

Resumen de la Memoria del Proyecto Fin de Carrera:

**Nanotecnología para Dispositivos de
Alta Frecuencia en Nitruros III-V.
*Aplicación a Filtros SAW y Transistores HEMT***

Autor: Tomás A. Palacios Gutiérrez

Tutor: Prof. Fernando Calle Gómez

*Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, y Dpto. de Ingeniería
Electrónica. ETSI de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid.*

Fecha de lectura:

20 de septiembre de 2001

Calificación:

10 puntos, Matrícula de Honor

<u>1.</u>	<u>MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS</u>	1
<u>2.</u>	<u>NANOTECNOLOGÍA EN NITRUROS III-N</u>	3
<u>3.</u>	<u>APLICACIONES (I): DETECTORES UV MSM</u>	6
<u>4.</u>	<u>APLICACIONES (II): FILTROS SAW</u>	9
<u>5.</u>	<u>APLICACIONES (III): TRANSISTORES HEMT</u>	12
<u>6.</u>	<u>CONCLUSIONES</u>	14
<u>7.</u>	<u>REFERENCIAS</u>	15

1. Motivación y Objetivos

Desde que en 1947 Shockley, Bardeen y Brattain desarrollaran el primer amplificador de estado sólido, la evolución en el campo de la microelectrónica ha sido constante. A pesar del gran número de investigadores y los muchos intereses contrapuestos, esta evolución ha estado siempre marcada desde un punto de vista tecnológico por dos grandes tendencias:

- La búsqueda de nuevos materiales que permitiesen extender las condiciones de funcionamiento y aplicaciones de los dispositivos existentes.
- La reducción de las dimensiones de los distintos componentes, en una búsqueda continua de mayores velocidades de funcionamiento y un aumento de la densidad de empaquetamiento de dispositivos.

Uno de los mercados que más insistentemente está demandando nuevas mejoras en las dos líneas anteriores es el de la electrónica para sistemas de altas frecuencias. En las últimas décadas, las características de los nuevos servicios de radiocomunicaciones han obligado a la utilización de frecuencias de funcionamiento cada vez más elevadas. Este hecho ha propiciado una gran investigación en el desarrollo de dispositivos semiconductores (activos y pasivos) capaces de funcionar a frecuencias de microondas y milimétricas, y que puedan sustituir a los componentes de microondas convencionales (líneas microstrip, cavidades resonantes, etc.), mucho más voluminosos, caros y menos flexibles.

Entre los semiconductores que más profundamente se están estudiando para su utilización en dispositivos electrónicos de muy altas frecuencias se encuentran los compuestos semiconductores binarios y ternarios de los grupos III-V [Amb98, Pea99]. En el ámbito de los transistores, hasta ahora el trabajo ha estado centrado en el GaAs [Dru86] y el InP. Sin embargo, en los últimos años, el interés por los nitruros (especialmente el GaN/AlGaN) en aplicaciones de microondas y milimétricas ha aumentado considerablemente gracias a su excelente comportamiento en transistores de alta movilidad electrónica (HEMT), la posibilidad de funcionamiento en condiciones adversas de temperatura o radiación y, muy especialmente, en aplicaciones de alta potencia [Pea99, Shu98]. Por otra parte, este mismo sistema de materiales semiconductores presenta intensos campos piezoeléctricos, que permiten su uso para la fabricación de dispositivos basados en la conversión de señales eléctricas a mecánicas, como los filtros de ondas acústicas de superficie (SAW) [Deg98] y otros sistemas

micro-electromecánicos (MEMS). Finalmente, tampoco se puede olvidar las múltiples aplicaciones optoelectrónicas de estos materiales, que posibilitan la fabricación de emisores [Naka94] y detectores [Mon01] en el azul y ultravioleta.

Sin embargo, para la fabricación de dispositivos activos y pasivos de microondas no es suficiente con disponer de los materiales adecuados. Una segunda dificultad está relacionada con la necesidad de obtener motivos submicrónicos en materiales muy poco reactivos [Pal00]. Este hecho exige utilizar, en lugar de la litografía óptica convencional, nuevas técnicas como la nanolitografía por haz de electrones [Rai97], así como a desarrollar la tecnología de contactos adecuada [Mon01a].

Han sido estas dos tendencias, la búsqueda de nuevos materiales y la reducción de tamaños lo que ha motivado el Proyecto que se presenta. Es la primera vez que se aplican en España estos conceptos a los nitruros y muchos de los resultados obtenidos constituyen novedades a nivel mundial. No sólo se han fabricado y estudiado dispositivos electrónicos con prestaciones muy superiores a las convencionales gracias a la utilización de la nanotecnología, sino que el desarrollo de la tecnología submicrónica, desconocida hasta ahora en los nitruros¹, abre la puerta de nuevos dispositivos que serán una parte fundamental de la electrónica del futuro: MEMS, microsensores y electrónica orgánica integrada, etc.

El objetivo básico de este Proyecto ha sido el desarrollo y posterior utilización de la tecnología submicrónica en los nitruros del grupo III. Con ello se pudo estudiar el funcionamiento de dispositivos de alta frecuencia, tanto activos como pasivos, en estos semiconductores. Para la consecución de este objetivo general se trazaron los siguientes objetivos parciales:

Objetivo A.- Desarrollo y optimización de la nanotecnología de nitruros III-N basada en litografía por haz de electrones. Fue necesario un estudio de los diversos factores que intervienen en la misma así como la selección de los mejores metales y técnicas de *lift-off* para asegurar la adecuada transferencia de cualquier tipo de diseño submicrónico (líneas, interdigitados, etc. con distintas disposiciones geométricas).

¹ Que sepamos, sólo existe la excepción de la tecnología de las puertas submicrónicas de los transistores HEMTs. Esta tecnología es mucho más sencilla que la que se aborda en este proyecto ya que el gas bidimensional de electrones (2-DEG) generado por la heterounión AlGaIn/GaN permite poder considerar al semiconductor como un conductor.

Objetivo B.- Aplicación de la tecnología submicrónica a distintos dispositivos electrónicos basados en $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1$). En concreto se han aplicado estas técnicas a la fabricación de detectores metal-semiconductor-metal (MSM) de radiación ultravioleta, filtros basados en ondas acústicas superficiales (SAW) y transistores de alta movilidad electrónica (HEMT)².

Objetivo C.- Estudio de las ventajas de la tecnología submicrónica aplicada a dispositivos de alta frecuencia. Se han realizado estudios teóricos que se han verificado mediante la medida, comparación y análisis de los dispositivos fabricados. En muchos casos, los resultados han sido tratados digitalmente para obtener información adicional.

Objetivo D.- Extracción de distintos parámetros físicos de la familia de semiconductores de AlGaN a partir de las medidas realizadas en los dispositivos desarrollados para los objetivos anteriores.

2. Nanotecnología en Nitruros III-N

El primer tema abordado en el Proyecto presentado ha sido el desarrollo de toda la tecnología necesaria para la realización de dispositivos submicrónicos en nitruros del grupo III. Esta tecnología cuenta con numerosas dificultades debidas, especialmente, a la gran resistividad y baja reactividad de la gran parte de los semiconductores basados en nitruros. Sin embargo, existe una gran motivación para tratar de solucionar dichos problemas ya que gracias a las reducciones de tamaño que dicha tecnología acarrea sería posible aumentar la densidad y/o complejidad de los chips, la frecuencia de funcionamiento de numerosos componentes electrónicos y el aumento del área efectiva de muchos dispositivos como los detectores MSM o los filtros SAW.

En este trabajo se ha optado por utilizar la litografía por haz de electrones como parte central de la tecnología submicrónica. Este sistema está basado en la transferencia de motivos desde una máscara previamente diseñada, residente en la memoria de un ordenador, hasta una resina, usando un haz colimado de electrones [Rai97]. Esta es una técnica ideal para la realización de dispositivos electrónicos con motivos entre 0.1 y 1

² El trabajo realizado en los transistores HEMT se engloba en un proyecto más amplio de desarrollo de HEMTs de potencia en el DIE-ISOM. Por ello, en este Proyecto se han podido utilizar muestras en las que el ataque de aislamiento de dispositivos y los contactos óhmicos de éstos ya estaban realizados.

μm al poseer una gran resolución y ser extremadamente flexible. Sin embargo, hasta ahora, sus máximas prestaciones se han obtenido en materiales conductores o semiconductores de *gap* estrecho. Así, cuando se aplica a semiconductores de *gap* ancho, la gran resistividad de estos cuando están sin dopar obliga a metalizar la resina litográfica con objeto de poder evacuar los electrones inyectados durante la litografía (Ver Figura 1a). Por otra parte, en la familia del AlGaN, la gran masa atómica del Ga acentúa otros problemas, como el efecto de proximidad, que impiden la realización de patrones periódicos submicrónicos. Todas estas dificultades han limitado la resolución máxima alcanzable en los nitruros a valores cercanos a $1\ \mu\text{m}$.

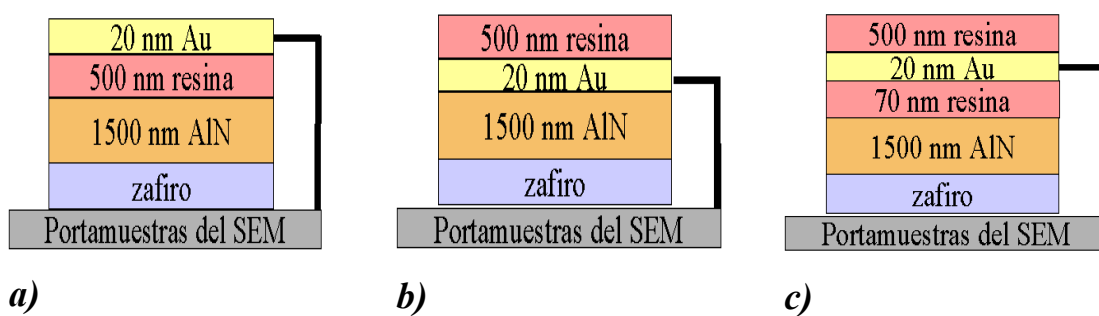


Figura 1. Estructuras metal/resina analizadas en este trabajo.

En este trabajo se proponen soluciones que permiten mejorar en un factor 5 la resolución hasta ahora alcanzada en los nitruros y otros materiales de ancho *gap*. Se han estudiado de forma teórica y experimental tres estructuras diferentes de metal/resina: la utilizada habitualmente (Figura 1a) y 2 nuevas (Figura 1b y c) [Pal01, 02]. Primeramente se realizaron simulaciones por el método de Monte Carlo del proceso de litografía por haz de electrones, especialmente de la dispersión que sufren los electrones según atraviesan las distintas capas de metal/resina/semiconductor. Gracias a estas simulaciones se analizó la influencia de los distintos parámetros de la litografía (tensión de aceleración, metal, disposición de las capas, etc). Del estudio anterior se observó que el esquema tradicional reducía la resolución debido a que la capa de metal dispersaba significativamente el haz de electrones. También se detectó por primera vez el “*efecto de ida y vuelta*”, por el cual los electrones inyectados en la estructura tradicional atraviesan dos veces la resina reduciendo, por tanto, la resolución. Para solucionar estos dos problemas se han propuesto las estructuras de las Figura 1b y c. Como se observa en las simulaciones (Figura 2), mediante estas dos nuevas estructuras se eliminan los fenómenos perjudiciales del sistema tradicional.

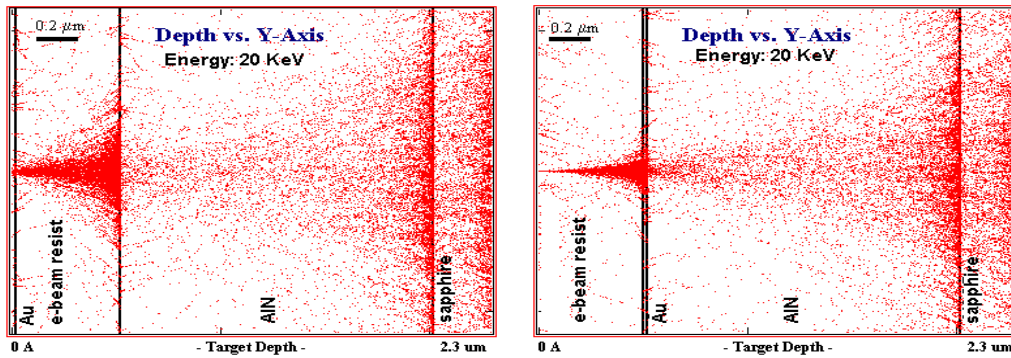


Figura 2. Simulaciones de la dispersión del haz de electrones al atravesar las estructuras *a)* Au/resina/AlN/zafiro y *b)* resina/Au/AlN/zafiro.

Las distintas mejoras detectadas mediante las simulaciones fueron implementadas en diversos programas de ordenador para poder seleccionar de forma automática los parámetros óptimos de la litografía y de la alineación de motivos. Estos programas, junto a otras mejoras como la doble litografía y metalización, fueron probados experimentalmente mediante litografías reales. Se debe destacar que la concordancia entre las simulaciones y los experimentos fue muy importante y mientras que con el sistema tradicional no se pudieron realizar estructuras periódicas de menos de 1 μm , con los nuevos esquemas propuestos la resolución mejoró hasta 0.2 μm (Ver Figura 3).



Figura 3. Ejemplos de litografías submicrónicas realizadas con el procedimiento desarrollado en este proyecto. En *a)* se tienen líneas de 0.5 μm separadas 0.5 μm y en *b)* las líneas son de menos de 200 nm.

3. Aplicaciones (I): Detectores UV MSM

Uno de los dispositivos que más se pueden beneficiar de la tecnología submicrónica son los detectores de radiación basados en estructuras metal-semiconductor-metal. Estos fotodetectores están formados por la deposición de dos contactos Schottky interdigitados (para aumentar el área efectiva del dispositivo) sobre una capa de semiconductor muy resistivo, como se representa en la Figura 4. Cuando se polariza el dispositivo, los pares electrón-hueco que son generados por la radiación dentro de la zona de depleción de los contactos serán capturados por estos y contribuyen a la fotocorriente [Sze71]. Esta fotocorriente es proporcional a la potencia óptica incidente.

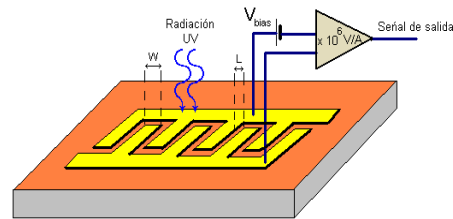


Figura 4. Esquema de un detector MSM y del circuito de medida asociado.

En este proyecto se ha estudiado el efecto de reducir la anchura y separación entre electrodos en las prestaciones de los fotodiodos MSM, especialmente los fabricados sobre GaN para detección de radiación UV. Se realizaron análisis teóricos y simulaciones y una vez comprendido dicho efecto, se fabricaron diversos dispositivos con objeto de validar dichos resultados.

Partiendo del modelo descrito por Sze en [Sze71], se calculó la anchura de la zona de carga espacial que rodea cada electrodo en función de la tensión de polarización aplicada (Ver Figura 5). Con estos valores se obtuvo el valor de la responsividad de esta clase de detectores para diferentes separaciones entre electrodos y tensiones de polarización del dispositivo (Ver Figura 6).

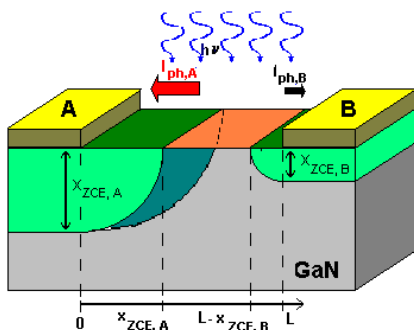


Figura 5. Esquema de las aproximaciones realizadas para el cálculo de la responsividad óptica de un fotodiodo MSM de GaN.

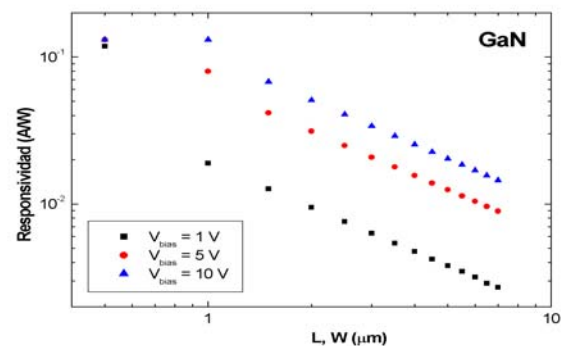


Figura 6. Responsividad óptica de un detector MSM de GaN para diferentes separaciones entre electrodos.

En la Figura 6 se observa que el fabricar fotodiodos con interdigitados separados por distancias submicrónicas permite aumentar significativamente la responsividad del detector ya que aumenta el área efectiva del detector al aumentar la zona de carga de espacio. Este efecto también se puede lograr aumentando la tensión de polarización, sin embargo se aumentaría también la corriente de fugas del fotodetector.

Otro de los aspectos fundamentales que motivan las investigaciones en detectores MSM submicrónicos es el del ancho de banda. En este trabajo se ha analizado teóricamente el ancho de banda de los detectores y se ha estudiado la influencia de las dimensiones de los interdigitados en cada una de sus dos componentes: el tiempo máximo de tránsito de los portadores minoritarios y el efecto de la capacidad del detector. Así se han obtenido simulaciones de la variación del tiempo de respuesta del detector con la separación entre electrodos (ver Figura 7), que han permitido por primera vez la elección de los parámetros óptimos de diseño para lograr cumplir las especificaciones técnicas necesarias para alta frecuencia.

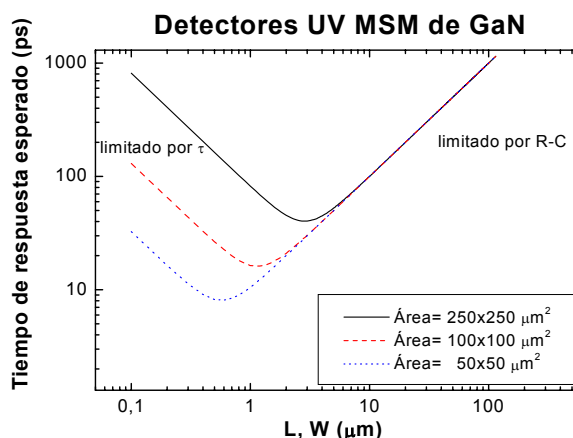


Figura 7. Simulación del tiempo de respuesta esperado de los fotodiodos MSM en función de la anchura y separación entre electrodos.

Con objeto de comprobar los resultados previstos por las simulaciones y, a la vez, verificar el correcto funcionamiento de la tecnología submicrónica desarrollada se han fabricado detectores MSM de 0.5, 1, 1.5 y 2 μm de separación entre electrodos (Ver Figura 8). Para su realización se han empleado metalizaciones de Ni/Au y de Pt y más de 20 pasos tecnológicos diferentes. Una vez fabricados, se procedió a su caracterización. Se debe indicar que nunca hasta ahora se han presentado resultados de detectores MSM submicrónicos de radiación ultravioleta.

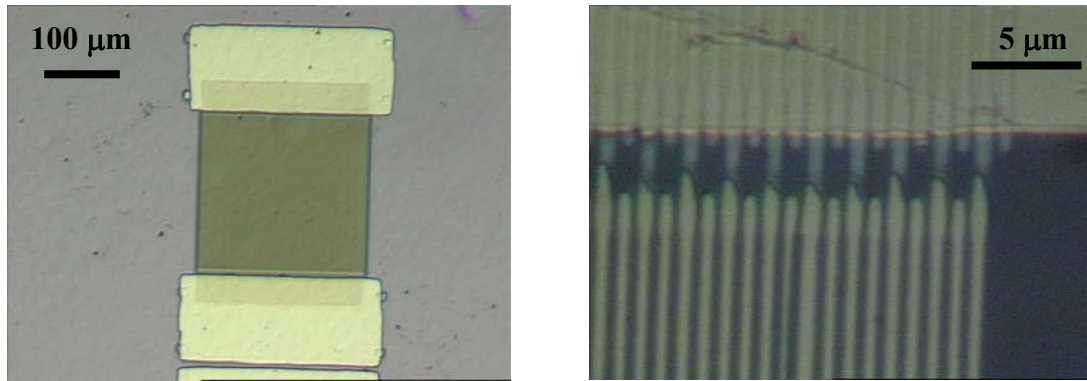


Figura 8. Vista completa y detalle de uno de los detectores MSM de 0.5 μm fabricados.

Como se aprecia en la Figura 9, la respuesta con la potencia incidente de todos los fotodetectores fabricados es lineal, alcanzándose responsividades de 1.1 A/W (@ $V_{\text{bias}}=5\text{ V}$) en los MSM de 0.5 μm y 0.53 A/W (@ $V_{\text{bias}}=5\text{ V}$) en los de 1.5 μm . Por otra parte, estos elevados valores de responsividad se obtienen sin degradar el contraste ultravioleta/visible. Este contraste es de más de 3 órdenes de magnitud en los dispositivos de 0.5 μm (Ver Figura 10), estando en el estado del arte de esta clase de detectores.

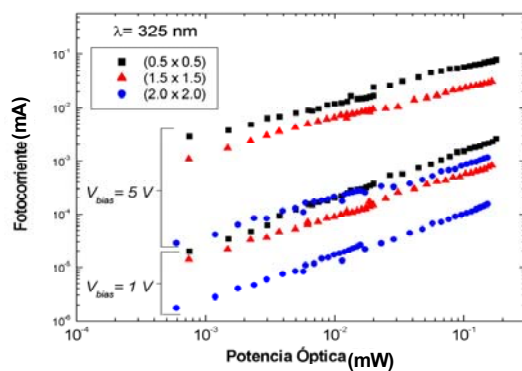


Figura 9. Fotocorriente vs Potencia óptica en detectores MSM de GaN de distintas geometrías y área de $250 \times 250\ \mu\text{m}^2$.

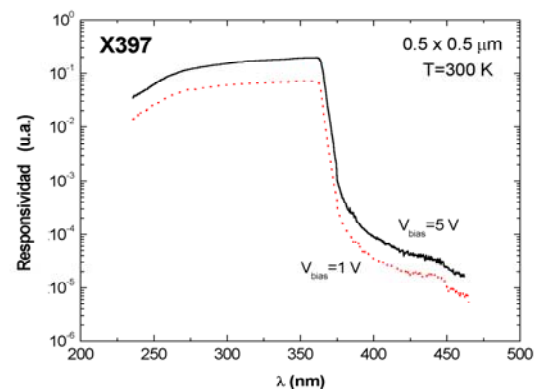


Figura 10. Respuesta espectral de un fotodiodo MSM de GaN bajo diferentes polarizaciones.

Respecto a la caracterización del tiempo de respuesta de estos dispositivos, se debe indicar que aún no se han podido realizar dichas medidas. Sin embargo, sí se ha comprobado su idoneidad para un funcionamiento correcto en alta frecuencia. Mediante medidas de su capacidad y respuesta ante diferentes frecuencias del *chopper* óptico se ha descartado la existencia de fenómenos de recombinación lenta no deseada. Con ello, se esperan anchos de banda del orden de 125 GHz para dispositivos de 0.5 μm y un área de $50 \times 50\ \mu\text{m}^2$.

4. Aplicaciones (II): filtros SAW

El segundo de los dispositivos en que se ha probado la tecnología submicrónica ha sido los filtros basados en ondas acústicas superficiales (SAW). Estos dispositivos electromecánicos están basados en la resonancia de dos electrodos o transductores interdigitados (IDT) con una onda elástica (acústica) superficial a una frecuencia determinada (Ver Figura 11). Esta frecuencia de resonancia, f_0 , viene determinada por la geometría de los interdigitados y por el substrato ($f_0 = v_{SAW} / \lambda$, con v_{SAW} la velocidad de las ondas SAW en la superficie del material y λ la periodicidad de los dedos). Gracias a su reducido tamaño y gran flexibilidad estos dispositivos se están imponiendo en una enorme variedad de funciones en el procesamiento de señales de alta frecuencia (50 MHz – 3 GHz), existiendo filtros, líneas de retardo, osciladores, duplexores, transformadores de Fourier, etc. [Cam98].

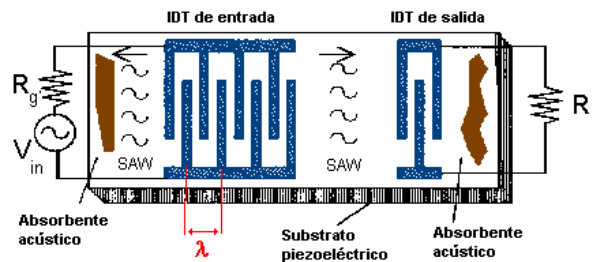


Figura 11. Esquema de un dispositivo SAW, consistente en dos electrodos interdigitados depositados sobre una lámina piezoeléctrica.

También estos dispositivos se pueden beneficiar de la utilización de los nitruros como substrato y de la tecnología submicrónica desarrollada en este proyecto. La nanolitografía nos permitirá elevar la frecuencia de funcionamiento ya que ésta es inversamente proporcional al período entre dedos (λ). Por otra parte, los nitruros presentan unas características óptimas para su utilización en dispositivos SAW de alta frecuencia y fiabilidad ya que la velocidad del sonido a través de su superficie es la más elevada entre los materiales habituales en estos dispositivos (10605 m/s en el AlN), lo cual permite reducir las necesidades litográficas y/o las dimensiones de los dispositivos. Así mismo, su carácter semiconductor permite la integración monolítica de los dispositivos SAW con el resto de la electrónica del sistema (transistores, detectores de radiación, etc). Finalmente, el gran energía de *gap* de esta familia de semiconductores posibilita su utilización en ambientes tanto térmica como químicamente agresivos.

En este proyecto se ha utilizado la tecnología submicrónica descrita en los apartados anteriores para fabricar dispositivos de microondas sobre AlN crecido mediante epitaxia de haces moleculares (MBE) [Pal01]. Se abarcaron todas las áreas de la fabricación de dichos dispositivos, desde el diseño y simulación de las propiedades del material y de los filtros (Ver Figura 12), hasta la realización de los programas de control e interconexión con el sistema de nanolitografía.

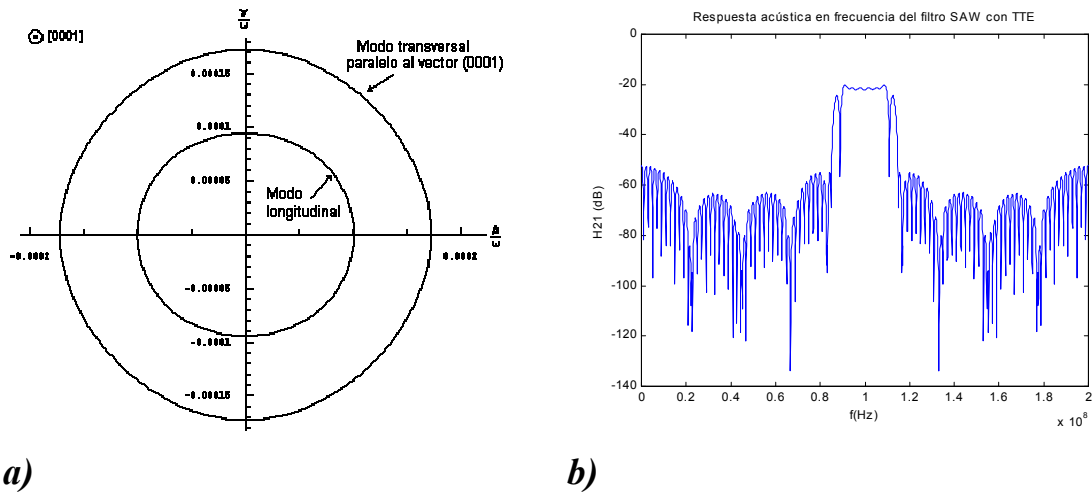


Figura 12. Simulaciones de a) las curvas de lentitud características del AlN y b) de la respuesta de uno de los filtros SAW diseñados sobre AlN.

Se fabricaron dispositivos con anchura de dedos y separaciones entre electrodos variables entre 6 y 0.5 μm . En la Figura 13 se muestra la función de transferencia de los dispositivos de 1.5 y 1 μm . Como se observa, se han logrado filtros por encima de 1.2 GHz y con pérdidas de inserción de 20 dB. En la misma figura, se pueden comparar la función de transferencia obtenida con la simulada, destacando la gran semejanza entre ambos resultados. Estos datos están dentro del estado del arte de los filtros SAW en general y, especialmente, entre los mejores resultados obtenidos en materiales semiconductores.

Una vez fabricados los dispositivos se procedió a realizar una completa caracterización con objeto de estudiar las propiedades y adecuación del AlN a la fabricación de dispositivos SAW. Así, se ha calculado el coeficiente piezoeléctrico e_{33} del AlN, el coeficiente de acoplamiento electromecánico K^2 y el coeficiente térmico de retardo del AlN. Todos ellos son parámetros fundamentales para el diseño y simulación de esta clase de dispositivos.

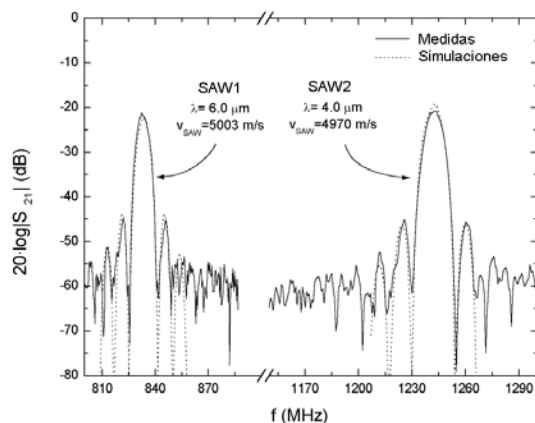


Figura 13. Función de transferencia medida (y simulada) en filtros de AIN con diferentes periodos de dedos.

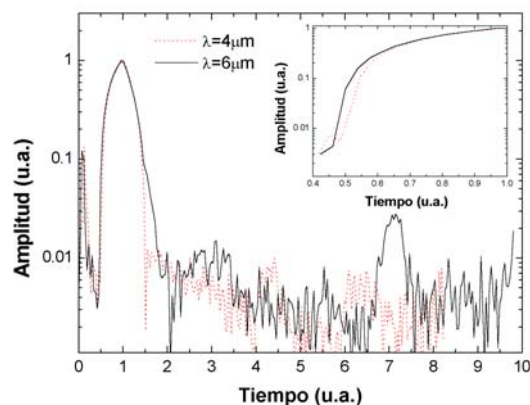


Figura 14. Respuesta al impulso normalizada de los filtros SAW de la Figura 13. En el gráfico insertado se muestra el efecto de las ondas BAW para diferentes valores de λ .

Finalmente, también se han estudiado diversos efectos de segundo orden que influyen en las prestaciones de los dispositivos SAW. Así por ejemplo, uno de los principales problemas de los filtros SAW fabricados sobre epicapas, como es nuestro caso, es la generación de ondas acústicas de volumen debido, entre otros factores, al espesor de la epicapa en relación con el del sustrato. Para estudiar este fenómeno se ha desarrollado un nuevo método basado en la normalización en tiempo y amplitud de la transformada inversa de Fourier de la función de transferencia de los filtros. Como ejemplo se muestra la Figura 14, en la que se obtiene la función al impulso normalizada de los filtros de la Figura 13. La mayor influencia de las ondas BAW en el filtro de 1.5 μm se traduce en una mayor señal en la zona de tiempos normalizada de 0.5 a 1 (véase el detalle de la Figura 14). Por otra parte, de la Figura 14 también se pueden obtener conclusiones sobre la influencia de otros efectos de segundo orden como el acoplamiento entre entrada y salida, y el efecto de triple tránsito.

5. Aplicaciones (III): transistores HEMT

El último de los dispositivos estudiados en el proyecto presentado son los transistores de alta movilidad electrónica (HEMTs) basados en heteroestructuras AlGaIn/GaN (Ver figura 15). Gracias al confinamiento de los electrones que se produce en la heteroestructura AlGaIn/GaN se obtienen dispositivos con frecuencias de funcionamiento de varias decenas de gigahertzio

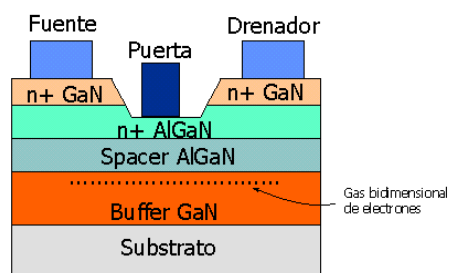
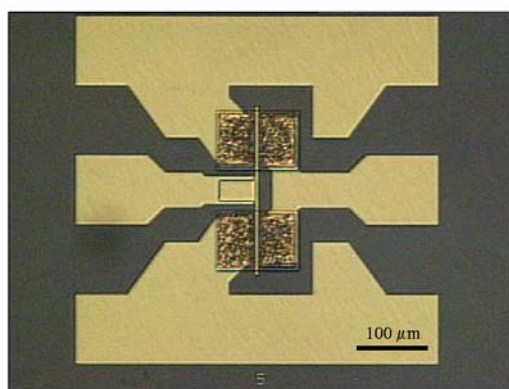
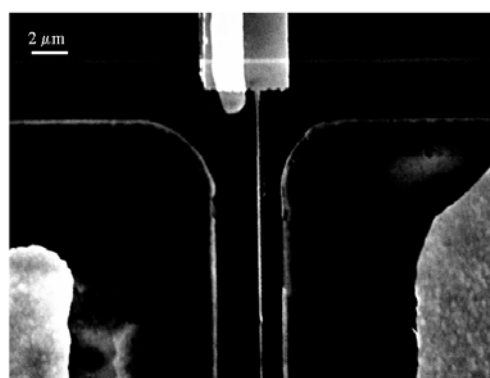


Figura 15. Esquema de la estructura de un transistor HEMT de AlGaIn/GaN.

muy adecuados para aplicaciones de alta potencia. En este proyecto, se estudió de forma teórica la influencia de las dimensiones de la puerta en las prestaciones en DC y RF de estos dispositivos (corriente máxima de saturación, transconductancia, frecuencias características f_t y $f_{m\acute{a}x}$ y potencia de salida), realizándose diversas simulaciones y, finalmente, se aplicó la tecnología submicrónica en la fabricación de los primeros transistores HEMT de AlGaIn/GaN fabricados en España con puertas de $0.2 \mu\text{m}$ (Ver Figura 16) [Pal01a].



a)



b)

Figura 16. Fotografías de a) uno de los transistores HEMT fabricados, y b) detalle de una puerta de $0.2 \mu\text{m}$ de longitud.

Al reducir la longitud de la puerta, todas las prestaciones de los transistores mejoraron. Así en la Figura 17 se aprecia el aumento de casi un 300 % de la corriente máxima al disminuir la longitud de puerta de las $2 \mu\text{m}$ convencionales a $0.2 \mu\text{m}$. También mejora la transconductancia en casi un 200 %, alcanzándose valores superiores a 200 mS/mm en transistores con $L_g=0.2 \mu\text{m}$. En relación con la transconductancia, se

debe destacar que se observó un doble máximo al estudiar su evolución con V_{gs} (Ver Figura 18). Es la primera vez que se detectan estos efectos en los HEMTs de AlGaIn/GaN y se han atribuido a la aparición de un canal parásito en la capa de AlGaIn.

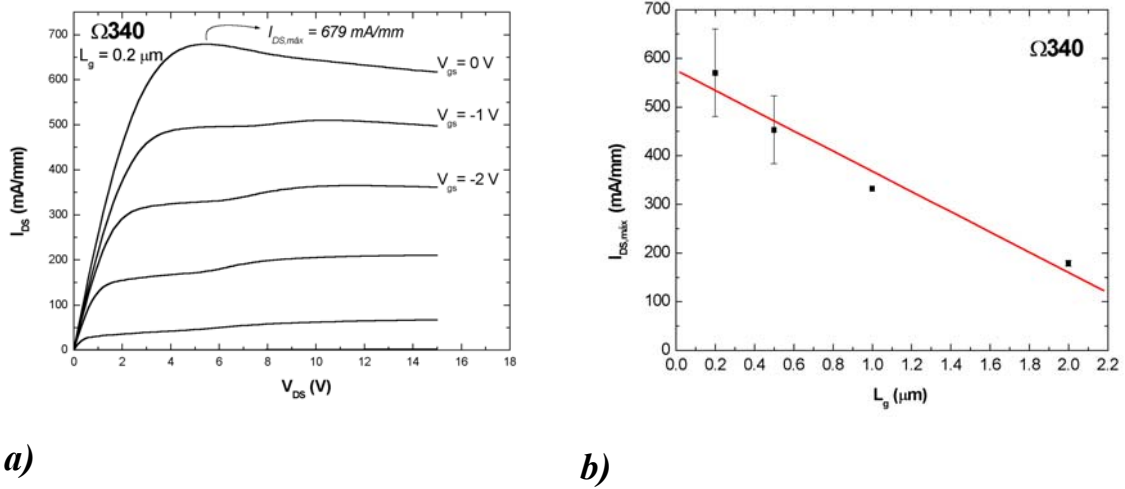


Figura 17. a) Variación de I_{DS} con V_{DS} en un transistor de $0.2 \mu\text{m}$ de longitud de puerta, y b) corriente máxima de saturación en función de la longitud de la puerta.

Se debe indicar que no se pudieron incluir en la memoria del Proyecto medidas en RF de los transistores fabricados. Sin embargo, en el momento de escribir este resumen sí se poseen dichos resultados. Así, por ejemplo, en la Figura 19 se muestra la evolución de la ganancia con la frecuencia para transistores con longitudes de puerta variando de $1 \mu\text{m}$ hasta $0.2 \mu\text{m}$. Se han obtenido frecuencias máximas de funcionamiento, $f_{m\acute{a}x}$, de 36 GHz en dispositivos de $0.2 \mu\text{m}$ de longitud de puerta.

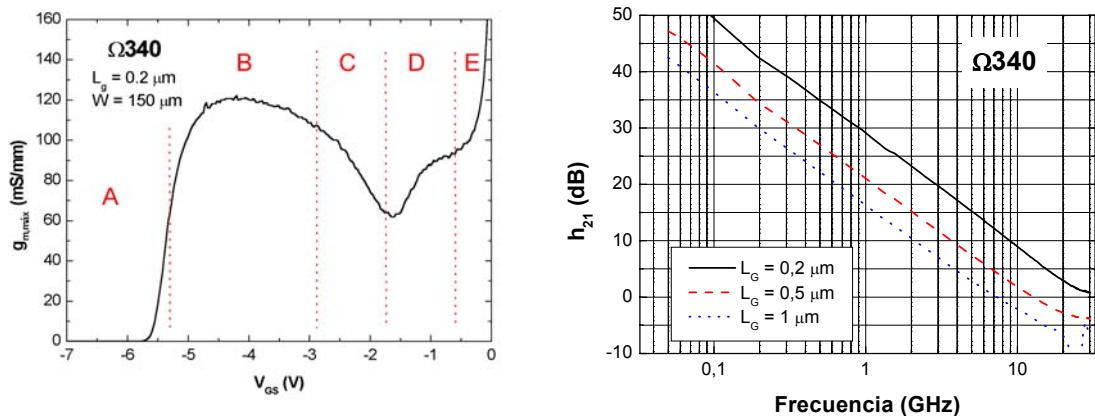


Figura 18. Influencia de la conducción paralela por un MESFET parásito en la capa de AlGaIn en un transistor HEMT con puerta submicrónica de AlGaIn/GaN.

Figura 19. Variación de la respuesta en frecuencia con la longitud de la puerta.

6. Conclusiones

A modo de conclusión de este resumen, a lo largo del Proyecto Fin de Carrera presentado se ha desarrollado completamente la tecnología submicrónica de semiconductores III-N y se ha demostrado su utilidad mediante el estudio teórico, diseño, fabricación y caracterización de tres tipos de dispositivos electrónicos diferentes: detectores MSM de luz ultravioleta, filtros SAW de AlN y transistores HEMT de AlGaIn/GaN. En todos estos dispositivos, la realización de motivos submicrónicos (de hasta 0.2 μm) ha permitido potenciar notablemente las prestaciones dadas por el uso de los nitruros como semiconductor.

La novedad del trabajo presentado es muy importante ya que es la primera vez, hasta donde nosotros sabemos, que se realizan dispositivos submicrónicos en nitruros en España, y en este trabajo se han presentado los primeros resultados a nivel mundial de detectores MSM y filtros SAW en dichos semiconductores de 0.5 μm de separación entre electrodos. La utilización de esta tecnología ha permitido que la gran mayoría de los resultados presentados se encuentren dentro del estado del arte actual, como demuestra la presentación de estos en más de 20 artículos y congresos científicos internacionales.

También destaca que todos estos resultados no se han quedado circunscritos al ámbito académico. Así, los resultados presentados en este trabajo han sido llevados a cabo con la ayuda de 6 proyectos de investigación diferentes financiados y promovidos tanto por instituciones públicas (Ministerio de Defensa, Ministerio de Ciencia y Tecnología, y la Organización Europea para la Investigación Nuclear, CERN) como privadas (Agencia Espacial Europea y Airtel) que permiten una muy probable explotación comercial a corto y medio plazo.

Por último, se debe señalar que la utilidad de la tecnología desarrollada no se limita a los dispositivos electrónicos presentados. Gracias a su versatilidad es posible adaptarla a la fabricación de otros dispositivos electrónicos (semiconductores y orgánicos) y sistemas microelectro-mecánicos (MEMS) que constituirán una parte fundamental entre los bloques constituyentes de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones del futuro.

7. Referencias

- [Amb98] O. Ambacher: “*Growth and applications of group III-nitrides*”, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 31, 2653 (1998).
- [Cam98] C. K. Campbell, “*Surface acoustic wave devices for mobile and wireless communications*”. Academic Press, 1998.
- [Deg98] C. Deger, E. Born, H. Angerer, O. Ambacher, M. Stutzmann, J. Hornsteiner, E. Riha y G. Fischerauer: “*Sound velocity of AlGa_N films obtained by surface acoustic-wave measurements*”, Appl. Phys. Lett., vol 72, no. 19, 2400 (1998).
- [Dru86] T. J. Drummond, W. T. Masselink y H. Morkoç: “*Modulation-Doped GaAs/(Al, Ga)As Heterojunction Field Effect Transistors: MODFETs*”, Proc. IEEE, vol. 74, no. 6, 773 (1986).
- [Mon01] E. Monroy, F. Calle, J.L. Pau, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont y P. Gibart: “*Application and Performance of GaN Based UV Detectors*”, Phys. Stat. Sol. (a) 185, no. 1, 91 (2001).
- [Mon01a] E. Monroy, F. Calle, T. Palacios, J. Sánchez-Osorio, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, F. Omnès, Z. Bougrioua e I. Moerman: “*Reliability of Schottky contacts on AlGa_N*”, Phys. Stat. Sol. (a) 188, no. 1, 367 (2001).
- [Naka94] S. Nakamura, T. Mukai y M. Senoh: “*Candela-class high-brightness InGa_N/AlGa_N double-heterostructure blue-light-emitting diodes*”, Appl. Phys. Lett., vol. 64, 1687 (1994).
- [Pal00] T. Palacios, F. Calle, M. Varela, C. Ballesteros, E. Monroy, F. B. Naranjo, M. A. Sánchez-García, E. Calleja y E. Muñoz: “*Wet etching of GaN grown by molecular beam epitaxy on Si (111)*”, Semicond.. Sci. Technol., vol. 15, 996 (2000).
- [Pal01] T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher y C. Prieto: “*Nanotechnology for SAW devices on AlN epilayers*”, Mat. Science & Eng. B (En prensa, 2001).
- [Pal01a] T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher, F. Omnès, Z. Bougrioua, I. Moerman y E. Muñoz: “*Sub-micron technology in group-III nitrides*”. Libro de ponencias del 11th European Heterostructure Technology Workshop. Padua, octubre 2001.
- [Pal02] T. Palacios, F. Calle, E. Monroy y E. Muñoz: “*Submicron Technology for III-Nitride Semiconductors*”. Enviado a J. Vac. Sci. & Tech. B., enero 2002.
- [Pea99] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, F. Ren: “*GaN: Processing, defects, and devices*”, J. Appl. Phys., vol. 86, 1 (1999).
- [Rai97] P. Rai-Choudhury (editor): “*Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, vol. 1*”, SPIE, (1997).
- [Shu98] M. S. Shur: “*GaN based transistors for high power applications*”, Solid-State Electron., vol. 42, no. 12, 2131 (1998).
- [Sze71] S. M. Sze, D. J. Coleman Jr. y A. Loya: “*Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structures*”, Solid-State Electron., vol. 14, 1209 (1971).

Solicitante:

Tomás Apóstol Palacios Gutiérrez

Proyecto presentado:

Título: “Nanotecnología para Dispositivos de Alta Frecuencia en Nitruros III-V. Aplicación a Filtros SAW y Transistores HEMT.”

Tutor: Prof. Fernando Calle Gómez

Lugar de Realización: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, y Departamento de Ingeniería Electrónica. ETSI de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha de lectura: 20 de septiembre de 2000

Tribunal:

Presidente:	Prof. Elías Muñoz Merino
Vocal:	Dr. Fernando Calle Gómez
Secretario:	Dra. Eva Monroy Fernández

Calificación: 10 puntos, Matrícula de Honor

2.- PARTICIPACIÓN EN PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN RELACIONADOS CON EL PROYECTO FIN DE CARRERA

Diciembre 2001 –

“Tecnología para la fabricación de dispositivos de alta frecuencia basados en nitruros III-N para operación en alta temperatura”

Entidad Contratante: CICyT. Ministerio de Ciencia y Tecnología

Entidad Contratada: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Responsable del Proyecto: Dr. Fernando Calle Gómez

Julio 2000 – Noviembre 2001

“Desarrollo de Procedimientos de Medida de Transistores GaN”

Entidad Contratante: Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada

Entidad Contratada: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, UPM

Responsable del Proyecto: Dr. Fernando Calle Gómez

Enero 2001 – Diciembre 2001

“GaN: Development of Processing Building Blocks”

Entidad Contratante: Agencia Espacial Europea

Entidad Contratada: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, UPM

Responsable del Proyecto: Dr. Elías Muñoz Merino

Diciembre 2000 – Octubre 2001

“Transistores de GaN de Potencia para Equipos Perturbadores Multibanda”

Entidad Contratante: Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada

Entidad Contratada: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, UPM

Responsable del Proyecto: Dr. Fernando Calle Gómez

Octubre 2000 – Junio 2001

“Filtros SAW de Frecuencias Intermedias para Telefonía Celular”

Entidad Contratante: Dpto. Ingeniería Electrónica, ETSI de Telecomunicación, UPM

Entidad Contratada: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, UPM

Responsable del Proyecto: Dr. Fernando Calle Gómez

Julio 2000- Septiembre 2000

“Electronics for particle-physic detectors”

Entidad Contratante: Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN, Suiza).

Entidad Contratada: Grupo de Microelectrónica. División de Física Experimental. CERN.

Responsable del Proyecto: Dr. Walter Snoeys

Septiembre 1999-Junio 2000

“Filtros de Ondas Acústicas Superficiales para Telefonía Celular CDMA y basados en GaAs y AlN”

Entidad Contratante: Cátedra Airtel. ETSI de Telecomunicación, UPM

Entidad Contratada: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, UPM

Responsable del Proyecto: Dr. Fernando Calle Gómez

3.- BECAS OBTENIDAS DURANTE LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Octubre 2000 – Junio 2001

Beca-Colaboración con el Dpto. de Ingeniería Electrónica de la ETSI de Telecomunicación de la UPM.

Organismo que concedió la beca: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Finalidad de la beca: Trabajo de investigación sobre filtros basados en ondas acústicas superficiales.

Centro de aplicación de la beca: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, UPM.

Julio 2000 – Septiembre 2000

Beca Internacional del Programa de Estudiantes de Verano del CERN

Organismo que concedió la beca: Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN, Suiza).

Finalidad de la beca: Trabajo de investigación sobre la resistencia de los circuitos electrónicos a la radiación y diseño de amplificadores de muy bajo nivel de ruido para detectores de partículas.

Centro de aplicación de la beca: Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN, Suiza).

Septiembre 1999 – Junio 2000

Beca Airtel de Investigación

Organismo que concedió la beca: Cátedra Airtel, ETSI de Telecomunicación de la UPM.

Finalidad de la beca: Trabajo de investigación sobre filtros basados en ondas acústicas superficiales.

Centro de aplicación de la beca: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología, UPM.

4.- PARTICIPACIÓN EN SEMINARIOS, CONGRESOS, CURSOS Y EN EVENTOS DE DIFUSIÓN CIENTÍFICA

a) Presentaciones Científicas Relacionadas con el Proyecto Fin de Carrera en Congresos Internacionales

- T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher, F. Omnès, Z. Bougrioua, I. Moerman y E. Muñoz: “*Sub-micron technology in group-III nitrides*”. 11th European Heterostructure Technology Workshop. Padua, 28-30 octubre 2001. Ponencia oral.
- T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher y C. Prieto: “*Nanotechnology for SAW devices on AlN Epilayers*”. 11th International Travelling Summer School in Microwaves and Lightwaves. Madrid, 7-12 Julio 2001. Ponencia oral.
- T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher and C. Prieto: “*Nanotechnology for SAW devices on AlN Epilayers*”. E-MRS Spring Meeting. Estrasburgo, 5-8 Junio 2001. Póster.
- F. Calle, T. Palacios, E. Monroy, J. Grajal, J.M. Tirado, A. Jiménez, E. Muñoz, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, Z. Bougrioua and I. Moerman: “*Fabrication and characterization of AlGaN/GaN HEMTs*”. 4th International Conference on Materials for Microelectronics and Nanoengineering. Espoo, Finland, 10-12 Junio 2002. Ponencia oral.
- W. Snoeys, G. Anelli and T. Palacios: “*New NMOS Layout Structure for Radiation Tolerance*”. IEEE Nuclear Science Symposium. San Diego (USA), 4-10 November 2001. Póster.
- E. Monroy, F. Calle, T. Palacios, J. Sánchez-Osorio, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, F. Omnès, Z. Bougrioua e I. Moerman: “*Reliability of Schottky contacts on AlGaN*”. 4th International Conference on Nitride Semiconductors. Denver, 16-20 Julio 2001. Ponencia oral.
- J. Rubio-Zuazo, R.J. Jiménez-Rioboó, E. Rodríguez-Cañas, C. Prieto, T. Palacios, F. Calle, E. Monroy y M. A. Sánchez-García: “*Brillouin Characterization of the Acousticwaves Phase-Velocity in Al_xGa_{1-x}N Epilayers*”. E-MRS Spring Meeting. Estrasburgo, 5-8 Junio 2001. Póster.
- M. Eickhoff, O. Ambacher, G. Steinhoff, J. Schalwig, R. Neuberger, T. Palacios, E. Monroy, F. Calle, G. Müller y M. Stutzmann: “*Novel Sensor Applications of group-III nitrides*”. MRS Fall Meeting, Boston 2001. Ponencia invitada.

- F. Calle, E. Monroy, J. M. Tirado, R. Ranchal, A. Jiménez, T. Palacios, E. Muñoz, J. Grajal, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, Z. Bougrioua e I. Moerman: “*Fabrication and characterization of AlGaN/GaN HEMTs*”. 11th European Heterostructure Technology Workshop. Padua, 28-30 Octubre 2001. Ponencia oral.
- M. Sánchez, F. J. Pacheco, S. I. Molina, P. Ruterana, F. Calle, T. Palacios, M. A. Sánchez-García, E. Calleja y R. Garcia: “*AlN Buffer Layer Thickness Influence on Inversión Domains in GaN/AlN/Si (111)*”. E-MRS Spring Meeting. Estrasburgo, 5-8 Junio 2001. Póster.

b) Presentaciones Científicas Relacionadas con el Proyecto Fin de Carrera en Congresos Nacionales

- T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, O. Abril, C. Prieto y C. Zaldo: “*Design and Processing of SAW Devices on AlN Epilayers*”. 3ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos. Granada, 15-16 Febrero 2001. Ponencia oral.

c) Asistencia a congresos científicos

- 11th European Heterostructure Technology Workshop. Padua (Italia), 28-30 Octubre 2001.
- 11th International Travelling Summer School in Microwaves and Lightwaves. Madrid, 7-12 Julio 2001.
- E-MRS Spring Meeting. Estrasburgo (Francia), 5-8 Junio 2001.
- 3ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos. Granada, 15-16 Febrero 2001.
- VIII Jornadas TELECOM I+D 98. ETSI de Telecomunicación. UPM. Madrid, 28-29 Octubre 1998.

5.- PUBLICACIONES

a) *Publicaciones relacionadas con el Proyecto Fin de Carrera en revistas internacionales*

- T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher y C. Prieto: “*Nanotechnology for SAW devices on AlN Epilayers*”. Mat. Sci. Eng. B., en prensa.
- T. Palacios, F. Calle, M. Varela, C. Ballesteros, E. Monroy, F. Naranjo, M. A. Sánchez-García, E. Calleja y E. Muñoz: “*Wet Etching of GaN grown by molecular beam epitaxy on Si(111)*”. Semic. Sci. and Tech. Nov. 2000, pp. 996-1000.
- T. Palacios, F. Calle, E. Monroy y E. Muñoz: “*Submicron Technology for III-Nitride Semiconductors*”. Enviado a J. Vac. Sci. & Tech. B., Enero. 2002.
- W. Snoeys, T. Palacios y G. Anelli: “*New NMOS Layout Structure for Radiation Tolerance*”. Enviado a IEEE Trans. Nuc. Sci., Nov. 2001.
- E. Monroy, F. Calle, T. Palacios, J. Sánchez-Osorio, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, F. Omnès, Z. Bougrioua e I. Moerman: “*Reliability of Schottky contacts on AlGaN*”, Phys. Stat. Sol. (a) 188, no. 1, 367 (2001).
- E. Monroy, F. Calle, R. Ranchal, T. Palacios, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, M. Eickhoff, F. Omnès, Z. Bougrioua e I. Moerman: “*Reliability of Pt and Ni based Schottky contacts on AlGaN*”. Enviado a IEEE Trans. On Elect. Dev., Sept. 2001.
- J. Rubio-Zuazo, R.J. Jiménez-Rioboó, E. Rodríguez-Cañas, C. Prieto, T. Palacios, F. Calle, E. Monroy y M. A. Sánchez-García: “*Brillouin Characterization of the Acousticwaves Phase-Velocity in Al_xGa_{1-x}N Epilayers*”. Mat. Sci. Eng. B, en prensa.
- A. M. Sánchez, F. J. Pacheco, S. I. Molina, P. Ruterana, F. Calle, T. Palacios, M. A. Sánchez-García, E. Calleja y R. García: “*AlN Buffer Layer Thickness Influence on Inversión Domains in GaN/AlN/Si (111)*”. Mat. Sci. Eng. B., en prensa.

b) *Otras publicaciones*

- T. Palacios y W. Snoeys: “*Study of radiation-tolerant layouts for N-MOS transistors*”. Microelectronics Group, Experimental Physics Division, European Organization for Nuclear Research (CERN). Documento confidencial por haberse solicitado una patente. Septiembre 2000.

8. 6.- ENTIDADES CIENTÍFICAS CON LAS QUE SE HA COLABORADO DURANTE LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

a) Nacionales

- Universidad Politécnica de Madrid, Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología.
- Universidad Politécnica de Madrid, ETSI de Telecomunicación, Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones: Dr. J. Grajal.
- Universidad Politécnica de Madrid, ETSI de Telecomunicación, Dpto. de Ingeniería Electrónica: Dres. J. M. Moreno, J. Colás, R. De Córdoba, J. Macías y A. De Santos.
- Universidad Politécnica de Madrid, Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología: Dres. F. Calle, E. Monroy, E. Muñoz, E. Calleja, I. Izpura, J. L. Sánchez-Rojas, J. M. García-Tijero, M. A. Sánchez y A. de Guzmán.
- Universidad Carlos III de Madrid, Dpto. de Física: Dras. M. Varela y C. Ballesteros.
- Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC: Dres. C. Prieto y C. Zaldo.
- Universidad de Cádiz, Dpto. de Ciencia de los Materiales: Dr. S. I. Molina.
- Centro de Investigaciones y Desarrollo de la Armada (CIDA): Dres. M. Verdú, F. J. Sánchez y M. T. Montojo.

b) Internacionales

- Technical University Munich, Walter Schottky Institute, Munich (Alemania): Dres. O. Ambacher y M. Eickhoff.
- Commissariat A L'Energie Atomique, Grenoble (Francia): Dra. E. Monroy.
- Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications, CRHEA-CNRS, Valbonne (Francia): Dr. F. Omnès.
- IMEC-Ghent University, INTEC, Gante (Bélgica): Dras. Z. Bougrioua e I. Moerman.
- European Organization for Nuclear Research (CERN), Microelectronics Group, Experimental Physics Department, Ginebra (Suiza): Dres. W. Snoeys, G. Anelli, F. Giustino.
- Institut des Sciences de la Matière et du Rayonnement, ESCTM-CRISMAT, CNRS, Caen (Francia): Dr. P. Ruterana.

7.- OTROS MÉRITOS

- Sept. 1998 –
Feb. 1999 Instructor en el “Laboratorio de Circuitos Electrónicos”, asignatura de 3^{er} curso del plan de estudios de la ETSI de Telecomunicación de la UPM.
- Feb. 1999 –
Jun. 1999 Instructor en el “Laboratorio de Sistemas Electrónicos Digitales”, asignatura de 3^{er} curso del plan de estudios de la ETSI de Telecomunicación de la UPM.
- 6-8 Mar. 1997 Colaboración en la organización de la XXXIII Olimpiada Matemática Española. E. U. Arquitectura. Universidad Politécnica de Valencia.
- 5-17 Jul. 1996 Representante de España en la **37^a Olimpiada Matemática Internacional** (Mumbay, India).
- Medalla de oro y primer premio** en la XXXII Olimpiada Matemática Española.
- Primer premio en la Olimpiada Matemática del Distrito Universitario de Madrid.
- Junio 1996 Nota de acceso a la universidad: 9.1
 Nota del examen de selectividad: 9.2
 Matrícula de Honor en COU
- Junio 1996 **Mención especial** por la trayectoria de 4 años en el Instituto Nacional de Bachillerato Cardenal Cisneros. Madrid.
- Febrero 1996 **Premio Extraordinario de Bachillerato.**
 Ministerio de Educación y Ciencia.
- Sobresaliente en todas las asignaturas del bachillerato.
- Julio 1995 **Premio internacional:** “*Prämienprogramm zur Forderung der Ausbildung ausländischer Schüler in der deutschen Sprache. Internationales Preisträgerprogramm*”. Ministerio de Educación Alemán.
- Junio 1995 Primer premio en la “*I Competición científica del Museo de la Ciencia de Madrid*”.
- Abril 1993 Primer premio “Cisneros” de Investigación Científica.

Cartas de apoyo adjuntadas en la solicitud y escaneadas en este documento:

- Carta del **Prof. D. Elías Muñoz Merino**, miembro de la Academia de Ingeniería de España y catedrático de electrónica de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. Director del *Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología* de dicha universidad.
- Carta del **Prof. D. Fernando Calle Gómez**, profesor titular de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. Secretario del *Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología* de dicha universidad y miembro de su consejo científico.
- Carta del **Prof. D. Martin Eickhoff**, investigador del *Walter Schottky Institute* de la Universidad Técnica de Munich y responsable de las investigaciones sobre nitruros en dicho centro, pionero a nivel mundial en estos semiconductores.
- Carta de la **Dra. D^a. Eva Monroy Fernández**, investigadora del *Commissariat a L'Energie Atomique* (CEA) de Grenoble (Francia) experta en el campo de los nitruros. Premio del COIT/AEIT en el año 2001 a la mejor Tesis Doctoral en Tecnologías Básicas de la Información y las Comunicaciones y sus Aplicaciones. Premio de la Universidad Politécnica de Madrid en el año 2002 a la mejor Tesis Doctoral.

NOTA: Debido al gran tamaño que poseen los escaneos de las cartas de apoyo, es posible que la carga de las páginas que siguen (con las 4 cartas de apoyo) tarde algunos segundos.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



Dirección: ETSI Telecomunicación
Dpto. Ing. Electrónica
Ciudad Universitaria s/n
28040 MADRID

Tel.: 91.336 73 21
Fax: 91 336 73 23
e-mail: elias @die.upm.es

6 de Febrero de 2002

Sr. D. Enrique Gutiérrez Bueno
Decano – Presidente del C.O.I.T.
Fernández de la Hoz, 7
28010 Madrid

Ref. Premios Mejor Proyecto Fin de Carrera

Estimado Enrique:

Me dirijo a ti en relación con la candidatura de D. Tomás A. Palacios Gutiérrez al Premio del COIT/AEIT al mejor PFC en Tecnologías Básicas.

Conozco a Tomás Palacios desde que fue alumno en una de las asignaturas del Departamento, y empezó a colaborar con nosotros. Su expediente es uno de los mejores que he conocido, y globalmente es uno de los 10 mejores alumnos que he tenido en mi dilatada experiencia.

Su PFC "Nanotecnologías para Dispositivos de Alta Frecuencia en Nitruros III-V: Aplicaciones a filtros SAW y transistores SAW" creo que ha sido un hito en nuestra Escuela, y creo que en España. Tomás puso a punto la tecnología submicrónica con haz de electrones para hacer transistores de microondas y filtros en la región de los GHz. Ninguno de estos dispositivos se habrían fabricado antes en España.

Estos trabajos merecieron la atención de Airtel, y ahora se ejecuta un proyecto PROFIT con Indra Sistemas y el Centro de Investigaciones de la Armada (CIDA) justo sobre estos transistores HEMT para microondas.

Creo que la originalidad del PFC, el esfuerzo de Tomás, sus publicaciones, y la aplicación industrial que he mencionado, forman un conjunto de méritos que no dudo que el tribunal valorará muy positivamente.

Recibe un cordial saludo,

un abrazo,

Elías Muñoz Merino
Catedrático de Electrónica
Director, Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología



Fernando Calle Gómez
Dpto. Ingeniería Electrónica
E.T.S.I. Telecomunicación – U.P.M.
28040 Madrid. SPAIN
Tel: 34-91-5495700 x-342; 34-91-3367322
Fax: 34-91-3367323
E-mail: calle@die.upm.es

RECOMENDACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA DEL INGENIERO SUPERIOR DE TELECOMUNICACIÓN D. TOMÁS A. PALACIOS GUTIÉRREZ

En calidad de Director del Proyecto Fin de Carrera realizado por D. Tomás A. Palacios Gutiérrez, y con ocasión de la concesión de los Premios otorgados por el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, me gustaría manifestar mi mejor opinión tanto sobre el Proyecto como sobre su autor, y solicitar le sea concedido a este trabajo uno de los citados Premios.

Conocí al Ing. Palacios hace 4 años, cuando cursaba 2º de la carrera de Ingeniería Superior de Telecomunicaciones en la ETSIT de Madrid. Desde entonces comenzó ya a colaborar en algunas tareas de investigación bajo mi supervisión, en el Dpto. de Ingeniería Electrónica de la ETSI de Telecomunicación y del Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología de la Universidad Politécnica de Madrid, dirigido por el Prof. D. Elías Muñoz. Simultáneamente, consiguió completar su formación con excelentes calificaciones (Premio al mejor estudiante de Primer Ciclo, y un expediente académico extraordinario).

Tomás Palacios trabaja metódica, rigurosa y eficientemente, logrando resultados sobresalientes debido a unos procedimientos de trabajo muy asentados, a una perseverancia ilimitada, y a una enorme fe en sus posibilidades. Me gustaría destacar aquí que ha demostrado sus aptitudes en varios tipos de actividad en los laboratorios de investigación a lo largo del periodo de ejecución de su Proyecto Fin de Carrera: así, por ejemplo, ha instalado un elipsómetro para la caracterización y desarrollado el software de medida; ha simulado el comportamiento de distintos dispositivos electrónicos y optoelectrónicos con objeto de optimizar su diseño; y ha establecido los procedimientos tecnológicos para su fabricación, ha realizado varios de estos dispositivos, y ha caracterizado sus prestaciones mediante varias técnicas.

En concreto, el trabajo defendido como Proyecto en setiembre de 2001 tenía por objeto el desarrollo de la tecnología de dispositivos submicrónicos basados en la familia de los nitruros, semiconductores de ancho gap que han despertado un inmenso interés en la última década. Entre los logros alcanzados, ha desarrollado por vez primera en nuestra Universidad (y en España, hasta donde yo conozco) y optimizado procedimientos de litografía electrónica en materiales resistivos (aislantes y de ancho gap), y los ha aplicado en la fabricación de varios dispositivos de alta frecuencia y/o elevada velocidad de respuesta, como fotodetectores de luz ultravioleta, transistores de alta potencia, y filtros de ondas acústicas superficiales. En todos estos casos consiguió mejoras significativas en las prestaciones, demostrando la viabilidad de los procedimientos utilizados. Algunos de estos resultados han sido defendidos por Tomás Palacios en Congresos internacionales, así como se han publicado en revistas internacionales.

En resumen, a Tomás Palacios le apasiona la I+D de las tecnologías electrónicas, y ha demostrado su capacidad de resolver problemas difíciles y de proponer nuevas aproximaciones, mostrando una enorme iniciativa y un notable grado de madurez, responsabilidad y motivación. En mi opinión, él y el proyecto desarrollados reúnen muy merecidamente todas las condiciones para ser acreedor de uno de los premios convocados por el COIT.

En Madrid, 1 de Febrero de 2002

Fernando Calle



WALTER SCHOTTKY INSTITUT

Dr. Martin Eickhoff

WALTER SCHOTTKY INSTITUT · Am Coulombwall · D – 85748 Garching



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Walter Schottky Institut
Am Coulombwall
D-85748 Garching

Tel. : 089 / 289 - 12889
Fax : 089 / 289 - 12737
eickhoff@wsi.tum.de

5. Februar 2002

To whom it may concern

By the present, I would like to support the proposal of Tomás A. Palacios Gutiérrez in order to present his Final Thesis' project entitled:

"Nanotecnología para dispositivos de alta frecuencia en nitruros III-V. Aplicación a Filtros SAW y Transistores HEMT" to the 22nd Prize Competition for the Best Spanish Final Thesis' Project.

I have been aware of the work on different aspects of nanotechnology of nitrides carried out by T. Palacios during the last year. He has achieved outstanding results adapting the e-beam lithography to the AlGa_N semiconductors family. Thanks to these results, he has been able to fabricate electronic devices specially suitable for high frequency applications. In particular, his advances in surface acoustic wave (SAW) filters have been presented on different international scientific conferences and papers and they are in the state of the art of SAW filters on AlN.

For the reasons given above, I recommend the Project of T. Palacios for the prize of the Spanish Telecommunication Association.

Martin Eickhoff

Walter Schottky Institut
Zentralinstitut der Technischen Universität München
für physikalische Grundlagen der Halbleiterelektronik

N/REF : SP2M/PSC 02-02

Grenoble, 6 Febrero 2002

V/REF :

OBJET : Informe sobre el Proyecto Fin de Carrera de D. Tomás Palacios Gutiérrez

Estimados Srs.:

Durante mi estancia en la Universidad Politécnica de Madrid, he tenido la oportunidad de seguir de cerca el trabajo de D. Tomás Palacios y de formar parte del Tribunal de su Proyecto Fin de Carrera. Por otra parte, mi trabajo investigador en los últimos seis años se ha concentrado fundamentalmente en el desarrollo de dispositivos electrónicos basados en semiconductores de *gap* ancho, particularmente en nitruros del grupo III. Así pues, me siento cualificada para evaluar la calidad del trabajo realizado por D. Tomás Palacios.

El Proyecto Fin de Carrera titulado "Nanotecnología para Dispositivos de Alta Frecuencia en Nitruros III-V. Aplicación a Filtros SAW y Transistores HEMT" representa una contribución relevante al desarrollo de dispositivos electrónicos basados en nitruros del grupo III. Estos semiconductores se han revelado durante esta década como los materiales más prometedores para el desarrollo y fabricación de fotodetectores de radiación UV, transistores de potencia y diodos electroluminiscentes y láseres en la región verde a ultravioleta del espectro. Estos dispositivos han empezado a comercializarse recientemente, pero su vertiginoso desarrollo ha dejado numerosos problemas tecnológicos pendientes. Este Proyecto proporciona respuestas a algunas de estas cuestiones.

En lo referente a procesado de materiales, el Proyecto supone un enfoque original de la tecnología de nitruros, como queda de manifiesto en las publicaciones sobre dicho tema. El proyectando se ha enfrentado a retos tecnológicos concretos (ataque químico y litografía submicrónica) y llega a desarrollar soluciones específicas para estos materiales, que son de gran interés, tanto para la comunidad científica como para la industria involucrada en la fabricación de dispositivos electrónicos. Desde un punto de vista más aplicado, se han fabricado con éxito tres tipos de dispositivo: detector de radiación UV, filtro de radiofrecuencia y transistor de alta movilidad electrónica. Las prestaciones obtenidas en todos ellos son competitivas a escala mundial.

En conclusión, D. Tomás Palacios ha realizado un Proyecto Fin de Carrera de calidad excepcional, que en mi opinión le hace merecedor del Premio del Colegio de Ingenieros de Telecomunicación.

Eva MONROY

Doctora Ingeniera de Telecomunicación