proceso de dos ciclos—con crecimiento inicial de la capa epitaxial de GaAsP sobre el sustrato de GaAs y, por último, un ciclo de decapado para limpiar de impurezas la cámara del reactor de grafito/cuarzo. En el ciclo de crecimiento epitaxial, las obleas de GaAs, previamente limpiadas se cargan en un carrusel situado dentro de una cámara de cuarzo del reactor que contiene un depósito de galio líquido elemental a cuyo través se dosifica el paso de gas HCl anhidro para formar GaCl₃. Las mezclas gaseosas de hidruro/hidrógeno (p. ej., 7 % AsH₃/H₂ y 10 % PH₃/H₂) se dosifican también en su paso a la cámara del reactor con la adición de concentraciones en ppm de impurezas organometálicas de telurio y selenio. Las especies químicas en la zona caliente, que es la parte superior de la cámara del reactor, reaccionan entre sí, y en la zona fría, que es la parte inferior de la cámara, forman la capa deseada de GaAsP sobre la oblea así como en el interior de la cámara del reactor.

Los efluentes del reactor son encaminados a un sistema de llama de hidrógeno (cámara de combustión o caja de quemado) para su pirólisis y se expulsan por ventilación a un sistema depurador húmedo. La alternativa es hacer burbujear los efluentes del reactor a través de un medio líquido para atrapar la mayoría de la partículas. El desafío para la seguridad consiste en la fiabilidad de los propios reactores para “agrietar” los gases. La eficiencia de estos reactores es de alrededor del 98 al 99,5 %; por lo tanto, algunos gases sin reaccionar pueden salir del borboteador cuando son extraídos por los operadores. Estos borboteadores desprenden gases de distintos compuestos de arsénico y fósforo, lo que exige que sean transportados en seguida a un sumidero ventilado antes de su mantenimiento, en el cual son purgados y limpiados para que la exposición del personal sea mínima. El desafío que este proceso impone a la higiene industrial es el de identificar con exactitud los gases efluentes, puesto que la mayoría de los compuestos gaseosos desprendidos de las distintas partes del reactor, y en especial del borboteador, son inestables en el aire y las técnicas tradicionales de recogida y análisis no discriminan lo suficiente entre las diferentes especies químicas.

Otra preocupación es la debida a los depuradores previos de los reactores de VPE, que pueden contener altas concentraciones de arsina y fosfina. Son posibles las exposiciones que rebasen los límites de exposición profesional si estos depuradores previos se abren sin tomar precauciones (Baldwin y Stewart 1989).

El ciclo de decapado se efectúa al final del ciclo de crecimiento y en nuevas partes del reactor para limpiar su superficie interior de impurezas. Se dosifica la entrada de gas HCl sin diluir en la cámara durante alrededor de 30 minutos, y se calienta el reactor hasta más de 1.200 °C. Los efluentes se ventilan hacia el sistema depurador húmedo para su neutralización.

Al final de estos ciclos de crecimiento y decapado, se utiliza una purga general con N₂ para arrastrar los gases tóxicos/inflamables y corrosivos que puedan quedar en la cámara del reactor.

Limpeza del reactor

Después de cada ciclo de crecimiento, es preciso abrir los reactores de VPE, sacar las obleas y realizar la limpieza física de las partes superior e inferior del reactor. Esta limpieza es ejecutada por el operador.

El depurador previo de cuarzo del reactor se quita de éste y se coloca en un disipador ventilado, donde se purga con N₂, se enjuaga con agua y después se sumerge en *agua regia*. Esta operación va seguida de otro lavado con agua antes de secar la pieza. Con la purga de N₂ sólo se pretende desplazar el oxígeno, dada la presencia de fósforo pirofórico inestable. Aun después de la purga y del lavado con agua, quedan en estas piezas algunos residuos que contienen diversos subproductos arsenicales y fosfóricos. La reacción entre estos residuos y la mezcla fuertemente oxidante/ácida podría generar cantidades importantes de AsH₃ y algo de PH₃. También existe posibilidad de exposición en otros procedimientos de mantenimiento de todo este proceso.

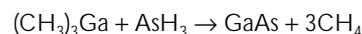
El fondo de la cámara de reacción de cuarzo y la placa del fondo (placa base) se limpian por rascado con una herramienta metálica, y las partículas de material (mezcla de GaAs, GaAsP, óxidos de arsénico, óxidos de fósforo y gases de hidruros atrapados) se recogen en un recipiente metálico situado debajo del reactor vertical. Para la limpieza final se emplea un vacío de alta eficiencia.

Otra operación con potencial de exposición química es la limpieza de la trampa del reactor. Para efectuarla se rascan las piezas de grafito de la cámara superior, que tienen una corteza de todos los subproductos ya mencionados más cloruro de arsénico. El procedimiento de rascado genera polvo y se ejecuta en una extracción localizada para reducir la exposición de los operadores. La tubería de salida del proceso, que contiene todos los subproductos más humedad que forma un residuo líquido, se abre para verter los desechos en un recipiente metálico. Se emplea vacío HEPA para limpiar las partículas de polvo que puedan haberse desprendido durante la transferencia de las piezas de grafito y de la subida y bajada de la campana de vidrio, que expulsa partículas sueltas.

Condensación de vapores de sustancias químicas organometálicas

La MOCVD está muy extendida en la preparación de dispositivos III-V. Además de los gases de hidruros empleados como materiales fuente en otros sistemas de CVD (p. ej., arsina y fosfina), en los sistemas MOCVD se usan también alternativas líquidas menos tóxicas (p. ej., butilarsina y butilfosfina terciarias), junto con otros tóxicos como alquilos de cadmio y mercurio (Content 1989; Rhoades, Sands y Mattera 1989; Roychowdhury 1991).

Mientras que la VPE consiste en el proceso de condensación del material de un compuesto, la MOCVD se refiere a las fuentes de sustancia química iniciales utilizadas en el sistema. Dos sustancias químicas son las empleadas: haluros y metalorgánicos. El proceso de VPE antes descrito es un proceso con haluro. En la zona caliente se forma un haluro del grupo III (galio), y en la zona fría se deposita un compuesto III-V. En el proceso metalorgánico del GaAs, se dosifica el trimetilgalio introducido en la cámara de reacción junto con arsina, o una alternativa líquida menos tóxica como la butilarsina terciaria, para formar arseniuro de galio. Un ejemplo de reacción típica de MOCVD es:



Hay otras sustancias químicas que se utilizan en el proceso por MOCVD de los LED. Los organometálicos utilizados como elementos del grupo III son el trimetilgalio (TMGa), el trietilgalio (TEGa), el TM indio, TE indio y TM aluminio. En el

proceso se utilizan también gases hidruros: 100 % AsH_3 y 100 % PH_3 . Las impurezas aplicadas en el proceso son: dimetil zinc (DMZ), bis-ciclopentadienil magnesio y seleniuro de hidrógeno (H_2Se). Estos materiales reaccionan a baja presión en la cámara de reacción en atmósfera de H_2 . La reacción produce capas epitaxiales de AlGaAs , AlInGaP , InAsP y GaInP . Esta técnica se ha venido utilizando en la fabricación de láseres de semiconductores y dispositivos de comunicación ópticos, como transmisores y receptores de fibra óptica. El proceso AlInGaP se emplea para producir LED muy brillantes.

De manera semejante a como ocurre en el proceso de VPE, la limpieza del reactor y de las piezas de la MOCVD impone desafíos al proceso y a los higienistas industriales, en especial si en el proceso se utilizan grandes cantidades de PH_3 concentrado. La eficiencia de "agrietado" de estos reactores no es tan elevada como la de los reactores de VPE. Se genera una cantidad significativa de fósforo, que origina peligro de incendio. En el procedimiento de limpieza se emplean peróxido de hidrógeno/hidróxido de amonio diluidos en distintas partes de estos reactores, lo que supone un peligro de explosión si, por error del operador, se emplea una solución concentrada en presencia de un catalizador de metal.

Fabricación de dispositivos

La oblea de GaAs con una capa de GaAsP que ha crecido por una técnica epitaxial sobre su superficie superior se somete a la secuencia de operaciones para fabricación del dispositivo.

Depósito de nitruro

Se efectúa una CVD de nitruro de silicio (Si_3N_4) a alta temperatura en un horno de difusión estándar. Las fuentes gaseosas son silano (SiH_4) y amoníaco (NH_3), transportados por gas nitrógeno.

Proceso fotolitográfico

El proceso estándar de fotoprotección, alineación/exposición, revelado y grabado se utiliza como en el procesamiento de los dispositivos de silicio (véase la sección sobre litografía en el artículo "Fabricación de semiconductores de silicio").

Grabado húmedo

Se emplean diversas mezclas de soluciones ácidas húmedo-químicas en baños de plástico instalados en estaciones de grabado con ventilación localizada, algunos provistos de sistemas de suministro laminar con filtrado HEPA montados en dirección vertical. Los principales ácidos empleados son sulfúrico (H_2SO_4), fluorhídrico (HF), clorhídrico (HCl) y fosfórico (H_3PO_4). Como en el proceso de fabricación del silicio, se usa peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con ácido sulfúrico, y el hidróxido de amonio (NH_4OH) permite un grabado cáustico. También se usa una solución de cianuro (sódico o potásico) para grabar aluminio. Pero el grabado con cianuro va quedando anticuado a medida que se desarrollan otros mordientes para este proceso. Como alternativa al grabado húmedo, se utiliza un proceso de grabado con plasma e incineración. Las configuraciones de reactor y los gases reaccionantes son muy similares a los utilizados en el proceso de fabricación de dispositivos de silicio.

Difusión

Se efectúa una difusión de una fuente sólida de diarseniuro de zinc en una ampolla cerrada dentro de un horno de difusión de vacío a la temperatura de 720 °C. con ayuda del gas portador N_2 . Como impurezas se usan arsénico y arseniuro de zinc. Se pesan en una vitrina de manipulación con guantes, de la misma manera que el sustrato.

Metalización

Se realiza una evaporación inicial de aluminio con ayuda de un evaporador de haz de electrones. Después del decapado trasero, se lleva a cabo una última etapa de evaporación de oro mediante un evaporador de filamento.

Aleación

El paso final de aleación se ejecuta en un horno de difusión a baja temperatura en una atmósfera inerte de nitrógeno.

Decapado trasero

El decapado trasero se hace para eliminar materiales depositados (GaAsP , Si_3N_4 , etc.) de la cara posterior de la oblea. Las obleas se montan con cera en una placa de bruñidora y se pulen en húmedo con una pasta de sílice coloidal. Se retira después la cera mediante decapado en húmedo de las obleas con un disolvente orgánico en una estación de grabado químico húmedo con ventilación localizada. Otra alternativa al pulimentado húmedo es el pulimentado en seco, que utiliza "arena" de óxido de aluminio.

Se utilizan numerosos protectores y disolventes de protectores, que suelen contener ácido sulfónico (ácido dodecilbenzeno sulfónico), ácido láctico, hidrocarburos aromáticos, naftaleno y catecol. Algunos disolventes de protectores contienen etanoato de butilo, ácido acético y éster de butilo. Se usan protectores y disolventes de protectores tanto negativos como positivos, en función del producto elaborado.

Prueba final

Como en el procesamiento de dispositivos de silicio, los circuitos LED terminados se comprueban por ordenador y se marcan (véase "Fabricación de semiconductores de silicio"). Se efectúa la inspección final, seguida del ensayo eléctrico de las obleas para marcar las pastillas defectuosas. A continuación se utiliza una sierra húmeda para separar las pastillas individuales, que se envían a montaje.

INSTALACION DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO Y ORDENADORES

Michael E. Williams

Tarjetas de cableado impreso

Las tarjetas de cableado impreso (PWB) son el marco de interconexiones eléctricas y la estructura física que mantiene juntos los distintos componentes electrónicos de una tarjeta de circuito impreso. Las categorías principales de PWB son de una sola cara, de doble cara, multicapa y flexible. La complejidad y los requisitos de espacio de unas tarjetas que cada vez son más densas y pequeñas han exigido que las dos caras de la tarjeta se cubran con circuitos subyacentes. Las tarjetas de una sola cara cumplían los requisitos de las primeras calculadoras y de los dispositivos sencillos de la electrónica de consumo, pero los ordenadores portátiles tipo agenda, los sistemas digitales de ayuda personal y los sistemas personales de música han impuesto las PWB de doble cara y multicapa. El proceso de modelado de las PWB es en esencia un proceso fotolitográfico que comprende el depósito selectivo y la eliminación de capas de materiales sobre un sustrato aislante que al final constituye el "cableado" eléctrico que se graba o deposita sobre la tarjeta de cableado impreso.

Las tarjetas multicapa contienen dos o más piezas de material aislante con un circuito que se apila y une entre sí. Se establecen conexiones eléctricas de una cara a otra, y con el circuito de la capa interior, por orificios taladrados que después se plaquean

Tabla 83.9 • Proceso de PWB: aspectos ambientales, de higiene y de seguridad.

Etapas fundamentales del proceso	Aspectos de salud y seguridad	Aspectos ambientales
Preparación del material		
Compra de láminas específicas, material de entrada y cartón de soporte cortado a la medida	Diseño asistido por ordenador—riesgos ergonómicos y de pantallas de PVD	Ninguno
Diagrama del proceso asistido por ordenador		
Apilar y sujetar		
Los paneles recubiertos de cobre se apilan con el material de entrada y con el cartón de soporte; se taladran agujeros y las espigas se sujetan.	Ruido durante el taladrado; partículas del taladrado que contienen cobre, plomo, oro y resina epoxi/fibra de vidrio	Residuos en partículas (cobre, plomo, oro y resina epoxi/fibra de vidrio)—reciclados o recuperados
Taladrar		
Máquinas de taladrar de control numérico (N/C)	Ruido durante el taladrado; partículas del taladrado que contienen cobre, plomo, oro y resina epoxi/fibra de vidrio	Residuos en partículas (cobre, plomo, oro y resina epoxi/fibra de vidrio)—reciclados o recuperados
Desbarbar		
Hacer pasar los paneles taladrados por cepillos o rueda abrasiva	Ruido durante el desbarbado; partículas que contienen cobre, plomo, oro y resina epoxi/fibra de vidrio	Residuos en partículas (cobre, plomo, oro y resina epoxi/fibra de vidrio)—reciclados o recuperados
Electrolisis en cobre		
Añadir capa delgada de cobre por los agujeros (proceso multietapa)	Inhalación y exposición dérmica a detergentes, acondicionadores, mordientes, catalizadores—H ₂ SO ₄ , H ₂ O ₂ , éteres de glicol, KMnO ₄ , NH ₄ HF ₂ , paladio, SnCl ₂ , CuSO ₄ , formaldehído, NaOH	Vertidos en desagües—ácidos, cobre, productos cáusticos, fluoruros; emisiones a la atmósfera—gases ácidos, formaldehído
Formar imagen		
Protector de película seca—fotopolímero sensible a UV	Inhalación y exposición dérmica a protectores, reveladores y decapantes—protectores a base de goma con disolventes; Na ₃ PO ₄ y K ₂ CO ₃ ; cloruro cúprico (Cl ₂ gas), monoetanol amina (MEA)	Emisiones a la atmósfera—disolventes (COVs), gases ácidos, MEA; líquidos—residuales
Protector impreso en pantalla—emulsión sensible a la luz		
Protector líquido—protectores líquidos fotosensibles		
Recubrimiento del patrón		
Limpieza	Inhalación y peligros dérmicos derivados de la limpieza, cobreado o recubrimiento de estaño/estaño y plomo y decapado en bastidor—H ₃ PO ₄ , H ₂ SO ₄ ; H ₂ SO ₄ y CuSO ₄ ; ácido fluorbórico y Sn/Pb; concentrado de HNO ₃	Emisiones a la atmósfera—gases ácidos; vertidos en desagües—ácidos, fluoruros, metales (cobre, plomo y estaño)
Recubrimiento de cobre		
Recubrimiento de estaño/plomo		
Decapado en bastidor		
Arranque, grabado, arranque		
Arranque del protector	Inhalación y peligros dérmicos del arranque del protector; grabado alcalino o arranque del cobre—monoetanol amina (MEA); NH ₄ OH; NH ₄ Cl/NH ₄ OH o NH ₄ HF ₂	Emisiones a la atmósfera—MEA, amoníaco, fluoruros; efluentes en agua—amoníaco, fluoruros, metales (cobre, plomo y estaño), compuestos del protector
Grabado alcalino		
Arranque del cobre		
Máscara de soldadura		
Tinta epoxi —impresión de pantalla	Inhalación y peligros dérmicos del prelavado; tintas epoxi y portadores de disolventes; reveladores—H ₂ SO ₄ ; epiclorhidrina + bisfenol A, éteres de glicol (basados en PGMEA); butirolactona gamma.	Emisiones a la atmósfera—gases ácidos, éteres de glicol (COVs); residuos—disolventes, tintas epoxi
Películas secas —laminadas en la PWB	luz UV del proceso de endurecimiento	
Tinta epoxi líquida fotosensible		
Recubrimiento por soldadura		
Nivelación de soldadura	Inhalación y peligros dérmicos del fundente, productos de la descomposición y restos de soldadura de plomo/estaño—éteres de glicol diluidos+ <1% HCl y <1% HBr; aldehídos, HCl, CO; plomo y estaño	Emisiones a la atmósfera—éteres de glicol (COV), gases ácidos, aldehídos, CO; residuos—soldadura de plomo/estaño, fundente
Dorado y niquelado		
	Inhalación y peligros dérmicos de ácidos, metales y cianuros—H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , NiSO ₄ , cianuro de potasio y oro	Emisiones a la atmósfera—gases ácidos, cianuros; emisiones en agua—ácidos, cianuros, metales; residuos—cianuros, metales
Rotulación de componentes		
Serigrafía	Inhalación y peligros dérmicos de tintas epoxi y portadores de disolventes—disolventes basados en éteres de glicol, epiclorhidrina + bisfenol A	Emisiones a la atmósfera—éteres de glicol (COVs) residuos — tintas y disolventes (pequeñas cantidades)
Endurecimiento en horno		

Cl₂ = gas cloro; CO = monóxido de carbono; COVs = compuestos orgánicos volátiles; CuSO₄ = sulfato de cobre; H₂O₂ = peróxido de hidrógeno; H₂SO₄ = ácido sulfúrico; H₃PO₄ = ácido fosfórico; HBr = ácido bromhídrico; HCl = ácido clorhídrico; HNO₃ = ácido nítrico; K₂CO₃ = carbonato potásico; KMnO₄ = permanganato potásico; Na₃PO₄ = fosfato sódico; NH₄Cl = cloruro amónico; NH₄OH = hidróxido amónico; NiSO₄ = sulfato de níquel; Pb = plomo; Sn = estaño; SnCl₂ = cloruro de estaño; UV = ultravioleta.

con cobre. El sustrato aislante más extendido es el formado por láminas de fibra de vidrio (laminado de epoxi/fibra de vidrio). Otros materiales empleados son el vidrio (con poliimidias, Teflon o resinas de triacina) y papel recubierto de resina fenólica. En Estados Unidos, las tarjetas laminadas se clasifican por sus propiedades ignífugas; por las de perforado, punzonado y mecanizado; por la absorción de humedad; por las propiedades químicas y de resistencia al calor, y por la rigidez mecánica (Sober 1995). El FR-4 (sustrato de resina epoxi y tejido de vidrio) está muy difundido para aplicaciones de alta tecnología.

El proceso real de PWB consta de numerosas etapas y una amplia variedad de agentes químicos. La Tabla 83.9 ilustra un proceso multicapa típico y los aspectos de SSA asociados a este proceso. Las diferencias principales entre una tarjeta de una cara y otra de doble cara es que la de una sola cara empieza por el revestimiento con cobre de una cara de la materia prima y omite el paso de plating químico con cobre. La tarjeta de doble cara estándar tiene una máscara soldada sobre cobre desnudo y se platea por los orificios; la tarjeta tiene contactos recubiertos de oro y una inscripción. La mayoría de las PWB son tarjetas multicapa, que son de doble cara con capas internas que han sido fabricadas y embutidas dentro de la montura laminada y después procesadas por un método casi idéntico al de una tarjeta de doble cara.

Montaje de tarjetas de circuito impreso

El montaje de tarjetas de circuito impreso (PCB) comprende la fijación firme de componentes electrónicos en la PWB mediante soldadura de plomo/estaño (en una máquina de soldadura por ola o aplicada en forma de pasta y después fluidificada en un horno de baja temperatura) o resinas epoxi (endurecidas en un horno de baja temperatura). La PWB subyacente (de una sola cara, de doble cara, multicapa o flexible) determinará las densidades de componentes que pueden fijarse. Numerosos aspectos relativos a proceso y fiabilidad condicionan la selección de los procesos de montaje de PCB que se utilizarán. Los procesos tecnológicos principales son: tecnología de montaje total en superficie (SMT), tecnología mixta (incluye tanto SMT como plating a través de orificio (PTH)) y fijación en cara inferior. Lo normal en las instalaciones modernas de electrónica/ordenadores es que se utilice la tecnología mixta, en la que algunos componentes se montan en superficie y otros conectores/componentes se sueldan encima mediante la tecnología de orificio pasante o por fluidificado de soldadura. A continuación se describe un proceso "típico" de tecnología mixta, en el cual se aplica el montaje en superficie mediante sujeción con adhesivo, soldadura por ola y soldadura por fluidificación. Con la tecnología mixta, a veces es posible soldar por fluidificación componentes montados en superficie (SMC) por la cara superior de una tarjeta de doble cara y soldar por ola los SMC de la cara inferior. Este proceso es de particular utilidad cuando tienen que mezclarse en una misma tarjeta las tecnologías de montaje en superficie y de orificio pasante, que es la norma en la fabricación electrónica actual. El primer paso es montar los SMC en la cara superior de la tarjeta mediante la soldadura por fluidificación. A continuación se insertan los componentes a través de orificios. Entonces se invierte la tarjeta y los SMC de la cara inferior se montan con adhesivo en la tarjeta. El paso final es la soldadura por ola de los componentes sujetos a través de orificios y los SMC de la cara inferior.

Los principales pasos técnicos del proceso de tecnología mixta son:

- limpieza previa y posterior;
- aplicación de pasta de soldar y de adhesivo [(impresión y colocación de plantilla (SMT y PTH)];

- inserción de componentes;
- endurecimiento de adhesivo y fluidificación de soldadura;
- aplicación de fundente (PTH);
- soldadura por ola (PTH);
- inspección y retoque;
- prueba;
- reproceso y reparación;
- operaciones de apoyo—limpieza de plantillas.

A continuación se hace una breve exposición de las implicaciones medioambientales, de salud y seguridad importantes en cada etapa del proceso.

Limpieza previa y posterior

Las PWB comerciales se compran por lo general a un proveedor de PWB y ya han sido sometidas a una limpieza previa con agua desionizada (DI) para eliminar todos los contaminantes superficiales. Antes de que existiese la preocupación relativa al adelgazamiento de la capa estratosférica de ozono, el fabricante de dispositivos electrónicos hubiera empleado una sustancia empobrecedora de dicha capa, como un clorofluorcarbono (CFC), para la limpieza final o incluso para la limpieza previa. Al final del proceso de montaje de la PCB, era típico realizar una operación de "desengrase en vapor" con un clorofluorcarbono para eliminar residuos de fundente/soldadura por ola. Pero debido a los problemas de destrucción del ozono y de los estrictos controles reglamentarios sobre la producción de los CFC, en el proceso se introdujeron cambios que permitían omitir la limpieza de los conjuntos PWB terminados o efectuarla únicamente con agua DI.

Aplicación de pasta de soldar y adhesivo (impresión y colocación de plantilla) e inserción de componentes

La aplicación de pasta de soldar de plomo/estaño a la superficie de la PWB permite la fijación del componente de montaje superficial en la PWB y es una operación clave para el proceso de SMT. El material de soldadura actúa como enlace mecánico para la conducción eléctrica y térmica y como recubrimiento para protección superficial y refuerzo de la capacidad de soldadura. La pasta de soldar está compuesta en alrededor del 70 al 90 % (en peso o en volumen) de sustancia no volátil:

- aleación de plomo/estaño;
- mezcla de resinas modificadas (ácidos de la colofonia o colofonia algo activada);
- activadores (en el caso de productos "sin limpiar", mezclas de sales halogenadas y aminoácidos o sólo ácidos carboxílicos).

Los disolventes (sustancias volátiles) componen el resto del producto (lo habitual es una mezcla de alcohol y éter de glicol que está patentada).

La pasta de soldar se imprime mediante una plantilla, que es un patrón exacto del diseño superficial que se quiere añadir a la superficie de la PWB. La pasta de soldar se empuja por las aberturas de la plantilla hasta los lugares de destino en la PWB mediante un rodillo de goma que recorre con lentitud la plantilla. Esta se retira después y deja depósitos de pasta sobre los puntos adecuados de la tarjeta. Entonces se insertan los componentes en la PWB. Los principales peligros para la SSA están relacionados con la limpieza general y la higiene personal de los operadores que aplican la pasta de soldar a la superficie de la plantilla, limpian el rodillo y limpian las plantillas. La concentración de plomo en la pasta de soldar y la tendencia de la pasta de soldar seca a adherirse a la piel y a las superficies de trabajo del equipo/instalación exigen la utilización de guantes protectores, una buena limpieza de las superficies de trabajo, la eliminación segura de los materiales de limpieza contaminados (y su

manipulación en el medio ambiente) y una higiene personal estricta por parte de los operadores (p. ej., lavado de manos con jabón antes de comer, beber o aplicarse cosméticos). Los niveles de exposición por suspensión en el aire suelen ser inferiores al límite de detección del plomo, y si se aplica una buena limpieza general/higiene personal, las lecturas de plomo en la sangre se sitúan en los niveles de fondo.

La aplicación de adhesivos consiste en la distribución automática de pequeñas cantidades de una resina epoxi (la más corriente es una mezcla de bisfenol A y epiclohidrina) en la superficie de la PWB y luego en la "recogida y colocación" del componente y su inserción a través de la resina epoxi en la PWB. Los peligros para la SSA están relacionados sobre todo con los riesgos mecánicos para la seguridad derivados de las unidades de "recogida y colocación", que son conjuntos mecánicos automatizados, a las lanzaderas de componentes en la trasera de las unidades y al riesgo de lesión grave si no se dispone de protecciones adecuadas, células fotoeléctricas y cortacircuitos en piezas mecánicas.

Endurecimiento de adhesivo y fluidificación de soldadura

Los componentes que se sujetaron mediante impresión por plantilla o aplicación de adhesivo se llevan después por una cinta transportadora de altura fija a un horno en serie que "fija" la soldadura por fluidificación de la pasta de soldar a la temperatura aproximada de 200 a 400 °C. Los componentes fijados por el adhesivo epoxi también se hacen pasar por un horno que se encuentra corriente abajo de la fluidificación de soldadura y que suele funcionar de 130 a 160 °C. Los componentes disolventes de la pasta de soldar y la resina epoxi se hacen desaparecer durante el proceso de horneado, pero el componente de plomo/estaño no se volatiliza. En el conducto de escape del horno de fluidificación se depositarán residuos en forma de telaraña si no se usa un filtro de malla metálica que lo impida. A veces, las PWB pueden quedar atrapadas en el sistema de transporte y se tostarán en el horno, de donde saldrán olores desagradables.

Adición de fundente

Para formar una junta soldada fiable entre la superficie de la PWB y el conductor del componente, ambos deberán estar limpios de oxidación y así deberán permanecer incluso a las temperaturas elevadas del proceso de soldadura. Asimismo, la aleación fundida para soldar debe empapar las superficies de los metales que se unan. Ello significa que el fundente tiene que reaccionar con los óxidos metálicos y eliminarlos de las superficies que se van a unir, e impedir una nueva oxidación de las superficies limpias. También es preciso que los residuos sean no corrosivos o eliminables con facilidad. Los fundentes empleados en la soldadura de equipo electrónico se clasifican en tres amplias categorías, que se conocen en general como fundentes basados en colofonia, fundentes orgánicos o hidrosolubles y fundentes sintéticos eliminables con disolventes. Los fundentes más modernos, de bajo contenido en sólidos "que no necesitan limpieza" o de compuestos orgánicos no volátiles (CONV) pertenecen a la categoría segunda de los citados.

Fundentes basados en colofonia

Los fundentes basados en colofonia son los más utilizados en el sector de la electrónica como *fundentes de rociado* o *fundentes de espuma*. La unidad distribuidora del fundente puede formar parte del equipo de soldadura por ola o ser una unidad autónoma situada en la entrada de alimentación. En principio, los fundentes a base de colofonia tienen resina natural o colofonia, la resina transparente, de color ámbar, que se obtiene después de haber destilado la trementina de la oleoresina y de la resina de pinos. Después de recogida, se calienta y destila la resina para eliminar

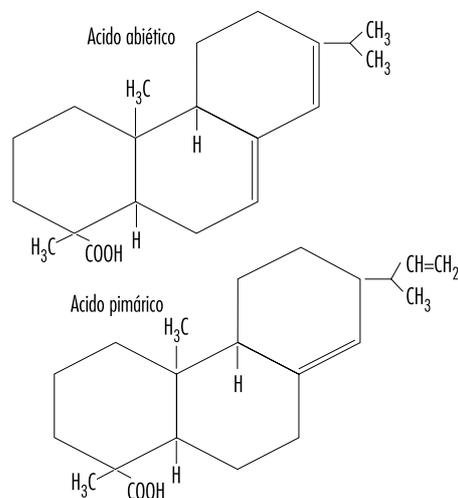
las partículas sólidas, de donde resulta una forma purificada del producto natural. Es un material homogéneo con un solo punto de fusión. La colofonia es una mezcla aproximada del 90 % de ácido resínico, que casi todo es ácido abiético (ácido orgánico insoluble en agua), y del 10 % de materiales neutros, como derivados del estilbeno y diversos hidrocarburos. En la Figura 83.6 se recoge la estructura química de los ácidos abiético y pimárico.

El agente activo es el ácido abiético, que a la temperatura de soldadura adquiere actividad química y ataca al óxido de cobre superficial de la PWB para formar abietato de cobre. Los fundentes a base de colofonia tienen tres componentes: el vehículo o disolvente, la colofonia y el activador. El disolvente es un mero vehículo del fundente. Para que sea eficaz, la colofonia debe aplicarse a la tarjeta en estado líquido. Para ello, la colofonia y el activador se disuelven en un sistema de disolventes, que suelen ser alcohol isopropílico (IPA) o mezclas de varios componentes alcohólicos (IPA, metanol o etanol). Luego, el fundente se distribuye por la superficie inferior de la PCB en forma de espuma por la adición de aire o nitrógeno, o se pulveriza en una mezcla "de bajo contenido de sólidos" que tiene un mayor contenido de disolventes. Estos últimos tienen tasas de evaporación diferentes, y es preciso añadir un diluyente a la mezcla fundente para mantener una composición adecuada del fundente. Las principales clases de fundentes a base de colofonia son: colofonia de actividad atenuada (RMA), que es el fundente de uso más generalizado, al que se añade un activador suave; y colofonia activa (RA), al que se ha añadido un activador más agresivo.

El principal peligro para la SSA de todos los fundentes basados en colofonia procede de la base de alcoholes del disolvente. Los peligros para la seguridad guardan relación con la inflamabilidad en almacenamiento y uso, la clasificación y manipulación como residuo peligroso, las emisiones a la atmósfera y los sistemas de tratamiento necesarios para eliminar los COV, además de los aspectos de higiene industrial relacionados con la inhalación y la exposición de la piel (dérmica). Cada uno de estos aspectos exige una estrategia de control diferente, la enseñanza y formación de los trabajadores y la conformidad de permisos/reglamentos (Association of the Electronics, Telecommunications and Business Equipment Industries 1991).

Durante el proceso de soldadura por ola, el fundente se calienta de 183 a 399 °C; y entre los productos generados que pasan al aire hay *aldehídos alifáticos*, como el formaldehído.

Figura 83. • Ácidos abiético y pimárico.



Muchos fundentes contienen también un *activador orgánico de clorhidrato de amino*, que ayuda a limpiar la zona que se suelda y que desprende ácido clorhídrico al calentarse. Otros componentes gaseosos son el benceno, tolueno, estireno, fenol, clorofenol y alcohol isopropílico. Además de los componentes gaseosos del fundente calentado, se genera una cantidad notable de partículas, cuyo tamaño va de 0,01 micras a 1,0 micra, conocidas como *humos de colofonia*. Se ha observado que estas partículas de material irritan los órganos respiratorios, y también los sensibilizan en individuos propensos (Hausen, Krohn y Budianto 1990). En el Reino Unido, las normas de contaminación atmosférica exigen que los niveles de los humos de colofonia estén controlados hasta los niveles más bajos obtenibles (Health and Safety Commission 1992). Además, la Conferencia americana de higienistas industriales del gobierno (ACGIH) ha establecido un límite umbral independiente para los productos de pirólisis de la soldadura con núcleo de colofonia de 0,1 mg/m³, medidos como formaldehído (ACGIH 1994). La Lead Industries Association, Inc. ha identificado la acetona, el alcohol metílico, los aldehídos alifáticos (medidos como formaldehído), el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, metano, etano, ácido abiético y ácidos diterpenos relacionados como productos típicos de la descomposición de la soldadura con núcleo de colofonia (Lead Industries Association 1990).

Fundentes orgánicos

Los fundentes orgánicos, llamados a veces fundentes intermedios o fundentes solubles en agua, son compuestos más activos que los fundentes a base de colofonia y menos corrosivos que los fundentes ácidos utilizados en los sectores de transformación de metales. Los compuestos generales activos de esta clase de fundentes pertenecen a uno de estos tres grupos:

- ácidos (p. ej., esteárico, glutámico, láctico, cítrico);
- halógenos (p. ej., clorhidratos, bromuros, hidrazina);
- amidas y aminas (p. ej., urea, trietanolamina).

Estos materiales y otras partes de la formulación, como los agentes tensoactivos que ayudan a reducir la tensión superficial de la soldadura, se disuelven en polietilenglicol, disolventes orgánicos, agua o por lo general en una mezcla de varias de estas sustancias. Los fundentes orgánicos deben considerarse corrosivos, pero su eliminación es fácil, basta con utilizar agua caliente.

Fundentes sintéticos activados (AS)

Mientras que los fundentes basados en colofonia son materiales sólidos disueltos en un disolvente, los fundentes AS suelen ser fórmulas totalmente líquidas (disolvente + fundente). El disolvente portador se elimina durante la fase de precalentamiento en la soldadura por ola, y deja un residuo húmedo y oleoso sobre la superficie de la PWB, que ha de limpiarse de inmediato tras la soldadura. El principal atributo de los fundentes AS es su capacidad para ser eliminados con disolventes adecuados, como los basados en fluorocarbono. Las restricciones en el uso de sustancias destructoras del ozono, como los fluorocarbonos (Freon TF, Freon TMS, etc.) que se utilizaban en la limpieza de esta clase de fundentes, han limitado en grado notable la utilización de estos últimos.

Fundentes de bajo contenido de sólidos "sin limpieza" o de compuestos orgánicos no volátiles

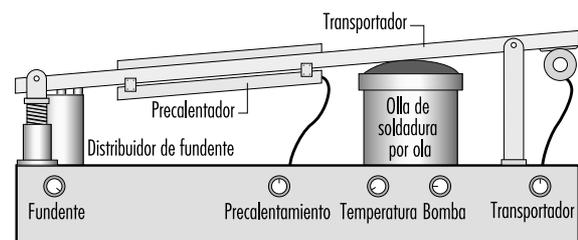
La necesidad de eludir, en la limpieza de residuos corrosivos o adheridos después de la soldadura, los disolventes de fluorocarbono ha generalizado el empleo de una nueva clase de fundentes que tienen una actividad similar a la de los fundentes RMA y un

contenido aproximado de sólidos del 15 %. El contenido de sólidos es una medida de su viscosidad y es igual a la relación entre fundente y disolvente. Cuanto menor es el contenido de sólidos, mayor es el porcentaje de disolvente. Cuanto mayor es el contenido de sólidos, más activo es el fundente y mayor es la necesidad de un paso de limpieza tras la soldadura. En el sector de electrónica es corriente utilizar fundentes bajos en sólidos (LSF) que no exigen el paso de limpieza final. Desde la perspectiva de emisiones al medio ambiente, los LSF eliminan la necesidad de desengrasar con vapor de fluorocarbono las tarjetas soldadas por ola, pero su elevado contenido de disolventes hace aumentar la cantidad de disolventes basados en alcoholes que se evaporan, lo que origina mayores niveles de COV. En Estados Unidos y en muchos otros países existe un control estricto de los niveles de emisión de COV al aire. Esta situación fue solucionada por la introducción de fundentes "sin limpieza", cuya base es el agua (en lugar de disolventes), pero que contienen activadores similares y colofonias fundentes. Los ingredientes activos principales se basan en el ácido dicarboxílico (2 a 3 %), y son típicamente los ácidos glutámico, succínico y adípico. También se incluyen *tensoactivos e inhibidores de corrosión* (en torno al 1 %), que dan un pH (acidez) de 3,0 a 3,5. Estos fundentes eliminan prácticamente las emisiones de COV a la atmósfera y otros peligros para la SSA asociados al empleo de fundentes a base de disolventes. Los productos de descomposición observados en fundentes basados en colofonia siguen siendo aplicables, y el pH débil no exige que el equipo de manipulación del fundente sea resistente a los ácidos. Algunas pruebas anecdóticas señalan problemas, dérmicos o respiratorios potenciales, debidos a los ácidos dicarboxílicos secos, que conservan una débil acidez y a los inhibidores de corrosión que pueden quedar como residuos en monturas de tarjetas, en carritos y en las superficies internas del equipo de soldadura por ola que utilice estos compuestos. También el agua componente de estos fundentes puede no evaporarse por completo antes de llegar a la olla de aleación fundida, lo que puede producir salpicaduras de soldadura caliente.

Soldadura por ola

La adición de fundente a la superficie inferior de la PWB puede lograrse por medio de un distribuidor de fundente situado en el interior de la unidad de soldadura por ola o por una unidad autónoma colocada a la entrada de la unidad de soldadura por ola. La Figura 83.7 recoge una representación esquemática de una unidad estándar de soldadura por ola con el distribuidor de fundente montado en su interior. Una y otra configuración utilizan el fundente en forma de espuma o de lluvia sobre la PWB.

Figura 83.7 • Esquema de una unidad de soldadura por ola.



Fuente: Clark 1985.

Pre calentamiento

Los portadores del fundente tienen que someterse a evaporación antes de efectuar la soldadura. Para lograrlo se emplean precalentadores de alta temperatura que eliminan los componentes líquidos. Los precalentadores utilizados son de dos tipos básicos: radiantes (varilla caliente) y volumétricos (aire caliente). Los calentadores radiantes son corrientes en Estados Unidos y pueden originar la ignición del fundente o disolvente en exceso o la descomposición de una PWB si ésta queda inmovilizada debajo del precalentador. Para capturar y evacuar los materiales disolventes/fundentes evaporados durante estas operaciones, se instala una ventilación de extracción localizada en el lado del distribuidor de fundente/precalentador de la unidad de soldadura por ola.

Soldadura

La aleación de soldar (por lo general un 63 % de estaño y un 37 % de plomo) está contenida en un depósito grande llamado *olla de soldadura*, que cuenta con un calentador eléctrico para mantener la aleación en estado líquido. Los calentadores consisten en un primer calentador potente para obtener la masa fundida inicial y un segundo suministro de calor más pequeño y regulado que controla la temperatura con un termostato.

La soldadura satisfactoria en la tarjeta exige que el diseño de los sistemas de olla de soldadura y bomba de recirculación suministren una "ola" continua de aleación fresca. Al soldar, la aleación pura se va contaminando con compuestos oxidados de plomo/estaño, con impurezas metálicas y productos de descomposición del fundente. Estos *desechos* se forman sobre la superficie de la aleación fundida, y cuanto más desechos se forman, mayor es la tendencia a su acumulación. Estos desechos son nocivos para el proceso de soldadura y la ola de soldadura. Si se forma una cantidad suficiente en la olla, pueden ser extraídos por la bomba de recirculación y causar la abrasión del impulsor. Los operadores de soldadura por ola deberán eliminar estos desechos de la ola cada cierto tiempo. Este proceso consiste en que el operador "espume" los desechos solidificados de la masa fundida y recoja los residuos para su recuperación/reciclado. El proceso de eliminación de desechos exige que el operador abra la puerta de acceso trasera (que suele tener una configuración de ala hundida) adyacente a la olla de soldadura y espume manualmente los desechos calientes. Durante este proceso, se liberan emisiones visibles de la olla que irritan mucho los ojos, nariz y garganta del operador. Este deberá vestir guantes térmicos, un mandil, gafas de seguridad y un blindaje facial con protección respiratoria [(para partículas de plomo/estaño, gases corrosivos (HCl) y aldehídos alifáticos (formaldehído)]. Desde el interior de la unidad de soldadura por ola se suministra ventilación por extracción localizada, pero es necesario sacar la olla de soldadura del armario principal para que el operador tenga acceso directo a ambos lados de la olla caliente. Una vez sacada la olla, el conducto local de evacuación que está montado en el armario queda inutilizado para eliminar los materiales liberados. Los principales peligros para la salud y la seguridad son: quemaduras térmicas de la soldadura caliente, la exposición respiratoria a materiales antes mencionada, lesiones de espalda por la manipulación de lingotes pesados de aleación y tambores de desechos y exposición a residuos de soldadura/partículas finas de plomo/estaño durante las actividades de mantenimiento.

Durante el proceso real de soldadura, las puertas de acceso están cerradas y el interior de la unidad de soldadura por ola está a una presión negativa debido a la ventilación de extracción localizada aplicada al fundente y a los laterales de la olla de soldadura. Esta ventilación y las temperaturas de trabajo de la olla de soldadura (que suele ser de 302 a 316 °C, justo por encima del punto de fusión de la aleación), consiguen hacer

Figura 83.8 • Carro de desechos con cubierta de vacío.



Fuente: Bliss Industries 1996.

mínima la formación de humos de plomo. La principal exposición a partículas de plomo/estaño se origina durante las actividades de eliminación de desechos y mantenimiento del equipo, agitación de los desechos en la olla, transferencia a la vasija de recuperación y limpieza de residuos de soldadura. Durante la operación de eliminación de desechos se forman partículas finas de plomo/estaño que pueden ser liberadas en el recinto de trabajo y en la zona donde respira el operador de la soldadura por ola. Se han ideado diversas estrategias de control técnico para reducir al mínimo estas exposiciones potenciales a partículas de plomo, incluida la incorporación de ventilación de extracción local en la vasija de recuperación (véase la Figura 83.8), uso de vacíos HEPA para limpieza de residuos y conductos de evacuación flexibles con brazos articulados para situar la ventilación en la olla caliente durante la eliminación de desechos. Debe prohibirse emplear escobas o cepillos para barrer residuos. También será preciso establecer prácticas rígidas de limpieza general y de higiene personal. Durante las operaciones de mantenimiento del equipo de soldadura por ola (que se efectúan con periodicidad semanal, mensual, trimestral y anual), los diversos componentes de la olla caliente se limpian en el propio equipo o se quitan y limpian en una campana de extracción localizada. Estas operaciones de limpieza pueden consistir en el rascado físico o la limpieza mecánica (con una taladradora eléctrica y un suplemento de cepillo de alambre) de la bomba y deflectores de soldadura. En el proceso de limpieza se generan niveles altos de partículas de plomo, por lo que debe llevarse a cabo en un recinto con ventilación de extracción localizada.

Inspección, retoque y prueba

Las funciones de inspección visual y retoque se realizan después de la soldadura por ola y consiste en utilizar lentes de aumento/luces próximas para la inspección final y el retoque de imperfecciones. La función de retoque puede exigir el uso de un soldador manual de *soldadura con barra* y aleación con núcleo de colofonia o la aplicación de una pequeña cantidad de fundente líquido y de hilo de aleación de plomo/estaño. Los humos que a simple vista salen de la soldadura con barra son productos de descomposición del fundente. Las pequeñas cantidades de perlas de plomo/estaño que no se adhieren a la junta soldada pueden representar un problema de limpieza general y

de higiene personal. Se debe disponer un ventilador adyacente a la estación de trabajo para ventilar por dilución general lejos de la zona donde respira el operador o un sistema extractor de humos más sofisticado que recoja los productos de la descomposición en la punta del soldador o adyacente a la operación. Los humos se llevan después a un sistema depurador del aire de salida que incorpore filtración HEPA de partículas y adsorción de gases en carbón activado para los aldehídos alifáticos y los gases de ácido clorhídrico. La eficacia de estos sistemas de ventilación depende mucho de las velocidades de recogida, de la proximidad al punto de generación de humos y de la ausencia de arrastres transversales en la superficie de trabajo. La prueba eléctrica de las PCB terminadas exige equipo y software de prueba especializados.

Reproceso y reparación

Con los resultados de la prueba de tarjetas, en las tarjetas defectuosas se localizan los fallos de componentes específicos, que son sustituidos. Este reproceso de las tarjetas pueden requerir soldadura a mano. Si es preciso sustituir componentes importantes de la PCB, como el microprocesador, se utiliza una *olla de soldadura para reproceso* para sumergir la porción de la tarjeta que aloja el componente o unión defectuosa en una olla de soldadura pequeña, quitar el componente y después insertar un componente nuevo en la tarjeta. Si el componente es más pequeño o se quita con más facilidad, se utiliza un sistema de *aire y vacío* que funde la aleación de la junta con aire caliente y aplica vacío para quitar la soldadura. La olla de soldadura para reproceso se aloja en un recinto con ventilación de extracción localizada que posee la velocidad de extracción suficiente para capturar los productos de descomposición del fundente formados cuando se cepilla la aleación líquida en la tarjeta y se hace el contacto de soldadura. Esta olla también forma desechos y exige disponer de equipo y procedimientos para eliminarlos (a escala mucho más pequeña). El sistema de aire y vacío no necesita estar en un recinto cerrado, pero la aleación de plomo/estaño eliminada tiene que manipularse como residuo peligroso y recuperarse/reciclarse.

Operaciones de apoyo—limpieza de plantillas

El primer paso del proceso de montaje de la PCB consistía en el uso de una plantilla que diera el patrón de los puntos de unión y permitiera distribuir por ellos la pasta de soldar de plomo/estaño. Lo normal es que las aberturas de la plantilla comiencen a obstruirse y haya que quitar los residuos de plomo/estaño de la pasta de soldar una vez en cada turno. Es habitual efectuar una limpieza previa en la pantalla impresora para retirar la contaminación gruesa de la tarjeta, y para ello la superficie de ésta se frota con una mezcla de alcohol diluido y trapos desechables. Para eliminar todos los residuos restantes, es preciso efectuar un proceso de limpieza húmeda. En un sistema similar a un lavavajillas grande, se emplea agua caliente (a 57 °C) y una solución química de aminas alifáticas diluidas (monoetanol amina) para eliminar de la plantilla por medios químicos la pasta de soldar. Se consigue así extraer de la tarjeta cantidades significativas de aleación de plomo/estaño que se depositan en la cámara de lavado o en la solución del efuente con agua. Este efuente exige filtración o combinación química del plomo y ajuste del pH relativo a las aminas alifáticas corrosivas (con ácido clorhídrico). Los sistemas limpiadores de plantillas más modernos, de circuito cerrado, utilizan la misma solución de lavado hasta que se agota. La solución es transferida a una unidad de destilación, y las sustancias volátiles se destilan hasta que se forma un residuo semilíquido. Este residuo se manipula después como residuo peligroso contaminado con plomo/estaño.

Proceso de montaje de ordenadores

Cuando la PCB final está montada, se transfiere a la operación de montaje de sistemas para su incorporación al producto final, que es el ordenador. Esta operación suele exigir mano de obra intensiva, y en ella las partes componentes que se montarán han de ser transportadas a los puestos de trabajo individuales sobre carritos colgantes a lo largo de la línea de montaje mecanizada. Los principales peligros para la salud y la seguridad se refieren al movimiento de materiales y al colgado (horquillas elevadoras, elevación manual), a las implicaciones ergonómicas del proceso de montaje (recorrido del movimiento, fuerza de inserción necesaria para "poner" componentes, instalación de tornillos y conectores) y el embalaje final, embalaje termoplástico y expedición finales. Un proceso típico de montaje de ordenadores comprende:

- preparación de chasis/caja;
- inserción de PCB (tarjeta madre e hija);
- inserción de componentes principales (unidad de disco flexible, de disco duro, fuente de alimentación, unidad de CD-ROM);
- montaje de indicadores (sólo portátiles);
- inserción de ratón y teclado (sólo portátiles);
- cableado, conectores y altavoces;
- montaje de cubierta superior;
- carga del software;
- prueba;
- reproceso;
- carga de batería (sólo portátiles) y embalado;
- embalaje termoplástico.

Las únicas sustancias químicas que pueden utilizarse en el proceso de montaje son las de limpieza final de la caja del ordenador o monitor. Se suele emplear una solución diluida de alcohol isopropílico y agua o una mezcla de limpiadores comerciales (p. ej., Simple Green—una solución diluida de butil cello-solve y agua).

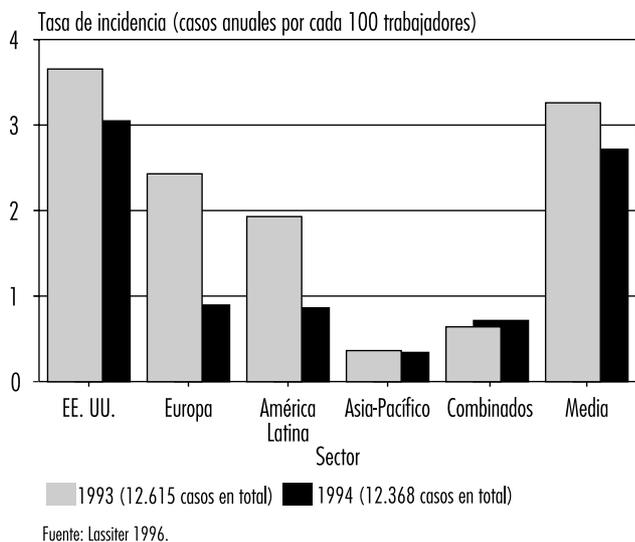
EFFECTOS SOBRE LA SALUD Y PAUTAS PATOLOGICAS

Donald V. Lassiter

Al ser un sector emergente, la fabricación de semiconductores se ha considerado a menudo como el epitome del lugar de trabajo de alta tecnología. Debido a los estrictos requisitos de fabricación asociados a la producción de múltiples capas de circuitos electrónicos con dimensiones del orden de micras sobre obleas de silicio, el ambiente de sala limpia se ha convertido en sinónimo del lugar de trabajo de este sector. Como algunos de los gases de hidruros empleados en la fabricación de semiconductores (p. ej., arsina, fosfina) se reconocieron pronto como sustancias químicas muy tóxicas, la tecnología de control de la exposición a la inhalación ha sido siempre un componente importante de la fabricación de obleas. Los trabajadores en semiconductores se aíslan más aún del proceso de producción con ropa especial que cubre todo el cuerpo (p. ej., monos), gorros, guardas de zapatos y, muchas veces, mascarillas (o incluso dispositivos suministradores de aire). Desde el punto de vista práctico, las pretensiones de la empresa de obtener productos de gran pureza han derivado también en la protección de los trabajadores contra la exposición.

Además de la ropa de protección personal, en todo el sector de semiconductores se utilizan sistemas muy perfeccionados de ventilación y vigilancia de los posibles productos químicos/gases del aire para detectar fugas de vapores disolventes tóxicos, ácidos y gases hidruros en partes por millón (ppm) o menos.

Figura 83.9 • Distribución de las tasas de incidencia de lesiones y enfermedades profesionales por áreas mundiales, 1993 y 1994.



Aunque desde el punto de vista histórico el sector ha experimentado frecuentes evacuaciones de trabajadores de las salas de fabricación de obleas a consecuencia de fugas reales o supuestas de gases o disolventes, esos episodios de evacuación se han vuelto raros porque las lecciones aprendidas se han aplicado al diseño de sistemas de ventilación, a la manipulación de gases/sustancias químicas tóxicas y a sistemas cada vez más complejos de vigilancia del aire con muestreo continuo. Pero el valor monetario creciente de las obleas de silicio individuales (junto con unos diámetros en aumento), que pueden contener docenas de microprocesadores o dispositivos de memoria, puede originar un estrés mental a los trabajadores que han de manipular contenedores de estas obleas durante los procesos de fabricación. En un estudio sobre trabajadores de semiconductores se obtuvieron pruebas de tal estrés (Hammond y cols. 1995; Hines y cols. 1995; McCurdy y cols. 1995).

El sector de semiconductores tuvo su comienzo en Estados Unidos, que tiene mayor número de trabajadores en el sector de semiconductores (alrededor de 225.000 en 1994) que ningún otro país (BLS 1995). No obstante, resulta difícil obtener estimaciones válidas de empleo internacional en este sector porque los trabajadores de semiconductores se agrupan con los de "fabricación de equipo eléctrico/electrónico" en las estadísticas de la mayoría de las naciones. A consecuencia de los controles técnicos extremadamente estrictos que se necesitan para fabricar dispositivos semiconductores, es más probable que los puestos de trabajo de semiconductores (es decir, salas limpias) sean comparables, en casi todos los aspectos, en todo el mundo. Este conocimiento, junto con los requisitos oficiales de EE.UU. para recoger todas las lesiones y enfermedades significativas relacionadas con el trabajo, hace que la experiencia con éstas en los trabajadores de semiconductores de EE.UU. sea muy pertinente a escala nacional e internacional. Dicho con sencillez, en este momento hay pocas fuentes internacionales de información y datos interesantes en relación con la experiencia en seguridad e higiene de los trabajadores de semiconductores aparte de la encuesta anual de lesiones y enfermedades profesionales que realiza el Bureau of Labor Statistics (BLS) de Estados Unidos.

En Estados Unidos, que ha recopilado datos sobre lesiones y enfermedades profesionales en todos los sectores desde 1972, la frecuencia de las lesiones y enfermedades relacionadas con el trabajo entre los trabajadores de semiconductores ha sido de las más bajas de todos los sectores de fabricación. Pero se ha manifestado la preocupación de que pueda haber efectos más sutiles sobre la salud en los trabajadores de semiconductores (LaDou 1986), aunque no se hayan documentado.

Se han celebrado varios simposios relativos a la evaluación de las tecnologías de control en el sector de semiconductores, y varias de las actas de los simposios tratan de asuntos medioambientales y de problemas de seguridad e higiene de los trabajadores (ACGIH 1989, 1993).

Algunos datos sobre lesiones y enfermedades profesionales en la comunidad internacional de fabricación de semiconductores se han deducido de una encuesta especial realizada en 1995, que comprendía casos comunicados en los años 1993 y 1994. Los datos de esta encuesta se resumen a continuación.

Lesiones y enfermedades profesionales en trabajadores de semiconductores

En relación con los datos estadísticos internacionales sobre lesiones y enfermedades profesionales entre trabajadores de semiconductores, los únicos datos comparables parecen ser los deducidos de una encuesta de las operaciones de fabricación multinacional de semiconductores realizada en 1995 (Lassiter 1996). Los datos recogidos en esta encuesta se referían a las operaciones internacionales de fabricantes norteamericanos de semiconductores en los años 1993-94. Algunos de los datos de la encuesta incluían operaciones distintas de la fabricación de semiconductores (p. ej., fabricación de ordenadores y unidades de disco), aunque todas las empresas participantes pertenecían al sector de la electrónica. Los resultados de esta encuesta se presentan en las Figuras 83.9 y 83.10, que incluyen datos de la región Asia-Pacífico, Europa, América Latina y Estados Unidos. Cada caso se refería a una lesión o enfermedad relacionada con el trabajo que exigió tratamiento médico o pérdida o restricción del trabajo. Todas las tasas de incidencia de las figuras se han

Figura 83.10 • Distribución de las tasas de incidencia de lesiones y enfermedades profesionales con días de ausencia del trabajo por áreas mundiales, 1993 y 1994.

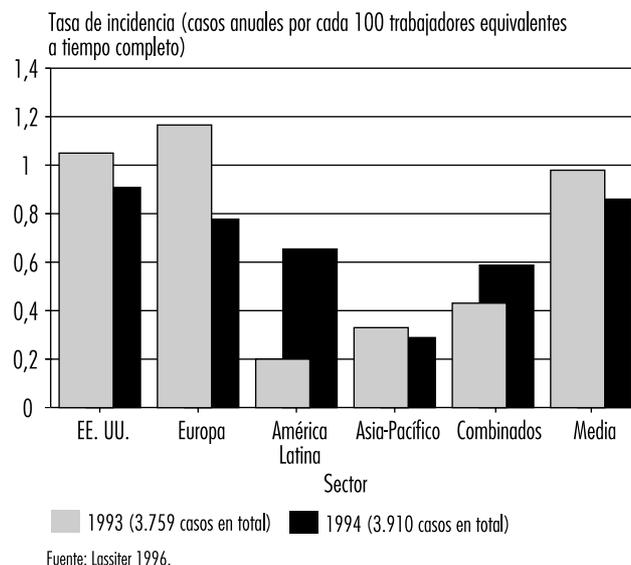
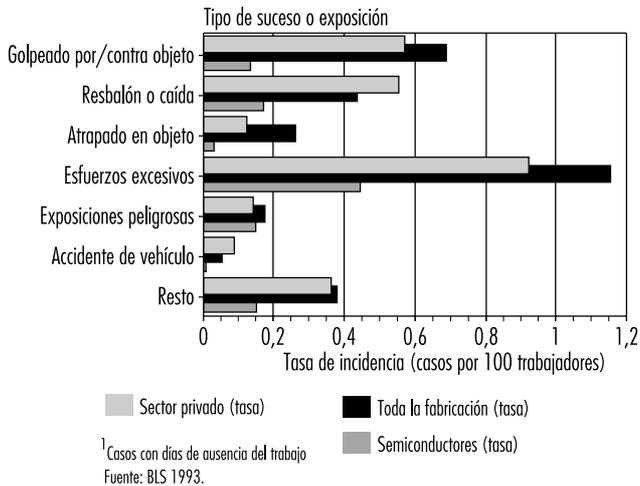


Figura 83.11 • Incidencia comparada de los casos de días de trabajo perdidos¹ por tipo de suceso o de exposición, 1993.



calculado en número de casos (o días de trabajo perdidos) por 200.000 trabajadores-hora al año. Si no se disponía del total de trabajadores-hora, se utilizaban estimaciones medias anuales de empleo. El denominador de 200.000 trabajadores-hora es igual a 100 trabajadores equivalentes a tiempo completo al año (en el supuesto de 2.000 horas de trabajo por trabajador y año).

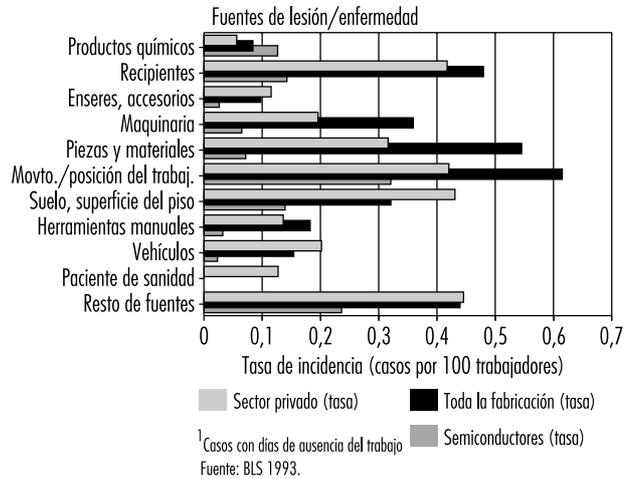
La Figura 83.9 refleja las tasas de incidencia de las lesiones y enfermedades profesionales en las distintas regiones del mundo en la encuesta de 1993-94. Las tasas de los países concretos no han sido representadas para garantizar la confidencialidad de las empresas participantes que fueron la única fuentes de datos en determinados países. Así pues, en algunos de los países de la encuesta los datos procedían de una sola instalación. En varios casos, las empresas combinaron todos los datos internacionales en una única estadística. Estos últimos datos aparecen en las Figuras 83.9 y 83.10 como "Combinados".

La incidencia anual de lesiones y enfermedades profesionales en todos los trabajadores de la encuesta internacional fue de 3,3 casos por cada 100 trabajadores (200.000 trabajadores-hora) en 1993 y 2,7 en 1994. Se comunicaron 12.615 casos en 1993 y 12.368 en 1994. La gran mayoría de los casos (12.130 en 1993) se tomaron de empresas de EE.UU. Estos casos se referían a unos 387.000 trabajadores en 1993 y a 458.000 en 1994.

La Figura 83.10 presenta las tasas de incidencia de los casos con días de trabajo perdidos que implicaron días de ausencia del trabajo. Las tasas de incidencia en 1993 y 1994 se basaron en alrededor de 4.000 casos con días de trabajo perdidos en cada uno de los 2 años de la encuesta internacional. El rango internacional/regional en tasas de incidencia de esta estadística fue el más estrecho de los medidos. La incidencia de casos con días de trabajo perdidos puede representar la estadística internacional más comparable en relación con la experiencia sobre seguridad e higiene de los trabajadores. La tasa de incidencia de los días de trabajo perdidos (días de ausencia del trabajo) estuvo en torno a 15,4 días de ausencia del trabajo por 100 trabajadores en cada uno de los 2 años.

Los únicos datos detallados conocidos que existen relativos a las características de los casos de lesiones y enfermedades de los trabajadores de semiconductores son los recopilados cada año en EE.UU. por el BLS, que recoge los casos con días de trabajo perdidos. Los casos que aquí se exponen fueron identificados por

Figura 83.12 • Incidencia comparada de los casos de días de trabajo perdidos¹ por causas de lesión o enfermedad, 1993.



el BLS en su encuesta anual del año 1993. Los datos obtenidos de estos casos aparecen en las Figuras 83.11 a 83.14. Cada Figura compara la experiencia de casos con días de trabajo perdidos en el sector privado, en toda la fabricación y en la fabricación de semiconductores.

En la Figura 83.11 se compara la experiencia de casos con días de trabajo perdidos por los trabajadores de semiconductores norteamericanos durante 1993 en el sector privado y en toda la fabricación en relación con el tipo de caso o exposición. Las tasas de incidencia de casi todas las categorías de esta figura fueron mucho menores en los trabajadores del sector de semiconductores que en los del sector privado o todo el sector de fabricación. Los casos de esfuerzo excesivo en trabajadores de semiconductores fueron inferiores a la mitad de la tasa para

Figura 83.13 • Incidencia comparada de los casos de días de trabajo perdidos¹ por la naturaleza de la lesión o enfermedad, 1993.

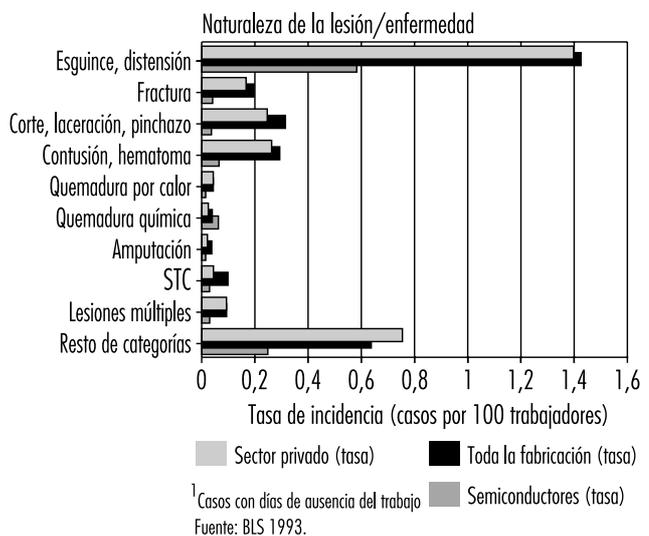
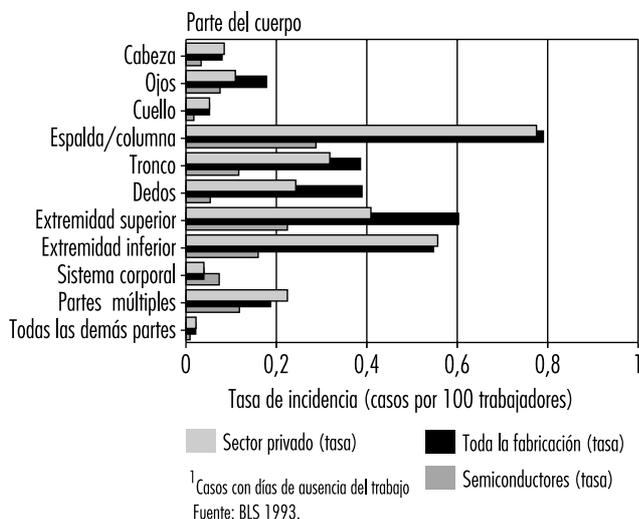


Figura 83.14 • Incidencia comparada de los casos de días de trabajo perdidos¹ según la parte del cuerpo afectada, 1993.



todos los trabajadores del sector de fabricación. La categoría de exposiciones peligrosas (asociada sobre todo a las exposiciones a sustancias químicas) fue equivalente en los tres grupos.

Las distribuciones comparativas de casos con días de trabajo perdidos en función de la fuente de lesión o enfermedad se presentan en la Figura 83.12. Las tasas de incidencia de los casos con días de trabajo perdidos en los trabajadores de semiconductores fueron inferiores a los del sector privado y de todo el sector de fabricación en todas las categorías de fuentes, excepto en los casos asociados a las exposiciones a sustancias químicas.

En la Figura 83.13 se comparan las tasas de incidencia de los casos con días de trabajo perdidos asociados a la naturaleza de la lesión o enfermedad entre los tres grupos. Las tasas en trabajadores de semiconductores fueron inferiores a la mitad de las tasas del sector privado y de todo el sector de fabricación en 1993. La incidencia de quemaduras químicas fue algo superior en los trabajadores de semiconductores, pero fue muy baja en los tres grupos de la comparación. La incidencia del síndrome de túnel carpiano (STC) en los trabajadores norteamericanos de semiconductores fue inferior a la mitad de la tasa de todo el sector de fabricación.

En la Figura 83.14 se ilustran la distribución y la incidencia de los casos con días de ausencia del trabajo en relación con la parte del cuerpo afectada. Aunque la incidencia de casos que afectaron a sistemas corporales fue baja en todos los grupos de la comparación, la tasa en trabajadores de semiconductores fue algo elevada. En todas las demás partes del cuerpo afectadas, fue mucho más baja la tasa en trabajadores de semiconductores que en los otros dos grupos de la comparación.

Estudios epidemiológicos sobre trabajadores de semiconductores

La preocupación por las posibles consecuencias para la salud reproductora asociadas al trabajo en empresas de semiconductores surgió en 1983, cuando una trabajadora de la instalación de semiconductores que Digital Equipment Corporation posee en Hudson, Massachusetts, indicó que le parecía haber observado un exceso de abortos entre las trabajadoras de las salas limpias de la instalación. Este alegación, junto con la ausencia de datos internos en la instalación, condujo a un estudio epidemiológico

realizado por la School of Public Health de la Universidad de Massachusetts (Umass) en Amherst. El estudio se inició en mayo de 1984 y terminó en 1985 (Pastides y cols. 1988).

Se observó un riesgo elevado de aborto en las zonas fotolito-gráfica y de difusión en comparación con las trabajadoras no expuestas de otras zonas de la instalación. Se consideró que el riesgo relativo de 1,75 no era estadísticamente significativo ($p < 0,05$), aunque el riesgo relativo de 2,18 observado en las trabajadoras de las zonas de difusión sí era significativo. La publicación del estudio de la UMass condujo a que todo el sector de semiconductores solicitara la realización de un estudio más extenso que validase los hallazgos observados y determinase su extensión y las causas posibles.

La Semiconductor Industry Association (SIA) de Estados Unidos patrocinó un estudio más amplio que fue realizado por la Universidad de California en Davis (UC Davis) a partir de 1989. El estudio de la UC Davis fue proyectado para probar la hipótesis de que la fabricación de semiconductores iba asociada al aumento del riesgo de aborto en las trabajadoras de fabricación de obleas. La población del estudio se seleccionó entre 14 empresas que representaban 42 centros de producción de 17 estados. El mayor número de centros (que representaban a casi la mitad de las trabajadoras del estudio) estaba en California.

El estudio de la UC Davis constaba de tres componentes diferentes: un componente transversal (McCurdy y cols. 1995; Pocekay y cols. 1995); un componente de cohorte histórica (Schenker y cols. 1995), y un componente prospectivo (Eskenazi y cols. 1995). En cada uno de estos estudios era capital la evaluación de la exposición (Hines y cols. 1995; Hammond y cols. 1995). El componente de evaluación de la exposición asignaba trabajadoras a un grupo de exposición relativa (es decir, alta exposición, baja exposición, etc.).

En el componente histórico del estudio, se determinó que el riesgo relativo de las trabajadoras de fabricación, en comparación con las de no fabricación, era de 1,45 (es decir, un 45 % más de riesgo de aborto). El grupo de máximo riesgo identificado en el componente histórico del estudio fue el de las mujeres que trabajaban en operaciones de fotolitografía o grabado. Las mujeres que realizaban operaciones de grabado experimentaban un riesgo relativo de 2,15 ($RR=2,15$). Además, se observó una relación dosis-respuesta en las mujeres que trabajaban con cualquier fotoprotector o revelador en relación con el aumento del riesgo de aborto. Estos datos apoyaban la existencia de una asociación dosis-respuesta para éteres de etilenglicol (EGE), pero no para éteres propilenglicol (PGE).

Aunque en el componente prospectivo del estudio de la UC Davis se observó un aumento del riesgo de aborto en las trabajadoras de fabricación de obleas, los resultados carecían de significación estadística (p inferior a 0,05). Un pequeño número de embarazos redujo de modo significativo la potencia del componente prospectivo del estudio. El análisis por exposición a agentes químicos indicaba el aumento del riesgo para las mujeres que trabajaban con monoetil éter etilenglicol, pero sólo se basaba en 3 embarazos. Un hallazgo importante fue el respaldo general, sin ninguna contradicción, de los resultados del componente histórico.

El componente transversal del estudio indicó un aumento de los síntomas respiratorios superiores sobre todo en los grupos de trabajadoras de hornos de difusión y película delgada. Un hallazgo interesante fue el de los evidentes efectos protectores de diversos controles técnicos relacionados con la ergonomía (p. ej., reposapiés y el uso de un asiento regulable para reducir lesiones de espalda).

En las mediciones del aire efectuadas en las fábricas de obleas se halló que la mayoría de las exposiciones a disolventes fueron

inferiores al 1 % de los límites de exposición permisibles (PEL) establecidos por la administración de EE. UU.

Un estudio epidemiológico independiente (Correa y cols. 1996) fue efectuado por la Universidad de John Hopkins (JHU) sobre un grupo de trabajadoras de semiconductores de IBM Corporation en 1989. La tasa global de abortos espontáneos observada en el estudio de JHU que incluía trabajadoras de sala limpia fue del 16,6 %. El riesgo relativo de aborto espontáneo en trabajadoras de sala limpia con la máxima exposición potencial a éteres de etilenglicol fue de 2,8 IC (95 % = 1,4-5,6).

Comentario de los estudios epidemiológicos sobre la reproducción en trabajadoras de semiconductores

Es notable la coincidencia de los estudios epidemiológicos en el alcance y semejanza de sus resultados. Todos ellos han producido hallazgos similares. Cada estudio documentó un exceso de riesgo de aborto espontáneo en las trabajadoras de fabricación de obleas de semiconductores. Dos de los estudios (JHU y UC Davis) pueden indicar una asociación causal con las exposiciones a éteres de glicol basados en etileno. El estudio de la UMass encontró que el grupo de fotolitografía (expuesto a éter de glicol) tenía menos riesgo que el grupo de difusión, que carecía de exposición documentada a éter de glicol. Si bien estos estudios señalan un aumento del riesgo de abortos espontáneos en las trabajadoras de fabricación de obleas, la causa de ese exceso de riesgo no está clara. El estudio de la JHU no documentó un papel significativo de los éteres de glicol, y el estudio de la UC Davis sólo indicó una relación marginal de los éteres de glicol (mediante el modelado de exposiciones y prácticas de trabajo comunicadas) con los efectos en la reproducción. En ambos estudios se realizó un seguimiento escaso o nulo para determinar las exposiciones a éteres de glicol. Después de concluidos estos estudios, el sector de semiconductores comenzó a cambiar de los éteres de glicol de la serie del etileno a sustitutos como éteres de glicol de las series de lactato de etilo y propileno.

Conclusión

Según los mejores datos disponibles en relación con la incidencia anual de lesiones y enfermedades profesionales, los trabajadores de semiconductores están sujetos a menos riesgo que los de otros sectores de fabricación o de todo el sector privado (incluidos muchos sectores de no fabricación). En el ámbito internacional, parece que los datos estadísticos de lesiones y enfermedades profesionales asociados a casos con días de trabajo perdidos pueden ser un indicador bastante fiable de la experiencia mundial en materia de seguridad e higiene de los trabajadores de semiconductores. El sector ha patrocinado varios estudios epidemiológicos independientes en su intento de hallar respuestas a preguntas sobre consecuencias en la salud reproductora relacionadas con el empleo en el sector. Aunque no se ha establecido una asociación definitiva entre los abortos espontáneos observados y las exposiciones a éteres de glicol a base de etileno, el sector ha comenzado a utilizar disolventes de fotoprotectores alternativos.

● CUESTIONES AMBIENTALES Y DE SALUD PUBLICA

Corky Chew

Visión general del sector

El sector de la electrónica, comparado con otros, se ha considerado "limpio" en cuanto a sus efectos sobre el medio ambiente. No obstante, las sustancias químicas utilizadas en la fabricación

de partes y componentes electrónicos, y los residuos generados, crean problemas medioambientales importantes que han de ser abordados a escala global por el tamaño del sector de la electrónica. Los residuos y subproductos derivados de la fabricación de tarjetas de cableado impreso (PWB), tarjetas de circuito impreso (PCB) y semiconductores son campos de interés en los que el sector de electrónica ha actuado con firmeza en los aspectos de prevención de la contaminación, tecnología de depuración y técnicas de reciclado/recuperación.

En la actualidad, el incentivo de controlar la huella medioambiental de los procesos electrónicos se ha trasladado en gran medida del acento medioambiental al ámbito económico. A causa de los costes y responsabilidades asociados a residuos y emisiones peligrosas, el sector de la electrónica ha implantado y desarrollado estrictos controles ambientales que han reducido en gran medida los efectos de sus subproductos y residuos. Además, la sector de la electrónica ha tomado la iniciativa de incorporar objetivos, herramientas y técnicas medioambientales en la conciencia de sus empresas. Ejemplos de este enfoque favorecedor son la prohibición de los CFC y de los compuestos perfluorados y el desarrollo de alternativas "respetuosas del medio ambiente", así como el reciente interés por el "diseño para el medio ambiente" en el desarrollo de productos.

La fabricación de las PWB, PCB y semiconductores exige utilizar gran variedad de sustancias químicas, de técnicas y equipo de fabricación especiales. La peligrosidad asociada a estos procesos de fabricación obliga a la gestión adecuada de los subproductos químicos, residuos y emisiones para garantizar la seguridad de los trabajadores del sector y la protección del medio ambiente en las comunidades donde radiquen las industrias.

Las Tablas 83.10, 83.11 y 83.12 presentan un esbozo de los subproductos y residuos claves que se generan en la fabricación de las PWB, PCB y semiconductores. Además, las tablas presentan los principales tipos de efectos medioambientales y los medios aceptados en general para la mitigación y control de la corriente de residuos. Los residuos que se generan afectan sobre todo a las aguas residuales industriales o al aire, o se convierten en residuos sólidos.

Los siguientes son los medios aceptados en general para mitigar las emisiones en el sector de PWB, PCB y semiconductores. Las opciones de control variarán en función de las posibilidades técnicas, de las disposiciones oficiales y de los componentes/concentraciones específicas de la corriente de residuos.

Control de las aguas residuales

Precipitación química

La precipitación química es el método generalmente utilizado en la eliminación de partículas o metales solubles de los efluentes de aguas residuales. Como los metales no experimentan degradación natural y son tóxicos a concentraciones bajas, es esencial eliminarlos de las aguas residuales industriales. Los metales sólo pueden eliminarse de las aguas residuales por medios químicos, puesto que no son muy solubles en agua; sus solubilidades dependen del pH, de la concentración del metal, del tipo de metal y de la presencia de otros iones. Lo normal es que las aguas residuales exijan ajustar el pH al valor adecuado para lograr la precipitación del metal. Es necesario añadir sustancias químicas a las aguas residuales si se quiere alterar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión. Los agentes de precipitación más empleados son la cal, la sosa cáustica y los sulfuros. Los agentes de precipitación facilitan la eliminación de metales disueltos y en suspensión por coagulación, sedimentación u oclusión en un precipitado.

Tabla 83.10 • PWB, generación y controles de residuos.

Etapas del proceso	Residuos/materiales peligrosos	Efectos ambientales	Controles ¹
Preparación del material	Ninguna	Ninguna	Ninguno
Apilar y sujetar	Metales pesados/preciosos	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
	Resina epoxi/fibra de vidrio	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
Taladrar	Metales pesados/preciosos	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
	Resina epoxi/fibra de vidrio	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
Desbarbar	Metales pesados/preciosos	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
	Resina epoxi/fibra de vidrio	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
Recubrimiento electrolítico con cobre	Metales	Aguas residuales	Precipitación química
	Corrosivos/cáusticos	Aguas residuales/aire	Neutralización del pH/depuración del aire (adsorción)
	Fluoruros	Aguas residuales	Neutralización química
Formar imagen	Disolventes	Aire	Adsorción, condensación o incineración
	Corrosivos	Aire	Depuración del aire (adsorción)
	Disolventes	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar/incinerar
Recubrimiento del patrón	Corrosivos	Aguas residuales/aire	Neutralización del pH/depuración del aire (adsorción)
	Metales	Aguas residuales	Precipitación química
	Fluoruros	Aguas residuales	Precipitación química
	Amoníaco	Aire	Depuración del aire (adsorción)
Arranque, grabado, arranque	Metales	Aguas residuales	Precipitación química
	Disolventes	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar/incineración
	Corrosivos	Aire	Depuración del aire (adsorción)
Máscara de soldadura	Disolventes	Aire	Adsorción, condensación o incineración
	Disolventes/tintas epoxi	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar/incineración
	Disolventes	Aire	Adsorción, condensación o incineración
Recubrimiento por soldadura	Corrosivos	Aire	Depuración del aire (adsorción)
	Soldadura de plomo/estaño, fundente	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
	Corrosivos	Aire	Depuración del aire (adsorción)
Dorado	Corrosivos	Aguas residuales	Neutralización del pH
	Metales	Aguas residuales	Precipitación química
	Metales	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar
	Disolventes	Aire	Adsorción condensación o incineración
Rotulación de componentes	Disolventes/tintas	Residuos sólidos ²	Reciclar/recuperar/incinerar

1. El empleo de inspecciones de mitigación depende de los límites de descarga en el emplazamiento específico.

2. Un residuo sólido es cualquier material desechado, con independencia de su estado.

Un resultado de la precipitación química de aguas residuales es la acumulación de lodos. Por lo tanto, se han desarrollado procesos de desecación para disminuir el peso de los lodos mediante centrifugadoras, prensas con filtro, filtros o lechos de secado. Los lodos desecados resultantes pueden destinarse después a la incineración o al vertedero.

Neutralización del pH

El pH (la concentración de iones hidrógeno o acidez) es un parámetro importante para conocer la calidad de las aguas residuales industriales. Los efectos adversos de pH extremos en las aguas naturales y en las operaciones de tratamiento de aguas residuales hacen necesario ajustar el pH de las aguas residuales industriales antes de descargarlas de la instalación de fabricación. El tratamiento tiene lugar en una serie de depósitos vigilados en relación con la concentración de iones hidrógeno en el efluente de aguas residuales. Suele utilizarse ácido clorhídrico o sulfúrico como neutralizante corrosivo, mientras que se emplea hidróxido de sodio como neutralizante cáustico. El agente neutralizante se introduce dosificado en el efluente de aguas residuales para ajustar el pH de la descarga a su valor deseado.

A menudo es preciso ajustar el pH antes de aplicar otros procesos de tratamiento de aguas residuales. Tales procesos son

la precipitación química, la oxidación/reducción, la adsorción en carbón activado, la disolución y el intercambio de iones.

Control de los residuos sólidos

Los materiales se consideran residuos sólidos si se abandonan o desechan por eliminación; son quemados o incinerados, o acumulados, almacenados o tratados antes o en lugar de ser abandonados (US Code of Federal Regulation 40, Sección 261.2). Los residuos peligrosos presentan en general una o más de las características siguientes: inflamabilidad, poder de corrosión, reactividad, toxicidad. En función de las características del material/residuo peligroso, son distintos los medios empleados para controlar la sustancia. La incineración es un tratamiento corriente para los residuos de disolventes y metales generados durante la fabricación de PWB, PCB y semiconductores.

Incineración

La incineración o destrucción térmica se ha convertido en una opción popular de gestionar los residuos inflamables y tóxicos. En muchas circunstancias, los residuos inflamables (disolventes) se emplean como fuente de combustible (mezcla de combustibles) en incineradores térmicos y catalíticos. La incineración adecuada de residuos disolventes y tóxicos proporciona una oxidación

Tabla 83.11 • PCB, generación y controles de residuos.

Pasos del proceso	Residuos/materiales peligrosos	Efectos ambientales	Controles
Limpieza	Metales (plomo)	Aguas residuales	Neutralización del pH, precipitación química, reciclar plomo
Pasta de soldar	Pasta de soldar (plomo/estaño)	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar
Aplicación de adhesivo	Pegamentos epoxi	Residuos sólidos	Incineración
Inserción de componentes			Las cintas, carretes y tubos de plástico se reciclan/reutilizan
Endurecimiento de adhesivo y reflujo de soldadura			
Fundente	Disolvente (fundente IPA)	Residuos sólidos	Reciclar
Soldadura con ola	Metal (escorias de soldadura)	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar
Inspección y retoque	Metal (recortes de alambre de plomo)	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar
Pruebas	Placas equipadas desechadas	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar (placas fundidas para recuperar metales preciosos)
Reprocesos y reparación	Metal (escorias de soldadura)	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar
Operaciones de apoyo— limpieza de matrices	Metal (plomo/estaño/pasta de soldar)	Residuos sólidos	Reciclar/incinerar

completa del combustible y convierte el material combustible en dióxido de carbono, agua y cenizas, por lo que no deja tras sí ninguna responsabilidad relativa a residuos peligrosos residuales. Los medios corrientes de incineración son los incineradores térmicos y catalíticos. La selección del método de incineración depende de la temperatura de combustión, de las características del combustible y del tiempo de permanencia. Los incineradores térmicos trabajan a altas temperaturas y se usan en general con compuestos halogenados. Entre los tipos de incineradores térmicos se encuentran los de horno giratorio, de inyección líquida, los de hogar fijo, los de lecho fluidificado y otros incineradores de diseño moderno.

Los incineradores catalíticos oxidan los materiales combustibles (p. ej., los COV) por inyección de una corriente de gas caliente a través de un lecho de catalizador. La forma del lecho catalizador hace máxima su área superficial de manera que,

al inyectar una corriente de gas caliente a través del lecho del catalizador, la combustión puede efectuarse a una temperatura menor que en la incineración térmica.

Emisiones atmosféricas

La incineración se utiliza también para controlar las emisiones a la atmósfera. Se emplean asimismo los métodos de absorción y adsorción.

Absorción

La absorción consiste en el lavado de las emisiones corrosivas a la atmósfera mediante el paso del contaminante a través de un líquido no volátil que lo disuelve (p. ej., agua). El efluente del proceso de absorción suele descargarse en un sistema de tratamiento de aguas residuales, donde se somete al ajuste del pH.

Tabla 83.12 • Generación y controles de residuos en la fabricación de semiconductores.

Pasos del proceso	Residuos/materiales peligrosos	Efectos ambientales	Controles
Litografía/grabado	Disolventes	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar/incinerar
	Metales	Aguas residuales	Precipitación química
	Corrosivos/cáusticos	Aguas residuales	Neutralización del pH
	Corrosivos	Aire	Depuración del aire (absorción)
	Ácido sulfúrico	Residuos sólidos	Reciclar/reproceso
	Fluoruros	Aguas residuales	Precipitación química
Oxidación	Disolventes	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar/incinerar
	Corrosivos	Aguas residuales	Neutralización del pH
Dopado	Gas tóxico (arsina, fosfina, diborano, trifluoruro de boro, tricloruro de boro, etc.)	Aire	Sustitución por fuentes líquidas/incineración (posquemador)
	Metales (arsénico, fósforo, boro)	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar
Deposición química de vapores	Metales	Residuos sólidos	Incineración
	Corrosivos	Aguas residuales	Neutralización del pH
Metalización	Disolventes	Residuos sólidos	Incineración
	Metales	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar
Montaje y pruebas	Disolventes	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar/incineración
	Metales	Residuos sólidos	Reciclar/recuperar
Limpieza	Corrosivos	Aguas residuales	Neutralización del pH
	Fluoruros	Aguas residuales	Precipitación química

Tabla 83.13 • Matriz de necesidades prioritarias.

Necesidad prioritaria (orden decreciente de prioridad)	Enfoque	Tareas seleccionadas
Uso más eficiente, regeneración y reciclado de sustancias químicas húmedas peligrosas	<p>Extender la vida de baños de plaeado electrolítico y químico.</p> <p>Desarrollar sustancias y procesos químicos de reciclado o regeneración local.</p> <p>Eliminar formaldehídos de materiales y sustancias químicas.</p> <p>Promover reciclado y recuperación/regeneración en la instalación.</p>	<p>Investigar la extensión de baños.</p> <p>Investigar purificación/regeneración en línea.</p> <p>Investigar sustancias químicas alternativas.</p> <p>Modificar disposiciones oficiales para promover el reciclado.</p> <p>Mejorar la línea de producción en problemas de entrada/salida del baño.</p>
Reducir residuos sólidos generados por PWB, conductores y componentes desechados en la corriente de residuos.	<p>Desarrollar y promover el reciclado de PWB, conductores y componentes desechados.</p> <p>Desarrollar nuevas herramientas de control y rendimiento de procesos.</p> <p>Mejorar la soldabilidad de las PWB.</p>	<p>Desarrollar infraestructura de manipulación de material reciclado.</p> <p>Establecer mejores herramientas de control y evaluación de procesos utilizables por empresas pequeñas y medianas.</p> <p>Entregar placas siempre limpias y soldables.</p>
Establecer mejores relaciones con proveedores para reforzar el desarrollo y aceptación de materiales no contaminantes del medio ambiente.	Promover asociación entre proveedor, fabricante y cliente para implantar el empleo de materiales no contaminantes.	Desarrollar un sistema de gestión de materiales peligrosos clave para empresas de PWB medianas y pequeñas.
Reducir el efecto de utilizar materiales peligrosos en fabricación de PWB.	<p>Reducir el uso de soldadura de plomo cuando sea posible y/o reducir el contenido de plomo de la soldadura.</p> <p>Desarrollar alternativas al plaeado por soldadura, como protección de grabado.</p>	<p>Cambiar especificaciones para aceptar máscara de soldadura sobre cobre desnudo.</p> <p>Validar la calidad de las alternativas de recubrimiento de plomo.</p>
Usar procesos aditivos que sean competitivos con los existentes.	<p>Desarrollar tecnologías de materiales y procesos aditivos simplificadas rentables.</p> <p>Buscar fuentes y enfoques alternativos para las necesidades aditivas de equipo capital del proceso.</p>	Colaborar en proyectos para establecer nuevas tecnologías y procesos aditivos de dieléctricos y metalización.
Eliminar manchas de agujeros en fabricación de PWB.	Desarrollar resinas o sistemas de taladrado sin manchas.	<p>Investigar laminados y materiales preimpregnados alternativos.</p> <p>Desarrollar el empleo de láser y otros sistemas alternativos de taladrar.</p>
Reducir el consumo y vertido de agua.	<p>Desarrollar un sistema de optimización y reciclado en el uso de agua.</p> <p>Reducir el número de operaciones de limpieza en la fabricación de PWB.</p> <p>Eliminar la manipulación y preparación de piezas para reducir la repetición de limpieza.</p>	<p>Modificar especificaciones para reducir las exigencias de limpieza.</p> <p>Investigar métodos alternativos de manipulación de piezas.</p> <p>Cambiar o eliminar sustancias químicas que exijan limpieza.</p>

Fuente: MCC 1994.

Adsorción

Es la adherencia (por fenómenos físicos o químicos) de una molécula de gas a la superficie de otra sustancia, llamada adsorbente. La adsorción se utiliza en general para extraer disolventes de una fuente de emisión a la atmósfera. El carbón activado, la alúmina activada o el gel de sílice son adsorbentes muy utilizados.

Reciclado

Los materiales reciclables se utilizan, se reutilizan o se recuperan como ingredientes en un proceso industrial para hacer un producto. El reciclado de materiales y residuos es un medio no contaminante y económico de aprovechar con eficacia tipos específicos de corrientes de residuos, como metales y disolventes. Los materiales y residuos pueden reciclarse en la propia empresa, aunque también los mercados secundarios pueden aceptar materiales reciclables. La elección del reciclado como alternativa para deshacerse de los residuos tiene que evaluarse con criterios financieros, a la vista de la estructura normativa y de la tecnología disponible para reciclar los materiales.

Orientación futura

A medida que aumenta la exigencia de prevenir la contaminación y que el sector busca medios rentables para abordar el uso y

los residuos de los productos químicos, el sector de la electrónica tiene que evaluar nuevas técnicas y tecnologías que le permitan mejorar los métodos de gestionar los materiales peligrosos y la generación de residuos. El enfoque de "final del proceso" tiene que ser sustituido por el diseño de técnicas medioambientales, en que estos temas se consideren en el contexto del ciclo vital completo de un producto, que incluya: conservación del material; operaciones de fabricación eficientes; empleo de los materiales menos perjudiciales para el medio ambiente; reciclado, regeneración y recuperación de productos residuales, y multitud de otras técnicas que garanticen una menor repercusión medioambiental del sector de fabricación electrónica. Un ejemplo es la gran cantidad de agua que se utiliza en los numerosos lavados y otras etapas del proceso en el sector de la microelectrónica. En zonas con escasez de agua, esta situación obliga al sector a buscar alternativas. Pero es esencial cerciorarse de que la alternativa (p. ej., disolventes) no crea problemas medioambientales adicionales.

Como ejemplo de orientaciones futuras en el proceso PWB y PCB, la Tabla 83.13 presenta diversas alternativas para aplicar prácticas más favorables para el medio ambiente y preventivas de la contaminación. En la tabla se identifican las necesidades y enfoques prioritarios.

Referencias

- American National Standards Institute (ANSI). 1986. *Safety Standard for Industrial Robots and Industrial Robot Systems*. ANSI/RIA R15.06-1986. Nueva York: ANSI.
- ASKMAR. 1990. *Computer Industry: Critical Trends for the 1990's*. Saratoga, California: Electronic Trend Publications.
- Asom, MT, J Mosovsky, RE Leibenguth, JL Zilko, G Cadet. 1991. Transient arsine generation during opening of solid source MBE chambers. *J Cryst Growth* 112(2-3):597-599.
- Association of the Electronics, Telecommunications and Business Equipment Industries (EEA). 1991. *Guidelines on the Use of Colophony (Rosin) Solder Fluxes in the Electronics Industry*. Londres: Leichestor House EEA.
- Baldwin, DG, BW King, LP Scarpace. 1988. Ion implanters: Chemical and radiation safety. *Solid State Technology* 31(1):99-105.
- Baldwin, DG, JH Stewart. 1989. Chemical and radiation hazards in semiconductor manufacturing. *Solid State Technology* 32(8):131-135.
- Baldwin, DG, JR Rubin, MR Horowitz. 1993. Industrial hygiene exposures in semiconductor manufacturing. *SSA Journal* 7(1):19-21.
- Baldwin, DG, ME Williams. 1996. Industrial hygiene. En *Semiconductor Safety Handbook*, dirigido por JD Bolmen. Park Ridge, Nueva Jersey: Noyes.
- Baldwin, DG. 1985. Chemical exposure from carbon tetrachloride plasma aluminum etchers. *Extended Abstracts, Electrochem Soc* 85(2):449-450.
- Bauer, S, I Wolff, N Werner, P Hoffman. 1992a. Health hazards in the semiconductor industry, a review. *Pol J Occup Med* 5(4):299-314.
- Bauer, S, N Werner, I Wolff, B Damme, B Oemus, P Hoffman. 1992b. Toxicological investigations in the semiconductor industry: II. Studies on the subacute inhalation toxicity and genotoxicity of gaseous waste products from the aluminum plasma etching process. *Toxicol Ind Health* 8(6):431-444.
- Bliss Industries. 1996. *Solder Dross Particulate Capture System Literature*. Fremont, California: Bliss Industries.
- Bureau of Labor Statistics (BLS). 1993. *Annual Survey of Occupational Injuries and Illnesses*. Washington, DC: BLS, US Department of Labor.
- . 1995. *Employment and Wages Annual Averages, 1994*. *Bulletin*. 2467. Washington, DC: BLS, US Department of Labor.
- Clark, RH. 1985. *Handbook of Printed Circuit Manufacturing*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Cohen, R. 1986. Radiofrequency and microwave radiation in microelectronics industry. En *State of the Art Reviews—Occupational Medicine: The Microelectronics Industry*, dirigido por J LaDou. Filadelfia, Pensilvania: Hanley & Belfus, Inc.
- Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno (ACGIH). 1989. *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing*. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- . 1993. *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing II*. Cincinnati, Ohio: ACGIH.
- . 1994. *Documentation of Threshold Limit Value, Rosin Core Solder Thermal Decomposition Products, as Rosin Acids-Colophony*. Cincinnati, Ohio: ACGIH.
- Content, RM. 1989. Control methods for metal and metalloids in III-V materials vapor-phase epitaxy. En *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing*, dirigido por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- Coombs, CF. 1988. *Printed Circuits Handbook*, 3ª ed. Nueva York: McGraw-Hill Book Company.
- Correa A, RH Gray, R Cohen, N Rothman, F Shah, H Seacat, M Corn. 1996. Ethylene glycol ethers and risks of spontaneous abortion and subfertility. *Am J Epidemiol* 143(7):707-717.
- Crawford, WW, D Green, WR Knolle, HM Marcos, JA Mosovsky, RC Petersen, PA Testagrossa, GH Zeman. 1993. Magnetic field exposure in semiconductor cleanrooms. En *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing II*. Cincinnati, Ohio: ACGIH.
- Escher, G, J Weathers, B Labonville. 1993. Safety design considerations in deep-UV excimer laser photolithography. En *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing II*. Cincinnati, Ohio: Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno.
- Eskenazi B, EB Gold, B Lasley, SJ Samuels, SK Hammond, S Wright, MO Razor, CJ Hines, MB Schenker. 1995. Prospective monitoring of early fetal loss and clinical spontaneous abortion among female semiconductor workers. *Am J Indust Med* 28(6):833-846.
- Flipp, N, H Hunsaker, P Herring. 1992. Investigation of hydride emissions during the maintenance of ion implantation equipment. Presentado en la American Industrial Hygiene Conference de junio 1992, Boston—Paper 379 (no publicado).
- Goh, CL, SK Ng. 1987. Airborne contact dermatitis to colophony in soldering flux. *Contact Dermatitis* 17(2):89-93.
- Hammond SK, CJ Hines MF Hallock, SR Woskie, SAbdollahzadeh, CR Iden, E Anson, F Ramsey, MB Schenker. 1995. Tiered exposure assessment strategy in the Semiconductor Health Study. *Am J Indust Med* 28(6):661-680.
- Harrison, RJ. 1986. Gallium arsenide. En *State of the Art Reviews—Occupational Medicine: The Microelectronics Industry*, publicado por J LaDou Filadelfia, Pensilvania: Hanley & Belfus, Inc.
- Hathaway, GL, NH Proctor, JP Hughes, ML Fischman. 1991. *Chemical Hazards of the Workplace*, 3ª ed. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- Hausen, BM, K Krohn, E Budianto. 1990. Contact allergy due to colophony (VII). Sensitizing studies with oxidation products of abietic acid and related acids. *Contact Dermat* 23(5):352-358.
- Health and Safety Commission. 1992. *Approved Code of Practice—Control of Respiratory Sensitizers*. Londres: Health and Safety Executive.
- Helb, GK, RE Caffrey, ET Eckroth, QT Jarrett, CL Fraust, JA Fulton. 1983. Plasma processing: Some safety, health and engineering considerations. *Solid State Technology* 24(8):185-194.
- Hines, CJ, S Selvin, SJ Samuels, SK Hammond, SR Woskie, MF Hallock, MB Schenker. 1995. Hierarchical cluster analysis for exposure assessment of workers in the Semiconductor Health Study. *Am J Indust Med* 28(6):713-722.
- Horowitz, MR. 1992. Nonionizing radiation issues in a semiconductor R and D facility. Presentado en la American Industrial Hygiene Conference de junio 1992, Boston—Paper 122 (no publicado).
- Jones, JH. 1988. Exposure and control assessment of semiconductor manufacturing. *AIP Conf. Proc. (Photovoltaic Safety)* 166:44-53.
- LaDou, J (dir.). 1986. *State of the Art Reviews—Occupational Medicine: The Microelectronics Industry*. Filadelfia, Pensilvania: Hanley and Belfus, Inc.
- Lassiter, DV. 1996. Work injury and illness surveillance on an international basis. Acta de la Tercer Internacional ESH Conference, Monterrey, California.
- Leach-Marshall, JM. 1991. Analysis of radiation detected from exposed process elements from the krypton-85 fine leak testing system. *SSA Journal* 5(2):48-60.
- Lead Industries Association. 1990. *Safety in Soldering, Health Guidelines for Solderers and Soldering*. Nueva York: Lead Industries Association, Inc.
- Lenihan, KL, JK Sheehy, JH Jones. 1989. Assessment of exposures in gallium arsenide processing: A case study. En *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing*, dirigido por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- Maletskos, CJ, PR Hanley. 1983. Radiation protection considerations of ion implantation systems. *IEEE Trans on Nuclear Science* NS-30:1592-1596.
- McCarthy, CM. 1985. *Worker Exposure during Maintenance of Ion Implanters in the Semiconductor Industry*. Tesis de master, Universidad de Utah, Salt Lake City, Utah, 1984. Compilado en *Extended Abstracts, Electrochem Soc* 85(2):448.
- McCurdy SA, C Pocekay, KS Hammond, SR Woskie, SJ Samuels, MB Schenker. 1995. A cross-sectional survey of respiratory and general health outcomes among semiconductor industry workers. *Am J Indust Med* 28(6):847-860.
- McIntyre, AJ, BJ Sherin. 1989. Gallium arsenide: hazards, assessment, and control. *Solid State Technology* 32(9):119-126.
- Microelectronics and Computer Technology Corporation (MCC). 1994. *Electronics Industry Environmental Roadmap*. Austin, Texas: MCC.
- . 1996. *Electronics Industry Environmental Roadmap*. Austin, Texas: MCC.
- Mosovsky, JA, D Rainer, T Moses, WE Quinn. 1992. Transient hydride generation during III-semiconductor processing. *Appl Occup Environ Hyg* 7(6):375-384.
- Mueller, MR, RF Kunesh. 1989. Safety and health implications of dry chemical etchers. En *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing*, dirigido por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- O'Mara, WC. 1993. *Liquid Crystal Flat Panel Displays*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- PACE Inc. 1994. *Fume Extraction Handbook*. Laurel, Maryland: PACE Inc.
- Pastides, H, EJ Calabrese, DW Hosmer, Jr, DR Harris. 1988. Spontaneous abortion and general illness symptoms among semiconductor manufacturers. *J Occup Med* 30:543-551.
- Pocekay D, SA McCurdy, SJ Samuels, MB Schenker. 1995. A cross-sectional study of musculoskeletal symptoms and risk factors in semiconductor workers. *Am J Indust Med* 28(6):861-871.
- Rainer, D, WE Quinn, JA Mosovsky, MT Asom. 1993. III-V transient hydride generation. *Solid State Technology* 36(6):35-40.
- Rhoades, BJ, DG Sands, VD Matterna. 1989. Safety and environmental control systems used in chemical vapor deposition (CVD) reactors at AT&T—Microelectronics-Reading. *Appl Ind Hyg* 4(5):105-109.
- Rogers, JW. 1994. Radiation safety in semiconductors. Presentado en la Semiconductor Safety Association Conference de abril 1994, Scottsdale, AZ (no publicado).
- Rooney, FP, J Leavey. 1989. Safety and health considerations of an x-ray lithography source. En *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing*, publicado por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- Rosenthal, FS, S Abdollahzadeh. 1991. Assessment of extremely low frequency (ELF) electric and magnetic fields in microelectronics fabrication rooms. *Appl Occup Environ Hyg* 6(9):777-784.

- Roychowdhury, M. 1991. Safety, industrial hygiene, and environmental considerations for MOCVD reactor systems. *Solid State Technology* 34(1):36-38.
- Scarpace, L, M Williams, D Baldwin, J Stewart, D Lassiter. 1989. Results of industrial hygiene sampling in semiconductor manufacturing operations. En *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing*, dirigido por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- Schenker MB, EB Gold, JJ Beaumont, B Eskenazi, SK Hammond, BL Lasley, SA McCurdy, SJ Samuels, CL Saiki, SH Swan. 1995. Association of spontaneous abortion and other reproductive effects with work in the semiconductor industry. *Am J Indust Med* 28(6):639-659.
- Schenker, M, J Beaumont, B Eskenazi, E Gold, K Hammond, B Lasley, S McCurdy, S Samuels, S Swan. 1992. *Final Report to the Semiconductor Industry Association—Epidemiologic Study of Reproductive and Other Health Effects among Workers Employed in the Manufacture of Semiconductors*. Davis, California: Universidad de California.
- Schmidt, R, H Scheufler, S Bauer, L Wolff, M Pelzing, R Herzsuh. 1995. Toxicological investigations in the semiconductor industry: III: Studies on prenatal toxicity caused by waste products from aluminum plasma etching processes. *Toxicol Ind Health* 11(1):49-61.
- SEMATECH. 1995. *Silane Safety Transfer Document, 96013067 A-ENG*. Austin, Texas: SEMATECH.
- . 1996. *Interpretive Guide for SEMI S2-93 and SEMI S8-95*. Austin, Texas: SEMATECH.
- Semiconductor Industry Association (SIA). 1995. *World Semiconductor Sales Forecast Data*. San José, California: SIA.
- Sheehy, JW, JH Jones. 1993. Assessment of arsenic exposures and controls in gallium arsenide production. *Am Ind Hyg Assoc J* 54(2):61-69.
- Sober, DJ. 1995. *Selecting Laminates Using "Fitness for Use" Criteria, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Wade, R, M Williams, T Mitchell, J Wong, B Tusé. 1981. *Semiconductor industry study*. San Francisco, California: California Department of Industrial Relations, Division of Occupational Safety and Health.
- Otras lecturas recomendadas**
- Carlson, V. 1995. *Step-by-Step SMT—Design for Test—Part 2, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Corbett, RA. 1990. *Standard Handbook of Environmental Engineering*. Nueva York: McGraw-Hill Publishing Company.
- Crawford, TJ. 1995. *Step-by-Step SMT—Cleaning—Part 8, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Electronic Industries Association (EIA). 1995. *Electronic Market Data Book—Statistical Yearbook of the Electronics Industries*. Arlington, Virginia: EIA.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1995. *Profile of the Electronics and Computer Industry*. Washington, DC: US EPA, Office of Compliance Sector Notebook Project.
- Flatt, M. 1992. *Printed Circuit Board Basics: An introduction to the PCB Industry*. San Francisco, California: Miller Freeman Inc.
- Gilleo, K. 1995. *Step-by-Step SMT—Adhesives/epoxies and Dispensing—Part 5, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Ginsberg, G. 1989. *Surface Mount and Related Technologies*. Nueva York: Marcel Dekker, Inc.
- Gray RH, M Corn, R Cohen, A Correa, R Hakim, W Hou, F Shah, H Zauer. 1993. *Final Report: The Johns Hopkins University Retrospective and Prospective Studies of Reproductive Health Among IBM Employees in Semiconductor Manufacturing*. Baltimore, Maryland: Universidad Johns Hopkins.
- Howes, MJ, DV Morgan (dirs.). 1985. *Gallium Arsenide Materials, Devices and Circuits*. Nueva York: Wiley.
- Hutchins, CL. 1996. *Step-by-Step SMT—Rework and repair—Part 10, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Hwang, JS. 1995. *Step-by-Step SMT—Solder Materials—Part 3, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Hwang, JS. 1996. *Surface Mount Technology: 1980's vs. 1990's, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- ITM, Inc. 1995. *Step-by-Step SMT—Printing—Part 4, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Kear, FW. 1987. *Printed Circuit Assembly Manufacturing*. Nueva York: Marcel Dekker, Inc.
- Leow, YH, SK Ng, CL Goh. 1995. Allergic contact dermatitis from epoxy resin in Singapore. *Contact Dermat* 33(5):355-356.
- Manahan, SE. 1994. *Environmental Chemistry*, 6ª edición. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- Manziona, LT. 1990. *Plastic Packaging of Microelectronic Devices*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- Meridith S. 1993. Reported incidence of occupational asthma in the United Kingdom, 1989-90. *J Epidemiol Community Health* 47(6):459-463.
- Moreau, WM. 1988. *Semiconductor Lithography—Principles, Practices, and Materials*. Nueva York: Plenum.
- O'Mara, WC. 1993. *Liquid Crystal Flat Panel Displays*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- PACE Inc. 1994. *Environmental Health and Safety Hazards of Soldering*. Laurel, Maryland: PACE Inc.
- Parker, SP (dir.). 1988. *Encyclopedia of Electronics and Computers*, 2ª edición. Nueva York: McGraw-Hill.
- Prasad, R. 1995. *Step-by-Step SMT—Component Placement—Part 6, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Rooks, S and B Bolliger. 1995. *Step-by-Step SMT—Test/inspection—Part 9, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Ryssel, H, I Ruge. 1993. *Ion Implantation*. Nueva York: Wiley.
- Salmon, ER. 1987. *Encapsulation of Electronic Devices and Components*. Nueva York: Marcel Dekker.
- Semiconductor Industry Association (SIA). 1994. *The National Technology Roadmap for Semiconductors*. San José, California: SIA.
- . 1995. *Semiconductor Industry Comparative Annual Injury and Illness Rates*. San José, California: SIA.
- . 1995. *Semiconductor Industry Roadmap*. San José, California: SIA.
- Sherman, A. 1987. *Chemical Vapor Deposition for Microelectronics—Principles, Technology, and Applications*. Park Ridge, Nueva Jersey: Noyes.
- Tolliver, DL. 1988. *Handbook of Contamination Control in Microelectronics: Principles, Applications, and Technology*. Park Ridge: Nueva Jersey: Noyes.
- Ungers, LJ, JH Jones, AJ McIntyre, CR McHenry. 1985. Release of arsenic from semiconductor wafers. *Am Ind Hyg J* 46(8):416-420.
- Van Zant, P. 1990. *Microchip fabrication—A Practical Guide to Semiconductor Processing*, 2ª ed. Nueva York: McGraw-Hill.
- Warwick, M, P Hedges. 1996. Changes in reduced residue solder pastes, surface mount technology (SMT). En *SMT's Guide to Soldering*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.
- Williams, ME, DG Baldwin. 1995. *Semiconductor Industrial Hygiene Handbook*. Park Ridge, Nueva Jersey: Noyes.
- Willis, R. 1995. *Step-by-Step SMT—Soldering—Part 7, Surface Mount Technology (SMT)*. Libertyville, Illinois: IHS Publishing Group.