

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 928 498**

51 Int. Cl.:

H01L 23/36 (2006.01)
H01L 23/373 (2006.01)
H01L 21/48 (2006.01)
H01L 23/00 (2006.01)
H01L 23/488 (2006.01)
H01L 25/065 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.05.2019** **PCT/US2019/031041**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.11.2020** **WO20226626**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.05.2019** **E 19768992 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.09.2022** **EP 3753049**

54 Título: **Método de fase líquida transitoria de plata-indio de unión de dispositivo semiconductor y soporte de dispersión de calor y estructura semiconductor que tiene una junta de unión de fase líquida transitoria de plata-indio**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.11.2022

73 Titular/es:

LIGHT-MED (USA), INC. (100.0%)
1130 Calle Cordillera
San Clemente, CA 92673, US

72 Inventor/es:

HUO, YONGJUN y
LEE, CHIN CHUNG

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 928 498 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de fase líquida transitoria de plata-indio de unión de dispositivo semiconductor y soporte de dispersión de calor y estructura semiconductor que tiene una junta de unión de fase líquida transitoria de plata-indio

Antecedentes de la invención

1. Campo de la Invención:

La presente invención se refiere a un método de unión y un sistema de estructura de unión, y más particularmente a un método de fase líquida transitoria de plata-indio de unión de un dispositivo semiconductor y un soporte de dispersión de calor, y una estructura semiconductor que tiene una junta de unión de fase líquida transitoria de plata-indio.

2. Antecedentes de la invención:

Cuando se fabrican dispositivos semiconductores de alta potencia, a menudo es necesario diseñar y construir una estructura de gestión térmica para disipar suficientemente el calor generado en el interior, asegurando así el funcionamiento normal continuo de los dispositivos de alta potencia. Por lo general, la funcionalidad y la capacidad de los dispositivos semiconductores de alta potencia están limitadas y determinadas por la provisión/disponibilidad/eficacia de tal estructura de gestión térmica. Una estrategia común de gestión térmica es adoptar material de alta conductividad térmica como soportes de dispersión de calor de los dispositivos semiconductores de alta potencia. Entre todos los materiales a granel conocidos existentes, el diamante tiene el valor de conductividad térmica más alto (~2000 W/mK). Como resultado, el diamante se ha seleccionado con frecuencia como material para los soportes de dispersión de calor en los productos de alta gama de electrónica de alta potencia, optoelectrónica y fotónica. Dado que el precio unitario del diamante policristalino cultivado por deposición química de vapor (CVD) en el mercado ya es lo suficientemente bajo, los productos de consumo industrial pueden considerar económicamente aceptables los soportes de dispersión de calor a base de diamante.

Sin embargo, el verdadero desafío al aplicar soportes de dispersión de calor basados en diamantes es cómo interconectar o formar una junta de unión confiable entre los dispositivos semiconductores de alta potencia y el diamante. Los requisitos generales de diseño de una buena junta de unión para las aplicaciones de dispersión de calor se dan a continuación.

En primer lugar, los materiales de la junta de unión deben poseer conductividades térmicas razonablemente altas, y el espesor de la junta de unión debe ser lo suficientemente delgado, asegurando así que la resistencia térmica general entre los dispositivos semiconductores de alta potencia y el diamante se minimice preferiblemente.

En segundo lugar, la junta de unión debe ser mecánicamente robusta y fuerte, y térmica y químicamente estable para soportar la estabilidad de la estructura integrada del ensamblaje del dispositivo a los soportes durante el procedimiento de fabricación posterior o durante las operaciones normales del dispositivo a temperaturas elevadas. Para la confiabilidad a largo plazo, la junta de unión debe mantener sus propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas después de una exposición prolongada a las temperaturas de servicio o después de múltiples ciclos térmicos con una resistencia a la fatiga razonable. Es particularmente difícil desarrollar el método de unión con materiales de unión apropiados para interconectar los dispositivos semiconductores de alta potencia con los soportes de dispersión de calor a base de diamante por las siguientes razones.

En particular, el diamante es bien conocido por ser uno de los materiales más duros y puede considerarse como un cuerpo absolutamente rígido durante el procedimiento de unión. Por lo tanto, los dispositivos semiconductores funcionales pueden agrietarse o verse afectados fácilmente por la tensión concentrada si la fuerza de unión aplicada es demasiado grande durante el procedimiento de unión.

Además, el coeficiente de expansión térmica (CTE) del diamante es de solo 1 ppm/°C, que es más pequeño que la mayoría de los materiales semiconductores comúnmente usados, por ejemplo, silicio (Si): 2.7 ppm/°C, arseniuro de galio (GaAs): 5.9 ppm/°C, nitruro de galio (GaN): 5.6 ppm/°C, fosfuro de indio (InP): 4.6 ppm/°C, carburo de silicio (SiC): 4.7 ppm/°C. Por lo tanto, la tensión/deformación inducida térmicamente por el desajuste del CTE entre los dispositivos semiconductores y los soportes de dispersión de calor de diamante se pueden acumular durante el procedimiento de enfriamiento desde la temperatura de unión hasta la temperatura ambiente. Esta tensión/deformación inducida por el desajuste del CTE suele ser problemática en la estructura heterogénea integrada, lo que lleva a problemas tales como microfisuras en los dispositivos semiconductores funcionales, delaminación interfacial, mal funcionamiento inducido por tensión/deformación residual, etc. Por lo tanto, un procedimiento de unión que requiere una menor presión de unión y una temperatura de unión más baja es muy deseable en la integración heterogénea entre dispositivos semiconductores y soportes de dispersión de calor basados en diamantes.

Convencionalmente, las soldaduras blandas, tales como estaño puro (Sn), soldadura rica en estaño, estaño-plomo (Sn-Pb), indio puro (In), soldadura rica en In e indio-estaño (In-Sn), etc., se han usado para la unión de semiconductores. Sin embargo, el límite de elasticidad de las soldaduras blandas suele ser demasiado bajo, por lo

que las n capas de unión tienden a deformarse plásticamente para relajar la tensión desarrollada. Sin embargo, la capacidad de deformación plástica hace que la soldadura blanda esté sujeta a fatiga térmica y problemas de ruptura por fluencia, lo que provoca problemas de confiabilidad a largo plazo. Por lo tanto, la industria prefiere usar soldaduras duras en productos de alta gama, donde la confiabilidad a largo plazo es de mayor importancia. Las soldaduras duras más usadas procedían de la familia de eutécticos ricos en oro. Se han desarrollado y aplicado tecnologías de unión eutéctica ricas en oro, tal como oro-estaño (Au-Sn), oro-germanio (Au-Ge) y oro-silicio (Au-Si), etc., para la integración heterogénea entre los dispositivos semiconductores a los soportes de dispersión de calor a base de diamante. Después del desarrollo y la optimización durante décadas en aplicaciones industriales, se ha demostrado que las tecnologías de unión eutéctica ricas en oro son soluciones de ingeniería confiables a largo plazo para unir dispositivos semiconductores a soportes de diamante. Un ejemplo se ilustra en el documento US 6,504,242 que divulga un conjunto electrónico que comprende un disipador de calor térmicamente conductor; una capa humectante formada en una superficie inferior del disipador de calor térmicamente conductor y un material de interfase térmico metálico de un material diferente al de la capa humectante ubicada en una matriz con una superficie inferior de la capa humectante en una superficie superior del material de interfase térmico metálico habiéndose calentado el material metálico de la interfase térmica para que se fundiera, y se dejó enfriar para que solidificara y formara una interfase térmica y estructural entre la matriz y el disipador de calor térmicamente conductor. El documento US 6,504,242 guarda silencio, entre otras cosas, sobre al menos una estructura de unión en sándwich que incluye la provisión de capas según la presente invención.

La unión eutéctica oro-estaño (Au 80 a % y Sn 20 a %), que se considera como el método más popular entre los mencionados anteriormente, tiene un punto eutéctico de 280 °C, y se ha informado que el procedimiento de unión confiable solo se puede lograr a 320 °C con una velocidad de rampa de temperatura muy rápida durante la etapa de calentamiento. Sin embargo, la temperatura de unión de 320 °C se considera un nivel de temperatura relativamente alto, lo que podría dar lugar a graves problemas asociados con el desajuste del CTE y un historial de difusión térmica no deseado que pudiera degradar las composiciones originales y las nanoestructuras en los dispositivos semiconductores funcionales. Además, se ha informado que la estructura de la junta de unión eutéctica modificada de Au-Sn con una capa reguladora de tensión de oro puro ayudaría a mitigar los problemas de tensión/deformación inducidos por el desajuste del CTE, pero a costa de agregar más resistencia térmica general en la estructura de disipación de calor. El coste extremadamente alto de la materia prima del oro (>1250 USD/oz.) es otra fuerza impulsora importante para desarrollar una solución de unión alternativa, que no es de la familia de eutécticos ricos en oro pero con un rendimiento similar o incluso mejor.

La unión en fase líquida transitoria (TLP) con el sistema de plata-indio (Ag-In) es uno de los candidatos prometedores para proporcionar la solución de unión alternativa a la industria de los semiconductores. En particular, el precio unitario de una materia prima en el mercado internacional de la plata (~15 USD/oz.) y el indio (~5 USD/oz.) son mucho más bajos que el oro. La idea central de la unión en TLP es formar una junta de unión que pueda soportar una temperatura de trabajo alta a una temperatura de unión relativamente más baja. Se prefiere altamente una estructura de unión en capas tipo sándwich de la unión con Ag-In para proporcionar una mejor resistencia interfacial y evitar problemas de migración de indio a largo plazo. Sin embargo, el objetivo de reducir el espesor de la junta de unión es muy difícil de lograr, debido al hecho de que los comportamientos de difusión en el sistema Ag-In son rápidos y difíciles de controlar.

Más específicamente, se ha registrado previamente que el espesor de la capa de indio en la estructura de unión tipo sándwich debe ser superior a 5 µm para lograr una unión rica en Ag fiable y totalmente unida a una temperatura de unión relativamente baja. Como resultado, el espesor total de la junta de unión del trabajo anterior tiene que ser superior a 30 µm, lo que se considera demasiado grueso para aplicaciones de disipación de calor de semiconductores de alta potencia.

Sumario de la invención

De acuerdo con lo anterior, es un objeto de la presente invención desarrollar un enfoque para reducir el espesor de la junta de unión con Ag-In para satisfacer todos los requisitos propuestos por las aplicaciones de disipación de calor de semiconductores de alta potencia.

Para lograr el objeto mencionado anteriormente, según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método de fase líquida transitoria (TLP) de Ag-In de unión de un dispositivo semiconductor y un soporte de dispersión de calor. El método de TLP con Ag-In comprende formar una primera estructura de unión en un lado inferior del dispositivo semiconductor, que incluye: formar una primera capa de unión en TLP con Ag-In en la parte inferior del dispositivo semiconductor; formar una segunda estructura de unión en un lado superior del soporte de dispersión de calor, que incluye: formar una estructura multicapa que tiene una segunda capa de unión en TLP con Ag-In en la parte superior del soporte de dispersión de calor, una capa transitoria intermedia del IMC de AgIn₂ (compuesto intermetálico) sobre una parte superior de la capa de unión en TLP con Ag-In, una capa de unión en TLP con In en la parte superior de la capa transitoria intermedia del IMC de AgIn₂, y una capa de recubrimiento contra la oxidación del IMC de AgIn₂ en la parte superior de la capa de unión en TLP con In; realizar un procedimiento de unión con Ag-In en la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión, convirtiendo así la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión en una junta de unión que incluye una estructura de unión en sándwich que tiene una primera capa de solución sólida de Ag-In en contacto con el dispositivo semiconductor, una segunda capa de solución sólida

de Ag-In en contacto con el soporte de dispersión de calor y una capa del IMC de Ag_2In en sándwich por la primera capa de solución sólida de Ag-In y la segunda capa de solución sólida de Ag-In, de manera que la junta de unión une el dispositivo semiconductor y el soporte de dispersión de calor, y el espesor de la capa del IMC de Ag_2In es mayor que el espesor de la primera capa de solución sólida de Ag-In y mayor que el espesor de la segunda capa de solución sólida de Ag-In.

Adicionalmente, según un segundo aspecto de la presente invención, una estructura semiconductor comprende un dispositivo semiconductor; un soporte de dispersión de calor; una junta de unión que une el dispositivo semiconductor y el soporte de dispersión de calor, en la que la junta de unión incluye una estructura de unión en sándwich, y la estructura de unión en sándwich incluye: una primera capa de solución sólida de Ag-In en contacto con el dispositivo semiconductor; una segunda capa de solución sólida de Ag-In en contacto con el soporte de dispersión de calor; y una capa del IMC de Ag_2In (compuesto intermetálico) en sándwich por la primera capa de solución sólida de Ag-In y la segunda capa de solución sólida de Ag-In, en la que el espesor de la capa del IMC Ag_2In es mayor que el espesor de la primera capa de la solución sólida de Ag-In y mayor que el espesor de la segunda capa de solución sólida de Ag-In.

El alcance adicional de la aplicabilidad de la presente invención resultará evidente a partir de la descripción detallada que se proporciona a continuación. Sin embargo, debe entenderse que la descripción detallada y los ejemplos específicos, si bien indican realizaciones preferidas de la invención, se proporcionan solo a modo de ilustración, dado que diversos cambios y modificaciones dentro del espíritu y alcance de la invención resultarán evidentes para los expertos en la técnica de esta descripción detallada.

Breve descripción de los dibujos

La presente invención se comprenderá mejor a partir de la descripción detallada que se proporciona a continuación y de los dibujos adjuntos que se proporcionan solo a modo de ilustración y, de este modo, no son limitativos de la presente invención, y en los que:

La figura 1 ilustra una vista en sección transversal de las capas de metalización en un dispositivo semiconductor/oblea según una realización de la presente invención;

La figura 2 ilustra una vista en sección transversal de las capas de metalización en un soporte de dispersión de calor según una realización de la presente invención;

La figura 3 ilustra una vista en sección transversal de microestructuras físicas reales de las capas de metalización en el soporte de dispersión de calor después de la deposición PVD (deposición física de vapor) según una realización de la presente invención;

La figura 4 ilustra una vista en sección transversal de la configuración antes de la unión en TLP con Ag-In según una realización de la presente invención;

La figura 5 ilustra los perfiles de temperatura y presión de unión aplicados durante el procedimiento de unión en TLP con Ag-In según una realización de la presente invención;

La figura 6 ilustra un diagrama de fase binario Ag-In; y

La figura 7 ilustra una vista en sección transversal de una junta de unión en TLP con Ag-In entre el dispositivo semiconductor y el soporte de dispersión de calor según una realización de la presente invención.

Descripción detallada de las realizaciones ilustradas

La presente invención se describirá ahora en detalle con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se usarán los mismos números de referencia para identificar elementos iguales o similares en las varias vistas. Cabe señalar que los dibujos deben verse en la dirección de orientación de los números de referencia.

En la presente solicitud, se ilustra una realización del método de unión en fase líquida transitoria (TLP) de plata-indio (Ag-In), junto con las estructuras de unión diseñadas específicamente antes del procedimiento de unión y diversas propiedades superiores de la junta de unión rica en Ag final. Con consideraciones fundamentales de termodinámica y cinética, los comportamientos naturales de difusión en el sistema Ag-In se comprenden mejor y se controlan con precisión con una secuencia de procedimientos bien diseñados antes de la unión y durante el procedimiento de unión en TLP. Por lo tanto, en la presente invención se ha desarrollado bien un nuevo método de unión en TLP con Ag-In para producir la junta de unión metalúrgica rica en Ag ultradelgada ($\leq 3 \mu\text{m}$). El método de unión en TLP con Ag-In ilustrado es esencialmente un método de unión sin fundente, de baja temperatura y baja presión. Por lo tanto, es muy ventajoso en la integración heterogénea entre dispositivos semiconductores y soportes de dispersión de calor basados en diamantes.

En las siguientes realizaciones ilustradas, los dispositivos semiconductores funcionales de arseniuro de galio (GaAs) y los soportes de dispersión de calor de diamante se usan como ejemplos de dos partes que se unirán entre sí. Sin embargo, el método de unión en TLP con Ag-In ilustrado, también se puede aplicar a otros dispositivos semiconductores y otros soportes de dispersión de calor.

Como se mencionó, el diamante es bien conocido por ser uno de los materiales más duros y puede considerarse como un cuerpo absolutamente rígido durante el procedimiento de unión. Por lo tanto, los dispositivos semiconductores funcionales pueden agrietarse o verse afectados fácilmente por la tensión concentrada si la fuerza de unión aplicada es demasiado grande durante el procedimiento de unión.

Por otro lado, el dispositivo semiconductor de GaAs se elige por su conocida naturaleza frágil y quebradiza, por lo que es uno de los casos más difíciles entre diversos semiconductores para lograr la unión con el diamante. El dispositivo semiconductor GaAs también se usa comúnmente para fabricar dispositivos semiconductores de alta potencia.

La figura 1 ilustra una oblea/dispositivo semiconductor o un chip 1 semiconductor individual, por ejemplo, una oblea/dispositivo de GaAs en la realización ilustrada, que está bien preparado a partir de las fabricaciones de la parte frontal del semiconductor con una superficie acabada similar a un espejo en el lado inferior de la misma. En una realización, las capas de metalización en el lado inferior de la oblea/dispositivo 1 semiconductor incluyen una capa de adhesión/barrera difusión 2, una capa 3 de compensación de tensión inducida por el desajuste de adhesión/CTE (coeficiente de expansión térmica) y una capa 4 de unión en TLP temperatura de fusión alta (T_m).

La capa de adhesión/barrera de difusión 2 sirve como interconexión metalúrgica entre el semiconductor y las siguientes capas de unión, y también evita que se produzca la interdifusión entre el semiconductor y las capas de unión durante los procedimientos posteriores. En una realización, la capa de adhesión/barrera de difusión 2 se puede seleccionar de los materiales que pueden formar un enlace covalente, pero tienen una velocidad de interdifusión muy limitada con los semiconductores específicos que se van a interconectar y las siguientes capas de unión. También es preferible elegir materiales de metalización que posean valores de CTE similares con el semiconductor específico que se va a unir. En la realización ilustrada, se puede usar preferiblemente cromo (Cr) o titanio (Ti) en la fabricación de la capa de adhesión/barrera de difusión 2 para la oblea/dispositivo semiconductor de GaAs.

Además, en la realización ilustrada, la capa 3 de compensación de tensión inducida por desajuste de adhesión/CTE está incluida en la estructura de las capas de unión para garantizar una buena resistencia interfacial a largo plazo entre la capa de adhesión/barrera de difusión 2 y la capa 4 de unión en TLP de alta temperatura de fusión (T_m). En principio, los valores de CTE de los materiales usados en la capa 3 de compensación de tensión inducida por desajuste de adhesión/CTE es intermedio, lo que debería estar entre el valor de CTE de la capa de adhesión/barrera de difusión 2 y el valor CTE de la capa 4 de unión en TLP de alta temperatura de fusión (T_m). En una realización, el oro (Au), el platino (Pt) y el níquel (Ni) son candidatos apropiados que pueden servir como esta capa 3 intermedia de compensación de tensión inducida por CTE. Se puede elegir una buena combinación de capa 2 y capa 3 entre Cr-Au, Cr-Pt, Ti-Au, Ti-Pt, Ti-Ni, etc. En una realización de las capas de metalización de unión, la capa de adhesión/barrera de difusión 2 tiene un espesor de 30 nm, y la capa 3 de compensación de tensión inducida por desajuste de adhesión/CTE tiene un espesor de 50 nm. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el espesor de las capas de metalización de unión puede variar a partir de estos valores siempre que cumplan propósitos similares.

En la realización ilustrada, es preferible usar plata (Ag) como material de T_m alta en la capa 4 de unión en TLP con Ag-In. En una realización preferida de las capas de metalización de unión, la plata de la capa 4 de unión en TLP de T_m alta tiene un espesor de 1000 nm. Se sabe que la suavidad de la superficie de unión inicial es crucial para la calidad final de la junta de unión. Como resultado, los métodos de deposición física de vapor (PVD), por ejemplo, evaporación por haz de electrones, pulverización de plasma, pulverización catódica con magnetron, etc., se usan preferiblemente para fabricar la estructura de unión para garantizar una buena suavidad de la superficie. En una realización, como se ilustra en la figura 1, la estructura de unión en el lado de GaAs se fabrica mediante un método PVD bajo un ciclo de vacío ininterrumpido. Según lo confirmado por la medición de microscopía de fuerza atómica (AFM), sería muy preferible para los siguientes propósitos de unión, si la rugosidad de la superficie depositada de la capa 4 de unión en TLP de T_m alta tiene un valor de raíz cuadrada media (RMS) de 50 nm o menor.

Vale la pena señalar que la capa de plata de 1000 nm de espesor se consideraría una capa relativamente gruesa si se usan los métodos PVD como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, la velocidad y el perfil de deposición de PVD deben diseñarse específicamente para evitar el problema de las ampollas de plata, que está asociado con el fenómeno de migración térmica de la plata. Una ampolla de plata puede crecer hasta cientos de nanómetros en la dirección vertical y unos pocos micrómetros en la dirección lateral, y esas ampollas de plata conducirían a resultados de unión no favorables posteriormente. Potenciar la resistencia interfacial entre cada capa depositada y disminuir la movilidad térmica migratoria son los factores clave para abordar el problema de las ampollas de plata. Más específicamente, en una realización, una velocidad de deposición más lenta (< 0.05 nm/s) en la etapa inicial del crecimiento de la película y una temperatura del sustrato más baja durante el procedimiento de deposición ayudaría a suprimir completamente el problema de las ampollas de plata. En particular, es muy preferible dividir el procedimiento de deposición de PVD de la capa de plata en varias etapas individuales, lo que permitiría que el sustrato del procedimiento de deposición de PVD se enfríe naturalmente en cada intervalo entre las etapas individuales del procedimiento de PVD durante al menos

10 minutos. Ayudará a mitigar la temperatura del sustrato y reducirá la tensión térmica acumulado y la energía retenida en la película de PVD plateada, eliminando así por completo el problema de las ampollas de plata.

Después del procedimiento de PVD anterior, la oblea/dispositivo de GaAs u otros tipos de oblea de semiconductor, además se pueden cortar en cubitos en los chips semiconductores de GaAs individuales con la estructura 11 de unión en TLP, como se muestra en la figura 1.

La figura 2 ilustra un diseño de metalización y capas de unión en TLP en un lado superior de un soporte 5 de dispersión de calor, por ejemplo, un diamante cultivado por CVD en la realización ilustrada. Las capas 12 de metalización en el soporte 5 de dispersión de calor incluyen una capa de adhesión/barrera de difusión 2', una capa 3' de compensación de tensión inducida por desajuste de adhesión/CTE, una capa 6 de unión en TLP de temperatura de fusión alta, una capa 7 de unión en TLP de temperatura de fusión baja, y una capa 8 de recubrimiento contra la oxidación.

Antes de la metalización, la superficie del diamante 5 cultivado por CVD se prepara preferiblemente con un procedimiento de pulido fino. La suavidad y limpieza iniciales de la superficie del diamante 5 cultivado por CVD u otros tipos de soportes de dispersión de calor son importantes para la calidad final de las capas de metalización y los siguientes resultados de unión. Más específicamente, un diamante 5 cultivado por CVD acabado similar a un espejo con una rugosidad superficial de un valor RMS de 50 nm o menor debería satisfacer este requisito, que está disponible comercialmente en el mercado de diversos fabricantes de diamantes cultivados por CVD. También se pueden aplicar disolventes orgánicos comunes para limpiar y eliminar las contaminaciones menores en los diamantes cultivados por CVD recibidos de los fabricantes, tales como grasa, partículas de polvo, etc. La limpieza por pulverización con plasma de argón (Ar) se puede aplicar como la etapa final de limpieza. antes de cargarlo en la cámara de deposición de PVD, con el fin de eliminar cualquier posible monocapa de moléculas orgánicas que quede en la superficie del diamante cultivado por CVD, asegurando así la buena resistencia interfacial con la capa de adhesión. También se pueden usar métodos de deposición y diseño de capas de metalización similares en la fabricación de la capa de adhesión/barrera de difusión 2' y la capa 3' de compensación de tensión inducida por desajuste de adhesión/CTE' en el diamante 5 cultivado por CVD, o en los otros tipos de soportes de dispersión de calor en general

En una realización preferida del diseño de capas de unión en TLP con Ag-In, la capa 6 de unión en TLP de T_m alta está hecha de plata (Ag), y la capa 7 de unión en TLP de T_m baja está hecha de indio (In). En una realización, la capa 6 de unión en TLP de T_m alta tiene un espesor de 1000 nm, y el espesor de la capa 7 de unión en TLP de T_m baja oscila preferiblemente entre 750 nm y 1400 nm, lo que corresponde a la fase y composición deseables de la junta final.

El indio puede oxidarse muy fácilmente después de exponerlo al entorno ambiental. Por lo tanto, se espera que se forme una capa continua de óxido de indio en la superficie superior. El óxido de indio es un compuesto altamente termoestable y químicamente estable, y la existencia de óxido de indio es perjudicial para la calidad general de la junta de unión final. Por lo tanto, la capa 8 de recubrimiento contra la oxidación, en la parte superior de la capa 7 de unión en TLP de T_m baja, está incluida en el diseño de capas de unión en TLP con Ag-In según una realización. Cualquier metal noble puede servir como esta capa de recubrimiento para evitar la oxidación del indio, pero en la realización ilustrada, la plata es la opción más favorable para el diseño de capas de unión en TLP con Ag-In, eliminando así todas las posibles fases ternarias desfavorables u otros tipos de formaciones de precipitados en la interfase de la junta de unión.

Si la capa de recubrimiento es demasiado delgada, entonces no puede evitar por completo los problemas de oxidación. Si la capa de recubrimiento es demasiado gruesa, entonces será perjudicial para el procedimiento de unión en TLP, lo que conducirá a posibles resultados de unión incompletos. En la realización ilustrada, se puede usar preferiblemente una capa de plata con un espesor de alrededor de 20 nm para que sirva como capa 8 de recubrimiento contra la oxidación. Al evitar que se produzca la oxidación, no se necesita fundente para eliminar el óxido, por lo que todos los problemas de confiabilidad relacionados con los residuos de fundente se pueden evitar. Por lo tanto, el método de unión en TLP con Ag-In actual es esencialmente un método de unión sin fundente.

La metalización y la estructura de las capas de unión en TLP en el diamante cultivado por CVD o el soporte 5 de dispersión de calor se pueden fabricar en un ciclo de vacío ininterrumpido con los métodos de PVD mencionados anteriormente. Sin embargo, en otra realización, también es deseable fabricar primero la capa 2', la capa 3' y la capa 6 bajo un ciclo de vacío, y luego realizar un procedimiento de recocido en el soporte 5 de dispersión de calor con capas depositadas antes de la fabricación de la capa 7 y la capa 8. Este procedimiento de recocido puede fortalecer la resistencia interfacial entre las capas de metalización y el diamante cultivado por CVD o el soporte 5 de dispersión de calor. Durante este procedimiento de recocido, la ampliación del tamaño de grano y la evolución de la microestructura de la capa 6 de unión en TLP de T_m alta conduciría a resultados beneficiosos para el procedimiento de unión en TLP posterior. También se puede aplicar un procedimiento de recocido similar al chip de GaAs con la estructura 11 de unión en TLP. En una realización, se puede usar un procedimiento de recocido con unas pocas horas en el intervalo de temperatura de 250 °C a 400 °C para cumplir con los propósitos mencionados anteriormente.

El procedimiento de PVD de la capa 7 de unión en TLP de T_m baja, es decir, la capa de indio en la realización ilustrada, es muy crucial para el éxito final del procedimiento de unión en TLP con Ag-In, que se explica a continuación.

En particular, las reacciones de interdifusión y de estado sólido entre dos metales ocurren comúnmente a temperaturas elevadas, donde la velocidad de interdifusión es lo suficientemente grande y se proporciona suficiente energía térmica para superar la barrera energética de las reacciones de estado sólido. Por lo general, los compuestos intermetálicos (IMC) se formarán como resultado de las reacciones de interdifusión y de estado sólido. El sistema Ag-In exhibe una naturaleza termodinámica y cinética muy especial en términos de reacciones de interdifusión y de estado sólido. Se sabe que las reacciones de estado sólido entre la plata y el indio pueden tener lugar a una temperatura relativamente baja o incluso a temperatura ambiente. Durante el procedimiento de PVD, los átomos o moléculas de vapor metálico generalmente se energizan, por ejemplo, contienen energía térmica en los métodos de evaporación térmica o contienen energía cinética en los métodos de pulverización catódica. Para la mayoría de los sistemas metálicos, una velocidad de deposición más lenta dará como resultado una película metálica fabricada con PVD con una adhesión más fuerte, una superficie más suave, una microestructura más densa y, de este modo, una mejor calidad general de la película. Sin embargo, esta regla general no se aplica al sistema Ag-In. Durante el procedimiento de PVD, se producirá una interdifusión in situ y las siguientes reacciones de estado sólido entre la capa 6 de unión en TLP de T_m alta fabricada previamente y la capa 7 de unión en TLP de T_m baja que se deposita. También es posible que la capa 6 de unión en TLP de T_m alta pueda reaccionar directamente con los átomos o moléculas de vapor de indio entrantes en la etapa temprana del procedimiento PVD de la capa 7 de unión en TLP de T_m baja. Como se ilustra en la figura 3, una porción de la capa 6 de unión inicial de TLP de T_m alta y la capa 7 de unión en TLP de T_m baja inicial se convertirán en una capa adicional del IMC en la interfase de la película de PVD metálica original (es decir, la interfase de la capa 6 de unión en TLP de T_m alta y la capa 7 de unión en TLP de T_m baja). La fase de esta capa adicional ha sido identificada como IMC de AgIn_2 (fase ϕ) por el método de difracción de rayos X (XRD), y se designa como la capa 9 transitoria intermedia del IMC de AgIn_2 . Por lo tanto, es esencial controlar la cinética de crecimiento de esta capa 9 intermedia transitoria del IMC de AgIn_2 para obtener un resultado de unión en TLP favorable.

En la etapa temprana de la formación del IMC de AgIn_2 , los átomos de plata se difunden en la película de indio a través del mecanismo de difusión intersticial a una velocidad relativamente rápida, mientras que los átomos de indio se difunden en la película de plata a través del mecanismo de difusión de los sitios de sustitución a una velocidad relativamente lenta. Por lo tanto, la formación y nucleación inicial de AgIn_2 es cinéticamente favorable en la interfase original, creciendo hacia el lado de la capa de indio. Durante el procedimiento de PVD de la capa 7 de unión en TLP de T_m baja, se encuentra que si se usa una velocidad de deposición relativamente lenta (< 0.1 nm/s), daría como resultado la formación de una microestructura morfológica de montículos en la superficie superior de las capas de unión. El valor RMS de la rugosidad superficial de la superficie con la microestructura de montículo puede ser tan alto como unos pocos micrómetros. Esta microestructura de montículos es muy perjudicial para el éxito final del procedimiento de unión en TLP con Ag-In, lo que lleva a resultados experimentales parcialmente unidos o no unidos. Los principales factores que contribuyen a la formación de la microestructura del montículo pueden ser la exposición prolongada con los átomos o moléculas de vapor de indio energizados durante el procedimiento de PVD y la siguiente interdifusión rápida de Ag-In, las reacciones de estado sólido asociadas y las migraciones y aglomeraciones de granos. Según lo confirmado por la medición experimental XRD, si se deposita con una velocidad de deposición relativamente lenta (< 0.1 nm/s), la mayor parte del indio ya se habría convertido en IMC de AgIn_2 , debido al exceso de interdifusión in situ y reacciones de estado sólido, durante el procedimiento de PVD.

Por lo tanto, en una realización preferida del procedimiento PVD, se usa una velocidad de deposición relativamente alta para fabricar la capa 7 de unión en TLP de T_m baja. La velocidad de deposición está diseñada para parecerse a la curva de una función sinusoidal, que varía desde 4 nm/s a 5 nm/s con un período de función sinusoidal de 20 s en una realización. La velocidad de deposición puede ser monitoreada por una microbalanza de cristal de cuarzo (QCM) y un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) bien controlado con un sistema de retroalimentación negativa. Mediante el uso de esta curva sinusoidal con una velocidad de deposición más alta, la formación de la microestructura de montículos se puede suprimir cinéticamente en gran medida y la suavidad de la superficie de las capas de unión se puede mejorar significativamente, con un valor RMS inferior a 50 nm. Por lo tanto, la utilidad de una velocidad de deposición de indio más alta (que varía desde 4 nm/s a 5 nm/s en una realización) daría un resultado favorable a las capas de unión de PVD fabricadas.

Después de la fabricación por PVD de la capa 8 de recubrimiento contra la oxidación, se espera que la fina capa de recubrimiento de plata reaccione completamente con la capa de indio debajo, convirtiéndose en la capa 10 de recubrimiento contra la oxidación IMC de AgIn_2 , debido a la interdifusión y reacciones de estado sólido en el sistema Ag-In que se han mencionado anteriormente. La capa 10 de recubrimiento contra la oxidación del IMC de AgIn_2 debe ser aproximadamente tres veces más gruesa que la capa de recubrimiento 8 contra la oxidación original en la realización ilustrada. La capa 10 de recubrimiento contra la oxidación del IMC de AgIn_2 no se oxidará en el entorno ambiental y puede evitar que la capa de indio se oxide, como se confirmó experimentalmente a partir de la medición XRD. Por lo tanto, las microestructuras físicas reales de la metalización y las capas 12' de unión en TLP en el soporte 5 de dispersión de calor después de que se haya revelado completamente la deposición de PVD, como se ilustra en la figura 3.

En una realización, antes del procedimiento de unión, es muy preferible almacenar el soporte 5 de dispersión de calor con una estructura de unión hecha de las capas 12' de unión en TLP a una temperatura relativamente baja (< -20 °C), para preservar las propiedades óptimas de las capas de unión en TLP a largo plazo.

El procedimiento de unión en TLP detallado se describirá a continuación, para realizar la interconexión entre un chip 1 semiconductor, por ejemplo, un chip GaAs, con las capas 11 de unión en TLP, y un soporte 5 de dispersión de calor, por ejemplo, un diamante cultivado por CVD, con capas 12' de unión en TLP, con una unión metalúrgica confiable.

En particular, en una realización preferida de la configuración antes de la unión en TLP con Ag-In, como se ilustra en la figura 4, un diamante 5 cultivado por CVD con las capas 12' de unión en TLP se ubica en primer lugar en una etapa de unión con una superficie plana razonable. A continuación, se coloca un chip 1 de GaAs con las capas 11 de unión en TLP sobre el diamante 5 cultivado por CVD en el centro, con las capas 11 de unión en TLP hacia abajo. Por lo tanto, se establece una configuración de capas de unión en TLP con Ag-In en sándwich simétrico entre el chip 1 de GaAs y el soporte 5 de dispersión de calor de diamante cultivado por CDV.

Se aplica una presión de unión estática entre el chip 1 de GaAs y el diamante 5 cultivado por CVD con las herramientas de unión, ya sea antes del procedimiento de unión o durante el procedimiento de unión, para asegurar el contacto íntimo a nivel atómico en la interfase de unión. La magnitud de la presión de unión aplicada debe optimizarse para lograr resultados de unión favorables. Si la presión de unión aplicada es demasiado alta, provocará la generación de grietas dentro del chip 1 de GaAs. Si la presión de unión aplicada es demasiado baja, dará lugar a resultados de unión parcial con algunos espacios o vacíos ubicados en la interfase de unión original. En la realización ilustrada, la presión de unión dentro del intervalo desde 100 psi (0.69 MPa) a 300 psi (2.07 MPa) daría como resultado un resultado de unión preferido, mientras que una presión de unión de alrededor de 200 psi (1.38 MPa) sería el más favorable para el procedimiento de unión en TLP con Ag-In de GaAs a diamante. Con este nivel de magnitud de la presión de unión, este procedimiento de unión en TLP con Ag-In debe considerarse como un procedimiento de unión a baja presión.

Además, también es importante garantizar una distribución uniforme de la presión de unión aplicada en el chip 1 de GaAs. La falta de uniformidad en la distribución de la presión de unión es responsable de los resultados de unión no favorables, tales como los resultados de unión a la mitad, unión sólo en los bordes o unión sólo en las esquinas. Las herramientas de unión diseñadas especialmente con el mecanismo de oscilación pueden proporcionar cierta tolerancia de ingeniería para superar este problema de desigualdad en la distribución de la presión de unión, que se debe principalmente a las condiciones de planitud no ideales en la superficie de las herramientas de unión o la etapa de unión.

La comprensión de la ruta de conducción de calor y los gradientes de temperatura de las estructuras de unión están altamente relacionados con el procedimiento de unión en TLP general. Las consideraciones detalladas sobre la estructura térmica de la configuración de unión se elaboran a continuación.

En particular, durante el procedimiento de unión en TLP, es deseable tener un perfil de temperatura y un gradiente simétricos desde el lado del chip de GaAs y el lado del diamante cultivado por CVD, respectivamente, hasta el centro de la capa 7 de unión en TLP de T_m baja. Dado que la temperatura local está muy relacionada con los comportamientos físicos, tales como la interdifusión, la fusión y la transformación de fase, es favorable tener un perfil de calentamiento sincronizado desde ambos lados. Por lo tanto, con la estructura de capas de unión en TLP con Ag-In en sándwich simétrico, como las flechas representadas en la figura 4, es muy preferible aplicar el calor desde ambos lados de la estructura de unión, para lograr el perfil y gradiente de temperatura simétricos. Si se aplica el calor desde un solo lado, el otro lado actuaría como un disipador de calor e inevitablemente crearía un perfil y un gradiente de temperatura altamente asimétricos, lo que daría como resultado resultados de unión no favorables.

También es posible lograr un perfil de temperatura casi simétrico para la estructura de capas de unión en TLP con Ag-In en sándwich asimétrica con curvas de calentamiento calculadas deliberadamente. Sin embargo, es mucho más simple lograr tales perfiles de temperatura casi simétricos con la estructura de capas de unión en TLP con Ag-In de sándwich simétrico aplicando las curvas de calentamiento idénticas desde ambos lados de la estructura de unión.

La figura 5 ilustra una realización preferida de los perfiles de temperatura y presión de unión aplicados durante el procedimiento de unión en TLP con Ag-In con resultados favorables. Como se representa en la figura 5, el procedimiento general de unión en TLP con Ag-In se puede dividir en cuatro etapas individuales, y el mecanismo físico real de unión en TLP en cada etapa se elaborará con los detalles de la siguiente manera.

En primer lugar, la etapa I es la etapa de rampa de calentamiento, y la velocidad de rampa de calentamiento es uno de los parámetros más importantes en el perfil de temperatura. La unión en TLP con Ag-In en la realización ilustrada no requiere una velocidad de rampa muy rápida (~ 100 K/s), mientras que la unión eutéctica convencional Au-Sn normalmente lo exige. Se ha demostrado que se puede lograr un resultado de unión favorable con una velocidad de rampa de calentamiento moderada (que oscila desde 1 K/s a 20 K/s) en la realización ilustrada.

Más específicamente, al comienzo de la etapa I, el indio en la capa 7 de unión en TLP de T_m baja primero experimentará la interdifusión de estado sólido y las reacciones con la capa 4 de unión en TLP de T_m alta en el lado del chip de GaAs y la capa 6 de unión en TLP de T_m alta en el lado del diamante cultivado por CVD. La etapa temprana de la interdifusión y las reacciones de estado sólido debe llevarse a cabo a través de la capa 9 del IMC transitoria intermedia y la capa 10 de recubrimiento del IMC contra la oxidación, lo que conduce a un mayor crecimiento de la capa 9 del IMC transitoria intermedia y la capa 10 de recubrimiento del IMC contra la oxidación. Por lo tanto, la original

y la capa 9 del IMC transitoria intermedia más desarrollada y la capa 10 de recubrimiento del IMC contra la oxidación actuarían como barreras de interdifusión autolimitantes para evitar que la capa 7 de unión en TLP de T_m baja se consuma demasiado rápido o se difunda demasiado rápido, preservando así el indio adecuado para generar suficiente fase líquida en la etapa de unión en TLP posterior.

De acuerdo con el diagrama de fase binaria Ag-In como se muestra en la figura 6, el indio puro funde a 156.6 °C. Por lo tanto, se generará una gran cantidad de la fase líquida cuando la temperatura de unión alcance los 160 °C. Se ha demostrado experimentalmente que la humectabilidad del indio líquido en la superficie del IMC de AgIn_2 es suficientemente buena. La interdifusión líquido-sólido y las reacciones del procedimiento de unión en TLP con Ag-In comienzan en este punto. Tener suficiente fase líquida generada en este momento es crucial para el éxito del procedimiento de unión en TLP. Con la presión de unión aplicada, el flujo de la fase líquida proporciona la movilidad para que los materiales de unión superen la rugosidad original de la superficie de las capas de unión, eliminando así por completo los vacíos y espacios no favorables en la interfase de unión original. Los vacíos y espacios darían como resultado una resistencia térmica adicional en la estructura térmica, lo que es muy perjudicial para el rendimiento general de la electrónica de alta potencia y la fotónica de alta potencia. Se ha demostrado experimentalmente que el 100 % del área verdaderamente adherida en toda la junta Ag-In se puede lograr con consistencia.

Como se representa en la figura 6, el IMC de AgIn_2 en la capa 9 del IMC transitoria intermedia y la capa 10 de recubrimiento del IMC de AgIn_2 contra la oxidación se convertirán en el indio en fase líquida y en el IMC de Ag_2In en estado sólido (fase γ) a 166 °C, a través de una reacción de descomposición peritética. A diferencia de la fase líquida generada por la fusión de la capa de indio, la cantidad de fase líquida generada a través de la reacción de descomposición peritética será mucho menor. Además, se mezclaría con el IMC Ag_2In de estado sólido en la microestructura peritética. Por lo tanto, la fase líquida generada por la reacción de descomposición peritética por sí sola no puede formar una capa humectante continua sobre toda el área de la junta, ni proporcionar la movilidad de flujo de material adecuada. En otras palabras, conduciría a resultados de unión no favorables si el indio de la capa 7 de unión en TLP de T_m baja ya se hubiera consumido en gran medida antes de la fusión. Sin embargo, la existencia del IMC de AgIn_2 en la capa 9 del IMC transitoria intermedia con un cierto espesor original puede proporcionar el mecanismo de interdifusión autolimitante, evitando así que se produzca el fenómeno de sobreinterdifusión. Se sabe que el indio se difunde preferiblemente a través de los límites de grano de la plata a una velocidad mucho más rápida que a través de la ruta de interdifusión de la red. Sin la barrera de interdifusión autolimitante con un espesor adecuado, el contacto directo del indio líquido con la plata conduciría al fenómeno de sobreinterdifusión debido al exceso de interdifusión a través del límite de grano. La aparición de sobreinterdifusión dará como resultado una microestructura porosa de la junta de unión, que normalmente no es favorable para minimizar la resistencia térmica y la fiabilidad a largo plazo de los dispositivos semiconductores unidos a temperaturas más altas. Por lo tanto, con un espesor nominal determinado de una junta de unión, la proporción de volumen entre el IMC de AgIn_2 anterior a la unión en la capa 9 del IMC transitoria intermedia y el indio restante en la capa 7 de unión en TLP de T_m baja es uno de los parámetros importantes que debe optimizarse para obtener el resultado de unión en TLP con Ag-In más favorable.

En una realización, una proporción de volumen del IMC de AgIn_2 anterior a la unión en la capa 9 del IMC de AgIn_2 transitoria intermedia al indio restante en la capa de unión en TLP de T_m baja, es decir, $(\text{AgIn}_2: \text{In})_{\text{vol.}}$, está en el intervalo de 1: 3 a 1: 1, para lograr resultados favorables de unión en TLP con Ag-In. Este valor de proporción de volumen se puede controlar fácilmente mediante el procedimiento de envejecimiento deliberado antes de almacenar las muestras en un ambiente con una temperatura más baja (< -20 °C). De este modo, se puede formar un espesor deseable del IMC de AgIn_2 mientras se conserva suficiente capa de indio en la estructura de capas de unión en TLP con Ag-In. Sería muy preferible una combinación óptima de la proporción de volumen mencionada anteriormente y la velocidad de rampa de calentamiento en la etapa I de unión en TLP para obtener un resultado de unión con una calidad de unión deseable.

La etapa II es la etapa de interdifusión líquido-sólido del procedimiento de unión en TLP con Ag-In. En la etapa II, la temperatura de unión alcanza los 180 °C, que es la temperatura máxima del procedimiento de unión en TLP con Ag-In. La temperatura máxima del procedimiento de unión en TLP con Ag-In es mucho más baja que la del método de unión eutéctica convencional Au-Sn (320 °C). Por lo tanto, la unión en TLP con Ag-In es un método de unión a baja temperatura, y todos los problemas inducidos térmicamente deberían ser inherentemente mucho menos graves que cuando se usa el método de unión eutéctica convencional Au-Sn.

En la etapa II, la fase líquida de indio en la capa 7 de unión en TLP de T_m baja continúa interdifundiéndose y reaccionando con la capa 4 de unión en TLP de T_m alta y la capa 6 de unión en TLP de T_m alta, hacia arriba y hacia abajo respectivamente, a través de las capas peritéticas transitorias. A medida que avanzan la interdifusión y las reacciones, las concentraciones de plata en las capas intermedias transitorias, es decir, la capa 7 de unión en TLP de T_m baja y las capas peritéticas transitorias, seguirán aumentando. Por lo tanto, la temperatura de fusión de las capas intermedias transitorias seguirá aumentando, de modo que la solidificación de las capas intermedias transitorias comience a ocurrir en el intervalo de temperatura de mantenimiento constante (entre 180 °C y 205 °C en una realización). Mientras tanto, durante la etapa II, IMC de AgIn_2 en la capa 9 del IMC de AgIn_2 transitoria intermedia y la capa 10 de recubrimiento del IMC de AgIn_2 contra la oxidación se han convertido completamente en indio en la fase líquida y el IMC de Ag_2In en estado sólido en la fase γ . La fase líquida de indio, generada a partir de la reacción de descomposición peritética en la capa 9 del IMC de AgIn_2 transitoria intermedia y la capa 10 de recubrimiento del IMC

de AgIn₂ contra la oxidación, también participará en la interdifusión y reacción con la capa 4 de unión en TLP de T_m alta y la capa 6 de unión en TLP de T_m alta. Eventualmente, toda la fase líquida en las capas intermedias transitorias se solidificará completamente en el intervalo de temperatura de mantenimiento constante. Por lo tanto, la junta de unión inicial entre el chip 1 de GaAs y el diamante 5 cultivado por CVD se ha formado en este punto. Un tiempo moderado de retención a temperatura constante (~10 minutos en una realización) sería suficiente para facilitar la interdifusión líquido-sólido y las reacciones hasta que finalice el procedimiento de solidificación completo, es decir, hasta que no se pueda realizar ninguna reacción de descomposición peritética al intervalo de temperatura de retención constante.

La etapa III es la etapa de homogeneización del procedimiento de unión en TLP con Ag-In. Al final de la etapa II, las capas intermedias deberían estar completamente solidificadas, pero aún no totalmente homogéneas. Durante la etapa III del procedimiento de unión en TLP con Ag-In, la temperatura disminuye gradualmente con una velocidad de rampa de enfriamiento que varía de 0.02 K/s a 1 K/s en una realización, pero permanece a una temperatura homóloga relativamente alta (T_h) de la junta de unión (T_h > 0.4). Por lo tanto, con la energía térmica adecuada proporcionada en la etapa III, la interdifusión y las reacciones en estado sólido aún pueden continuar hasta que finalice la homogeneización completa. En la etapa III, ocurre el procedimiento de recrystalización, donde los granos agrandados de ambos lados de las capas de unión en TLP pueden fusionarse por completo. La interfase de unión original desaparecería en este punto, lo que indica que se ha formado una unión metalúrgica confiable.

Como se ilustra en la realización de la figura 7, con un diseño de capas de unión en TLP con Ag-In específico, la junta de unión en TLP con Ag-In con IMC de Ag₂In como composición final se puede lograr al final de la etapa III. Después de la homogeneización completa, se espera que la junta de unión en TLP con Ag-In final, como una estructura de unión en sándwich, consista en una capa 13 del IMC de Ag₂In homogénea, una capa 14 intermedia de solución sólida de Ag-In en el lado del soporte de dispersión de calor, y una capa 15 intermedia de solución sólida de Ag-In en el lado del dispositivo semiconductor. La capa 13 del IMC de Ag₂In homogénea se puede diseñar para ocupar la mayor porción de la junta de Ag-In final. En particular, el espesor de la capa 13 del IMC de Ag₂In es mayor que el espesor de la capa 14 de solución sólida de Ag-In y mayor que el espesor de la segunda capa 15 de solución sólida de Ag-In. Se sabe que la resistencia interfacial del IMC Ag₂In a la capa 2 de metalización o la capa 3 no es fuerte, pero puede adherirse fuertemente a la capa de solución sólida intermedia de Ag-In. También se sabe que la capa intermedia de solución sólida de Ag-In puede adherirse bien a la capa 2 de metalización o la capa 3. Por lo tanto, la estructura de las capas previas a la unión con Ag-In está diseñada para preservar las dos capas 14, 15 intermedias de solución sólida de Ag-In respectivamente en cada interfase después de la homogeneización completa. Esto solo se puede lograr cuando se usa la estructura de capas de unión en TLP con Ag-In tipo sándwich.

Como se representa en la figura 7, la capa 13 del IMC de Ag₂In está completamente separada de las primeras capas 2 y 3 de metalización por la capa 15 de solución sólida de Ag-In, y está completamente separada de las capas 2' y 3' de metalización por la capa 14 de solución sólida de Ag-In.

Además, dado que el tamaño del soporte 5 de dispersión de calor suele ser mayor que el del chip 1 semiconductor, y el área 16 no unida en el lado del soporte de dispersión de calor ha experimentado un procedimiento de reflujo durante el procedimiento de unión, el área 16 no unida se ha convertido en un material compuesto del IMC de Ag₂In e IMC de AgIn₂. Como se representa en la figura 7, el área 16 no unida está en contacto con una pared lateral de la capa 13 del IMC de Ag₂In y una superficie superior de la capa 14 de la solución sólida de Ag-In.

La etapa IV es la etapa de relajación de la tensión térmica del procedimiento de unión en TLP con Ag-In. Debido al desajuste del CTE entre el chip 1 de GaAs y el diamante 5 cultivado por CVD, se inducirá la tensión térmica durante la etapa de enfriamiento del procedimiento de unión. Una velocidad de enfriamiento lenta (< 0.01 K/s en una realización) en esta etapa es muy preferible con el fin de liberar la tensión térmica. Un recocido posterior a la unión a baja temperatura, alrededor de 100 °C, también puede ayudar a liberar aún más la tensión térmica residual. Se ha demostrado experimentalmente que se puede obtener un dispositivo semiconductor libre de estrés residual inducido térmicamente después de la etapa IV del procedimiento de unión en TLP con Ag-In, o después de un procedimiento de recocido posterior a la unión a baja temperatura.

Se ha demostrado experimentalmente que el procedimiento de unión en TLP con Ag-In se puede realizar con éxito en el entorno ambiental. Sin embargo, es preferible realizar el procedimiento de unión en TLP con Ag-In en un ambiente de vacío de nivel intermedio bajo (~ 50 mTorr), para suprimir el posible problema de oxidación del indio durante el procedimiento de unión en TLP con Ag-In. También es favorable lograr una buena calidad de la junta de unión con la utilidad del gas de formación común, tal como el gas de hidrógeno o el gas de ácido fórmico, para proporcionar un entorno reductor durante el procedimiento de unión en TLP con Ag-In.

Como resultado, se puede formar una unión metalúrgica de Ag-In ultrafina ($\leq 3 \mu\text{m}$) uniforme, homogénea, libre de poros y libre de tensiones residuales entre el chip de GaAs y el soporte de dispersión de calor de diamante cultivado por CVD, sin inducir grietas en el chip de GaAs. El espesor de la junta de unión se considera un parámetro crítico para el propósito de disipación de calor en la electrónica y fotónica de alta potencia. Con la junta de unión ultrafina se puede minimizar su resistencia térmica para conseguir una alta conductividad térmica, en comparación con la junta realizada por el método convencional ($> 30 \mu\text{m}$). Por lo tanto, la capacidad de dispersión de calor de los diamantes cultivados

por CVD se puede realizar por completo, lo que lleva a un rendimiento óptimo de los dispositivos electrónicos y fotónicos de alta potencia.

Las ventajas del método de unión en TLP con Ag-In ilustrado se describirán en detalle, atribuyéndolas a las numerosas propiedades excelentes de los materiales de la junta de unión con Ag-In.

- 5 Como se ilustra en la figura 7, en una realización preferida, la junta de unión en TLP con Ag-In consiste principalmente en IMC de Ag_2In (fase γ) 13. En particular, el espesor de la capa 13 del IMC de Ag_2In es mayor que el espesor de la capa 14 de solución sólida de Ag-In y mayor que el espesor de la segunda capa 15 de solución sólida de Ag-In. Por lo tanto, las propiedades mecánicas, térmicas y químicas de la unión final se asemejan a las propiedades materiales del IMC de Ag_2In en la fase γ . De acuerdo con el diagrama de fase binaria Ag-In que se muestra en la figura 6, IMC de Ag_2In en la fase γ se convertirá en IMC de Ag_2In en la fase ζ , a 300 °C, a través de un procedimiento de transformación de fase de estado sólido. A medida que aumenta la temperatura, IMC de Ag_2In en fase ζ seguirá estando completamente en estado sólido, hasta 600 °C. Aunque la junta de unión en TLP con Ag-In se forma a una temperatura de unión relativamente baja, por ejemplo, 180 °C en una realización, la temperatura de trabajo nominal de la junta de unión en la forma IMC de Ag_2In debe ser al menos superior a 300 °C, lo que satisface los requisitos más fundamentales de la electrónica y la fotónica de alta potencia y alta temperatura. Como lo indica el rendimiento de los dispositivos operativos de alta potencia, la conductividad térmica de la junta de unión con IMC de Ag_2In es comparable a la de una junta de unión con el método eutéctico convencional de Au-Sn. Por lo tanto, se espera que la junta de unión en forma del IMC de Ag_2In tenga una conductividad térmica relativamente alta, lo que es muy favorable para la utilidad de los dispositivos de alta potencia.
- 20 La estabilidad a alta temperatura de la junta de unión IMC de Ag_2In también es excelente. La junta de unión IMC de Ag_2In puede soportar una prueba de almacenamiento a alta temperatura y una prueba de ciclo térmico, sin mostrar degradaciones térmicas importantes. Por lo tanto, la junta de unión IMC de Ag_2In se considera una excelente candidata para garantizar el funcionamiento normal de los dispositivos de alta potencia a temperaturas elevadas.
- 25 La junta de unión del IMC de Ag_2In también tiene una estabilidad química superior. La junta de unión IMC de Ag_2In puede soportar un procedimiento de recocido prolongado a la temperatura elevada del aire, sin mostrar ningún problema de oxidación o degradación. En los experimentos de grabado químico, los materiales en las capas 13-16 pueden soportar un procedimiento de grabado prolongado bajo soluciones químicas altamente oxidantes (por ejemplo, HNO_3 , H_2O_2), lo que muestra una buena propiedad contra la oxidación de la junta de unión del IMC de Ag_2In . Se sabe que la plata pura puede corroerse fácilmente con los gases corrosivos que contienen azufre, tal como el vapor de azufre, el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el dióxido de azufre (SO_2) y el sulfuro de carbonilo. El producto de la corrosión, el sulfuro de plata (Ag_2S), es perjudicial para la confiabilidad a largo plazo y la vida útil de los componentes electrónicos que contienen plata. Esto se conoce como el problema del deslustre de la plata. Recientemente se ha descubierto que IMC de Ag_2In exhibe la propiedad antideslustre completa, debido a la alternancia de la banda de valencia cuando forma la aleación con el indio.
- 30
- 35

La migración electroquímica (ECM) es otro problema serio de confiabilidad que preocupa cuando se usa material basado en plata como interconexión en el entorno de alto voltaje. Impulsada por un campo eléctrico alto, la plata pura tiende a formar dendritas o bigotes, lo que provoca posibles fallas por cortocircuito a largo plazo. Se ha descubierto recientemente que el IMC de Ag_2In también exhibe la propiedad de migración antielectroquímica completa, mostrando una corriente de fuga cero en una prueba estándar de gota de agua (WDT). Por lo tanto, la junta de unión IMC de Ag_2In está completamente libre de las principales preocupaciones del problema del deslustre y el problema de la migración electroquímica, lo que garantiza la confiabilidad a largo plazo de los dispositivos con su estabilidad química superior.

40

- 45 La resistencia mecánica del material de la junta de unión determina la estabilidad mecánica de los dispositivos semiconductores unidos. Por lo general, los compuestos intermetálicos son frágiles bajo tensión de tracción por naturaleza, por lo que la tenacidad mecánica bajo tensión de compresión se puede usar para evaluar sus resistencias mecánicas. En una prueba estándar de microindentación, IMC de Ag_2In exhibe un cierto nivel de ductilidad bajo tensión de compresión y no puede agrietarse con la carga de fuerza máxima (1000 gf), mientras que la mayoría de los IMC comunes (por ejemplo, Cu_6Sn_5) se agrietarían a una fuerza mucho más ligera. Por lo tanto, IMC de Ag_2In exhibe una alta tenacidad mecánica, que es muy favorable para la estabilidad mecánica de la junta de unión. Por otro lado, IMC de Ag_2In se asemeja a las propiedades mecánicas de las soldaduras duras típicas, lo que significa que no sufrirá el problema de la fluencia o la fatiga a largo plazo.
- 50

- 55 En vista de lo anterior, los detalles técnicos del método de unión en TLP con Ag-In ilustrado para producir una junta metalúrgica ultrafina se divulgan completamente. Con un coste de materia prima mucho más bajo, en comparación con los métodos de unión convencionales ricos en oro, se espera que el método de unión en TLP con Ag-In ilustrado proporcione un método de unión de troquel económico y amigable para los propósitos de disipación de calor de los dispositivos semiconductores de alta potencia. Este método permite unir a una temperatura relativamente baja sin usar fundente. Por lo tanto, además del enfoque de enlace convencional de chip a chip, también se puede adoptar como un método de unión a nivel de oblea (chip a oblea u oblea a oblea) para aumentar el rendimiento y la productividad en la producción de la masa. Para las aplicaciones industriales, el método de unión en TLP con Ag-In ilustrado se puede usar en la fabricación de diversos dispositivos electrónicos y fotónicos de alta potencia, tal como
- 60

diodos láser (LD) de alta potencia, diodos emisores de luz (LED) de alta potencia, láseres emisores de superficie externa de cavidad vertical (VECSEL), transistores de efecto de campo semiconductor de óxido de metal de alta potencia (MOSFET), etc., donde la capacidad de disipación de calor determina en gran medida el rendimiento general de los dispositivos.

REIVINDICACIONES

1. Un método de fase líquida transitoria (TLP) de Ag-In de unión de un dispositivo semiconductor y un soporte de dispersión de calor, que comprende:

5 formar una primera estructura de unión en un lado inferior del dispositivo semiconductor, que incluye:

formar una primera capa de unión en TLP con Ag en la parte inferior del dispositivo semiconductor;

10 formar una segunda estructura de unión en el lado superior del soporte de dispersión de calor, caracterizada porque el método incluye, además:

15 formar una estructura multicapa que tiene una segunda capa de unión en TLP con Ag en la parte superior del soporte de dispersión de calor, una capa del IMC (compuesto intermetálico) de AgIn_2 transitorio intermedio en la parte superior de la capa de unión en TLP con Ag, una capa de unión en TLP con In en la parte superior de la capa transitoria intermedia del IMC de AgIn_2 y una capa de recubrimiento contra la oxidación del IMC de AgIn_2 en la parte superior de la capa de unión en TLP con In;

20 realizar un procedimiento de unión con Ag-In en la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión, convirtiendo así la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión en una junta de unión que incluye una estructura de unión en sándwich que tiene una primera capa de solución sólida de Ag-In en contacto con el dispositivo semiconductor, una segunda capa de solución sólida de Ag-In en contacto con el soporte de dispersión de calor y una capa del IMC de Ag_2In en sándwich por la primera capa de solución sólida de Ag-In y la segunda capa de solución sólida de Ag-In, de manera que la junta de unión une el dispositivo semiconductor y el soporte de dispersión de calor, y el espesor de la capa del IMC de Ag_2In es mayor que el espesor de la primera capa de solución sólida de Ag-In y mayor que el espesor de la segunda capa de solución sólida de Ag-In.

2. El método de la reivindicación 1, en el que la etapa que forma la estructura multicapa incluye:

30 formar una capa de unión inicial de TLP Ag en la parte superior del soporte de dispersión de calor;

después de la formación de la capa de unión en TLP con Ag inicial, formar una capa de unión en TLP con In inicial sobre la parte superior de la capa de unión en TLP con Ag inicial, de manera que una parte de la capa de unión en TLP con Ag inicial y una porción de la capa de unión en TLP con In inicial reaccionen, formando así la capa del IMC de AgIn_2 transitoria intermedia en una interfase de la segunda capa de unión en TLP con Ag y la capa de unión en TLP con In; y formar una capa de recubrimiento contra la oxidación de Ag sobre la parte superior de la capa de unión de la TLP de In inicial de manera que otra porción de la capa de unión de la TLP de In inicial y la capa de recubrimiento contra la oxidación de Ag reaccionen, formando así la capa de recubrimiento del IMC de AgIn_2 contra la oxidación.

3. El método de la reivindicación 2, en el que la etapa de formación de la capa de unión en TLP con Ag inicial en la parte superior del soporte de dispersión de calor se realiza mediante PVD bajo solo un único ciclo de vacío ininterrumpido.

4. El método de la reivindicación 3, en el que la etapa de formación de la segunda estructura de unión en el lado superior del soporte de dispersión de calor incluye, además:

después de la formación de la capa de unión inicial de TLP Ag en la parte superior del soporte de dispersión de calor pero antes de la etapa de formación de la capa de unión inicial de TLP de In en la parte superior de la capa de unión inicial de TLP Ag, realizar un procedimiento de recocido en el soporte de dispersión de calor y la capa de unión en TLP con Ag inicial en la parte superior del soporte de dispersión de calor.

5. El método de la reivindicación 2, en el que la etapa de convertir la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión en la junta de unión incluye:

55 realizar, en un primer intervalo de temperatura predeterminado desde una temperatura más baja del primer intervalo de temperatura predeterminado con una primera velocidad de rampa de calentamiento, interdifusión de estado sólido y reacciones entre la capa de unión en TLP con In de la segunda estructura de unión y la primera capa de unión en TLP con Ag de la primera estructura de unión a través de la capa de recubrimiento del IMC de AgIn_2 contra la oxidación, y entre la capa de unión en TLP con In de la segunda estructura de unión y la segunda capa de unión en TLP con Ag de la segunda estructura de unión a través de la capa transitoria intermedia del IMC de AgIn_2 , por lo que sigue creciendo la capa transitoria intermedia del IMC de AgIn_2 y la capa de recubrimiento del IMC de AgIn_2 contra la oxidación de la segunda estructura de unión.

6. El método de la reivindicación 5, en el que la etapa de convertir la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión en la junta de unión incluye, además:

después de realizar la interdifusión y reacción en estado sólido, realizar, en un segundo intervalo de temperatura predeterminado que es más alto que el primer intervalo de temperatura predeterminado, interdifusión líquido-sólido y reacciones entre la capa de unión en TLP con In de la segunda estructura de unión y la primera capa de unión en TLP con Ag de la primera estructura de unión a través de la capa de recubrimiento del IMC de AgIn₂ contra la oxidación, y entre la capa de unión en TLP con In de la segunda estructura de unión y la segunda capa de unión en TLP con Ag de la segunda estructura de unión a través de la capa transitoria intermedia del IMC de AgIn₂, mientras que IMC de AgIn₂ en la capa transitoria intermedia del IMC de AgIn₂ y la capa de recubrimiento del IMC de AgIn₂ contra la oxidación se convierte en In en una fase líquida y el IMC Ag₂In en estado sólido en una fase γ a través de una reacción de descomposición peritética, hasta que no se puede producir ninguna reacción de descomposición peritética en el segundo intervalo de temperatura predeterminado.

7. El método de la reivindicación 6, en el que IMC de AgIn₂ en la capa transitoria intermedia del IMC de AgIn₂ y la capa de recubrimiento contra la oxidación del IMC de AgIn₂ se convierte completamente en In en la fase líquida y el IMC de Ag₂In de estado sólido en la fase γ dentro del segundo intervalo de temperatura predeterminado.

8. El método de la reivindicación 6, en el que la etapa de convertir la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión en la junta de unión incluye, además:

después de que no se pueda realizar ninguna reacción de descomposición peritética en el segundo intervalo de temperatura predeterminado, realizar un procedimiento de homogeneización en un tercer intervalo de temperatura predeterminado desde una temperatura más alta del tercer intervalo de temperatura predeterminado con una primera velocidad de rampa de enfriamiento mientras permanece dentro de una temperatura homóloga predeterminada (T_h) de la junta de unión, formando así la estructura de unión en TLP con Ag-In en sándwich que tiene la capa del IMC de Ag₂In como una capa del IMC de Ag₂In homogénea,

en la que el tercer intervalo de temperatura predeterminado es menor que el segundo intervalo de temperatura predeterminado.

9. El método de la reivindicación 8, en el que la etapa de convertir la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión en la junta de unión incluye, además:

después de realizar el procedimiento de homogeneización, realizar un procedimiento de relajación de la tensión térmica en la estructura de unión en sándwich a un cuarto intervalo de temperatura predeterminado desde una temperatura más alta del cuarto intervalo de temperatura predeterminado con una segunda velocidad de rampa de enfriamiento.

10. El método de la reivindicación 1, en el que la etapa de realizar el procedimiento de unión con Ag-In incluye:

colocar el dispositivo semiconductor con la primera estructura de unión sobre el soporte de dispersión de calor con la segunda estructura de unión, con la primera estructura de unión mirando hacia la segunda estructura de unión y colocada simétricamente sobre la segunda estructura de unión.

11. El método de la reivindicación 10, en el que la etapa de realizar el procedimiento de unión con Ag-In incluye, además:

aplicar una presión de unión estática entre la primera estructura de unión y la segunda estructura de unión durante el procedimiento de unión con Ag-In.

12. El método de la reivindicación 1, en el que

el dispositivo semiconductor incluye una primera capa de metalización en la parte inferior del mismo, y la etapa de formación de la primera capa de unión en TLP con Ag incluye formar la primera capa de unión en TLP con Ag en la parte inferior de la primera capa de metalización, y

el soporte de dispersión de calor incluye una segunda capa de metalización en la parte superior del mismo, y la etapa de formación de la estructura multicapa incluye formar la segunda capa de unión en TLP con Ag en la parte superior de la segunda capa de metalización.

13. Una estructura semiconductor que comprende:

un dispositivo semiconductor;

un soporte de dispersión de calor;

una junta de unión que une el dispositivo semiconductor y el soporte de dispersión de calor, en la que la junta de unión incluye una estructura de unión en sándwich, caracterizada porque la estructura de unión en sándwich incluye:

una primera capa de solución sólida de Ag-In en contacto con el dispositivo semiconductor;

una segunda capa de solución sólida de Ag-In en contacto con el soporte de dispersión de calor; y

una capa del IMC (compuesto intermetálico) de Ag_2In en sándwich por la primera capa de solución sólida Ag-In y la segunda capa de solución sólida Ag-In, en la que el espesor de la capa del IMC de Ag_2In es mayor que el espesor de la primera capa de solución sólida Ag-In y mayor que el espesor de la segunda capa de solución sólida de Ag-In.

14. La estructura semiconductor de la reivindicación 13, en la que

el dispositivo semiconductor incluye una primera capa de metalización en la parte inferior del mismo y en contacto con la primera capa de solución sólida de Ag-In, y

el soporte de dispersión de calor incluye una segunda capa de metalización en la parte superior del mismo y en contacto con la segunda capa de solución sólida de Ag-In.

15. La estructura semiconductor de la reivindicación 14, en la que:

la primera capa de metalización incluye:

una primera capa de compensación de tensión inducida por el desajuste del CTE (coeficiente de expansión térmica) en la parte inferior del dispositivo semiconductor y en contacto con la primera capa de solución sólida de Ag-In; y

una primera capa de barrera de difusión por encima de la primera capa de compensación de tensión inducida por el desajuste del CTE y completamente separada de la primera capa de solución sólida de Ag-In por la primera capa de compensación de tensión inducida por el desajuste del CTE; y

la segunda capa de metalización incluye:

una segunda capa de compensación de tensión inducida por el desajuste del CTE en la parte superior del soporte de dispersión de calor y en contacto con la segunda capa de solución sólida de Ag-In; y

una segunda capa de barrera de difusión debajo de la primera capa de compensación de tensión inducida por el desajuste del CTE y completamente separada de la segunda capa de solución sólida de Ag-In por la segunda capa de compensación de tensión inducida por el desajuste del CTE.