

# Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de semiconductores y otros componentes electrónicos

## Introducción

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de la práctica internacional recomendada para la industria en cuestión<sup>1</sup>. Cuando uno o más miembros del Grupo del Banco Mundial participan en un proyecto, estas Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad se aplican con arreglo a los requisitos de sus respectivas políticas y normas. Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para este sector de la industria deben usarse junto con el documento que contiene las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, en el que se ofrece orientación a los usuarios respecto de cuestiones generales sobre la materia que pueden aplicarse potencialmente a todos los sectores industriales. En el caso de proyectos complejos, es probable que deban usarse las guías aplicables a varios sectores industriales, cuya lista completa se publica en el siguiente [sitio web: http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines](http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines).

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad contienen los niveles y los indicadores de desempeño que generalmente

pueden lograrse en instalaciones nuevas, con la tecnología existente y a costos razonables. En lo que respecta a la posibilidad de aplicar estas guías a instalaciones ya existentes, podría ser necesario establecer metas específicas del lugar así como un calendario adecuado para alcanzarlas.

La aplicación de las guías debe adaptarse a los peligros y riesgos establecidos para cada proyecto sobre la base de los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del emplazamiento, tales como las circunstancias del país receptor, la capacidad de asimilación del medioambiente y otros factores relativos al proyecto. La decisión de aplicar recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas idóneas y con experiencia.

En los casos en que el país receptor tenga reglamentaciones diferentes a los niveles e indicadores presentados en las guías, los proyectos deben alcanzar los que sean más rigurosos. Si corresponde utilizar niveles o indicadores menos rigurosos en vista de las circunstancias específicas del proyecto, debe incluirse como parte de la evaluación ambiental del emplazamiento en cuestión una justificación completa y detallada de cualquier alternativa propuesta, en la que se ha de demostrar que el nivel de desempeño alternativo protege la salud humana y el medioambiente.

## Aplicabilidad

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de semiconductores y otros componentes

<sup>1</sup> Definida como el ejercicio de la aptitud profesional, la diligencia, la prudencia y la previsión que podrían esperarse razonablemente de profesionales idóneos y con experiencia que realizan el mismo tipo de actividades en circunstancias iguales o semejantes en el ámbito mundial. Las circunstancias que los profesionales idóneos y con experiencia pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, sin que la mención sea limitativa, diversos grados de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medioambiente, así como diversos niveles de factibilidad financiera y técnica.

electrónicos incluyen información relevante sobre los proyectos y las instalaciones para la fabricación de semiconductores y otros componentes electrónicos. No incluyen información sobre la extracción de materias primas, el ensamblaje de componentes generales, la fabricación de pantallas para el ensamblaje de componentes internos dentro de la estructura plástica o la producción de conectores estándares. El Anexo A contiene una descripción completa de las actividades industriales en este sector. Este documento está dividido en las siguientes secciones:

- Sección 1.0: Manejo e impactos específicos de la industria
- Sección 2.0: Indicadores y seguimiento del desempeño
- Sección 3.0: Referencias
- Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

## 1.0 Manejo e impactos específicos de la industria

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas a la fabricación de semiconductores y otros componentes electrónicos que tienen lugar durante la fase operacional, así como recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones sobre la gestión de las cuestiones de este tipo que son comunes a la mayoría de los grandes establecimientos industriales durante las etapas de construcción y de desmantelamiento.

### 1.1 Medio ambiente

Las cuestiones medioambientales en la fabricación de semiconductores y otros componentes electrónicos incluyen principalmente lo siguiente:

- Uso de materiales peligrosos y gestión de residuos
- Emisiones al aire
- Aguas residuales
- Consumo de energía
- Modificaciones generales del proceso

#### Materiales peligrosos y residuos

Casi todos los procesos de fabricación de semiconductores y otros componentes electrónicos generan residuos peligrosos o potencialmente peligrosos, como residuos de agua destilada (que contienen ácidos orgánicos), desechos de solventes y reveladores (por ejemplo, parafinas), residuos de soluciones de limpieza, lodos del tratamiento de aguas residuales, residuos de material con epoxi (fabricación de circuitos impresos [PCB] y de semiconductores), residuos de soluciones de cianuro

(galvanoplastia), y flujos de soldadura y residuos metálicos (circuitos impresos ensamblados [PCBA]).

Además de las medidas relevantes sobre gestión de materiales peligrosos que se señalan en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, las técnicas específicas de prevención de la contaminación incluyen modificaciones del proceso y sustituciones de elementos como las siguientes<sup>2</sup>:

- Modificaciones del proceso o del equipo, como<sup>3</sup>:
  - Regenerar los baños de grabado mediante filtración con carbón activo para eliminar los contaminantes orgánicos acumulados, lo que reduce el volumen de los baños de grabado por eliminar y reduce la necesidad de nuevas sustancias químicas;
  - Adoptar sistemas automatizados de cabinas de gas para controlar las fugas de gases de los cilindros, especialmente al cambiarlos;
  - Sustituir las soldaduras de plomo por aleaciones de estaño u otras soldaduras sin plomo;
- Sustitución o eliminación de materias primas—por ejemplo, sustitución de soluciones de grabado con cianuro (por grabado con oro en la industria de PCB) por ácido sulfúrico de cobre, sulfuro de oro y niquelado sin electricidad, sustituyendo los cromados con Cr VI por cromado con Cr III (fabricación de PCB, aunque el uso de baños de cromado es obsoleto);
- Segregar, separar y preparar las sustancias y los residuos peligrosos—por ejemplo, la segregación de los lodos de aguas residuales por metales contaminantes mejora la

<sup>2</sup> Se debe restringir o eliminar progresivamente el uso de plomo, mercurio, cadmio, cromo (Cr VI), polibromobifenilos y polibromodifenilos, de acuerdo con lo dispuesto por la Unión Europea (2003a y 2003b). Se ha eliminado progresivamente el uso de clorfluorocarbonos y tricloroetileno. Se están considerando restricciones del uso de sulfonatos de pefluorooctano mediante la enmienda de la Directiva 76/769/EEC del Consejo de la UE (COM/2005/0618 final - COD 2005/0244). World Semiconductor Council (WSC) y Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI) han adoptado medidas voluntarias para limitar el uso y los vertidos de sulfonatos de pefluorooctano.

<sup>3</sup> En el Anexo A se ofrece información adicional.

- recuperación de residuos; almacenamiento de productos químicos del grabado para segregarse las sustancias incompatibles, como los cianuros de los ácidos y los oxidantes de los combustibles;
- Recuperar y reciclar los metales, principalmente en los sectores de los semiconductores y los PCBA—por ejemplo, recuperación de cobre y metales preciosos mediante procesos electrolíticos; eliminación y recuperación del cobre y el estaño de las placas mediante precipitación electrolítica o química; recuperación del arsénico y el galio de los residuos de procesamiento con arseniuro de galio (GaAs) (mediante la separación térmica de los residuos sólidos del GaAs y la recuperación de los residuos del pulido con GaAs);
  - Reducción de los vertidos de sulfonatos de perfluorooctano (PFO) en la fabricación de semiconductores mediante la eliminación progresiva de los usos no esenciales de sustancias basadas en PFO, como algunas mezclas para el grabado para las que existen sustitutos. En el caso de los usos esenciales de PFO para los que no existan alternativas, como las tecnologías de onda más corta empleadas en la fabricación de semiconductores, se debe llevar a cabo una eliminación controlada de los residuos, especialmente cuando se trate de incineración<sup>4</sup>.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ocupan de la gestión de los materiales peligrosos. Las medidas específicas para este sector incluyen:

- Debe comprobarse regularmente que no haya fugas en las áreas de almacenamiento de sustancias químicas;

<sup>4</sup> Los PFO están en la lista de sustancias químicas con propiedades tóxicas, persistentes y bioacumulativas, y se está considerando por lo tanto su inclusión en la lista de contaminantes orgánicos persistentes (COP) del Convenio de Estocolmo. Como se ha indicado anteriormente, las asociaciones sectoriales (WSC y SEMI) han contraído un acuerdo global voluntario que describe la eliminación todos los usos, excepto los esenciales, de los PFO y requiere la incineración de todas las emisiones sólidas que contengan PFO. Este acuerdo puede consultarse en [http://www.sia-online.org/pre\\_stat.cfm?ID=294](http://www.sia-online.org/pre_stat.cfm?ID=294)

- Las conducciones subterráneas deben tener doble capa, con un sistema para detectar las fugas en la capa interior;
- Las conducciones para materiales peligrosos deben construirse con materiales compatibles y deben tener suficiente apoyo, estar claramente marcadas e instalarse con juntas de alta calidad. Las conducciones deben contar también con drenaje en la parte inferior, ventilación en la parte superior y válvulas de aislamiento, como máximo, cada 30 metros;
- Se deben emplear bandejas de contención de las fugas.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** tratan la gestión de los residuos sólidos y peligrosos. Algunas medidas para este sector incluyen: marcar claramente todos los residuos con propiedades peligrosas (como desechos de agua destilada, desechos de solventes, desechos de soluciones de limpieza, lodos del tratamiento de aguas residuales, desecho de material con epoxi y desecho de soluciones con cianuro, entre otras) y almacenarlos por separado de los residuos generales en zonas especiales y cerradas que sean resistentes a las sustancias químicas. El almacenamiento y la contención seguras son esenciales dada la elevada reactividad y toxicidad de los residuos y subproductos industriales, como se explica también más adelante en la sección sobre higiene y seguridad ocupacional.

## Emisiones al aire

Entre las principales emisiones preocupantes relacionadas con la fabricación de semiconductores y componentes electrónicos se encuentran los gases de efecto invernadero, y las sustancias tóxicas, reactivas y corrosivas (por ejemplo, vapores ácidos, dopantes, gases de limpieza y compuestos orgánicos volátiles

[VOC]), procedentes de los procesos de difusión, limpieza y electroplastia<sup>5</sup>.

Hay tres tipos de sistemas de reducción de las emisiones de gases tóxicos o peligrosos:

- Sistemas en el punto de uso (PDU) que son relativamente pequeños y normalmente dedicados a un único elemento del proceso. Estos sistemas pueden eliminar hasta el 99,99 por ciento de los gases efluentes. Por ejemplo, un purificador en el PDU puede reducir la arsina hasta menos de 50 ppm. Se utilizan seis tecnologías básicas para la reducción en el PDU de los contaminantes gaseosos y en partículas, incluidos los compuestos perfluorocarbonados (PFC):
  - Depuración húmeda en la fabricación de semiconductores, aunque con un margen limitado de tratamiento. Los depuradores húmedos también se utilizan para el tratamiento de gases ácidos y subproductos del tratamiento de combustión/oxidación;
  - Baños químicos calientes en la fabricación de semiconductores;
  - Combustión/oxidación mediante quemadores de combustible o cámaras de calefacción eléctricas, que suelen combinarse con depuradores húmedos (fabricación de semiconductores y PCBA);
  - Reactores de plasma en la fabricación de semiconductores, aunque tienen un margen limitado de tratamiento y requieren unidades adicionales de depuración en la salida;
  - Absorción en frío en la industria de PCBA;

- Trampillas, filtros, ciclones y precipitantes en la industria del PCBA para eliminar los sólidos y condensar los vapores del escape.

- Sistemas generales que son relativamente mucho más grandes y se colocan fuera de una fábrica (fundición de semiconductores) y pueden gestionar grandes flujos de efluentes de muchas fuentes distintas;
- Los depuradores de emergencia, idóneos para el manejo de escapes grandes y repentinos de gases tóxicos, suelen instalarse en las ventilaciones de las zonas de almacenamiento de cilindros de gas. El objetivo de estos depuradores de emergencia es prevenir los escapes incontrolados. Sin embargo, la mayoría de los gases tóxicos pueden controlarse en cabinas especiales en las que se depura o filtra su salida a la atmósfera después de controlar cuidadosamente que los gases no tengan un impacto sobre la salud o el medio ambiente.

### *Compuestos de perfluorocarbono y otros gases de efecto invernadero*

Los PFC—que incluyen  $CF_4$ ,  $C_2F_6$  y  $C_3F_8$ —trifluoruro de nitrógeno ( $NF_3$ ), HFC-23 ( $CHF_3$ ) y hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ) se usan en la fabricación de semiconductores en los sistemas de deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) en el grabado con plasma, y, principalmente, en la fabricación de pantallas de transistores de película fina-cristal líquido (TFT-LCD). El principal problema medioambiental asociado con los PFC es su elevado potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés), derivado de su larga perduración en la atmósfera<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ha identificado unos 30 contaminantes peligrosos de la atmósfera en la fabricación de semiconductores, aunque se calcula que más del 90 por ciento de las emisiones contienen ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, éteres de propilenglicol y sus acetatos, metanol y xilenos.

<sup>6</sup> En mayo de 2005, los miembros del World Semiconductor Council acordaron reducir las emisiones de PFC al menos 10 por ciento con respecto al valor base (de 1995 para las asociaciones europeas, estadounidenses y japonesas; 1997 para la asociación coreana, y 1998 en el caso de Taiwán) antes de 2010.

Las técnicas para la reducción y el control de la emisión de PFC incluyen lo siguiente<sup>7</sup>:

- Optimización del proceso, especialmente en los procesos de limpieza por CVD;
- Sustitución química, por ejemplo, usando  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  o  $\text{NF}_3$  como alternativa de reducción del gas de limpieza de la cámara, en lugar de  $\text{C}_2\text{F}_6$  en una cámara modificada de CVD, minimizando las emisiones a la atmósfera;
- Reducción mediante disociación de moléculas para obtener subproductos sin PFC, mediante sistemas de combustión, descomposición catalítica o destrucción con plasma (esto último sólo puede aplicarse a las herramientas de grabado con un máximo de 200 mm). La tecnología de destrucción térmica puede aplicarse a los procesos de limpieza de cabinas o grabado dentro de la fábrica (dispositivos en PDU) o en toda la fábrica (dispositivos al final del proceso);
- Captura y reutilización de PFC procedente de los escapes, aunque, se trata de un proceso complicado a nivel técnico y económico.
- En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrece información adicional sobre los gases de efecto invernadero.

### *Vapores ácidos*

Las posibles emisiones de vapores ácidos (principalmente, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico) están relacionadas con los siguientes procesos en la fabricación de semiconductores y PCBA:

- Operaciones de limpieza, grabado y disolución de fotoresistores en la fabricación de semiconductores;

- Grabado, durante el que pueden desprenderse vapores de cloruro de hidrógeno;
- Limpieza, preparación de la superficie, grabado con cloruro de cobre y deposición en la fabricación de PCB.

Las emisiones de aerosol de ácido sulfúrico también están asociadas con el tratamiento de las obleas con compuestos ácidos para el grabado. La mezcla utilizada más habitualmente contiene ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.

Las emisiones de vapores ácidos se reducen mediante la instalación de depuradores húmedos horizontales (corriente cruzada) o verticales (contracorriente). Las medidas para prevenir la contaminación incluyen también lo siguiente:

- Uso de inhibidores del vaho en las superficies bañadas y uso de humectantes (emulsionantes);
- Reprocesamiento del ácido sulfúrico usado durante la fabricación de obleas mediante calentamiento y destilación para purificar la corriente ácida;
- Instalación de tapas o mallas en los baños de grabado para eliminar el vaho.

### *Compuestos orgánicos volátiles*

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se emplean principalmente en la fabricación de semiconductores y la industria de PCBA. Se pueden generar COV durante la mayoría de los procesos de limpieza y fotolitografía, durante las operaciones de secado de fotoresistores, desarrollo y eliminación de fotoresistores. Normalmente, los sistemas de carbón activo absorben las emisiones de COV para facilitar la recuperación y/o tratamiento con oxidantes térmicos. Las técnicas aplicables de control de la contaminación o los dispositivos adicionales para controlar las emisiones consisten en lo siguiente:

<sup>7</sup> El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2000) ofrece información adicional sobre las reducciones de emisiones de PFC mediante una variedad de tecnologías de control de las emisiones.

- Oxidantes térmicos regenerativos, que suelen ser prácticos cuando la tasa de flujo volumétrico del escape de los procesos supera los 1,4 m<sup>3</sup>/s (3.000 scfm, pies cúbicos estándar por minuto);
- Absorbentes giratorios de zeolita con oxidantes térmicos recuperativos, que se usan para concentrar los flujos diluidos de COV antes de pasarlos por un dispositivo de eliminación o recuperación;
- Lecho fijo de carbón absorbente con separación por gradiente del vapor para la recuperación de COV (para su reutilización o reciclaje fuera de las instalaciones);
- Lecho fluido de carbón absorbente con desorción por nitrógeno caliente y recuperación de COV (para su reutilización o reciclaje fuera de las instalaciones);
- Lecho fluido de polímeros absorbentes con regeneración por nitrógeno caliente y recuperación de COV, cuando sea práctico, o con oxidantes térmicos recuperativos.

### *Oxidos de nitrógeno*

Como ocurre en otros sectores industriales, las emisiones de NO<sub>x</sub> en la fabricación de semiconductores incluyen los subproductos de los procesos de combustión. Estos subproductos son generados por las calderas del sistema de calefacción, los generadores de energía de emergencia y los oxidantes térmicos que reducen las emisiones de COV. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se presenta información relevante sobre tecnologías para la prevención y el control de las emisiones.

### *Polvo*

Los procesos de perforación y grabado durante la fabricación de PCB generan cantidades significativas de polvo, mientras que las industrias de semiconductores y PCBA no emiten cantidades importantes de polvo. El cortado y recortado con láser, el pulido químico mecánico y los procesos de rebajado en

la fabricación de semiconductores pueden generar ciertas cantidades de polvo, lo mismo sucede con la fabricación de dispositivos magnéticos y componentes pasivos. Entre las medidas de control recomendadas se encuentran:

- Sistemas de sedimentación del agua
- Depuración con filtros de bolsa o precipitantes electrostáticos

### **Consumo de energía**

Dado que existen muchos procesos térmicos y el manejo de las obleas es altamente mecanizado, la fabricación de semiconductores conlleva un consumo significativo de energía, que exige un uso óptimo de la misma. Se debe emplear un equipo especial, que combine la mejora de la eficiencia del proceso con la eficiencia energética, por ejemplo:

- Equipo de tratamiento del aire que controle la humedad y la temperatura, lo que permite un ahorro de hasta el 25 por ciento de energía;
- Enfriadores de alto rendimiento; y
- La recuperación del calor de los condensadores de agua que utilizan intercambiadores de calor puede permitir que un centro industrial moderno ahorre hasta un 40 por ciento de la energía que necesita.

Las tecnologías avanzadas para la reducción de las emisiones también mejoran la eficiencia y reducen el consumo de energía de los nuevos equipos.

### **Aguas residuales**

#### *Aguas residuales de procesos industriales*

Los efluentes de aguas residuales pueden contener componentes orgánicos e inorgánicos, como metales, ácidos, álcalis, cianuros y sólidos en suspensión. Para minimizar tanto

el uso de agua como los posibles impactos de los vertidos, el agua procedente de los lavados debe recuperarse para que el agua tratada pueda reciclarse en el proceso.

Las aguas residuales del proceso pueden incluir componentes orgánicos, especialmente solventes no clorados (por ej., resistores a base de pirrol, amina, flúor/éter; isopropil alcohol, hidróxido de tetrametilamonio) para una serie de fases en la fabricación de semiconductores y PCBA, como la limpieza, el secado de fotoresistores, el desarrollo y la eliminación de fotoresistores; metales de la metalización y los procesos de CMP; ácidos y álcalis de los desechos de soluciones de limpieza y operaciones como grabado, limpieza y metalización, entre otras; cianuros de los procesos de metalización, y sólidos en suspensión de los residuos de las películas y partículas metálicas (procedentes de los procesos de fotolitografía, metalización, rectificado posterior y cortado).

### *Tratamiento de aguas residuales del proceso industrial*

Dado que en las operaciones de fabricación de semiconductores y componentes electrónicos se utilizan una gran variedad de materias primas, sustancias químicas y procesos, el tratamiento de las aguas residuales puede exigir el uso de operaciones específicas para el proceso de fabricación y el contaminante en cuestión. Las técnicas para el tratamiento de las aguas residuales del proceso industrial en este sector incluyen i) segregación de fuentes y tratamiento previo de las corrientes de aguas residuales con altas concentraciones de compuestos no biodegradables mediante la separación por fases con recuperación de solventes, eliminación por aire, oxidación química, procesos de absorción, etc. ii) reducción de metales pesados mediante precipitación química, coagulación y floculación, recuperación electroquímica, intercambio de iones, etc. iii) oxidación química de cianuros; y iv) desecado y desecho de residuos en vertederos designados para residuos peligrosos.

Pueden ser necesarios controles de ingeniería adicionales para i) la eliminación avanzada de metales mediante filtración con membranas u otras tecnologías de tratamiento físico/químico, ii) eliminación de materias orgánicas recalcitrantes y halogenadas mediante carbón activo y oxidación química avanzada, iii) reducción de la toxicidad del efluente mediante tecnología adecuada (como osmosis reversa, intercambio de iones, carbón activo, etc.), y iv) contención y tratamiento de materias orgánicas volátiles procedentes de varias operaciones específicas en el sistema de tratamiento de aguas residuales.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ocupan de la gestión de las aguas residuales industriales y presentan ejemplos de estrategias de tratamiento. Las instalaciones industriales deben cumplir los valores orientativos para el vertido de aguas residuales, mediante el uso de estas tecnologías y las buenas prácticas para la gestión de aguas residuales, como se indica en el cuadro relevante de la sección 2 de este documento.

### *Otras corrientes de aguas residuales y consumo de agua*

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientación sobre la gestión de aguas residuales no contaminadas de los servicios, aguas pluviales no contaminadas y aguas de alcantarillado. Las corrientes contaminadas deben canalizarse al sistema de tratamiento de las aguas residuales de los procesos industriales. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones para reducir el consumo de agua, especialmente cuando pueda tratarse de un recurso natural limitado.

### *Fabricación de circuitos impresos (PCB)*

Se han desarrollado varias medidas para la prevención de la contaminación en el proceso de fabricación de PCB, descrito en el Anexo A. Estos son algunos ejemplos de modificaciones de los procesos beneficiosas para el medio ambiente:

- *Fabricación de placas:* tecnología de montaje superficial (SMT) en lugar de inserción en orificios, sustrato moldeado de inyección, grabado aditivo;
- *Limpieza y preparación de la superficie:* uso de limpiadores no quelantes, prolongación de la vida del baño, mejora de la eficiencia del enjuague, limpieza contracorriente, y reciclaje/reutilización de aguas de lavado y enjuague;
- *Impresión de patrones y máscaras:* fotoresistores procesables con agua, serigrafía en lugar de fotolitografía, impresión con chorro de tinta, fotoresistor seco, reciclaje/reutilización de reveladores de fotoresistores, segregación de flujos y recuperación de metales;
- *Galvanoplastia y revestimiento sin electricidad:* sustituir por la producción mecánica de placas, baños sin cianuro, prolongación de la vida del baño, mejora de la eficiencia del enjuague, limpieza contracorriente, segregación de corrientes, y reciclaje/reutilización de aguas de lavado y enjuague.
- *Grabado:* uso de grabado diferencial, decapantes no quelantes y sin cromo, grabado con máscara en lugar de panel, proceso aditivo en lugar de sustractivo, y reciclaje/reutilización de decapantes;
- La recuperación de metales mediante tecnologías de electrodeposición regenerativa e intercambio de iones produce una descarga casi nula de efluentes de las corrientes segregadas portadoras de metales. Los metales pesados se recuperan en capas de metal, que eliminan el 95% del sedimento. Los lodos no tratados para la recuperación de metales deben desecharse en vertederos seguros.

## 1.2 Higiene y seguridad ocupacional

Los peligros para la higiene y la seguridad ocupacional en los proyectos de fabricación de semiconductores y otros componentes electrónicos incluyen principalmente lo siguiente:

- Exposición a los materiales emitidos por los sustratos durante el manejo o la manipulación mecánica;
- Exposición a sustancias químicas peligrosas, lo que incluye polvos metálicos;
- Riesgos de origen físico y exposición a peligros energéticos (cinéticos, eléctricos, neumáticos e hidráulicos);
- Exposición a radiaciones ionizantes y no ionizantes y láser.

### Sustratos

Aunque los sustratos de los semiconductores de silicio (dióxido de silicio) no son tóxicos, el polvo producido en su fabricación y uso puede ser peligroso. No obstante, los sustratos de GaAs y fosfato de indio (InP) plantean un mayor riesgo físico y para la salud. La vía de exposición más habitual al GaAs y el InP es la inhalación de partículas. Dada la alta toxicidad del arsénico y el indio, el nivel de exposición a estos componentes en el trabajo es bajo. El InP es inflamable y puede reaccionar con el vapor de agua y los ácidos para formar fosfamina, un gas tóxico e inflamable. El GaAs es peligroso cuando se rebaja, corta o pule.

La prevención y el control de estos riesgos conllevan la adopción de controles de ingeniería y administración para proteger a los trabajadores. Normalmente se adoptan las siguientes precauciones en el uso:

- Uso de extracción local para el rebajado o lapeado húmedo. Estas operaciones deben realizarse en condiciones de humedad y los residuos deben enjuagarse cuidadosamente. Debe evitarse el rebajado o lapeado en seco del GaAs;

- Se debe utilizar extracción y ventilación en todos los procesos con estos sustratos, incluidas las operaciones de corte, rebajado, pulido o grabado;
- Se debe limpiar periódicamente la ropa de trabajo para prevenir la contaminación y se deben promover buenas prácticas de higiene;
- Se debe evitar el calentamiento excesivo, y se debe tener especial precaución de que los fuertes reductores ácidos no produzcan arsina o fosfina altamente tóxicas;
- La materia prima de la arsina y la fosfina debe guardarse en contenedores con presión reducida.

### Sustancias químicas peligrosas

El proceso de fabricación de semiconductores y componentes electrónicos puede conllevar el uso de numerosas sustancias químicas potencialmente peligrosas<sup>8</sup>. También puede haber presencia de polvos metálicos en la fabricación de componentes pasivos y dispositivos magnéticos. Se deben desarrollar y aplicar programas de protección química para materiales específicos, como se describe en detalle en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Los trabajadores deben estar protegidos de la exposición a sustancias químicas derivadas del proceso como: ácidos, básicos, solventes, polvos y sedimentos metálicos, además de gases tóxicos, criogénicos y pirofóricos. Otras recomendaciones específicas para el sector incluyen:

- Sustitución de materias peligrosas, como éteres de glicol a base de etileno, por compuestos menos peligrosos en la fabricación de semiconductores;
- Si se emplean silano (SiH<sub>4</sub>) u otros gases potencialmente peligrosos (por ej., HF, H<sub>2</sub>) en la fabricación de

<sup>8</sup> Una lista de ejemplos incluiría: acetona, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, amoníaco, arsénico de galio, arsina, dióxido de cloro, diclorosilano, disilano, fluorina, fosfina, germanio, hidróxido de amonio, óxido de nitrógeno, ozono, oxiclóruo de fósforo, silano, tetrafluoruro de metano, triclorosilano, trifluoruro de boro, trifluoruro de cloro, trimetilarsénico, trimetilindio.

semiconductores, instalación de sistemas integrados de alarma con fijación de detectores de gases y alarmas en los niveles de seguridad establecidos por la ley o la industria;

- Uso de sistemas aislados y automatizados de fabricación para prevenir la exposición de los trabajadores cuando no sea posible la sustitución química en la industria de semiconductores y de PCBA;
- Uso de controles de ingeniería como extracción de polvo y vapor e instalación de sistemas de ventilación para eliminar las materias suspendidas en el aire del área de trabajo, tanto en la industria de semiconductores como de PCBA.

### Riesgos de origen físico y energético

Los riesgos de origen físico que pueden ocurrir en la fabricación de semiconductores y componentes electrónicos incluyen el movimiento de objetos pesados—por ejemplo, transporte de grandes obleas (especialmente para las obleas de 300 mm) y productos finales empacados, o el trabajo cerca de equipo automatizado. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se presentan recomendaciones generales para la prevención y el manejo de riesgos de origen físico y energético (incluidos los cinéticos, eléctricos, neumáticos e hidráulicos) en el lugar de trabajo.

### Radiación ionizante y no ionizante y láser

El proceso de fabricación puede incluir fuentes de radiación ionizante como rayos X, rayos gamma y partículas alfa y beta, cuyas características son onda corta y elevada energía. Los tipos posibles de radiación no ionizante en el proceso de fabricación pueden incluir radiofrecuencias (usadas para la producción de plasma), rayos UV, infrarrojos o espectro visible. Algunos tipos de calentadores, equipo de pruebas o antenas de alta potencia pueden producir radiación no ionizante.

El láser se clasifica en función del daño que pueda provocar a los ojos o la piel. Si se dirige o refleja contra un objeto, el láser puede ser absorbido parcialmente, provocando un aumento de la temperatura y una alteración del material expuesto.

La exposición a las fuentes de radiación debe prevenirse mediante el uso de cierres protectores y bloqueos de corriente para el equipo generador, y la formación de los trabajadores sobre la importancia y el mantenimiento de estos cierres y bloqueos. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrece información adicional sobre la exposición a la radiación.

Se deben instalar controles de ingeniería, como el resguardo con bloqueos, los filtros de protección y los bloqueos de corriente en el sistema, para prevenir los riesgos derivados del uso de láser.

### 1.3 Higiene y seguridad en la comunidad

Las consecuencias que la construcción y el desmantelamiento de las instalaciones de fabricación de semiconductores y componentes electrónicos pueden acarrear para la higiene y seguridad en la comunidad son comunes a la mayoría de los establecimientos industriales, y se explican en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

## 2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño

### 2.1 Medio ambiente

#### Guías sobre emisiones y efluentes

En los cuadros 1 y 2 se presentan las guías sobre efluentes y emisiones para este sector. Los valores orientativos para las emisiones y los efluentes del proceso industrial indican una

buena práctica internacional en la industria, de acuerdo con las normas relevantes de los países con marcos regulatorios establecidos. Estos valores son posibles con condiciones normales de funcionamiento en instalaciones adecuadamente diseñadas y operadas, mediante la aplicación de las técnicas de prevención y control de la contaminación que se explican en las secciones anteriores de este documento. Estos niveles pueden lograrse, sin dilución, al menos el 95 por ciento del tiempo de operación de la planta o la unidad. La desviación de estos niveles en función de condiciones específicas y locales del proyecto deben justificarse en la evaluación ambiental.

Las guías sobre efluentes son aplicables a los vertidos directos de efluentes tratados a las aguas superficiales para uso general. Se pueden establecer niveles específicos de vertido para cada lugar en función de la disponibilidad y las condiciones de uso de los sistemas de recolección y tratamiento del alcantarillado público o, si el vertido se realiza directamente a las aguas superficiales, en función de la clasificación del uso del agua receptora, tal como se describe en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Las guías sobre emisiones son aplicables a las emisiones de los procesos industriales. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen directrices sobre las emisiones de fuentes de combustión en las actividades de calentamiento o generación de energía, en las que las fuentes de calor tienen una capacidad máxima de 50MWth. Las **Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para Centrales Térmicas** se ocupan de las emisiones de fuentes más potentes. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientaciones sobre las consideraciones ambientales basadas en la carga total de emisiones.

**Cuadro 1. Niveles de efluentes**

Contaminantes	Unidades	Valor de referencia
pH	—	6–9
DQO	mg/L	160
DBO <sub>5</sub>	mg/L	50
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50
Aceite y grasa	mg/L	10
Azufre total	mg/L	2
Fluoruro	mg/L	5
Amoníaco	mg/L	10
Cianuro (total)	mg/L	1
Cianuro (libre)	mg/L	0,1
AOX (halógenos orgánicos absorbibles)	mg/L	0,5
Arsénico	mg/L	0,1
Cromo (hexavalente)	mg/L	0,1
Cromo (total)	mg/L	0,5
Cadmio	mg/L	0,1
Cobre	mg/L	0,5
Plomo	mg/L	0,1
Mercurio	mg/L	0,01
Níquel	mg/L	0,5
Estaño	mg/L	2
Plata	mg/L	0,1
Selenio	mg/L	1
Zinc	mg/L	2
Aumento de la temperatura	°C	<3 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Al borde de una zona de mezcla científicamente establecida que tiene en cuenta la calidad del agua ambiente, el uso del agua receptora, los receptores potenciales y la capacidad de asimilación.

**Cuadro 2. Niveles de emisiones al aire<sup>c</sup>**

Contaminantes	Unidades	Valor de referencia
COV <sup>a</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	20
HAP orgánicos <sup>b</sup>	Ppmv	20
HAP inorgánicos <sup>b</sup>	Ppmv	0,42
Cloruro de hidrógeno	mg/Nm <sup>3</sup>	10
Fluoruro de hidrógeno	mg/Nm <sup>3</sup>	5
Fosfina	mg/Nm <sup>3</sup>	0,5
Arsina y compuestos de As	mg/Nm <sup>3</sup>	0,5
Amoníaco	mg/Nm <sup>3</sup>	30
Acetona	mg/Nm <sup>3</sup>	150

NOTAS:  
<sup>a</sup> Aplicable a los procesos de limpieza de superficies.  
<sup>b</sup> Los contaminantes peligrosos para la atmósfera (HAP) específicos de la industria incluyen: compuestos de antimonio, compuestos de arsénico, arsina, tetracloruro de carbono, catechol, cloro, compuestos de cromo, etilacrilato, etilbenzeno, etileno glicol, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, compuestos de plomo, metanol, metilisobutil cetona, cloruro de metileno, compuestos de níquel, percloroetileno, fosfina, azufre, tolueno, 1,1,1-tricloroetano, tricloroetileno (retirado), xilenos. En la práctica actual de la industria no se emplean etilbenzeno, tolueno, xileno, cloruro de metileno, tetracloruro de carbono, compuestos de cromo, percloroetileno, 1,1,1-tricloroetano ni tricloroetileno.  
<sup>c</sup> Con 3 por ciento de O<sub>2</sub>.

### Uso de recursos y generación de desechos

En el cuadro 3 se ofrecen ejemplos de indicadores sobre el consumo de recursos de energía y agua, además de la generación de desechos en este sector. Los valores de referencia de la industria se ofrecen solamente con fines comparativos y los proyectos individuales deben tener como objetivo la mejora continua en estas áreas.

**Cuadro 3. Consumo de agua y energía y generación de desechos**

Insumos por unidad de producto	Unidad	Valor de referencia de la industria
Uso de agua Agua ultrapura para grabados húmedos	l/oblea de 300-mm	42
Consumo de agua ultrapura	l/oblea de 200-mm	4 000–8 000
Uso neto de corriente de agua	l/cm <sup>2</sup>	8–10
Uso de agua ultrapura en fábrica	l/cm <sup>2</sup>	4–6
Energía Total para herramientas de fábrica	kWh/cm <sup>2</sup> de oblea	0.3–0.4
Total para sistemas de apoyo de fábrica		0.5–0.6
Generación por unidad de producto	Unidad	Valor de referencia de la industria
Desechos <sup>a</sup> Reciclaje y reutilización de residuos líquidos peligrosos	%	80
Reciclaje y reutilización de residuos sólidos	%	85
NOTAS: <sup>a</sup> El objetivo de los fabricantes de semiconductores debe ser una planta con "sin desechos". Fuente: International Technology Roadmap for Semiconductors (2005).		

### Seguimiento ambiental

Se llevarán a cabo programas de seguimiento ambiental para este sector en todas aquellas actividades identificadas por su potencial impacto significativo en el medio ambiente, durante las operaciones normales y en condiciones alteradas. Las actividades de seguimiento ambiental se basarán en indicadores directos e indirectos de emisiones, efluentes y uso de recursos aplicables al proyecto concreto.

La frecuencia del seguimiento debería permitir obtener datos representativos sobre los parámetros objeto del seguimiento. El seguimiento deberá recaer en individuos capacitados, quienes deberán aplicar los procedimientos de seguimiento y registro y

utilizar un equipo adecuadamente calibrado y mantenido. Los datos de seguimiento se analizarán y revisarán con regularidad, y se compararán con las normas vigentes para así adoptar las medidas correctivas necesarias. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los métodos de muestreo y análisis de emisiones y efluentes.

## 2.2 Higiene y seguridad ocupacional

### Guías sobre higiene y seguridad ocupacional

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad en el trabajo deben utilizarse las guías sobre la materia que se publican en el ámbito internacional, entre ellas: guías sobre la concentración máxima admisible de exposición profesional (TLV<sup>®</sup>) y los índices biológicos de exposición (BEIs<sup>®</sup>) publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)<sup>9</sup>, la Guía de bolsillo sobre riesgos químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo de los Estados Unidos (NIOSH)<sup>10</sup>, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)<sup>11</sup>, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea<sup>12</sup> u otras fuentes similares.

### Tasas de accidentes y letalidad

Deben adoptarse medidas para reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores del proyecto (ya sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar la pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad e incluso la muerte.

<sup>9</sup> Disponibles en: <http://www.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>.

<sup>10</sup> Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>.

<sup>11</sup> Disponibles en: [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9992](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992).

<sup>12</sup> Disponibles en: [http://europe.osha.eu.int/good\\_practice/risks/ds/oel/](http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/).

Como punto de referencia para evaluar las tasas del proyecto puede utilizarse el desempeño de instalaciones en este sector en países desarrollados, que se obtiene consultando las fuentes publicadas (por ejemplo, a través de la Oficina de Estadísticas Laborales de los Estados Unidos y el Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido)<sup>13</sup>.

## Seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo

Es preciso realizar un seguimiento de los riesgos que pueden correr los trabajadores en el entorno laboral del proyecto concreto. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas y realizadas por profesionales acreditados<sup>14</sup> como parte de un programa de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo. En las instalaciones, además, debe llevarse un registro de los accidentes y enfermedades laborales, así como de los sucesos y accidentes peligrosos. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los programas de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo.

<sup>13</sup> Disponibles en: <http://www.bls.gov/iif/> y <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.

<sup>14</sup> Los profesionales acreditados pueden incluir a higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

### 3.0 Referencias y fuentes adicionales

Australian National Pollutant Inventory. 1999. Emission Estimation Technique Manual for the Electronics and Computer Industry. Queensland, Australia.

Comisión Europea. 2005. Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para el tratamiento de superficies metálicas y plásticas. Sevilla, España.

Eastern Research Group. 1999. Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emissions from Semiconductors Manufacturing. Prepared for US EPA, Point Sources Committee. Morrisville, Carolina del Norte.

Geng, Hwaiyu. 2005. Semiconductor Manufacturing Handbook. McGraw-Hill. New York, New York.

Gobierno Federal Alemán. 2002. Primer reglamento administrativo general relativo a la Ley Federal de Control de Emisiones (Instrucciones técnicas sobre el control de la calidad del aire – TA Luft). Berlín, Alemania.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2000. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Disponible en [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum\\_es.html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.html) (consultado en junio de 2006).

Ministerio de Medioambiente de Alemania, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear. 2004. Promulgación de una nueva versión de la orden sobre requisitos para el vertido de aguas residuales en el agua - AbwV) del 17 de junio de 2004. Berlín, Alemania.

Harper, C.A. 1997. Passive Electronic Component Handbook. McGraw-Hill. Nueva York, Nueva York.

Helsinki Commission (Helcom). 2002. Reduction of Discharges and Emissions from the Metal Surface Treatment. Recommendation 23/7. Helsinki, Finlandia.

Intel. 2004. Environmental, Health and Safety Report. Available at <http://www.intel.com/intel/other/ehs/> (consultado en marzo de 2006).

International Technology Roadmap for Semiconductors. 2005. Environmental, Safety and Health. Disponible en <http://public.itrs.net/> (consultado en marzo de 2006).

Ireland Environmental Protection Agency. 1996. Integrated Pollution Control Licensing. Batneec Guidance Note for the Manufacture of Integrated Circuits and Printed Circuit Boards. Ardavan, Irlanda.

McLyman, Colonel Wm. T. 2002. High Reliability Magnetic Devices: Design and Fabrication. CRC Edition. Londres, Reino Unido.

New York State Department of Environmental Conservation, Pollution Prevention Unit. 1999. Environmental Compliance and Pollution Prevention Guide for the Electronics and Computer Industry. Nueva York, Nueva York.

Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). Guideline F5-90. Guide for Gaseous Exhaust Emissions. Disponible en <http://wps2a.semi.org/wps/portal/pagr/118/pa.118/190> (consultado en marzo de 2006).

Semiconductor Industry Association. 2000. Occupational Health System 2000 Annual Survey of Work Injuries and Illnesses. San José, California.

Unión Europea. 2003a. Directiva 2002/95/EC sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. Bruselas, Bélgica.

Unión Europea. 2003b. Directiva 2002/96/EC sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Bruselas, Bélgica.

US Environmental Protection Agency (EPA). 1995. Electronic and Computer Industry, Sector Notebook Project. Washington, DC.

US EPA. 1998. Reduction of Arsenic Wastes in the Semiconductor Industry. EPA/600/R-02/089. Washington, DC.

US EPA. 2001. Proposed Air Toxics Rule for Semiconductor Manufacturing. Fact Sheet. Washington, DC.

US EPA. 2002. 40 CFR Part 63 National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Semiconductor Manufacturing. Washington, DC.

US EPA. Design of the Environment. Printed Wiring Board. Section A, Clean Air Act Requirements. Washington, DC. Disponible en <http://www.epa.gov/oppt/dfe/pubs/index.htm#pwb> (consultado en marzo de 2006)

US EPA. 40 CFR Part 413. Electroplating Point Source Category. Washington, DC.

US EPA. 40 CFR Part 433. Metal Finishing Point Source Category. Washington, DC.

US EPA. 40 CFR Part 469. Electrical and Electronic Components Point Source Category. Washington, DC.

World Semiconductor Council (WCS). 1999. Position Paper Regarding PFC Emissions Reduction Goal, 26 de abril de 1999. Fiuggi, Italia.

World Semiconductor Council (WCS). 2005. Joint Statement on the Ninth Meeting. 19 de mayo de 2005, Kyoto, Japón.

WCS y SEMI. 2006. Agreement for PFOS. Voluntary Semiconductor Industry Commitment. Disponible en [http://www.sia-online.org/pre\\_stat.cfm?ID=294](http://www.sia-online.org/pre_stat.cfm?ID=294) (consultado en abril de 2007)

## Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

La industria de la electrónica incluye la fabricación de semiconductores, circuitos impresos (PCB, por sus siglas en inglés), circuitos impresos ensamblados (PCBA, por sus siglas en inglés), pantallas, componentes pasivos y dispositivos magnéticos.

### Fabricación de semiconductores

En la fabricación de semiconductores se utiliza silicio, carburo de silicio (SiC), arseniuro de galio (GaAs), metales, sustancias químicas, agua y energía. La pureza de todos los materiales tiene que ser muy alta, por lo que son esenciales los sistemas de gases especiales, los sistemas automatizados de manejo de sustancias químicas y los sistemas de aire limpio y seco en las salas blancas, especialmente en la fotolitografía. También es necesario un sistema de destilación del agua porque la fabricación de semiconductores requiere una gran cantidad de agua destilada, especialmente en los procesos de limpieza en húmedo, pero también en el aguafuerte, los procesos con solventes y los procesos de limpieza de herramientas. Muchas nuevas fábricas están reduciendo el consumo de agua mediante el reciclaje de una parte importante de las aguas residuales procedentes de los procesos de enjuague. Este proceso no contribuye significativamente a la contaminación del agua. Dado que los circuitos integrados son cada vez más pequeños, el control de la vibración y el diseño de los cimientos del centro de trabajo han cobrado más importancia.

El proceso de fabricación conlleva cientos de operaciones que se realizan capa a capa sobre un material sólido cristalino, principalmente silicio, y más recientemente carburo de silicio (SiC). El arseniuro de galio (GaAs) se emplea para muchas aplicaciones militares y comerciales como los láseres, los diodos emisores de luz (LED, por siglas en inglés), y dispositivos de comunicación (por ejemplo, los teléfonos

celulares tienen osciladores microondas compuestos de chips de GaAs).

La fabricación de semiconductores incluye dos series básicas de operaciones: fabricación de obleas y ensamblaje, empaquetado y pruebas (APT, por sus siglas en inglés), que consiste en el ensamblaje de las obleas para formar circuitos integrados.

*En la gráfica A.1 (última página) se resumen los principales pasos en la fabricación de semiconductores, subrayando la utilización de sustancias químicas y otros fluidos, y los puntos de emisiones y generación de efluentes y desechos.*

La fabricación de obleas de semiconductores necesita una estructura uniforme y cristalina de silicio con múltiples capas (oblea de silicio), que se obtiene mediante técnicas controladas, como la deposición química en fase de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) o el crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE, por sus siglas en inglés). Seguidamente, se forma una capa fina de dióxido de silicio, que aísla y protege el silicio, sobre la oblea mediante un tratamiento de calor en un horno de alta temperatura (900°C a 1.200°C). Después se aplica una capa uniforme y fina de resina sensible a la radiación, denominado fotoresistor (positivo o negativo), y se expone a la luz ultravioleta o los rayos X a través de máscaras de cristal o una plantilla creada previamente con el patrón del circuito.

El fotoresistor positivo se vuelve soluble en las zonas expuestas y se puede eliminar mediante reveladores químicos, revelando el dibujo hecho con la máscara sobre el dióxido de silicio (desarrollo). El dióxido de silicio se elimina mediante aguafuerte o grabado en seco: para el primer tratamiento se emplean soluciones ácidas, básicas o cáusticas; el segundo, también denominado grabado con plasma, emplea gas reactivo ionizado

y ofrece mayor resolución y menos desechos. El exceso de resina fotosensible se elimina finalmente con solventes o plasma. Al repetir los pasos (hasta 25 o 30 veces) desde la oxidación del silicio hasta la eliminación del fotoreistor y el uso de diferentes máscaras, se forman diferentes regiones en las capas que quedan aisladas unas de otras. Este proceso se denomina fotolitografía o microlitografía.

El uso del grabado con plasma del nitruro de silicio, un proceso en seco, en la tecnología de estructura MOS (Metal Oxide Semiconductor), permite reemplazar el proceso húmedo en caliente de corrosión mediante ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), y disminuir los residuos generados y mejorar la seguridad de los trabajadores, a la vez que se reduce el número de pasos en la fabricación.

Para cambiar la conductividad de las regiones del silicio, se introducen dopantes mediante difusión o implantación de iones. La difusión puede ser gaseosa o no gaseosa, y se realiza a altas temperaturas. La implantación de iones consiste en un bombardeo acelerado de iones sobre las áreas expuestas del silicio. La interconexión selectiva de diferentes regiones y capas de la oblea se obtiene mediante la metalización: se deposita un material dieléctrico damasquinado y se rellena el patrón con aleaciones de aluminio en vacío o cobre mediante galvanoplastia o deposición electroquímica (ECD, por sus siglas en inglés). El exceso de cobre se elimina a través de un pulido o aplanado químico mecánico (CMP, por sus siglas en inglés). Otras técnicas de metalización incluyen la deposición física en fase de vapor (PVD, por sus siglas en inglés) y la deposición de capas atómicas (ALD, por sus siglas en inglés). Finalmente, se aplica una capa de óxido o poliamida a la superficie de la oblea mediante pasivado para ofrecer un sello protector al circuito.

En las nuevas aplicaciones se necesitan semiconductores muy finos; por lo tanto, se reduce el grosor de la oblea mediante el rebajado posterior o distensión. Cada oblea acabada puede

contener cientos de chips que se prueban eléctricamente (miden) antes de cortarlos en chips individuales con una cuchilla diamantada ultrafina (corte) y marcarlos. Una vez probado, cada chip se monta en un marco metálico o cerámico, conectado con finos hilos dorados y encapsulado para su soporte mecánico y protección contra el ambiente externo. El paquete final puede contener uno o varios chips encapsulados.

## Nanotecnología y sistemas microelectromecánicos

La nanotecnología consiste en la creación de estructuras funcionales a escala atómica o molecular, en las que al menos una dimensión característica se mide en nanómetros. La evaporación de algunos polvos de óxido metálico ( $ZnO$ ,  $Ga_2O_3$ ,  $SnO_2$ , etc.) a altas temperaturas permite la síntesis de nanocinturones y nanocables de los mismos óxidos metálicos. Los semiconductores resultantes suelen usarse como sensores, transductores o en otras aplicaciones para dispositivos electrónicos u optoelectrónicos.

Los sistemas microelectromecánicos (MEM) están compuestos esencialmente de microtransductores (por ejemplo, microsensores de temperatura, presión, sustancias químicas o radiación). Sus técnicas de fabricación son similares a las que se emplean para los chips. Los materiales utilizados para la producción de MEM son diversos y tienen propiedades eléctricas específicas, pero también tienen características mecánicas y térmicas o químicas especiales. El silicio es el material que se emplea con más frecuencia.

La tecnología más habitual para la producción de dispositivos MEM consiste en la deposición y el grabado de una capa de óxido de silicio, seguidos de la deposición y el grabado de una capa de polisilicio y la eliminación de la capa oxidada, lo que permite que la capa de polisilicio sirva de ménsula, que se suele realizar con compuestos de ácido fluorhídrico.

Los procesos de corte y separación son fundamentales, dado que las partes móviles del dispositivo MEM son frágiles. Las pruebas son específicas para la aplicación, y el ensamblaje de dispositivos MEM suele exigir mucho esfuerzo debido a su fragilidad. El empaquetado también es específico para la aplicación, pero el objetivo siempre es proteger el grabado de los efectos ambientales, sin impedir su sensibilidad a parámetros ambientales esenciales para su funcionamiento adecuado (por ejemplo, aplicación para un sensor de presión en airbags-bolsas de aire). Los dispositivos MEM se utilizan en muchos sectores industriales, entre ellos los sectores del automóvil, control industrial, equipo de oficina, aeroespacial, médico y comunicaciones.

### **Fabricación de circuitos impresos (PCB)**

La fabricación de PCB conlleva el grabado y el revestimiento de circuitos sobre materiales base, que suelen colocarse en capas. Los PCB pueden tener una cara, dos caras o varias caras y flexibles. Se pueden usar tecnologías aditivas, semiaditivas o sustractivas, aunque la tecnología sustractiva es la más empleada. La preparación de la placa consiste en la limpieza, laminación y perforación; es necesaria una limpieza química y mecánica antes del revestimiento anaelectrolítico. La fase de impresión permite la transferencia de la forma del circuito a la placa mediante fotolitografía o serigrafía; a continuación se usa la galvanoplastia (normalmente con cobre) para engrosar las capas conductoras y protegerlas de la corrosión o la erosión. En el caso del revestimiento por soldadura (o aplicación de capas de soldadura por aire caliente), el PCB se sumerge en una soldadura fundida, normalmente una aleación fusible (por ejemplo, aleaciones de estaño sin plomo). El exceso de soldadura se elimina con el nivelado con aire caliente. Las fases finales de la fabricación de PCB consisten en pruebas eléctricas, inspecciones dimensionales y visuales, empaquetado y etiquetado.

### **Fabricación de circuitos impresos ensamblados**

Los PCB están esencialmente formados por una base, compuesta por resina de epoxi prensada, Teflon™, fibra de vidrio o cerámica sobre la que se montan los semiconductores (silicio, carburo de silicio o GaAs) y los componentes pasivos. Se conectan o sueldan los componentes eléctricos específicos sobre el PCB. Normalmente se utiliza un flujo químico para limpiar la placa y facilitar la soldadura posterior de conexiones. La soldadura se puede realizar mediante diferentes técnicas, como la soldadura de ola, la tecnología de montaje superficial (SMT, por sus siglas en inglés) y la soldadura a mano. En el proceso de ensamblaje de PCB, existen alternativas que no agotan la capa de ozono para la limpieza del circuito impreso como, por ejemplo, otros solventes orgánicos, mezclas de hidrocarburos/tensioactivos, alcoholes y combinaciones de solventes orgánicos), y procesos acuosos o semiacuosos. En la actualidad, el residuo del flujo se elimina con agua destilada; anteriormente se usaban freón 113 (CFC-113) y tricloroetano (TCA), que ahora están prohibidos. La industria ha demostrado que se pueden realizar incluso ensamblajes sofisticados sin limpieza y usando flujos con escaso residuo, que dejan muy pocos contaminantes en las placas.

### **Fabricación de pantallas**

Las pantallas planas se dividen entre pantallas de retroproyección y de visión directa, que se subdividen a su vez en emisivas y no emisivas. La pantalla plana más conocida es la pantalla de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés), en la que un campo eléctrico controla la disposición del cristal líquido (LC, por sus siglas en inglés). Lo que se ve depende de la organización molecular del LC. Hay un filtro de color y un transistor de película fina (TFT, por sus siglas en inglés) que están alineados, pegados y separados por un espacio; se inyecta el LC y se forma el sellado final. Finalmente, se ensamblan el polarizador, el encapsulado en cinta, la retroiluminación y el chasis.

Las pantallas de diodos orgánicos de emisión de luz (OLED, por sus siglas en inglés) tienen una estructura simple en estado sólido, ya no tienen vacío, líquido ni gas en el interior. Los OLED emplean moléculas de material luminoso que se depositan por evaporación al vacío. Los polímeros de LED (PLED) utilizan polímeros de materiales luminosos que se depositan normalmente mediante impresión con tinta o cobertura por centrifugado (spin coating). Se agrega un TFT para mejorar su rendimiento. Los OLED tienen ventajas como un proceso simple de producción, elevada eficiencia óptica y una fuente de alimentación de bajo voltaje, pero tienen un corto período de vida.

### **Fabricación de componentes pasivos**

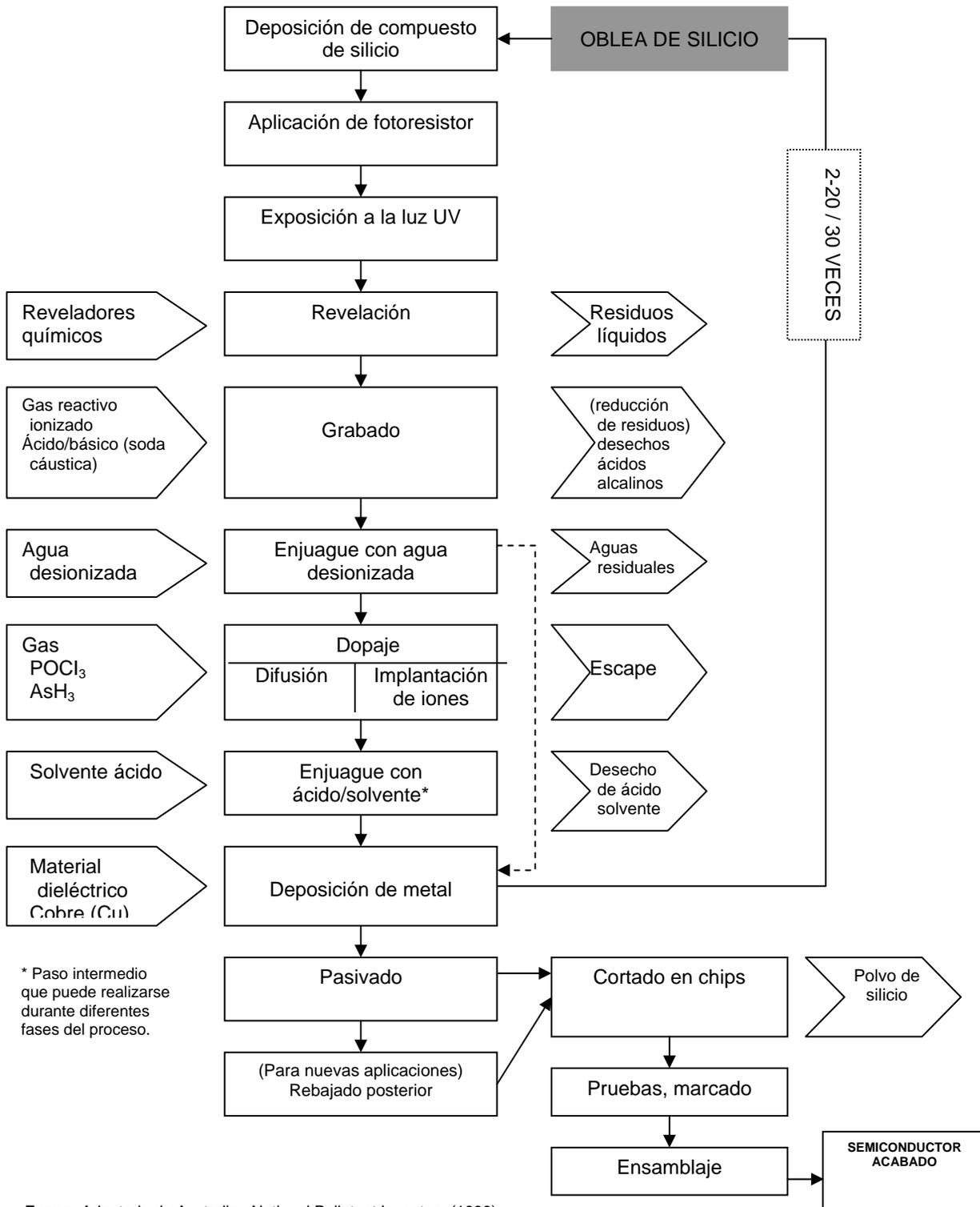
La principal tecnología empleada para la fabricación de componentes pasivos es el prensado y/o la sinterización de polvos—alúmina ( $Al_2O_3$ ), nitrato de aluminio (NIA), etc.—para obtener cerámicas con propiedades aislantes, conductivas y piezoeléctricas. Los productos más habituales son los sustratos de cerámica aislantes ( $Al_2O_3$ , NIA) para los microcircuitos integrados.

En el caso de los sustratos de gran potencia, se utilizan combinaciones de aluminio o estaño y carburo de silicio (AlSiC o CuSiC) para mejorar la conductividad térmica, en comparación con la habitual  $Al_2O_3$ . Se producen resistencias de cualquier dimensión y resistencia eléctrica (ohmios) mediante la combinación de aditivos con carbono o silicio. Las características piezoeléctricas se utilizan principalmente en todo lo relacionado con sensores de presión (automóviles), sensores de tensión, y limpiadores ultrasónicos, o para la emisión de ultrasonidos para las ecografías. Los compuestos cerámicos especiales de óxido de zinc (ZnO) se utilizan para los limitadores de picos de voltaje (varistores).

### **Fabricación de dispositivos magnéticos**

Los procesos de fabricación de dispositivos magnéticos se basan en la combinación de polvos magnéticos (hierro o elementos raros) para obtener películas o cintas magnéticas para almacenamiento en la industria informática, y cerámica o metales sinterizados con mayores propiedades magnéticas, que se emplean en la fabricación de pequeños transformadores de impulsos o imanes especiales superpotentes para la industria automovilística o para los equipos de resonancia magnética.

Gráfico A.1: Visión esquemática del proceso de fabricación de semiconductores



Fuente: Adaptado de Australian National Pollutant Inventory (1999)

