

“Contribución al desarrollo de barreras Schottky de siliciuro y su aplicación a la detección de radiación infrarroja.”

Dr. D. Francisco Javier Jiménez Leube

Dpto. de Tecnología Electrónica - U.P.M.

1. Introducción:

Los sistemas de detección de radiación infrarroja constituyen un campo en la Electrónica cuyo interés e importancia ha venido acrecentándose durante las últimas décadas. El desarrollo de estas tecnologías ha posibilitado que se extienda el abanico de aplicaciones de los sistemas de termografía en el infrarrojo a campos donde antes estaban descartados por motivos económicos. Además de sus aplicaciones en sistemas militares (vigilancia, guiado de misiles), actualmente se utilizan en aplicaciones industriales (p.ej. : detección de puntos calientes en sistemas industriales, identificación de fallos en sistemas de alta tensión, identificación de fallos en placas de circuito impreso), aplicaciones médicas (creación de mapas de la distribución de venas superficiales, localización de fenómenos que provocan incrementos locales de temperatura debidos a aumentos en la actividad celular) y aplicaciones científicas (identificación de mecanismos de pérdidas energéticas).

Existen matrices de plano focal de siliciuro de platino (PtSi), con aplicación a la ventana de propagación atmosférica de la radiación infrarroja entre 3 y 5 micras (infrarrojo medio), de elevado número de elementos (1024x1024). La gran uniformidad en la responsividad de sus detectores hace posible su integración con los dispositivos CCD encargados de la lectura y simplifica la circuitería electrónica de lectura (esquemas de corrección).

Sin embargo, a pesar de disponer de un candidato para extender la longitud de onda de respuesta de los detectores de infrarrojo de barrera Schottky de siliciuro metálico a la ventana entre 8 y 12 micras, no se habían conseguido resultados similares. La resolución de los problemas tecnológicos que plantea la formación del monosiliciuro de iridio posibilitaría disponer de cámaras con aplicación a la ventana de 8 a 12 micras (infrarrojo lejano).

Por tanto, el objetivo de la tesis fue desarrollar una tecnología que permitiera fabricar, de forma reproducible, detectores de infrarrojo de barrera Schottky de monosiliciuro de iridio. Para conseguirlo ha sido necesario definir las estructuras, definir y optimizar los procesos tecnológicos de fabricación y determinar los procedimientos de caracterización que permitan evaluar las estructuras fabricadas.

2. Antecedentes y objetivos:

La utilización de barreras Schottky como detectores de radiación infrarroja fue propuesta por primera vez por Yang y Shepherd en 1973 [Shepherd, 73]. A partir de ese momento la tecnología de fabricación de matrices de plano focal de barrera Schottky ha evolucionado desde la demostración de los conceptos iniciales (década de los setenta), hasta el desarrollo de cámaras de alta resolución tanto en modo de barrido (*scanning*) como mosaicos bidimensionales de plano focal (*staring*) en la década de los ochenta.

El funcionamiento de estas cámaras es similar al de las cámaras de televisión (en el visible) excepto en que su fotorrespuesta se extiende a longitudes de onda superiores a 1 micra por la utilización del proceso de "fotoemisión interna" como mecanismo de detección (figura 1).

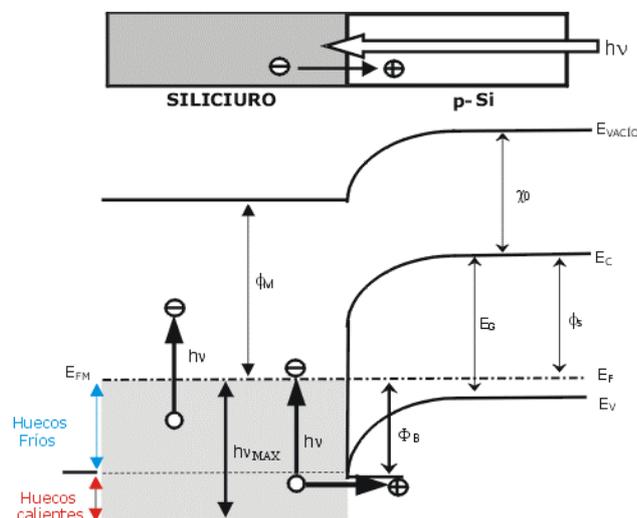


Figura 1.- Diagrama de bandas de energía simplificado ilustrando el proceso de fotoemisión interna en un detector de barrera Schottky de siliciuro al ser iluminado a través del sustrato de Si. (Adaptado de [Kosonocky, 87])

Cuando se comparan con otras tecnologías infrarrojas, los sensores de barrera Schottky de siliciuro presentan varias ventajas incluyendo la eliminación de sistemas ópticos móviles, reducción de la circuitería electrónica necesaria para la lectura, y bajo coste y relativamente sencillo proceso de fabricación. Como desventaja principal presentan una baja eficiencia cuántica; esto es, el número de portadores generados por cada fotón incidente es bajo en comparación con las eficiencias cuánticas de detectores fabricados en otros materiales (HgCdTe, InSb).

Se han desarrollado matrices de electrodos de siliciuro de Platino (PtSi) y Paladio (Pd₂Si) para su utilización en la segunda ventana de propagación atmosférica de la radiación infrarroja (3-5 μm) con uniformidades en su respuesta espectral mejores del 0.1%. Como ejemplo del grado de madurez alcanzado con la tecnología del PtSi puede mencionarse la fabricación de un mosaico de plano focal

con más de 1.000.000 de elementos [Rogalsky, 95]. Estos dispositivos han entrado en competencia directa con las matrices híbridas de HgCdTe sobre silicio y con las híbridas o monolíticas de InSb.

Las investigaciones para encontrar materiales que produzcan barreras de potencial suficientemente bajas sobre p-Si como para permitir que los huecos calientes generados por la radiación infrarroja lejana (8-12 μm) puedan ser colectados en el silicio llevaron al estudio de las propiedades y posibilidades tecnológicas de diversos materiales (siliciuros de iridio o mezclas de siliciuros de iridio y platino) con resultados prometedores (detección en laboratorio de radiación de 12,4 μm de longitud de onda [Tsaour, 90]).

A pesar de estos resultados iniciales continuaban sin estar resueltas una gran cantidad de cuestiones de tipo técnico y científico, relacionadas básicamente con la falta de homogeneidad de los dispositivos, que posibiliten fabricar matrices con un número de electrodos comparable al de los mosaicos de PtSi.

El objetivo trabajo es el desarrollo de la tecnología de obtención de capas de siliciuro de iridio aptas para su integración monolítica en mosaicos de plano focal (*Focal Plane Arrays*, FPA) sensibles al infrarrojo lejano de modo que se pueda eliminar el principal problema que tienen los procedimientos actuales: la falta de uniformidad de los dispositivo resultantes [Cabansky, 91].

Esta falta de uniformidad en los detectores de IrSi es consecuencia de:

- El silicio es la principal especie móvil en la reacción de formación del siliciuro, por lo que la presencia de islas de óxido u otros contaminantes en la superficie de silicio antes de depositar el iridio hace que éstas permanezcan en la intercara silicio/siliciuro después de reaccionar .
- En el sistema Ir-Si se ha detectado la formación de hasta nueve fases diferentes y que como consecuencia del tratamiento térmico pueden coexistir en la intercara. Este problema es especialmente importante ya que el monosiliciuro de iridio, IrSi, de carácter metálico y fase deseada para la fabricación de detectores y la fase identificada en la literatura como IrSi_{1.75} de carácter semiconductor se forman en rangos de temperaturas comunes.

Como consecuencia, el objetivo fundamental de este trabajo será definir una tecnología que permita fabricar detectores de barrera Schottky de monosiliciuro de iridio (IrSi) con intercaras homogéneas.

3. Materiales y medios experimentales utilizados:

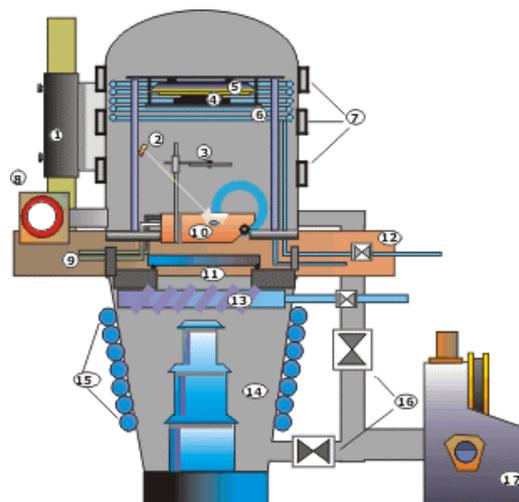
En el trabajo presentado ha sido necesario tanto la adaptación y puesta en funcionamiento de sistemas experimentales que permitieran la fabricación de dispositivos como el desarrollo de sistemas de caracterización para la evaluación de los resultados obtenidos. Agrupando los diferentes hitos según sus implicaciones sobre tecnologías de fabricación o de caracterización, se pueden destacar los siguientes:

Tecnologías y procesos de fabricación

El primer objetivo tecnológico para posibilitar la fabricación de detectores fue disponer de un sistema para la evaporación de películas delgadas de Iridio ($d < 20$ nm, para los detectores se manejan espesores típicos de 5 nm) libres de contaminación por oxígeno y con control de la temperatura de proceso.

Para minimizar la cantidad de oxígeno incorporada al Ir durante la evaporación se diseñó e instaló una trampa criogénica (Meissner con LN₂ circulante) en el interior del sistema de evaporación y para homogeneizar la temperatura se diseñó un susceptor de grafito. Con ello se consigue poder elevar la temperatura en el interior del sistema de vacío hasta 450°C (limitado por la seguridad de los sellos de vacío), manteniendo la presión base en valores inferiores a $2 \cdot 10^{-7}$ Torr.

Se han determinado los procedimientos de limpieza y preparación de sustratos y los procedimientos óptimos de evaporación. El nivel de oxígeno en superficie se mantiene por debajo del umbral de detección de los sistemas de espectroscopía Auger [Fernández, 94] utilizados y tampoco se ha detectado cantidad significativa mediante SIMS.



- | | |
|---|--|
| 1. Sistema de elevación de la campana de vacío. | 9. Circuito de refrigeración del cañón de electrones |
| 2. Monitor del control de espesores y velocidad de evaporación. | 10. Cañón de electrones. |
| 3. Pantalla electromecánica (shutter). | 11. Válvula de alto vacío. |
| 4. Susceptor de grafito. | 12. Electroválvula de entrada de nitrógeno líquido. |
| 5. Calefactor de sustratos. | 13. Trampa criogénica. |
| 6. Trampa criogénica (meissner). | 14. Bomba difusora de aceite. |
| 7. Circuito de refrigeración de la campana de vacío. | 15. Circuito de refrigeración. |
| 8. Válvula de entrada al espectrómetro de masas | 16. Electroválvulas del sistema de vacío. |
| | 17. Bomba rotatoria. |

Figura 2.- Representación esquemática del sistema de evaporación mediante haz de electrones adaptado y modificado para la realización de este trabajo.

Se han desarrollado las rutas de procesos tecnológicos que permiten fabricar diodos/detectores con posibilidad de realizar los tratamientos de silicidación tanto en el interior del sistema de vacío como en sistemas de tratamiento térmico externo (horno de tubo abierto convencional) y se ha

utilizado por primera vez, según la bibliografía consultada, el sistema de tratamiento térmico rápido RTP como procedimiento para la fabricación de diodos/detectores de IrSi [Rodríguez, 93] [Sanz-Maudes, 99].

Se han determinado los procedimientos de lift-off necesarios para la definición de motivos en la película metálica ya que el Iridio es un metal difícilmente atacable por procedimientos químicos. Se han realizado ensayos de viabilidad para la utilización de sistemas RIE para la eliminación del metal sobrante.

Como se utilizan diferentes rutas de procesos tecnológicos, según sea el procedimiento para la formación del silicuro se han determinado diferentes materiales "a sacrificar" en los procedimientos de "lift-off". Se ha definido el proceso de "lift-off" para diodos tratados en el interior del sistema de evaporación y para diodos tratados en sistemas externos, después de sacarlos del sistema de evaporación. En todos los tratamientos se minimizó el tiempo de exposición a la atmósfera antes del tratamiento térmico para reproducir las condiciones.

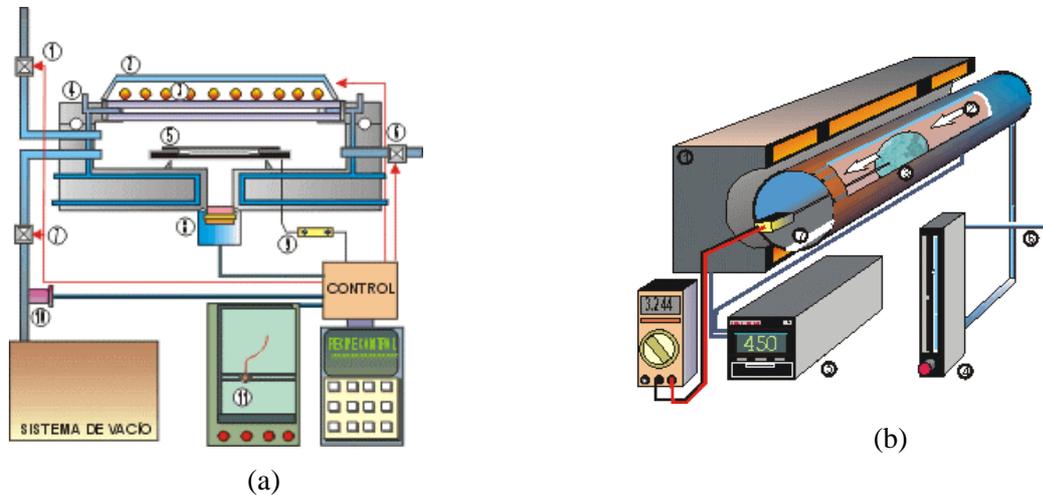


Figura 3.- Sistemas de tratamiento térmico externo: (a) Representación esquemática del sistema de tratamiento térmico rápido y (b) Horno de tubo abierto convencional

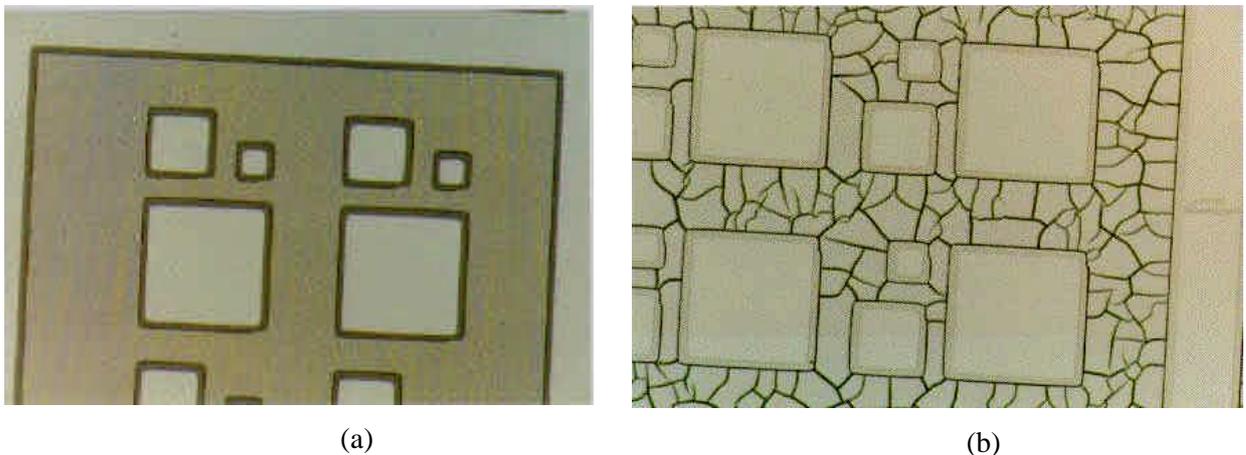


Figura 4.- (a) Aspecto de una oblea de Si antes de proceder a la evaporación de Ir. (b) Película de Ir depositada sobre resina antes del proceso de Lift-off

Para poder evaluar el efecto de los diferentes tratamientos térmicos sobre las propiedades del material formado y de la intercara silicio/siliciuro resultante, se han diseñado y fabricado estructuras de prueba, en ruta simplificada de dos máscaras. Mediante estas estructuras se ha podido analizar el efecto de la temperatura, duración y atmósfera en la que se produce la reacción de formación del siliciuro de cara a determinar los procesos óptimos.

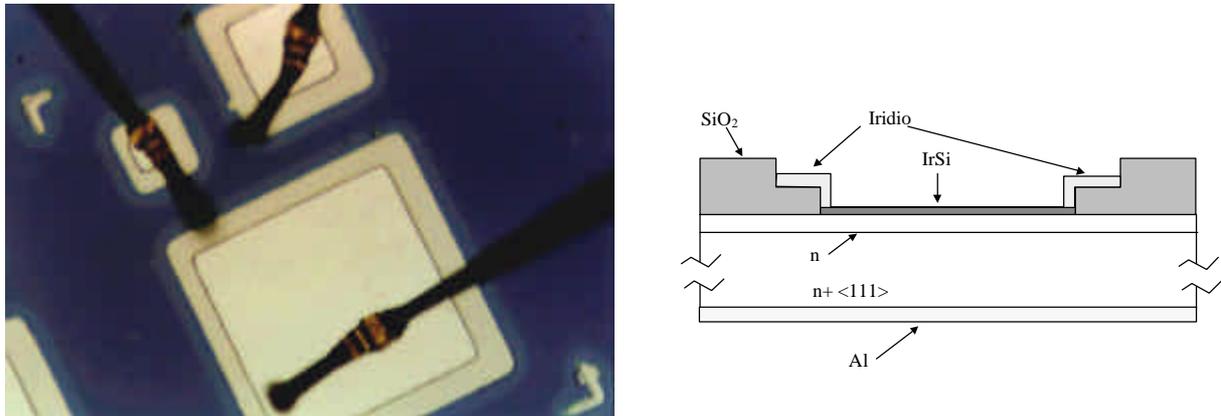


Figura 5.- Vista superior de los dispositivos de prueba y estructura de los mismos.

Se ha desarrollado la tecnología de fabricación de detectores de infrarrojo de barrera Schottky de siliciuro de Iridio, para iluminación frontal y posterior, con y sin resonador de SiO_2 para optimizar su fotorrespuesta y con y sin anillo de guarda.

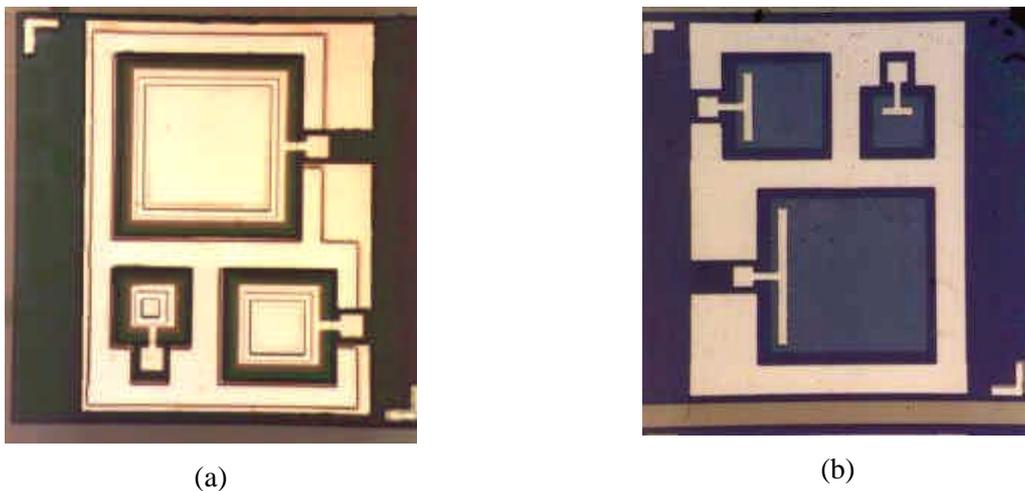


Figura 6.- (a) Vista superior de los detectores fabricados para iluminación posterior (a través del sustrato de Si) (b) Vista superior de los detectores fabricados para iluminación frontal (a través del siliciuro).

Caracterización: sistema experimental

La caracterización estructural y la determinación de la composición se ha realizado mediante los siguientes medios diagnósticos:

- **Espectrometría Rutherford de Iones Retrodispersados (RBS):** El análisis mediante Espectrometría Rutherford de Iones Retrodispersados se realizó en el Centro de Física Nuclear de Sacavem (Portugal) por el equipo del profesor J. Soares. Se han utilizado configuraciones de incidencia rasante para maximizar la sensibilidad. Este análisis permite determinar la composición de las muestras en función del espesor.
- **Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM):** Las imágenes obtenidas de las muestras utilizando la Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) y la Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución (HREM) se obtuvieron en el Centro de Microscopía Electrónica de Universidad Complutense de Madrid por la Dra. Carmen Ballesteros.
- **Espectrometría de Masas de Iones Secundarios (SIMS):** El análisis mediante Espectrometría de Masas de Iones Secundarios (SIMS) se ha realizado en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Politécnica de Madrid por el profesor Dr. José María Blanco y el Dr. José Javier Serrano. Los trabajos realizados se publicaron en [Blanco, 94], [Blanco, 95], y [Blanco, 96].

Ninguno de estos medios diagnósticos permite obtener un "mapeado" de la composición de la película de siliciuro en la intercara silicio/siliciuro por lo que no nos resultan definitivos para cualificar la calidad de la intercara resultante. Sin embargo nos permiten comprobar si se ha producido reacción de silicidación y su extensión.

La determinación de la calidad de las intercaras se ha realizado utilizando un sistema experimental indirecto: dado que el monosiliciuro de iridio (fase deseada para la fabricación de los detectores) presenta la mayor altura de barrera Schottky conocida sobre sustratos de silicio tipo-n ($\Phi_B > 0.9$ eV), cualquier imperfección, contaminación o inhomogeneidad presente en la intercara del dispositivo provocará la aparición de excesos de corriente en las características I-V del diodo.

Analizando la variación de las características I-V en función de la temperatura de medida, y utilizando la variación del índice de idealidad incremental (proporcional a la derivada del logaritmo de la corriente que atraviesa el diodo respecto a la tensión aplicada) como parámetro que aporta mayor sensibilidad al análisis es posible analizar la calidad de las intercaras.

Se definieron como procesos aptos para la fabricación de detectores a aquellos que proporcionan diodos sobre sustratos tipo-n cuyas características tensión-corriente en función de la temperatura de medida siguen el modelo unidimensional de la teoría de emisión termiónica y cuya altura de barrera resultante corresponde a la del monosiliciuro de iridio.

Las características tensión-corriente de los diodos que no se ajustan a este modelo, que habitualmente se han justificado en la literatura por la existencia de componentes generación-recombinación o contribuciones debidas a efecto túnel no justificables teóricamente, se ha demostrado que pueden justificarse por la existencia de distribuciones laterales de potencial en la intercara como consecuencia de una probable coexistencia de fases (IrSi e IrSi_{1,75}) como revelaron algunos de los análisis TEM realizados. El método está descrito en [Jiménez-Leube, 97d]

Para poder realizar de forma sistemática la medida de las características IV en función de la temperatura en el rango entre 150-300K con suficiente número de puntos, se diseñó, programó y puso en funcionamiento un sistema automático de caracterización que permite la medida de hasta cinco dispositivos diferentes en un ciclo térmico con resolución en corriente mejor de 0.1 pA. Este sistema es necesario dado que cada ciclo térmico se realiza en más 30 horas.

Como paso final del trabajo, se comprobó que los resultados obtenidos sobre sustratos tipo-n eran directamente extrapolables a los sustratos tipo-p, utilizados para la fabricación de los detectores de infrarrojo, fabricando una serie de detectores de acuerdo con uno de los procesos previamente determinado como óptimo. Las características eléctricas y ópticas medidas de los detectores fabricados se correspondieron a las esperadas confirmando la adecuación del método de trabajo.

4. Resultados experimentales

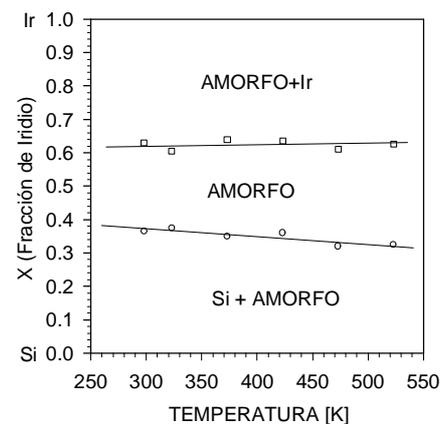
Los resultados experimentales presentados en el trabajo se agrupan según el procedimiento de silicidación empleado. Como referencia de comparación se analizaron los diodos fabricados sobre sustratos tipo-n sin tratamiento térmico posterior.

Diodos sin tratamiento térmico posterior

La caracterización de las películas de Ir sobre Si tipo-n sin tratamiento térmico posterior se encuentra publicada en [Ballesteros, 95] donde se analiza la posible estructurada de la película interfacial detectada al depositar Iridio sobre Si a 200°C y se justifica su aparición basándonos en un modelo de aleaciones sobreenfriadas propuesto por Miedema [Miedema, 76]. A partir de los resultados se extrapola el análisis para todo el rango de temperaturas de interés. Un estudio similar, donde se comparan sus resultados y se contrastan con los publicados por nuestro grupo ha sido publicado recientemente [Demuth, 99]



(a)



(b)

Figura 7.- (a) Micrografía HREM mostrando un detalle de la película policristalina de Ir sin tratamiento térmico posterior. [Ballesteros, 95], (b) Extensión del método de la tangente en el rango de temperatura 300-550 K para el sistema Ir-Si.

La caracterización eléctrica de los diodos se encuentra publicada en [Jiménez-Leube, 97a y c]. Los diodos presentan características ideales a temperatura ambiente, sin embargo al analizar las características IVT se detecta la existencia de una distribución de potencial en la intercara como consecuencia de la coexistencia de IrSi e Iridio sin reaccionar.

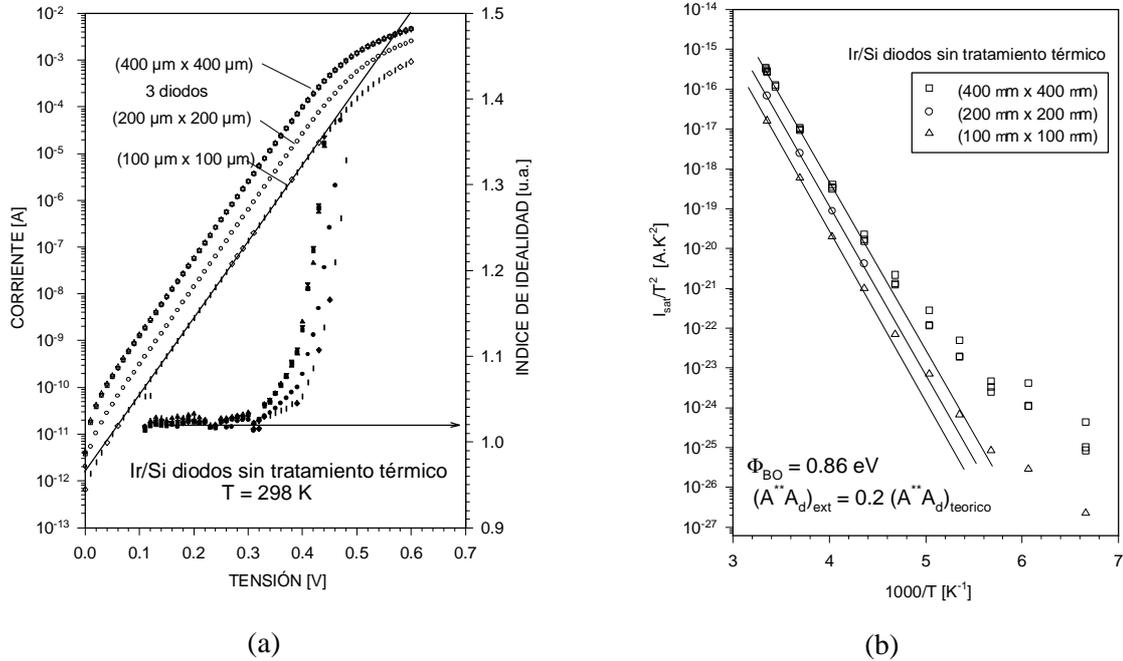


Figura 8.- (a) Características IV a temperatura ambiente, el índice de idealidad incremental se mantiene en su valor teórico. (b) Representación de Richardson para los mismos diodos, la curvatura que presenta es consecuencia de la distribución de potencial en la intercara. [Jiménez-Leube, 97a]

Diodos tratados en horno de tubo abierto convencional

Se realizaron tratamientos térmicos en atmósferas de Forming Gas y Argon a temperaturas de 400°C y 500°C con duraciones de 1,2 y 4 horas. Ninguno de los procesos analizados proporcionó diodos con características adecuadas para seleccionarlo como proceso para la fabricación de detectores. Los procesos y resultados obtenidos se presentaron en el "1st International Congress for Materials for Microelectronics" y están resumidos en [Jiménez-Leube, 95].

Diodos tratados en el interior del sistema de evaporación

La caracterización estructural de las muestras mediante SIMS y RBS indica que existe una evolución como consecuencia de la mayor temperatura o duración del tratamiento térmico empleado pero no permite obtener conclusiones determinantes.

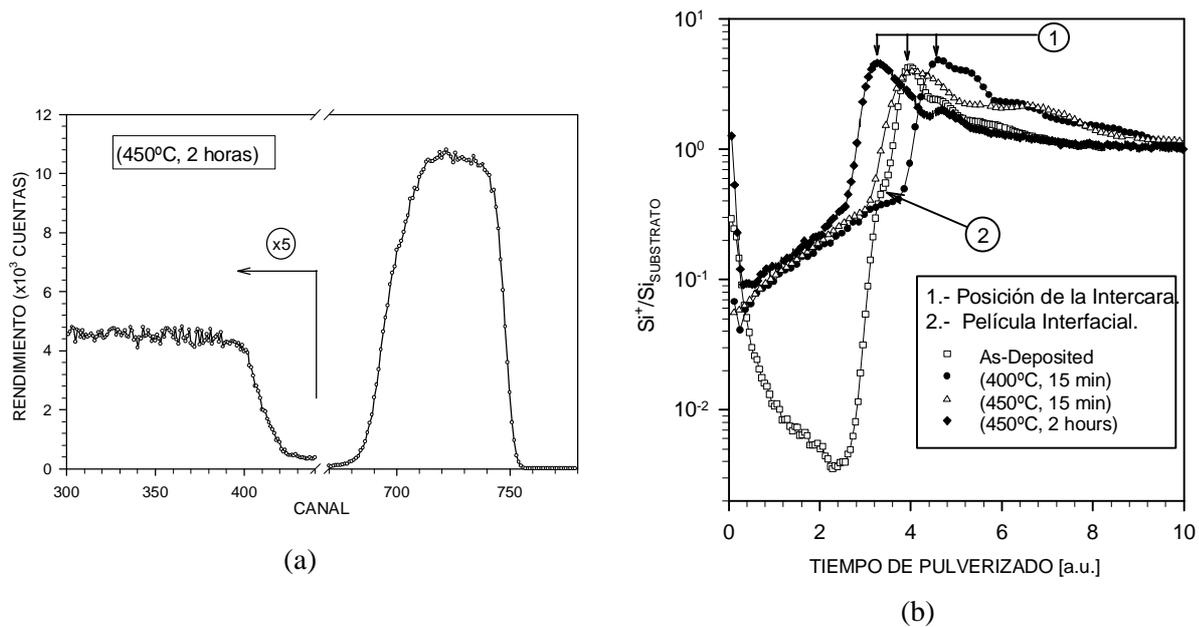


Figura 9.- (a) Perfil RBS de una muestra de 20 nm de Ir depositado sobre Si y recocido en el interior del sistema de vacío a 450°C durante dos horas. [Jiménez-Leube, 97b] (b) Perfiles SIMS (Si) de diferentes diodos tratados en el interior del sistema de evaporación. (1) Indica la posición de la intercara silicio-silicio, y (2) indica la posible existencia de la película interfacial ya descrita. [Jiménez-Leube, 97b]

Los resultados obtenidos del proceso de silicidación en el interior del sistema de evaporación están resumidos en [Jiménez-Leube, 97 b]. Se realizaron tratamientos a 400 y 450°C con duraciones desde 15 min. hasta 2 horas. Incluyendo en la comparación los resultados obtenidos con los diodos sin tratamiento térmico posterior puede resumirse que la secuencia observada en los procesos destacados es : Ir+IrSi, IrSi, IrSi+IrSi_{1.75} y probablemente IrSi_{1.75}. Los resultados presentados indican que la probable altura de barrera que presenta la fase semiconductor, sin determinación experimental previa según la bibliografía consultada es de 0.7 eV.

Los comportamientos observados pueden justificarse utilizando un modelo matemático basado en la existencia de distribuciones de potencial en la intercara silicio-silicio. Las simulaciones numéricas realizadas demuestran que si la diferencia entre alturas de barrera aparente de las dos fases es de 0.2 eV, recubrimientos inferiores al 0.1% del área total del diodo modificarían significativamente las características tensión-corriente.

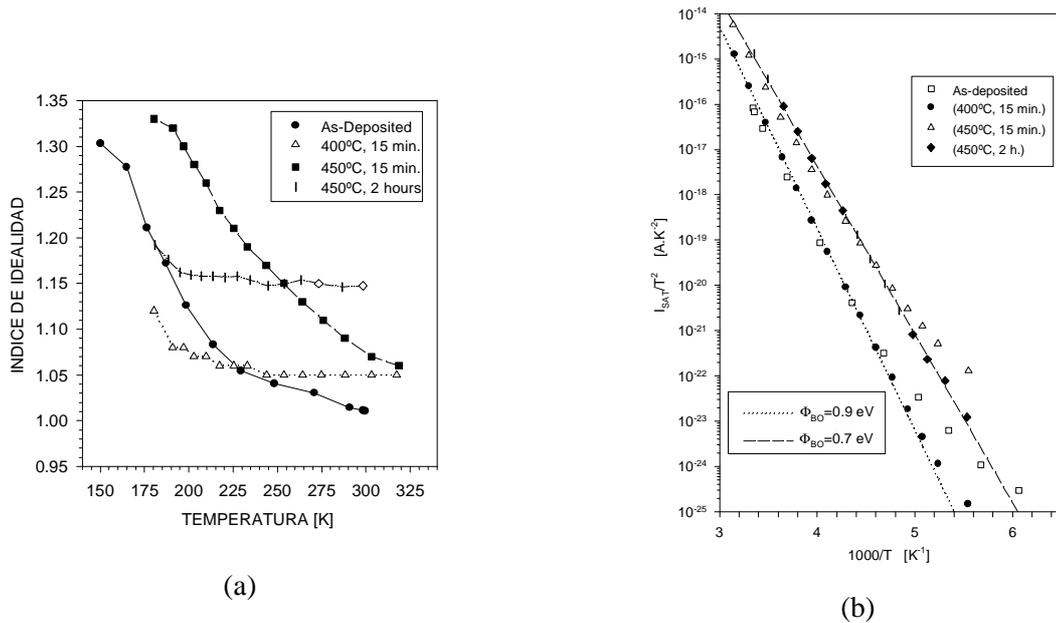


Figura 10.- (a) Variación del índice de idealidad con la temperatura de medida y (b) representación de Richardson para los diodos tratados en el interior del sistema de evaporación. [Jiménez-Leube, 97b]

Diodos tratados en sistema de Tratamiento Térmico Rápido (RTP)

Se ha utilizado por primera vez, en lo que a la bibliografía consultada se refiere, el sistema de tratamiento térmico rápido para la formación de siliciuro de iridio [Rodríguez, 93 y 96] y la fabricación de diodos. Se ha estudiado el efecto de realizar los tratamientos en atmósfera de Ar y en vacío, en el rango de temperaturas entre 375 y 500°C y con duraciones entre 1 y 10 minutos. El resumen de los resultados obtenidos ha sido publicados en [Sanz-Maudes, 99].

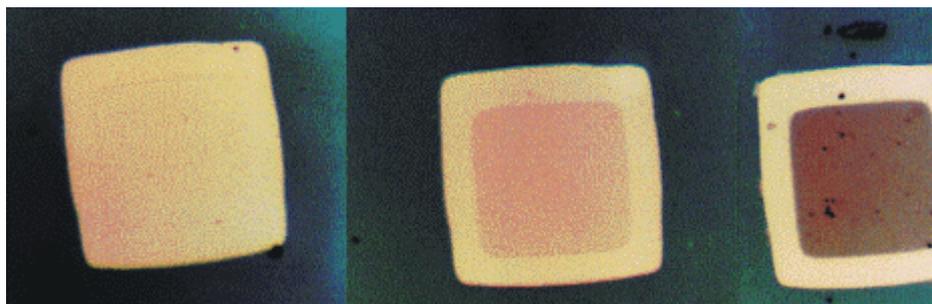


Figura 11.- Vista superior de diodos procedentes de diferentes tratamientos térmicos: (a) RTA Argon @500°C, 5 min, (b) RTA Vacío @ 500°C, 2 min y (c) RTA Vacío @ 500°C, 5 min. Se aprecia la progresiva incorporación de silicio a la superficie como consecuencia del tratamiento térmico.

La Figura 12 muestra una sección transversal de una muestra tratada a 500°C durante 1 min. en vacío, puede apreciarse la película cuasi-policristalina de IrSi (7-8 nm de espesor) (A), el tamaño de los granos se encuentra en el rango 3-10 nm. En algunos casos se produce el crecimiento en forma de

granos del IrSi a través de las fronteras de grano del Ir (B) y también se aprecian en esta micrografía regiones con el contraste típico de zonas amorfas (C) [Rodríguez, 96]. Se ha identificado mediante microdifracción y FFT la presencia de granos aislados de IrSi_{1.75}, aunque cabe esperar que su densidad sea baja.

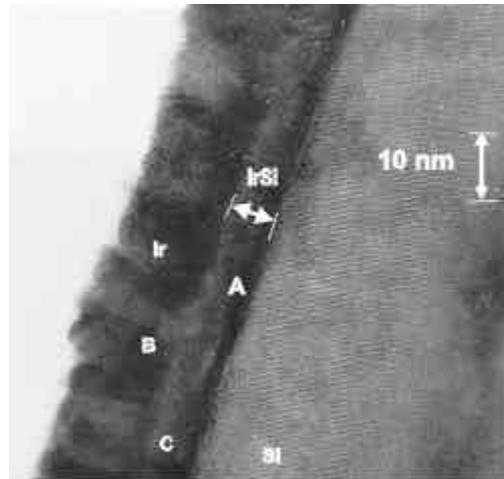


Figura 12.- Microfotografía de transmisión de la sección transversal de una muestra recocida en RTA vacío a 500°C, 1 min.

Diodos tratados mediante RTA en vacío:

Ninguno de los procesos es apto para la fabricación de detectores. En la Figura 13 pueden apreciarse los excesos de corriente a temperatura ambiente (a) y las curvaturas apreciadas en el gráfico de Richardson (b).

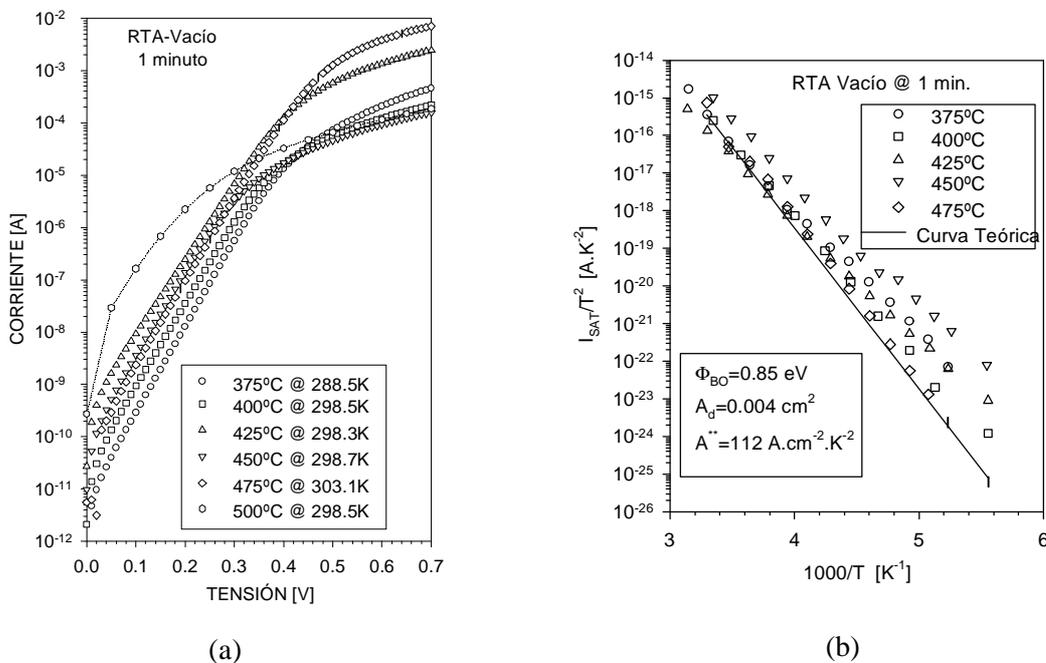


Figura 13.- (a) Características I-V a temperatura ambiente de diodos tratados mediante RTA a diferentes temperaturas durante 1 minuto. [Sanz-Maudes, 99] (b) Gráfico de Richardson correspondiente. Como comparación, se ha incluido la expresión una curva teórica para un diodo del mismo área que los analizados que tuviera un valor extrapolado de la altura de barrera a 0K de 0.85 eV. [Sanz-Maudes, 99]

Diodos tratados mediante RTA en Argon:

Los diodos tratados mediante RTA en Argon son candidatos para la fabricación de detectores. El máximo valor de altura de barrera se ha obtenido para los tratados a 500°C durante 5 min. sin embargo, la posible incorporación del oxígeno residual presente en la atmósfera de tratamiento puede resultar perjudicial para sus propiedades ópticas. La Figura 14 muestra la elevada uniformidad de sus características.

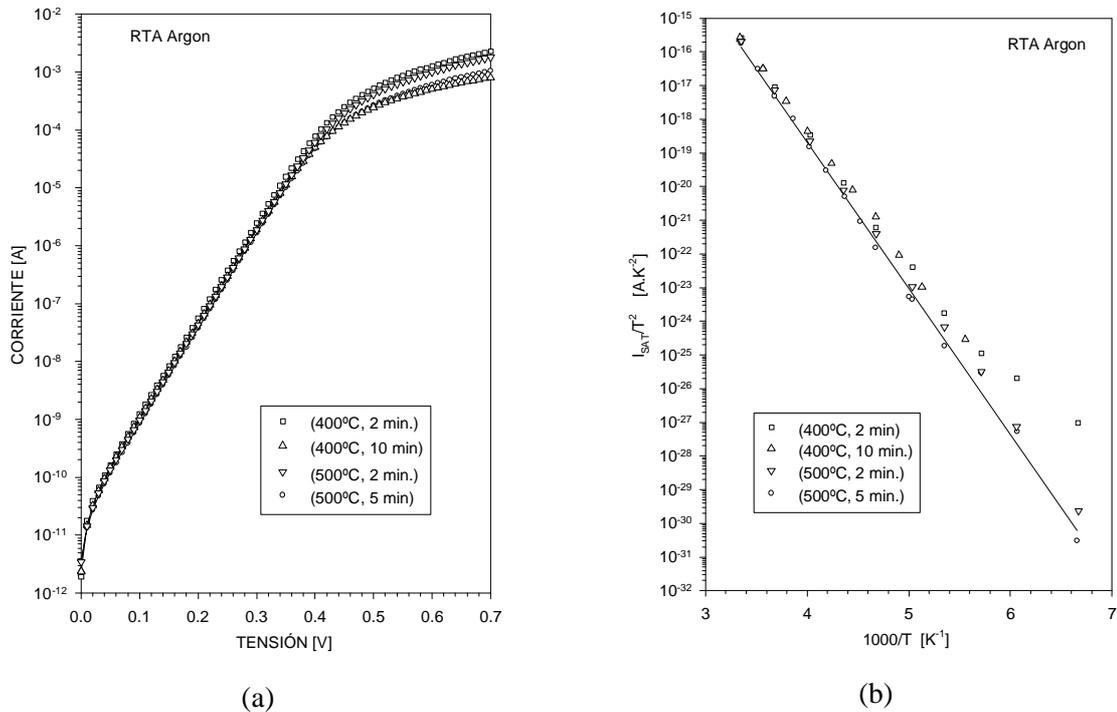


Figura 14.- (a) Características I-V a temperatura ambiente y (b) representación de Richardson de los diodos tratados mediante RTA en Argon. Los diodos tratados a 500°C durante 5 min. presentan la mayor altura de barrera. [Sanz-Maudes, 99]

Detectores de IR de barrera Schottky de silicuro de iridio

Para la fabricación de detectores se seleccionó el tratamiento en el interior del sistema de evaporación a 400°C. Dado el reducido espesor de la película metálica, 5 nm, se redujo su duración a 5 minutos. La Figura 15 presenta el gráfico de Richardson y las medidas de responsividad para uno de los detectores fabricados, la longitud de onda de respuesta se extiende más allá de las 10 μm .

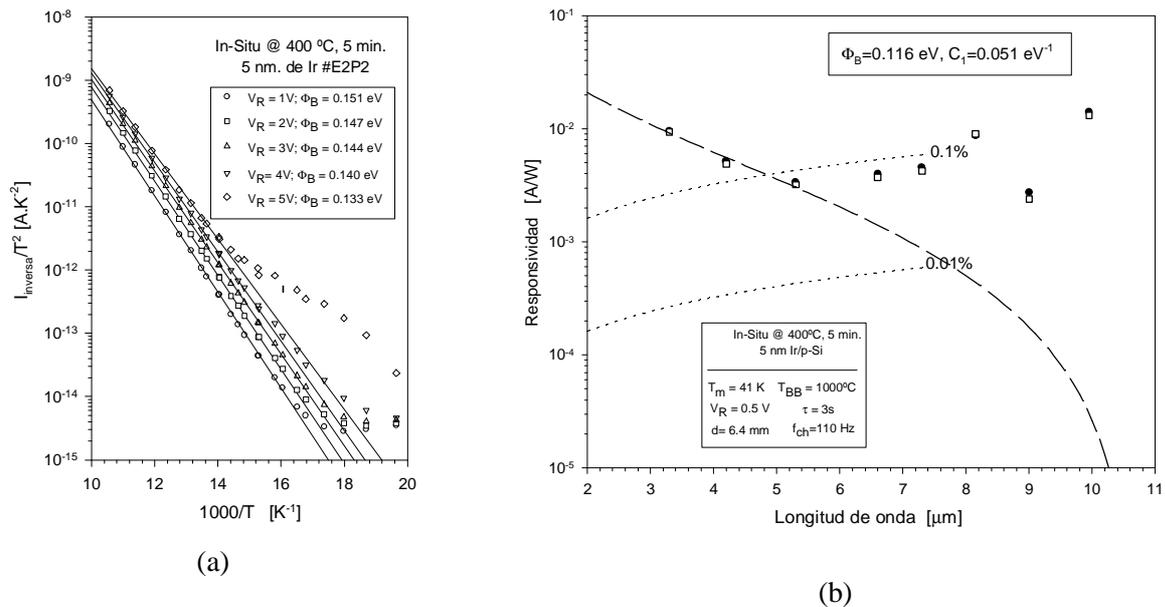


Figura 15.- (a) Representación de Richardson y (b) medida de responsividad de los detectores fabricados. Los resultado obtenidos son comparables a los encontrados en la literatura.

5. Conclusiones

Siguiendo un desarrollo cronológico, las conclusiones que se han obtenido del estudio realizado son:

- La calidad de la intercara silicio-siliciuro se ve afectada por la presencia de contaminantes o islas de óxido en la superficie del silicio antes de depositar el metal. El oxígeno, incorporado durante la evaporación o presente en la atmósfera de reacción, difunde a través del metal reaccionando con el silicio e inhibiendo, a partir de una concentración umbral, la reacción de formación del siliciuro [Fernández, 94].
- Al depositar Iridio sobre silicio a 200°C se forma una película interfacial no-amorfa [Rodríguez, 93]. La plausibilidad de formación de esta película se demuestra mediante un análisis termodinámico basado en el modelo de Miedema de aleaciones sobreenfriadas [Ballesteros, 95], y la extensión del estudio indica que ésta se debería formar para todas las temperaturas en el rango 100-350°C. El análisis mediante microscopía electrónica de alta resolución muestra que es una región que acumula gran cantidad de defectos sin mostrar el contraste típico de películas amorfas [Ballesteros, 95].
- Tal como ha demostrado su caracterización eléctrica [Jiménez-Leube, 97a], los diodos de barrera Schottky fabricados al depositar Iridio sobre silicio sin tratamiento térmico posterior presentan características ideales a temperatura ambiente. El análisis de sus características tensión-corriente en función de la temperatura demuestran que la intercara metal-semiconductor es inhomogénea pudiendo ser mezcla de siliciuro de iridio e iridio sin reaccionar [Jiménez-Leube, 97a y b].
- Los tratamientos térmicos realizados en horno de tubo abierto convencional, tanto en atmósfera reductora como inerte, no han resultado aptos para la fabricación de detectores de infrarrojo de

barrera Schottky de siliciuro de iridio [Jiménez-Leube, 95]. Se obtienen mejores resultados en atmósfera inerte aunque insuficientes para la fabricación de detectores.

- Los tratamientos de silicidación realizados en vacío, bien sea en el interior del sistema de evaporación (tratamientos in-situ) [Jiménez-Leube, 97d] o en el sistema de tratamiento térmico rápido (mediante RTP) [Sanz-Maudes, 99], provocan la aparición de la fase semiconductor (IrSi_{1.75}). Tan sólo algunos diodos fabricados a temperaturas de 400°C presentan intercaras IrSi-Si homogéneas.
- La determinación del valor extrapolado a 0K de la altura de barrera de los diodos fabricados mediante tratamientos térmicos en vacío indica que la altura de barrera efectiva correspondiente a la fase semiconductor (IrSi_{1.75}) [Jiménez-Leube, 97d][Sanz-Maudes, 99] debe ser inferior al valor previamente publicado.
- Al utilizar una atmósfera inerte (Ar) en el sistema de tratamiento térmico rápido se extiende el rango de temperaturas y duración de los tratamientos térmicos útiles para conseguir intercaras IrSi-Si homogéneas [Sanz-Maudes, 99]. El proceso tecnológico que proporciona diodos con las mejores características de homogeneidad de la intercara IrSi es el tratamiento mediante RTP en atmósfera de Argon a 500°C durante 5 minutos.
- Los resultados de la caracterización eléctrica y las medidas ópticas de los detectores fabricados sobre sustratos tipo-p mediante tratamiento térmico en el interior del sistema de evaporación son consistentes con los esperados a partir de la caracterización de los diodos sobre sustratos tipo-n validando el método experimental utilizado.

Contribuciones originales del trabajo

Las contribuciones originales de este trabajo son:

- 1) Se han modificado los sistemas experimentales y se han definido los procesos para depositar películas de Iridio sobre sustratos de silicio sin que exista evidencia de contaminación interfacial ni de trazas de oxígeno en el metal.
- 2) Se han diseñado y desarrollado las rutas de procesos tecnológicos para fabricar diodos y detectores de infrarrojo de barrera Schottky de siliciuro de Iridio con diferentes estructuras.
- 3) Se ha diseñado y puesto en funcionamiento un sistema experimental que permite la caracterización eléctrica en forma semiautomática de los diodos fabricados.
- 4) Se ha adaptado un método experimental que permite analizar el efecto de los diferentes tratamientos térmicos sobre las propiedades de la intercara silicio-siliciuro: la espectroscopía I-V-T. Este método experimental se ha utilizado para determinar el efecto de la temperatura, de la duración y de la composición de la atmósfera en la que se realiza el tratamiento térmico para la formación del siliciuro sobre las propiedades de la intercara silicio-siliciuro.
- 5) Se ha utilizado por primera vez el tratamiento térmico rápido (RTP) como método de silicidación en la fabricación de diodos/detectores de barrera Schottky de siliciuro de iridio.

6. Referencias:

- [Ballesteros, 95] C. Ballesteros, T. Rodríguez, **F.J. Jiménez-Leube**, M. Clement. "Polycrystalline interlayer formed by deposition of thin-film iridium on silicon" *Journal of Applied Physics*, 77 (10), 5173, (1995)
- [Blanco, 94] J.M. Blanco, J.J. Serrano, **F.J. Jiménez-Leube**, T. Rodríguez. "Determination of Iridium Silicides using matrix effects in SIMS". *Vacuum*, 45 (10/11), 1121, (1994)
- [Blanco, 95] J.M. Blanco, J.J. Serrano, **F.J. Jiménez-Leube**, T. Rodríguez, M. Clement, M. Aguilar "Caracterización por espectrometría de masas de iones secundarios de detectores de infrarrojo" *X Symposium nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI) Abstracts (Serie Ingeniería, nº 4) (1995)*
- [Blanco, 96] J.M. Blanco, J.J. Serrano, **F.J. Jiménez-Leube**, T. Rodríguez, M. Aguilar, R. Gwilliam. "SIMS characterization of thin layers of Ir and its silicides". *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B*, 113, 530, (1996).
- [Cabansky, 91] W. A. Cabanski, M.J. Schulz. "Electronic and IR-optical properties of silicide-silicon interfaces". *Infrared Physics*. 32, 29, (1991).
- [Curello, 96] G. Curello, R. Gwilliam, M. Harry, B. Sealy, T. Rodríguez, **F.J. Jiménez-Leube**. "Iridium silicides formation on High Doses Ge+ Implanted Si layers" *Materials Research Society Proceeding*, Vol. 402, 411, (1996).
- [Demuth, 99] V. Demuth, H.P. Strunk, D. Wörle, C. Kumpf, E. Burkel, M. Schulz. "Formation of amorphous layers by solid-state reaction from thin Ir films on Si(100)". *Applied Physics A*, 68, 451, (1999).
- [Fernández, 94] M. Fernández, T. Rodríguez, A. Almendra, **F.J. Jiménez-Leube**, H. Wolters. "Influence of oxygen on the Iridium Silicide formation by Rapid Thermal Annealing". *Material Research Society Symposium Proceeding Vol 299*, 325, (1994).
- [Kosonocky, 90] Kosonocky, W.F. "Review of Schottky-Barrier Imager Technology", *SPIE Vol. 1308 Infrared Detectors and Focal Plane Arrays*, 2, (1990).
- [Jiménez-Leube, 95] **F.J. Jiménez-Leube**, M.Clement, A. Almendra, J. Sanz-Maudes, T. Rodríguez. "Comparison between furnace and rapid thermal annealed iridium silicide Schottky barrier diodes". *Materials Science and Technology*, 11, 1215, (1995).
- [Jiménez-Leube, 97^a] **F.J. Jiménez-Leube**, M.Clement, J. Sanz-Maudes, T. Rodríguez. "Electrical characterization of high quality Ir/Si Schottky diodes : the early stages of silicidation" *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 15 (4), 903, (1997).
- [Jiménez-Leube, 97^b] **F.J. Jiménez-Leube**, M. Clement, J. Sanz-Maudes. "Espectroscopía tensión-corriente de diodos de barrera Schottky. Aplicación a la estructura Ir/Si (111) tipo-n". *1ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE'97) Libro de Actas (1997)*.
- [Jiménez-Leube, 97^c] **F.J. Jiménez-Leube**, M. Clement, J. Sanz-Maudes. "Caracterización eléctrica de la estructura Ir/Si (111) tipo-n". *1ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE'97) Libro de Actas*.
- [Jiménez-Leube, 97^d] **F.J. Jiménez-Leube**, M. Clement, J. Sanz-Maudes, J.M. Blanco, J.J. Serrano. "Effect of the In-Situ thermal treatments on Ir/n-type Si (111) Schottky contacts". *Journal of Vacuum Science Technology B* 15 (6), 2001, (1997).
- [Miedema, 76] A.R. Miedema. "On the heat of formation of solid alloys, II". *Journal of Less-Common Metals* 46, 67 (1976).
- [Rodríguez, 93] T. Rodríguez, H. Wolters, M. Fernández, A. Almendra, M.F. Da Silva, M. Clement, J.C. Soares, C. Ballesteros. "Iridium silicides obtained by rapid thermal annealing" *Applied Surface Science* 73, 182, (1993).
- [Rodríguez, 96] T. Rodríguez, A. Almendra, M.F. da Silva, J.C. Soares, H. Wolters, A. Rodríguez, J. Sanz-Maudes. "RBS characterization of iridium silicides formed by RTA in vacuum" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 113, 279, (1996).
- [Rogalsky, 95] "Infrared Photodetectors", A. Rogalski, editado por el SPIE.
- [Sanz-Maudes, 99] J. Sanz-Maudes, **F.J. Jiménez-Leube**, M. Clement Lorenzo "High Barrier Iridium Silicide Schottky contacts on Si fabricated by Rapid Thermal Annealing" *Journal of Vacuum Science Technology B* 17 (2), 397, (1999).

[Shepherd, 73]

F.D. Shepherd, A.C. Yang, International Electron Devices Meeting, Technical Digest, 310, (1973).

[Tsaour, 90]

B.Y. Tsaour, C.K. Chen, B.A. Nechay. "IrSi Schottky -Barrier Infrared Detectors with Wavelength Response Beyond 12 μm ". IEEE. Electron Devices Letters, 11 (9), 415, (1990).

Autor:

Francisco Javier Jiménez Leube

Director de Tesis:

Dr. D. Jesús Sanz Maudes

Departamento de Tecnología Electrónica

E.T.S.I. de Telecomunicación

Universidad Politécnica de Madrid

Fecha de lectura: 12 de abril de 2000

Calificación: Sobresaliente Cum Laude por unanimidad

Tribunal:

Presidente: **Dr. D. Miguel Aguilar Fernández**

Catedrático de Universidad, Dpto. de Tecnología Electrónica-UPM

Vocales: **Dr. D. Jose María Ruiz Pérez**

Catedrático de Universidad, Dpto. de Electrónica Física-UPM

Instituto de Energía Solar

Dr. D. Juan Manuel Martínez Duart

Catedrático de Universidad, Dpto. de Física Aplicada-UAM

Presidente de la European Materials Research Society

Dr. D. Joan Ramón Morante i Leonart

*Catedrático de Universidad, Dpto. de Física Aplicada y
Electrónica-UB*

Secretario: **Dr. D. Tomás Rodríguez Rodríguez**

Catedrático de Universidad, Dpto. de Tecnología Electrónica-UPM

Publicaciones y ponencias presentadas a Congresos:

Publicaciones en revistas internacionales:

Autores	J. Sanz-Maudes, F.J. Jiménez-Leube , M. Clement Lorenzo
Título	<i>High Barrier Iridium Silicide Schottky contacts on Si fabricated by Rapid Thermal Annealing</i>
Referencia	Journal of Vacuum Science Technology B 17 (2), 397-404, (1999)
Autores	F.J. Jiménez-Leube , M. Clement, J. Sanz-Maudes, J.M. Blanco, J.J. Serrano
Título	<i>Effect of the In-Situ thermal treatments on Ir/n-type Si (111) Schottky contacts.</i>
Referencia	Journal of Vacuum Science and Technology B 15 (6), 2001-2010 (1997)
Autores	F.J. Jiménez-Leube , M. Clement, J. Sanz-Maudes, T. Rodríguez
Título	<i>Electrical characterization of high quality Ir/Si Schottky diodes: the early stages of silicidation</i>
Referencia	Journal of Vacuum Science and Technology B, 15 (4), 903-907 (1997)
Autores	J.M. Blanco, J.J. Serrano, F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez, M. Aguilar, R. Gwilliam
Título	<i>SIMS characterization of thin layers of Iridium and its silicides</i>
Referencia	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 113 , 530-533. (1996)
Autores	F.J. Jiménez-Leube , M. Clement, A. Almendra, J. Sanz-Maudes, T. Rodríguez.
Título	<i>Comparison between Schottky Barrier diodes of Iridium Silicide formed by conventional and Rapid Thermal Annealing</i>
Referencia	Materials Science and Technology, 11 , 1215-1218 (1995)
Autores	C. Ballesteros, T. Rodríguez, F.J. Jiménez-Leube , M. Clement.
Título	<i>Polycrystalline interlayer formed by deposition of Iridium thin film on Silicon</i>
Referencia	Journal of Applied Physics, 77 (10), 5173-5175 (1995)
Autores	J.M. Blanco, J.J. Serrano, F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez, H. Wolters.
Título	<i>Determination of iridium silicides using matrix effects in SIMS</i>
Referencia	VACUUM, 45 (10-11), 1121-1122. (1994)

Contribuciones en congresos internacionales:

Autores	J. M. Blanco, J.J. Serrano, F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez, O. Ameziane, M. Aguilar
Título	<i>Sims data quantification method for matrix element sims signals from binary alloys</i>
Congreso	10th International Conference on thin films 5th European Vacuum Conference. Salamanca (España)
Año	1996

Autores	<u>G. Curello</u> , R. Gwilliam, M. Harry, B. Sealy, T. Rodríguez, F.J. Jiménez-Leube
Título	<i>Iridium silicides formation on High Doses Ge+ Implanted Si layers</i>
Congreso	MRS 1995 Fall Meeting, Symposium H Boston (Massachusetts, USA)
Tipo de participación	Presentación oral
Referencia	Material Research Society Proceedings, Vol. 402, 411-416
Año	1996

Autores	J.M. Blanco, <u>J.J. Serrano</u> , F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez, M. Aguilar.
Título	<i>Quantification of SIMS analysis of Iridium silicides</i>
Congreso	10 th International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS X) Muenster (Alemania)
Tipo de participación	Poster A-18
Referencia	Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS X. Editado por : A. Benninghaven, B. Hagenhoff, H.W. Werner. John Wiley & Sons, New York, 669-672 (1994)
Año	1996
Autores	J.M. Blanco, <u>J.J. Serrano</u> , F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez, M. Aguilar, R. Gwilliam.
Título	<i>SIMS characterization of thin layers of Iridium and its silicides</i>
Congreso	4 th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART 4) Zurich (Suiza)
Tipo de participación	Poster
Referencia	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 113 , 530-533, (1996)
Año	1995
Autores	F.J. Jiménez-Leube , M. Clement, A. Almendra, J. Sanz-Maudes, T. Rodríguez.
Título	<i>A comparison of furnace and Rapid Thermal annealed Iridium Silicide Schottky Barrier diodes</i>
Congreso	1 st International Conference on Materials for Microelectronics Barcelona (España)
Tipo de participación	Presentación oral
Referencia	Materials Science and Technology, 11 , 1215-1218, (1995)
Año	1994
Autores	J.M. Blanco, J.J. Serrano, F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez.
Título	<i>Secondary Ion Emmision Probability: Electron Tunneling or Bond Breaking Effect</i>
Congreso	14 th General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society. Madrid (España)
Tipo de participación	Poster
Referencia	Libro de Actas.

Año	1993
<hr/>	
Autores	J.M. Blanco, J.J. Serrano, F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez.
Título	<i>Secondary Ion Emmision from Iridium silicide</i>
Congreso	9 th International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS IX) Yokohama (Japón)
Tipo de participación	Poster
Referencia	Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS IX. Editado por : A. Benninghaven, Y. Nihei, R. Shimizu, H.N. Werner. John Wiley & Sons, New York, 646-649 (1994)
Año	1993
<hr/>	
Autores	J.M. Blanco, <u>J.J. Serrano</u> , F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez
Título	<i>Determination of Iridium Silicide using matrix effects in SIMS</i>
Congreso	2 nd Iberian Vacuum Meeting Alicante (España)
Tipo de participación	Presentación Oral
Referencia	VACUUM, 45 (10-11), 1121-1122 (1994).
Año	1993
<hr/>	

Autores	M. Fernández, T. Rodríguez, A. Almendra, F.J. Jiménez-Leube , H. Wolters
Título	Influence of oxygen in the Iridium Silicide formation by Rapid Thermal Annealing.
Congreso	MRS 1993 Spring Meeting San Francisco (California, USA)
Tipo de participación	Poster
Referencia	Materials Reseach Society Proceedings, Vol 299, 325-329 (1994)
Año	1993

Contribuciones en congresos nacionales:

Autores	F.J. Jiménez-Leube , M.Clement, J. Sanz-Maudes
Título	<i>Caracterización eléctrica de la estructura Ir/Si (111) tipo-n</i>
Congreso	1ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE-97) Barcelona (España)
Tipo de participación	<i>Presentación oral (Sesión 3B.2 : Materiales)</i>
Referencia	Actas de la Conferencia de Dispositivos Electrónicos (ISBN 84-7653-625-9), 419, (1997)
Año	1997

Autores	F.J. Jiménez-Leube , M.Clement, J. Sanz-Maudes
Título	<i>Espectroscopía tensión-corriente de diodos de barrera Schottky. Aplicación a diodos de Ir/Si (111) tipo-n.</i>
Congreso	1ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE-97) Barcelona (España)
Tipo de participación	<i>Presentación oral (Sesión 1B.2 : Tecnología, Caracterización y Simulación de Procesos I)</i>
Referencia	Actas de la Conferencia de Dispositivos Electrónicos (ISBN 84-7653-625-9), 41, (1997)
Año	1997

Autores	J.M. Blanco, <u>J.J. Serrano</u> , F.J. Jiménez-Leube , T. Rodríguez, M. Clement, M. Aguilar
Título	<i>Caracterización por espectrometría de masas de iones secundarios de detectores de infrarrojo</i>
Congreso	X Symposium nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI) Valladolid (España)
Tipo de participación	Presentación Oral
Referencia	Abstracts (Serie Ingeniería, nº 4)
Año	1995

Financiación del trabajo:

El trabajo presentado se financió fundamentalmente a través de dos proyectos oficiales, uno de la Comisión Interministerial para la Ciencia y la Tecnología y otro proyecto del Grupo de Activación de la Microelectrónica en España, en colaboración con la empresa Tecnológica S.A.

Título	Obtención de capas de IrSi mediante RTP
Entidad financiadora	CICYT
Duración	3 años (Mayo 1993-Mayo 1996)
Investigador principal	Dr. D. Jesús Sanz Maudes

Título	Detectores de Infrarrojo de IrSi
Entidad financiadora	GAME (Grupo de Activación de la Microelectrónica en España)
Duración	Octubre 1991 - Mayo 1993
Investigador principal	Dr. D. Jesús Sanz Maudes

Otros proyectos relacionados con el tema:

Otros proyectos en los que ha colaborado el autor en temas relacionados con el de la tesis doctoral.

Título	Obtención por cristalización en fase sólida de capas delgadas policristalinas de SiGe
Entidad financiadora	CICYT
Duración	3 años (Julio 96 - Julio 99)
Investigador principal	Dr. D. Tomás Rodríguez Rodríguez

Título	Materiales de alto coeficiente de temperatura compatibles con tecnologías de Silicio aplicables a la fabricación de sensores de radiación IR a temperatura ambiente.
Entidad financiadora	CICYT
Duración	3 años (Junio 1995-Junio 1998)
Investigador principal	Dr. D. Enrique Iborra Grau

Título	Electronic Structure of Transition Metal Silicides and Buried Solid-Solid
--------	---

Interfaces	
Entidad financiadora	INTAS
Coordinador	Dr. Manfred Neuman
Grupos participantes	Institute of Metal Physics (Russian Academy of Sciences-Ural Division, Yekaterinburg, Russia) Institute of Solid State Chemistry (Russian Academy of Sciences-Ural Division, Yekaterinburg, Russia) Sektion der Physik (University of Osnabrueck, Germany) Departamento de Tecnología Electrónica (Universidad Politécnica de Madrid) Institute of Chemistry (Uppsala University, Sweden)
Título	Fabricación de un bolómetro semiconductor para diagnóstico de plasmas de Fusión Termonuclear.
Entidad financiadora	EURATOM (Asociación EURATOM-CIEMAT para Fusión)
Investigador principal	Dr. D. Tomás Rodríguez Rodríguez

Cursos y seminarios impartidos en relación con el tema de la Tesis:

Cursos de especialización impartidos en relación con el tema de la tesis.

Curso	Detectores de infrarrojo basados en heteroestructuras de semiconductores III-V
Seminarios	Introducción a la Radiometría, Detectores basados en Silicio
Centro	E.T.S.I. de Telecomunicación (Universidad Politécnica de Madrid)
Materia	Curso impartido a personal del Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA)
Fecha	Enero 1996

Informes de los miembros del Tribunal:

Transcripción de los informes de los siete miembros (cinco titulares y dos suplentes) del tribunal nombrado por la Comisión de Doctorado de la U.P.M.

D. Miguel Aguilar Fernández

Catedrático de Universidad, Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad

Politécnica de Madrid.

"El abajo firmante informa que a su entender la tesis que presenta el Ingeniero de Telecomunicación D. Francisco Javier Jiménez Leube para acceder al grado de Doctor Ingeniero de Telecomunicación en lo que se refiere a los aspectos contemplados en la normativa vigente, fuentes bibliográficas y análisis del estado del arte, metodología seguida, originalidad del trabajo, validez de los resultados y calidad de las aportaciones, es satisfactoria.

Por ello recomienda se proceda a su lectura y defensa."

D. José Manuel Martínez-Duart

Catedrático de Universidad, Departamento de Física Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid. Presidente de la European Materials Research Society

"Una vez leída la Tesis Doctoral presentada por D. Francisco Javier Jiménez Leube, cuyo título aparece más arriba, emito el siguiente Informe. Antes de empezar su trabajo sobre fotodetectores de silicio, el Sr. Jiménez hizo un estudio bibliográfico y sobre el estado del arte de los fotodetectores Schottky para el infrarrojo basados en silicios, analizando los problemas que estos presentaban, como era el de su baja eficiencia cuántica y falta de uniformidad en su respuesta. Estos problemas han sido solucionados en la presente Tesis, al haber sido capaz el Sr. Jiménez Leube de llevar a cabo la formación de intercaras de excelente calidad entre el silicio y el silicio de Iridio (IrSi), desarrollando toda la tecnología necesaria. Esto ha permitido, siguiendo una metodología muy adecuada, la fabricación de dispositivos mediante tratamientos térmicos rápidos (RTP) para formar las intercaras Si/IrSi.

Como se puede apreciar de lo anteriormente expuesto, el trabajo es completamente original y la validez de los resultados está basada en una caracterización electrónica, óptica y estructural, llevada a cabo de modo muy riguroso, sobre los dispositivos fotodetectores desarrollados. Por todo ello, mi opinión es claramente favorable a que se proceda a la lectura y defensa de dicha Tesis Doctoral."

Don Joan Ramón Morante i Lleó

Catedrático de Universidad, Departamento de Física Aplicada y Electrónica, Universidad de Barcelona.

"Dr. D. Juan Ramón Morante Lleó, Catedrático de Electrónica de la Facultad de Físicas de la Universidad de Barcelona, informa:

Que la memoria titulada "Contribución al desarrollo de barreras Schottky de silicio y su aplicación para la detección de radiación infrarroja" presentada por D. Francisco Javier Jiménez Leube para optar al grado de doctor, reúne todos los requisitos de calidad, nivel científico y tecnológico, originalidad y resultados para poder procederse a su lectura y defensa pública.

El trabajo presentado se centra en el desarrollo de una tecnología para la fabricación de detectores de infrarrojo basados en siliciuro de iridio.

La prospección bibliográfica es extensa y cubre la actividad llevada a cabo en este campo tanto desde el punto de vista de dispositivo electrónico como desde el punto de vista tecnológico. Se identifican de forma clara los posibles inconvenientes pero se resaltan las posibles ventajas. Este análisis permite al autor definir de forma clara y precisa sus objetivos tecnológicos que van especialmente orientados a definir un proceso que garantice la formación de forma reproducible de diodos de siliciuro de iridio con interfaces homogéneas.

A partir de la definición e identificación de estos puntos la metodología presentada por el autor busca una armonía de síntesis en el campo tecnológico entre lo posible y lo disponible. Centrada la actividad en la evaporación de iridio por haces de electrones, el autor sigue cada uno de los pasos de procesado con un riguroso análisis de los parámetros que influyen y la viabilidad de su control.

Es de especial interés el concienzudo procedimiento desarrollado para determinar el más adecuado tratamiento térmico.

Este rigor metodológico también se encuentra en las técnicas experimentales aplicadas tanto a nivel electrónico como óptico y estructural. Son de especial mención los detallados análisis de técnicas ópticas donde se ha implementado un sistema completo para el análisis en la zona infrarroja media con posibilidades de llevar a cabo cálculos radiométricos y medidas de responsividad.

Los resultados obtenidos son válidos, originales ya que su vía de obtención no ha sido desarrollada previamente en el laboratorio de trabajo, y de calidad ya que han permitido llegar a una optimización tecnológica en la fabricación de detectores de infrarrojo basados en siliciuro de iridio.

Para ello, el autor ha determinado en qué condiciones de interficie de silicio y de evaporación se optimiza la superficie y se minimiza la presencia de oxígeno. La realización de un detallado análisis eléctrico de los diodos sin tratamiento térmico alguno ha permitido profundizar en el conocimiento científico de las interfaces obtenidas pudiendo así intentar modelizar el comportamiento eléctrico. Ello ha demostrado ser una ardua tarea a causa muy probablemente de la calidad final de dichas interfaces sin tratamiento térmico alguno. Este resultado que ha priori podía ya esperarse, ha permitido al autor profundizar en los distintos mecanismos eléctricos y su influencia en las características eléctricas finales. Además, ha permitido seguir su evolución con los diferentes procesados térmicos y en consecuencia llegar a acotar el rango de valores óptimos o a sugerir métodos alternativos a aplicar como son los tratamientos RTP con diferentes atmósferas, tiempos y temperaturas.

Hubiera sido interesante una exploración con diseños que incorporasen anillos de guarda para poder disminuir las corrientes de fugas y en consecuencia aplicar mayores voltajes en inverso. No obstante, los valores característicos obtenidos indican la idealidad del proceso a nivel de interficie y por tanto la relevancia de la metodología desarrollada para la fabricación de diodos de siliciuro de iridio así como de los métodos de modelización realizados y las innovaciones tecnológicas desarrolladas para conseguir los diodos optimizados presentados en esta trabajo.

Por todo ello, hay que concluir que el presente trabajo reúne originalidad, calidad y aportaciones válidas para proceder a su lectura y defensa públicas."

D. José María Ruiz Pérez

Catedrático de Universidad, Departamento de Electrónica Física, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid.

"Leída la memoria de Tesis Doctoral presentada por el doctorando y considerando que:

- La memoria está bien organizada y su elaboración ha sido cuidadosa, tanto en el texto escrito como en la profusión y calidad de las ilustraciones gráficas
- Presenta adecuadamente el estado actual de conocimientos, y la bibliografía pertinente, sobre los detectores de infrarrojo de barrera Schottky de silicio y, en su marco, encuadra los detectores de silicio de iridio, objeto del trabajo
- Es riguroso y ordenado en la descripción y utilización de las técnicas experimentales, tanto de fabricación como de caracterización de los dispositivos realizados: procesos básicos, mejoras, tratamientos térmicos posteriores, caracterización eléctrica y óptica sin despreciar otros medios de diagnóstico complementarios. Es también exhaustivo en la presentación de resultados experimentales y en su discusión.
- El trabajo presenta aportaciones originales relevantes, especialmente en los terrenos experimentales del procesado tecnológico y de la caracterización. Esta última tanto relativa a materiales como a procesos y como, finalmente, a los dispositivos fabricados.
- El trabajo ha dado lugar, además, a un número significativo de publicaciones y contribuciones en revistas, congresos internacionales, de las que el doctorando es coautor y, de varias de ellas, primer autor. Lo que también avala la originalidad y calidad del trabajo, así como la validez e interés de los resultados obtenidos.

Informo FAVORABLEMENTE la procedencia de la lectura y defensa de esta Tesis Doctoral."

D. Tomás Rodríguez Rodríguez

Catedrático de Universidad, Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Madrid.

"El desarrollo de matrices de detectores de PtSi para la ventana de 3 a 5 micras demostró la viabilidad de fabricar matrices de un gran número de elementos, hasta 1024x1024, muy uniformes y fácilmente integrables con los circuitos de procesamiento de señal. Buscando una solución semejante para la ventana de 8 a 12 micras, se comenzó a trabajar con detectores de IrSi. Esta alternativa se demostró viable, si bien no era posible conseguir una uniformidad equivalente a la de los detectores de PtSi, lo que imponía ciertas limitaciones a su utilización.

El trabajo presentado estudia y analiza el posible origen de estas inhomogeneidades, la detección de las mismas mediante caracterización eléctrica de los dispositivos fabricados y la incidencia de diferentes procesos de fabricación en las características de los detectores.

El tratamiento de las fuentes bibliográficas es exhaustivo, así como el análisis del estado del arte.

La metodología es rigurosa y adecuada.

Los resultados presentados identifican algunas de las causas de la falta de homogeneidad de los detectores, no identificables por otros métodos, y sugieren procesos tecnológicos que las pueden obviar.

La calidad de las aportaciones está avalada por el conjunto de publicaciones, tanto en revistas científicas internacionales como en congresos internacionales y nacionales, en los que se han publicado/presentado los resultados de este trabajo.

Por todo ello, estimo que procede la lectura y defensa de esta tesis doctoral."

D. Evaristo J. Abril Domingo

Catedrático de Universidad, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e

Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid

"La tesis doctoral examinada parte de la paradoja, recogida en la bibliografía, que se observa cuando se comparan las tecnologías de fabricación de detectores de barrera Schottky de plano focal para infrarrojo. Mientras que en infrarrojo medio los detectores de siliciuro de platino son perfectamente funcionales, y comerciales, presentando una respuesta espectral homogénea que permite su integración en los dispositivos CCD, en el caso de los candidatos para infrarrojo lejano (siliciuro de iridio) se está lejos de obtener dicha homogeneidad. El repaso a la bibliografía existente en el momento de iniciar los trabajos y su seguimiento durante el desarrollo de los mismos parece adecuado y permite centrar el tema en las características de estabilidad eléctrica y estructural de las intercaras de los dispositivos.

En el trabajo se recogen los resultados de un estudio sistemático de los parámetros de varios procesos de siliciación del iridio y se ponen a punto un conjunto de técnicas de medida y evaluación que permiten caracterizar los dispositivos y posibles tecnologías resultantes. Los resultados parecen coherentes y dan lugar a varias publicaciones en revistas internacionales de reconocido prestigio, lo que adicionalmente valida tanto la metodología empleada como la calidad y originalidad de los trabajos expuestos.

En resumen, en mi opinión se puede y se debe proceder a la lectura y defensa de la tesis doctoral presentada a mi consideración."

D. Juan Jiménez López

*Catedrático de Universidad, Departamento de Física de la Materia Condensada,
Universidad de Valladolid.*

"La presente memoria constituye un excelente trabajo de investigación aplicada. La detección de radiación infrarroja es de una gran importancia para múltiples aplicaciones como queda perfectamente reflejado en la memoria. El siliciuro de iridio es un material que presenta dificultades tecnológicas que impiden la formación de películas homogéneas aptas para la detección de infrarrojo. Este problema aparece claramente expuesto en la memoria y constituye la base del presente trabajo. El trabajo presentado ha estado orientado a la solución de este problema mediante la optimización de los diferentes procesos tecnológicos de la fabricación de las películas de siliciuro de iridio sobre Silicio. La caracterización de los diferentes procesos se ha hecho de manera detallada, permitiendo la mejora sistemática de los tratamientos con vistas a los objetivos marcados. En particular el estudio de intercaras se ha hecho mediante la técnica IVT que se ha demostrado adecuada a tal efecto, en contraste con otras técnicas más convencionales en este tipo de estudios como RBS, TEM, ...

Se han descrito dos procesos de tratamiento térmico que permite un la obtención de películas delgadas de siliciuro de iridio con calidad suficiente para la realización de detectores. Además se ha demostrado que el método seguido es válido tanto sobre sustratos tipo n como tipo p.

El trabajo, por consiguiente, presenta numerosas contribuciones originales. La metodología seguida ha sido la adecuada para la obtención de los objetivos marcados. Además está excelentemente presentado, de manera clara y rigurosa. La calidad de las aportaciones presentadas queda de manifiesto en las publicaciones derivadas del mismo, todas ellas en revistas de prestigio.

En cuanto a las fuentes bibliográficas hay que decir que son abundantes y actuales. La revisión que se presenta es muy completa y describe de manera clara y rigurosa la situación del problema.

Por todo ello considero que estamos ante un trabajo excelente y que procede su lectura y defensa ante el correspondiente tribunal."

Otros méritos:

Otros trabajos de investigación:

Título	Desarrollo y puesta en funcionamiento de herramientas de generación de contenidos docentes (H3700000188)
Entidad financiadora	Universidad Politécnica de Madrid, Proyectos de Innovación Educativa
Duración	1 año (diciembre 1999 - diciembre 2000)
Investigador principal	Dr. D. Jesús Sanz Maudes

Título	Proyecto RETELEDU (GT-5)
Entidad financiadora	Fundación RETEVISIÓN
Duración	2 años
Investigador principal	Dr. D. Alejandro Orero.

Título	Desarrollo de un programa de formación por ordenador en el proceso de fabricación de circuitos integrados VLSI
Entidad financiadora	Lucent Technologies
Coordinador	Dr. D. Tomás Rodríguez

Becas y premios:

- Premio a la **"Innovación Educativa"** de la Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid 1998.
- Co-autor de la propuesta ganadora del **"Hewlett-Packard Instructional Initiative on Telecommunication Systems/distributed/ Systems Grant"** (dotado con 150.000 USD), propuesta presentada en colaboración por los Departamentos de Tecnología Electrónica y de Ingeniería Telemática de la U.P.M.
- **Beca** del Instituto de la Energía para la realización de una estancia en el grupo de Fusión Termonuclear del C.I.E.M.A.T (Asociación Euratom-CIEMAT para Fusión) dentro de la 2ª Convocatoria de Becas para la Introducción a la Fusión Nuclear (Madrid, julio-septiembre 1989)