



INSTITUTO DE
*SISTEMAS OPTOELECTRÓNICOS
Y MICROTECNOLOGÍA*

**MEMORIA DE ACTIVIDADES
2000-2001**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



**Instituto de
Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología**

Universidad Politécnica de Madrid

**Memoria de Actividades
2000-2001**

E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación
Ciudad Universitaria s/n
28040, Madrid
Teléfono: (34) 91 336 6832 Fax: (34) 91 336 6832
<http://www.isom.upm.es>

PRESENTACIÓN

Esta primera Memoria de Actividades del Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) recoge la labor científica del ISOM, desde su creación administrativa en marzo del 2000 hasta finales del 2001. Este informe refleja, en primer lugar, la continuación de las actividades que los grupos integrados en el ISOM venían desarrollando antes de la formación del Instituto, y también muestra cómo esa integración va proporcionando unas mayores posibilidades de investigación para esos grupos. La unión de las tecnologías, materiales, conocimientos y experiencias de partida, ha ido enriqueciendo a todos los miembros del Instituto ya en esta primera fase.

Se han resumido aquí algunas de las líneas de investigación del Instituto, que ilustran fundamentalmente su labor en las áreas de sensores ópticos y magnéticos, emisores de luz y dispositivos de RF. El Instituto ha mantenido una posición de realizaciones y liderazgo muy notables en algunas de estas áreas. La disponibilidad de nueva instrumentación, y capacidades tecnológicas más avanzadas, está produciendo una evolución natural hacia la integración de algunas de estas estructuras para constituir microsistemas multifuncionales. Por otra parte, se expone cómo el Instituto ha comenzado la realización de nanoestructuras para emisión óptica, dispositivos de RF y sensores magnéticos.

Esta primera Memoria me da la oportunidad para agradecer públicamente a los investigadores, estudiantes graduados, y al personal de mantenimiento y administración del Instituto, sus esfuerzos e ilusión, que han permitido, entre todos, poder llevar a este centro a un buen nivel operativo.

También quiero agradecer al Equipo Rectoral de la Universidad Politécnica de Madrid, así como a la Dirección, Administración y Oficina Técnica de la ETSI de Telecomunicación, su ayuda en esta primera etapa. Este esfuerzo colectivo llevó a la inauguración oficial del ISOM el pasado mes de junio de 2002. Queda por último reconocer el apoyo financiero de las instituciones autonómicas y nacionales, y de empresas españolas y organismos internacionales, que han permitido la realización de la investigación y actividades que aquí se resumen.

Madrid, Febrero 2003.

*Elias Muñoz Merino
Director*

Memoria de Actividades 2000-2001

INDICE

1	PRESENTACIÓN.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	ESTRUCTURA DEL INSTITUTO.....	5
4	EQUIPOS Y TÉCNICAS INSTRUMENTALES	7
5	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	11
6	RESÚMENES DE UNA SELECCIÓN DE TEMAS DE INVESTIGACIÓN.....	13
6.1	FABRICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES DE DETECTORES DE UV BASADOS EN $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$	15
6.2	SISTEMAS DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN INFRARROJA	21
6.3	SENSORES MAGNÉTICOS PLANARES.....	27
6.4	NANOESTRUCTURAS MAGNÉTICAS MODULADAS PARA GRABACIÓN MAGNÉTICA.	33
6.5	COMPONENTES Y SUBSISTEMAS PARA COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	39
6.6	LEDs DE CAVIDAD RESONANTE DE NITRUROS III-V PARA COMUNICACIONES	43
6.7	TRANSISTORES HEMT DE ALGAN/GAN PARA MICROONDAS	51
6.8	DISPOSITIVOS DE ONDAS ACÚSTICAS SUPERFICIALES (SAW) BASADOS EN NITRUROS	57
6.9	NANOCOLUMNAS DE NITRUROS DEL GRUPO III	61
7	PROYECTOS DE I+D	65
7.1	PROYECTOS DE FINANCIACIÓN PÚBLICA NACIONAL	65
7.2	PROYECTOS CON INDUSTRIAS Y ORGANISMOS NACIONALES.....	67
7.3	PROYECTOS CON FINANCIACIÓN INTERNACIONAL	69
7.4	ACCIONES INTEGRADAS INTERNACIONALES	70

8	PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA.....	71
8.1	PUBLICACIONES EN REVISTAS Y LIBROS	71
8.2	CONTRIBUCIONES EN CONGRESOS	77
8.3	CONFERENCIAS INVITADAS	85
8.4	TESIS DOCTORALES	87
8.5	PROYECTOS FIN DE CARRERA	89
9	COLABORACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS	91
9.1	INTERNACIONALES.....	91
9.2	NACIONALES.....	92
9.3	ESTANCIAS EN EL EXTERIOR DE MIEMBROS DEL ISOM	93
9.4	OTRAS ACTIVIDADES DE I+D	95
9.5	VISITAS Y ESTANCIAS DE CIENTÍFICOS EXTERNOS AL ISOM	96
9.6	CONFERENCIAS IMPARTIDAS EN EL INSTITUTO.....	97
10	SERVICIOS A OTRAS INSTITUCIONES	99
11	CURSOS DE FORMACIÓN	101
11.1	CURSOS DE DOCTORADO	101
11.2	SEMINARIOS DEL INSTITUTO	103
12	ENTIDADES FINANCIADORAS (PROYECTOS Y CONTRATOS)	105
13	PERSONAL.....	107

1 PRESENTACIÓN

El Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) es un instituto universitario de investigación adscrito a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), creado el 16 de marzo del año 2000 (BOCM del 28-3-2000) a una propuesta inicial de varios grupos de investigación pertenecientes a los Departamentos de Ingeniería Electrónica, Tecnología Fotónica, Física Aplicada a las Tecnologías de la Información y Física Aplicada a la Arquitectura, el Urbanismo y el Medio Ambiente.

El ISOM tiene sus instalaciones en la planta baja del edificio López Araujo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la UPM. Consta de 400 m² de salas limpias, de 300 m² de laboratorios de caracterización con aire acondicionado centralizado, y 200 m² de laboratorios de instrumentación y electrónica. Las instalaciones incluyen una sala para Cooperación Industrial y Transferencia Tecnológica, y una oficina para la gestión de Servicios al Exterior. En el ISOM trabaja un conjunto de 30 investigadores, 1 ingeniero de la Central de Tecnología, 4 técnicos y 1 administrativo. Se trata así de un grupo con suficiente masa crítica, cuya labor investigadora se ha venido consolidando durante los últimos años. En particular, los grupos que lo forman han participado en numerosos proyectos de investigación financiados por la Unión Europea durante más de 10 años.

El ISOM recibió, como cesión de la Comunidad Autónoma de Madrid, los equipos que habían sido donados a la misma por Telefónica I+D, y que procedían de su antiguo Centro de Optoelectrónica. Los sistemas tecnológicos del ISOM permiten la fabricación de materiales, su procesamiento tecnológico, y la obtención de dispositivos y estructuras integradas de tipo electrónico, óptico, optoelectrónico y magnético. En la actualidad, el ISOM posee capacidad para fabricar y desarrollar diodos láser para instrumentación, medio ambiente y comunicaciones ópticas; transistores de microondas para alta potencia y alta temperatura; detectores de infrarrojo de aplicaciones civiles y militares; detectores de ultravioleta para monitorización de la radiación solar UV y aplicaciones militares; sensores magnéticos para un amplio abanico de aplicaciones y filtros SAW de RF para sensores y telefonía móvil. Su ámbito dimensional cubre tanto la escala micrométrica como, recientemente, la nanométrica, gracias a su sistema de litografía por haz de electrones. Bajo una concepción pluridisciplinar científica y tecnológica, merece la pena resaltar su potencialidad como Laboratorio de Certificación y Calibración de calidad y fiabilidad de procesos tecnológicos, componentes y subsistemas optoelectrónicos, y de sensores. Hay que señalar que esta localización del ISOM en la E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación (UPM) proporciona un entorno óptimo para poder abordar problemas en prácticamente cualquier terreno del ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones.

En noviembre de 2001, la Central de Tecnología del ISOM ha sido designada Gran Instalación Científica Española a todos los efectos.

2 OBJETIVOS

El objetivo del Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) es la investigación y la difusión de sus resultados al sector productivo, sobre detección, procesado, transmisión y almacenamiento de información por medio de la Optoelectrónica y la Microtecnología. La formación de profesionales innovadores se realizará mediante su participación en dichas tareas de investigación y desarrollo.

El ISOM quiere ser un laboratorio de investigación tecnológica que le permita participar, en las mejores condiciones posibles, en los proyectos de la Unión Europea. Participación como centro de excelencia en su ámbito, y con capacidad de coordinarse y desarrollar tareas con igualdad de posibilidades que otros centros similares en Europa.

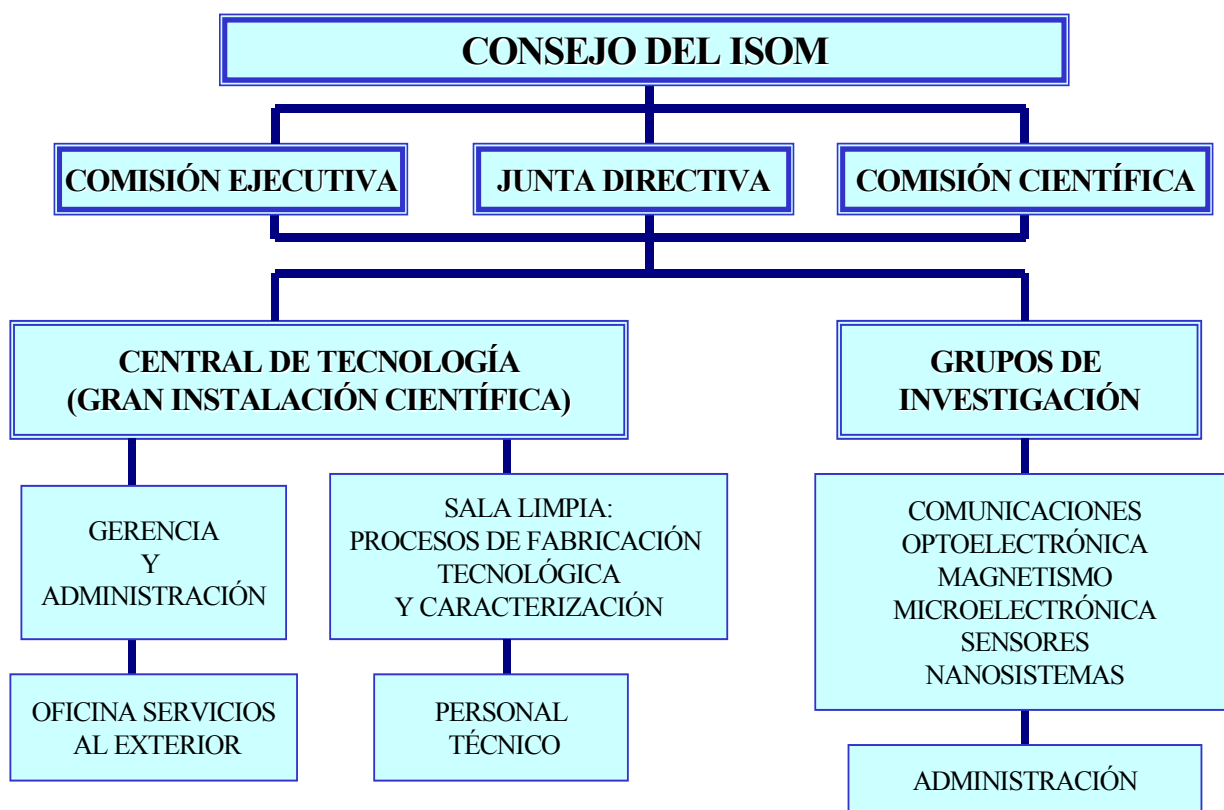
Hay tres aspectos diferenciales del ISOM: su deseo de disponer de capacidad tecnológica con control y reproducibilidad preindustriales; su vocación de colaboración y transferencia tecnológica a industrias y organismos no académicos; y su deseo de ofrecer servicios al exterior sobre caracterización y de control de calidad y fiabilidad, en el ámbito de la optoelectrónica y de las tecnologías de la información y las comunicaciones.

El ISOM ofrece a las industrias fórmulas de cooperación que incluyen el uso, por periodos de tiempo a definir, de espacios de laboratorio y sala limpia, e incluso salas exclusivas, disponibles para la industria en labores de I+D con condiciones de protección de la propiedad industrial e intelectual. El ISOM quiere participar además en la generación de pequeñas empresas tecnológicas derivadas de la I+D académica (*spin-off's*) mediante acuerdos temporales de uso de espacios y equipos tecnológicos y humanos.

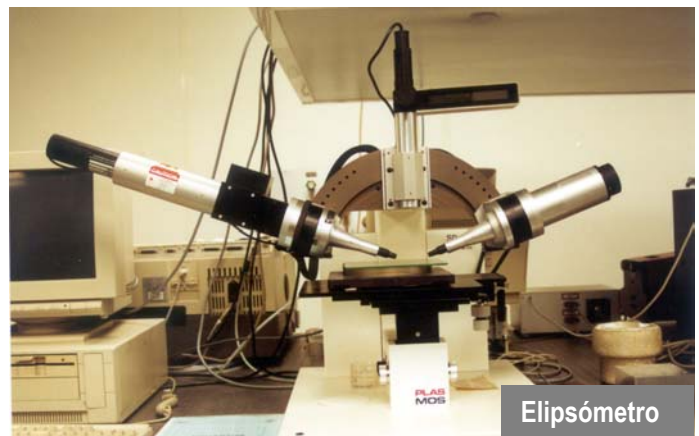
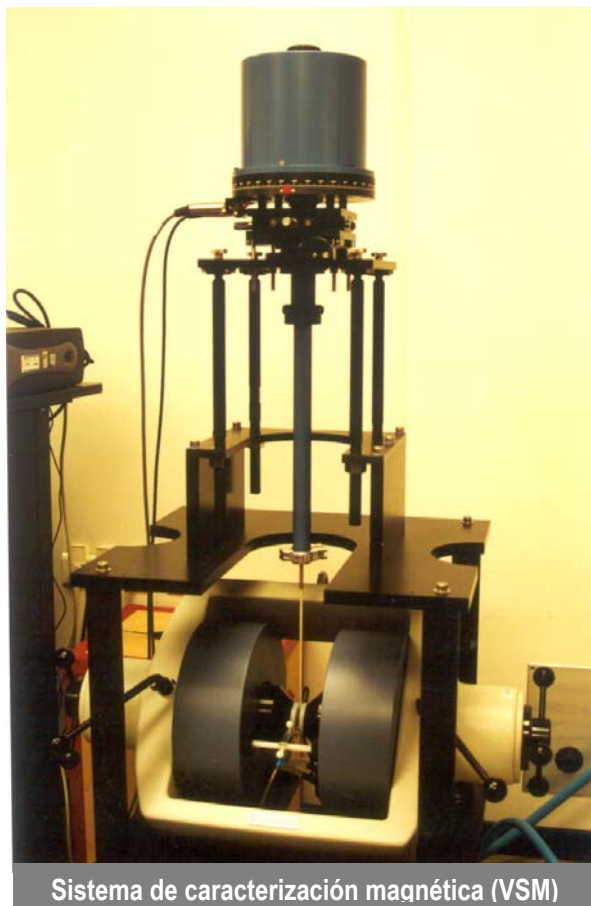
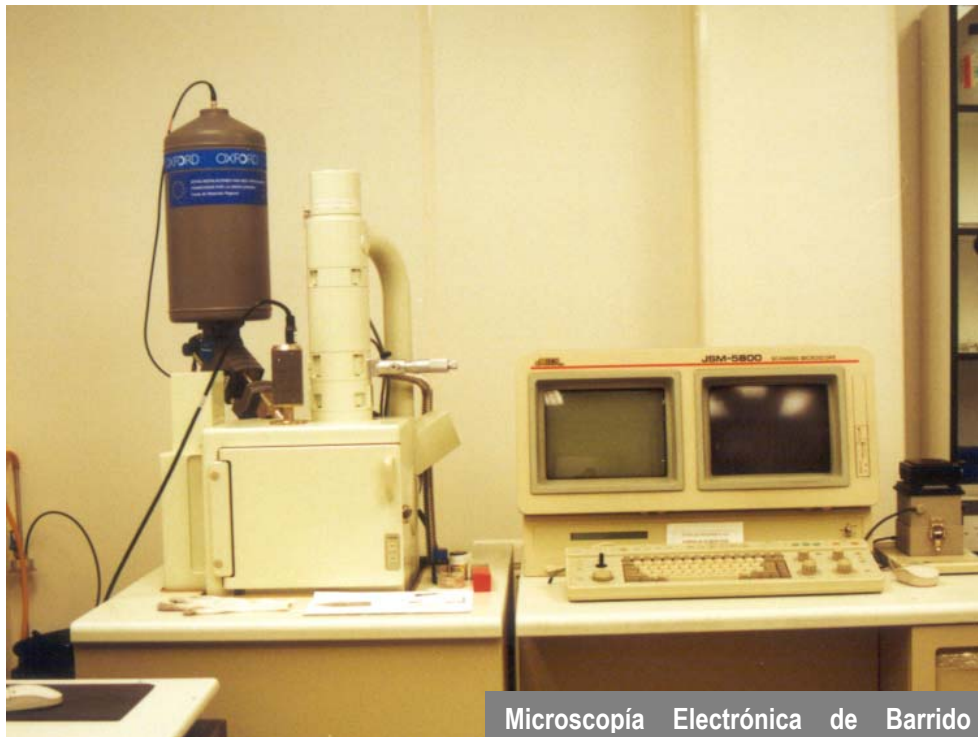
El ISOM quiere destacar su voluntad de desarrollar fórmulas de cooperación con universidades y centros de investigación en materia de formación de doctores, programas conjuntos de doctorado y en el desarrollo de tecnología e investigación. Para ello ya ha suscrito varios convenios de cooperación que se indican mas adelante.

El ISOM a través de su Central de Tecnología, quiere además ofrecer sus servicios de tecnología y de caracterización a la comunidad científico-técnica. Para ello desea albergar instalaciones promovidas por la UPM, u otras instituciones, que puedan ser útiles a esa comunidad (varias técnicas de microscopía de alta resolución, análisis de materiales, cámaras de climatización y fiabilidad, caracterización de componentes, módulos y sistemas, encapsulado, acoplos y ruido, etc.) en el sector de la electrónica, la optoelectrónica y de las comunicaciones.

3 ESTRUCTURA DEL INSTITUTO



4 EQUIPOS Y TÉCNICAS INSTRUMENTALES



Sistemas de crecimiento y producción

- Cortadoras de disco de precisión (3 sistemas) y *scriber* de diamante
- Ataque seco reactivo (RIE)
- Nanolitografía por haz de electrones
- Pulverización catódica (sputtering) mediante magnetrón (2 sistemas)
- Sistema electrolítico Polarón (perfilómetro)
- Crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE) y cámaras asociadas de transferencia y metalización (2 sistemas)
- Depósitos de aislantes PECVD
- Fotolitografía óptica (resolución >1 micra) (2 sistemas)
- Metalización térmica (Joule, e-beam) (5 sistemas)
- Microsoldadura ultrasónica y por termocompresión (2 sistemas)
- Recocido térmico convencional y rápido (RTA)

Sistemas de caracterización:

A) Estructural y superficial

- Difractómetros de rayos X de alta resolución (XRD) (2 sistemas)
- Medidor de espesores (DecTac)
- Microscopio de fuerza atómica (AFM)
- Microscopio electrónico de barrido (SEM) con EDAX

B) Eléctrica y Magnética

- Caracterización eléctrica y óptica bajo presión hidrostática
- Caracterización eléctrica de defectos (DLTS)

- Análisis de redes en RF
- Sistemas electrónicos de caracterización y medida (trazador de características, parametrizador, puentes de impedancias, osciloscopio de muestreo, generadores nanovoltímetros, amplificadores por enganche de fase, etc.).
- Caracterización por efecto Hall
- Caracterización magnética (Vibrating Sample Magnetometer)
- Observación de dominios magnéticos con tratamiento digital de imágenes
- Medida de espesores (perfilómetro de punta de mercurio)

C) Óptica

- Espectrofotómetro de absorción FTIR (VIS, IR)
- Microscopio óptico Nomarski de alta resolución
- Elipsometría
- Espectroscopía Raman
- Criogenia (5 sistemas)
- Fotoluminiscencia UV, VIS e IR (4 sistemas)

D) De dispositivos

- Estaciones de puntas de chips (baja capacidad) para VLSI y dispositivos discretos (2 sistemas)
- Banco de caracterización de láseres de semiconductor y equipos electrónicos asociados
- Caracterización eléctrica automatizada de transistores y dispositivos (C-V, I-V, C-f, ruido 1/f, etc) hasta 1GHz
- Captura y análisis de imágenes
- Caracterización óptica de detectores

5 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En forma esquemática, las actividades de I+D+I que en la actualidad se desarrollan en el ISOM son las siguientes:

Sistemas con Sensores Ópticos

- Sistemas de detección de radiación ultravioleta
 - Monitorización de la radiación solar UV-B
 - Detección de ozono y contaminantes mediante LEDs, diodos láser y detectores de UV. Aplicaciones en medio ambiente y control de calidad de aguas limpias
 - Detección de llamas por la emisión UV; integración con componentes electrónicos para alta temperatura. Aplicaciones en gasodomésticos y combustión
 - Imágenes UV en astrofísica
 - Control del grado de madurez de la fruta
- Sistemas de detección de radiación infrarroja
 - Detectores de alta sensibilidad y respuesta multiespectral. Uso de la tecnología de pozos y de puntos cuánticos en AlGaAs/InGaAs (QWIP's)
 - Aplicaciones en espoletas. Integración multiespectral. Electrónica asociada
 - Aplicaciones medioambientales de la detección IR

Sistemas con Sensores Magnéticos

- Sensores magnetométricos para la medida de campos magnéticos débiles: Fluxgates, Piezoeléctrico-magnetostrictivos, Magnetoópticos y Magnetorresistivos
- Multisensores.
 - Aplicaciones en la detección de vehículos
 - Aplicaciones en el control y guiado de aeronaves en tierra
 - Aplicaciones en la monitorización de grandes instalaciones de baterías
- Dispositivos planares. Aplicación en el desarrollo de inductores planares para fuentes conmutadas y de antenas.
- Tarjetas inteligentes de baja frecuencia con sensores magnéticos

Microsistemas magnéticos

- Estructuras multicapas magnéticas. Aplicaciones en la producción de núcleos sensores y en spintrónica
- Sistemas estructurados para inducción de anisotropías magnéticas. Aplicación al diseño del material "ad hoc".
- Nanodots y MEMS magnéticos. Aplicación a sensores y grabación magnética

Componentes y sub-sistemas para Comunicaciones Ópticas

- Láseres de mediana potencia de 0.9 a 1,3 micras (InGaAs/GaAs) y de 1.3 a 1.55 micras (GaInNAs). Aplicaciones para amplificación óptica, bombeo y comunicaciones por fibra óptica
- Moduladores de alta velocidad y alto índice de contraste. Dispositivos crecidos sobre substratos de orientación especial (GaAs, InP-111)
- Emisores de cavidad resonante en el visible. Aplicaciones para transmisión por fibras ópticas de plástico (POF)

Componentes electrónicos para comunicaciones

- Transistores HEMT's de AlGaIn/GaN. Aplicaciones en microondas (Banda X). Desarrollo de tecnología de fabricación. Características de ruido. Propiedades de transporte de portadores. Efectos piezoeléctricos
- Amplificadores de bajo ruido (LNA)
- Filtros para RF (< 3 GHz) por ondas acústicas superficiales (SAW), basados en AlGaIn

Microsistemas y nanotecnología

- Microsistemas (opto-)electro-mecánicos, MEMS y MOEMS. Modulación de detección óptica por dispositivos piezoeléctricos.
- Sensores físico-químicos y biológicos (óptico, piezoeléctrico, electroquímico). Deposición de polímeros.
- Nanopartículas, nanoestructuras y nanodispositivos.
- Litografías electrónica y de fuerza atómica. Control por microscopía de fuerzas.

6 RESÚMENES DE UNA SELECCIÓN DE TEMAS DE INVESTIGACIÓN



6.1 Fabricación, caracterización y aplicaciones de detectores de UV basados en $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$

Introducción

El estudio de la detección de radiación ultravioleta (UV) se presenta como una línea de trabajo de interés creciente por las nuevas posibilidades científicas y técnicas que ofrece. Dentro del espectro electromagnético, la región UV se encuentra situada entre el visible (VIS) y los rayos X (Figura 1). La principal fuente de fotones de UV en la superficie terrestre proviene de la parte de la radiación solar que no es absorbida en la capa de ozono (por encima de 290 nm). Además de la radiación solar, existen otras fuentes de radiación UV como son la combustión de determinados compuestos y gases, plasmas y otros emisores artificiales.

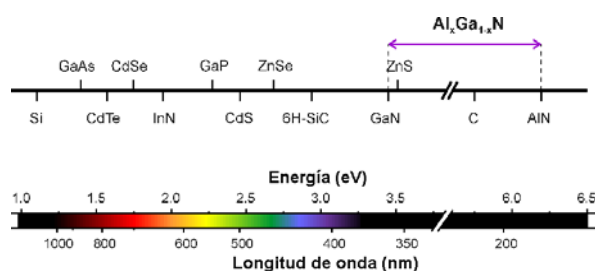


Fig.1. Espectro electromagnético y materiales adecuados para las distintas longitudes de onda.

Estas características hacen atractiva la detección del UV, pues a un detector que sólo fuese sensible para longitudes de onda correspondientes a esta radiación, no le afectaría la iluminación en el infrarrojo (IR) ni en el VIS, que, por otra parte, presentan generalmente una densidad de fotones superior en varios órdenes de magnitud. Así, por ejemplo, la luz que se recibe en la superficie de la Tierra procedente del Sol tiene componentes en el IR, VIS y UV, pero la irradiancia es fundamentalmente debida a las componentes de IR y VIS por el efecto de la absorción atmosférica. De hecho, la búsqueda de nuevos detectores que respondan sólo en la región del espectro a la que no alcanza la radiación solar (conocidos más comúnmente como “Solar-Blind”) es una de las tendencias de la investigación en este tema.

Actualmente, la tecnología está desarrollándose continuamente para mejorar los detectores de UV ya existentes, fundamentalmente basados en silicio, pero la dificultad intrínseca de conseguir avances importantes ha motivado la aparición de nuevas soluciones que presentan ventajas considerables mediante la utilización de materiales de banda prohibida ancha. Dentro de este tipo de materiales, la tecnología que se encuentra en un estado más avanzado de desarrollo son los nitruros (GaN y sus aleaciones con Al e In, $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$) [1].

Las características del GaN se ajustan bien a la detección de fotones de energías del UV, ya que presenta el borde de absorción en la región del UV menos energético (Figura 2). De esta forma, el material es transparente para longitudes de onda del IR y VIS, haciéndolo adecuado para su uso en aplicaciones donde se requiera gran sensibilidad a la radiación UV. Por otra parte, presenta algunas ventajas adicionales sobre los detectores de Si como son un campo de ruptura elevado, lo que permite en teoría reducir el área de los dispositivos hasta tamaños submicrónicos, la posibilidad de operar a alta temperatura y la mayor resistencia al

daño producido por la radiación debido a la mayor fuerza de los enlaces atómicos que forman la red cristalina. También es destacable su resistencia química y mecánica.

Adicionalmente, existe la posibilidad de ampliar el rango de detección para longitudes de onda más largas formando compuestos ternarios de $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ o para hacer al material “ciego” a radiación de energías del UV cercano formando aleaciones del GaN con Al ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$).

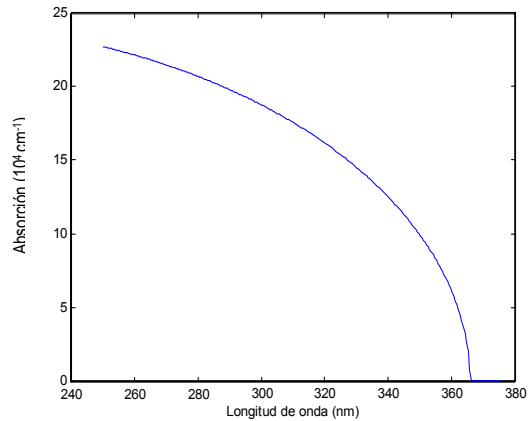


Fig.2. Simulación del espectro de absorción del GaN.

Fotodetectores

Los dispositivos objeto de estudio durante el desarrollo de esta actividad son de diversos tipos:

Fotodiodos Schottky o metal-aislante-semiconductor.

Dispositivos asimétricos con un contacto óhmico y otro de barrera Schottky. Para cierto rango de espesores, la deposición de una capa aislante entre el metal y el semiconductor disminuye la responsividad aunque aumenta el parámetro de detectividad.

Metal-semiconductor-metal (MSM).

Dispositivos fabricados mediante el depósito de contactos de tipo Schottky interdigitados separados unas pocas micras. Son dispositivos diseñados para operar a altas frecuencias. La existencia de ganancia fotoconductiva en algunos dispositivos y su efecto sobre la respuesta temporal han sido estudiados en detalle [2]. La disminución de la separación entre contactos conduce a un incremento de su responsividad (Figura 3) [3].

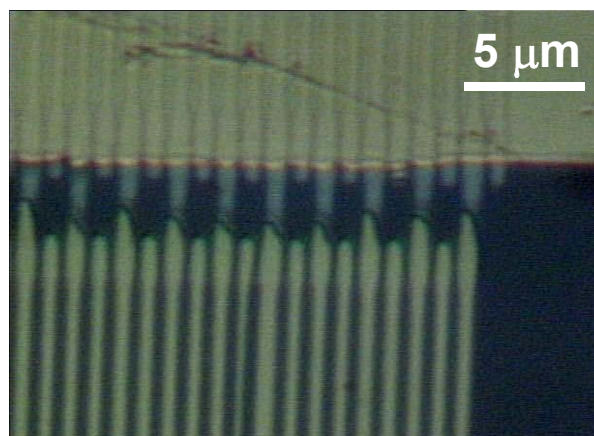


Fig.3. Contactos interdigitados de tamaño sub-micrónico. La anchura de dedo y el espaciado entre dedos son de $0.5 \mu\text{m}$.

Fotoconductores.

La geometría de los contactos para estos dispositivos es idéntica a la utilizada para los metal-semiconductor-metal. Sin embargo, su fabricación requiere la utilización de contactos óhmicos. La utilización de tratamientos térmicos rápidos (RTA o *Rapid Thermal Annealing*) mejora el carácter óhmico de los contactos y la responsividad de los dispositivos.

Fotodiodos p-n o p-i-n.

Como los fotodiodos Schottky, son dispositivos fotovoltaicos. El uso de heteroestructuras permite acondicionar la respuesta espectral variando espesores, dopajes y contenidos de aleaciones ternarias (AlGaIn, InGaIn).

Matrices de detectores MSM.

La fabricación de matrices de dispositivos detectores permite la formación de imágenes. En esta línea se están realizando esfuerzos para la fabricación de matrices lineales y bidimensionales, de detectores MSM de UV basados en AlGaIn (Figura 4).

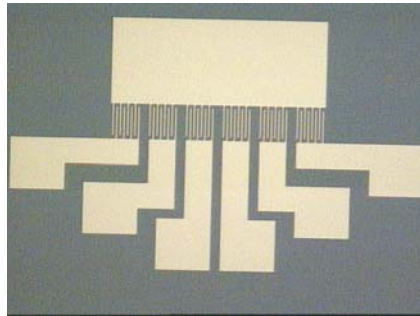


Fig.4. Matriz lineal de detectores MSM 1x6. El tamaño de cada pixel es de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$

Actividades

Los dispositivos han sido desarrollados para su uso en diversas aplicaciones. La respuesta espectral de los detectores debe ser adaptada a los requerimientos de cada aplicación. Parámetros como la responsividad, el tiempo de respuesta o el nivel de ruido tienen que ser igualmente adecuados en cada caso.

La curva espectral del eritema representa el daño biológico que la radiación UV tiene sobre el cuerpo humano. Se ha demostrado que utilizando detectores de nitruros crecidos por MBE sobre sustratos de zafiro, Si(111) y GaIn, se pueden obtener detectores que se ajusten a dicha curva y den como resultado una señal proporcional al daño biológico que produce la radiación UV (Figura 5).

La detección de llamas basada en su emisión UV tiene un sinnúmero de posibles utilidades. Cada una tiene unas necesidades distintas en cuanto a respuesta espectral, sensibilidad,... Para su operación en espacios abiertos es necesaria la utilización de detectores ciegos al Sol (contenidos de Al del 40-60%), mientras que en espacios cerrados las necesidades son más flexibles (Figura 6)[4].

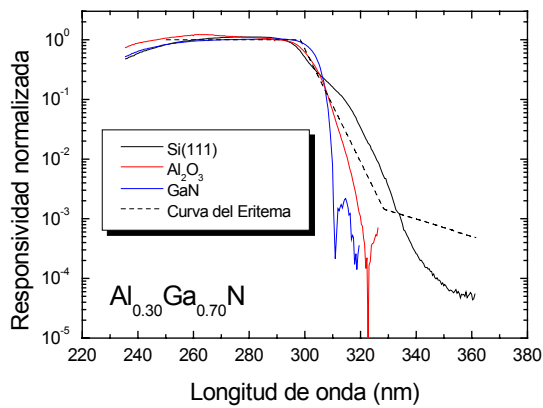


Fig.5. Respuesta espectral de fotodiodos Schottky de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.30$) crecidos sobre substratos de Si(111), zafiro y GaN con el objetivo de ajustar la curva del eritema.

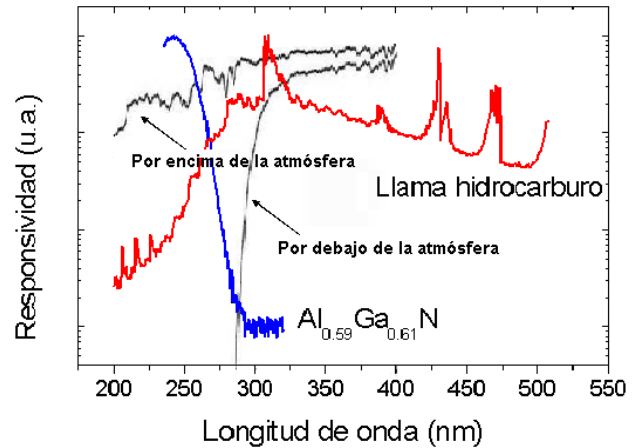


Fig.6. Respuesta espectral de un fotodiodo MSM de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.59$) con sensibilidad fuera del rango de alcance de la luz solar. Los espectros de emisión del Sol por encima y debajo de la atmósfera son incluidos como comparación. En rojo, se muestra el espectro de llama de una mezcla propano-butano

Así, se realizaron pruebas de detección de llama en calderas de tipo estanco utilizando detectores basados en AlGaIn y InGaIn con distintos contenidos de Al e In respectivamente (Figura 7)[5]. Los ambientes agresivos en los que deben operar los detectores en este tipo de aplicación, hacen que sea fundamental la protección del dispositivo ante gases corrosivos y partículas residuales de la combustión que pudiesen degradar las propiedades del dispositivo. Asimismo es necesario un cuidadoso análisis de los efectos que la temperatura tiene sobre parámetros como la corriente de oscuridad o la responsividad.



Fig.7. Prototipo de caldera estanca para medición de fotodetectores basados en nitruros (Ikerlan-Vitoria).

El creciente interés por los rangos del espectro electromagnético correspondientes al UV de vacío y rayos-X que se está mostrando en círculos astronómicos, está motivando la búsqueda de nuevos materiales que permitan superar los obstáculos presentados por los detectores fabricados dentro de la tecnología de Silicio [6]. Por este motivo, se han realizado medidas en el rango del UV de vacío con objeto de analizar la forma de la respuesta espectral a esas longitudes de onda y estimar la eficiencia cuántica de algunos dispositivos fabricados

(Figura 8). La interacción de la radiación con el material se ve modificada a medida que aumentamos la energía de los fotones incidentes. El empleo de diferentes estructuras y aleaciones de ternarios permite analizar los efectos de dicha interacción, con el fin de optimizar la detección de los dispositivos en ese rango del espectro electromagnético

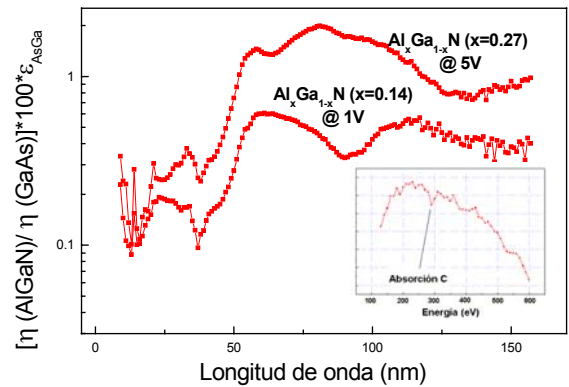


Fig.8. Respuesta óptica de fotodiodos MSM de $Al_xGa_{1-x}N$ ($x = 0.14, 0.27$) a la radiación sincrotrón en el rango 10-150 nm. La figura interior muestra la fotorrespuesta de un fotodiodo de $Al_xGa_{1-x}N$ ($x = 0.02$) entre 100 y 600 eV.

Otras aplicaciones sobre las que se han realizado estudios preliminares son:

- Comunicaciones espaciales
- Comunicaciones submarinas
- Seguimiento de misiles
- Conocimiento del grado de madurez de la fruta
- Detección de incendios
- Digitalización de señales médicas (rayos X)

Referencias

- [1] E. Muñoz, E. Monroy, J.L. Pau, F. Calle, F. Omnès, P. Gibart, "III-nitrides and UV detection", *J. Phys.: Condens. Matter*, **13**, 7115-7137 (2001).
- [2] J.L. Pau, E. Monroy, M.A. Sánchez-García, E. Calleja, E. Muñoz, "AlGa_N ultraviolet photodetectors grown by molecular beam epitaxy on Si(111) substrates", *Mat. Sci. Eng. B*, **B93**, 159-162 (2002)

- [3] T. Palacios, E. Monroy, F. Calle, F. Omnès, “High-responsivity submicron MSM UV detectors”, *Appl. Phys. Lett.* 81, 1902 (2002)
- [4] Proyecto Fin de Carrera “Diseño y desarrollo de un sistema de detección de llama para gasodomésticos basado en detectores de ultravioleta de AlGaN” por Marcos Redondo, ETSI Telecomunicación (2002).
- [5] PETRI No. 95/0466/OP con MCC-División Componentes.
- [6] J.-F. Hochedez, J. Alvarez, F.D. Auret, P. Bergonzo, M.-C. Castex, A. Deneuve, J.M. Defise, B. Fleck, P. Gibart, S.A. Goodman, O. Hainaut, J.-P. Kleider, P. Lemaire, J. Manca, E. Monroy, E. Muñoz, P. Muret, M. Nesladek, F. Omnes, E. Pace, J.L. Pau, V. Ralchenko, J. Roggen, U. Schühle, C. Van Hoof, “Recent progresses of the BOLD investigation towards UV detectors for the ESA Solar Orbiter”, *Diamond and Related Materials*, **11**, 427-432 (2002).

6.2 Sistemas de detección de radiación infrarroja

Durante los últimos 7 años, el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología viene realizando una importante labor de investigación en el campo de los detectores cuánticos de IR. Al contrario que los detectores clásicos, donde la detección se produce por la transición de electrones desde la banda de valencia a la de conducción en un semiconductor, en los detectores cuánticos se aprovechan las transiciones de electrones desde un nivel base a un nivel excitado dentro de un pozo de potencial en una de las bandas del material (generalmente GaAs/AlGaAs/InGaAs o InP). Entre las principales ventajas de este tipo de dispositivos se pueden citar: la posibilidad de obtener absorción selectiva en cualquier región del espectro infrarrojo con un diseño adecuado del perfil de potencial, la mayor homogeneidad del GaAs frente al clásico MCT (*“Mercury Cadmium Telluride”*) para la realización de matrices de plano focal o la madurez de la tecnología del GaAs.

Existen diferentes configuraciones para la realización de este tipo de detectores, no obstante, en el Instituto existe un especial interés por la llamada configuración *“ligado a casi continuo”*. En este caso las transiciones tienen lugar entre un nivel base ligado en el pozo y un segundo nivel parcialmente confinado por unas finas barreras de AlAs de 20 Å. Una vez en este nivel, los electrones atraviesan la barrera de AlAs por efecto túnel y son captados por los contactos dando lugar a una fotocorriente efectiva. Gracias a estos diseños es posible extender el intervalo de aplicación de los detectores cuánticos desde las 4 µm hasta el infrarrojo lejano (>12 µm).[1]

Otra de las principales ventajas de estos detectores es la posibilidad de realizar estructuras apiladas donde cada zona activa es selectiva a un “color” [2], de esta manera se pueden realizar detectores multicolor lo cual no es posible con otros sistemas de materiales como el Si o el anteriormente citado MCT. No obstante, y debido a las reglas de selección de las transiciones intrabanda, la incidencia normal de la luz está prohibida por lo que es necesaria la utilización de métodos adicionales de acoplo de radiación para que los dispositivos sean utilizables en la práctica. Entre estos métodos se incluyen la definición de redes de difracción sobre la superficie o la incidencia a través de un bisel pulido en los bordes de la oblea [3] [4]

En cuanto a las aplicaciones de estos detectores, se encuentran: la detección remota de incendios, la realización de cámaras de visión nocturna, la detección y medida de gases contaminantes en la atmósfera y por supuesto también aplicaciones militares como la guía infrarroja o la detección de misiles y blancos móviles.

El ISOM posee un grupo de trabajo dedicado al estudio de este tipo de dispositivos cuya tarea se centra en tres áreas fundamentalmente: detectores de AlAs/GaAs/AlGaAs [5] [6], detectores de InGaAs/GaAs/InGaAsN, y desarrollo de matrices de plano focal con detectores tri-color. También se estudian otros aspectos como el crecimiento de detectores sobre GaAs (111)B o el crecimiento de puntos cuánticos de InAs. Estos trabajos están financiados por numerosos organismos y empresas tanto nacionales como internacionales entre los que se pueden citar: el Ministerio de Industria, el Ministerio de Defensa, la *“Office of Naval Research”* de EE.UU., la Comunidad Europea o la empresa INDRA.

Detectores de AlAs/GaAs/AlGaAs

En este sistema de materiales se han conseguido realizar detectores en la ventana de transmisión atmosférica de 3 a 5 μm . Una de las principales contribuciones originales del Instituto en este campo consiste en la utilización de la técnica de modulación de dopaje para la mejora sustancial de las prestaciones del detector [7] [8]. Gracias a la separación física de las cargas y las impurezas ionizadas se consigue una mejora de un factor 5 en la responsividad del dispositivo, así como una reducción en la anchura del pico de absorción. Con una distribución adecuada de las impurezas en las barreras se puede además controlar el carácter fotovoltaico de las estructuras, obteniéndose de este modo muestras con responsividades de 0,018 A/W y detectividad de $\sim 10^{12} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{-1/2}/\text{W}$ debido a la reducida corriente de ruido existente al operar a 0V [9].

Con respecto al origen del citado efecto fotovoltaico en este tipo de detectores no existe un acuerdo claro en la bibliografía. Ha sido atribuido principalmente a la distinta difusión del dopante (Si) en las barreras durante el proceso de crecimiento aunque también se cree que pueda estar relacionado con la existencia de asimetrías no intencionadas en las barreras de AlAs. Como contribución importante del Instituto se ha hecho un estudio detallado del origen de este efecto utilizando la modulación de dopaje para separar físicamente el Si del pozo de potencial y utilizando la microscopía electrónica de transmisión (TEM) [10] para cuantificar dicha difusión en muestras con dopaje en el pozo. Como resultado de esta investigación se ha visto que el efecto fotovoltaico está relacionado con la existencia de zonas de carga espacial debidas a la difusión del dopante, pues no se observa en muestras con modulación de dopaje simétricamente distribuido a ambos lados del pozo. En la figura 1 se puede observar el control del carácter fotovoltaico utilizando distintos perfiles de dopaje en comparación con una muestra con dopaje en los pozos [8].

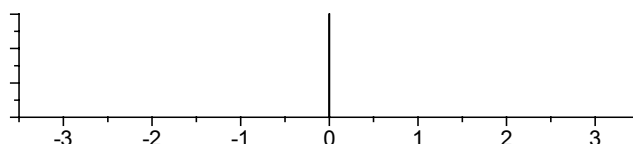


Fig. 1. Control del efecto fotovoltaico mediante el empleo de modulación de dopaje

En cuanto al resultado de la microscopía TEM se han realizado medidas sensibles a la composición química del material sobre muestras con dopaje en los pozos. Lo que se observa es una clara distribución asimétrica del dopante en las barreras debida a la difusión durante el crecimiento lo cual viene a confirmar lo observado en las muestras con modulación de dopaje. Esta hipótesis también se sostiene en el hecho de la observación de un menor efecto fotovoltaico en una muestra crecida a menor temperatura de crecimiento (100°C por debajo de lo habitual), la cual debería presentar menor difusión del Si como se comprueba experimentalmente.

Detectores de InGaAs/GaAs y de InGaAsN/GaAs

En este sistema de materiales se han conseguido desarrollar detectores para la región de transmisión atmosférica de 8 a 12 μm . La estructura utilizada en este caso ha sido la de ligado a continuo, con una serie de pozos de InGaAs con barreras de GaAs. El contenido de In en el pozo ha sido variado hasta valores del 40% en algunas muestras. Se han observado altos valores de responsividad (hasta 0.8 A/W) para estos dispositivos incluso para aquéllos con mayores contenidos de In. En la bibliografía especializada existe evidencia experimental de absorción en incidencia normal para este sistema de materiales, sin embargo también existe controversia al respecto ya que la teoría predice valores muy bajos de eficiencia cuántica en este caso. La contribución del ISOM en este aspecto se centró en la demostración experimental de la ausencia de absorción en incidencia normal como predice la teoría. Para ello se estudiaron diferentes muestras con contenidos de In creciente y se compararon con muestras de AlGaAs para las mismas longitudes de onda. En todos los casos medidos, se obtuvieron relaciones TE/TM de aproximadamente un 10%, lo que indica la similitud de ambas estructuras con relación a su absorción en incidencia normal [3].

Es de destacar también el esfuerzo realizado en el estudio del crecimiento de dichas muestras mediante Epitaxia por Haces Moleculares, puesto que al tratarse de un sistema de materiales con desajuste de red es necesario obtener unas condiciones de crecimiento que aseguren un crecimiento 2D durante toda la epitaxia además de un alto grado de reproducibilidad. A este respecto se han obtenido referencias estables de temperatura de crecimiento por la observación directa de las reconstrucciones superficiales mediante el RHEED, lo que asegura la reproducibilidad de los crecimientos como se ha demostrado también experimentalmente [11].

Detectores multi-color y desarrollo de matrices de plano focal

También se han desarrollado estructuras de detectores apilados para trabajar simultáneamente en varias regiones de espectro infrarrojo. Concretamente se han desarrollado detectores que operan a la vez en las ventanas de transmisión atmosférica de 3 a 5 y de 8 a 12 μm . Una de las principales características de estos dispositivos es que son sintonizables mediante la tensión de polarización gracias a la diferente conductancia diferencial que presentan, tal como se puede comprobar en la figura 2 [2] [12]. Por otro lado, se han realizado detectores bi-color y tri-color en la región de 3 a 5 μm con longitudes de onda de absorción en 3.8, 4.2 y 4.5 μm .

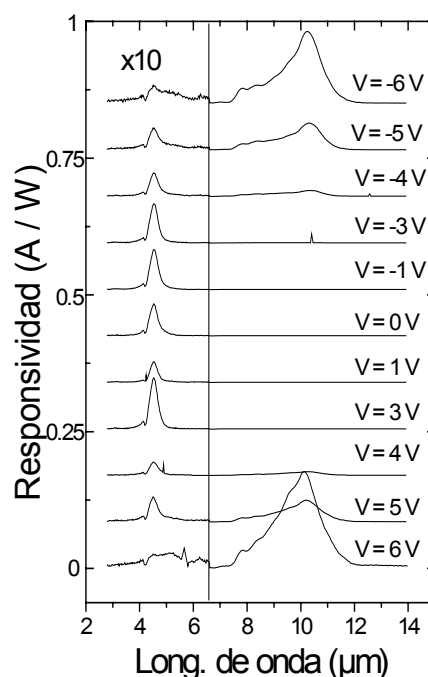


Fig.2 Muestra bi-color sintonizable con la tensión de alimentación

Para extender el intervalo de aplicación de estos detectores por debajo de las 4 μm , el Instituto está estudiando actualmente las llamadas aleaciones de N diluido (“N-dilute alloys”) las cuales se emplean habitualmente para el crecimiento de láseres en 1.5 μm . Otro de los principales logros en este aspecto consiste en la realización con éxito de detectores de infrarrojo con picos de absorción en 3 μm basados en pozos cuánticos de InGaAsN y de

GaAsN con barreras de GaAs. En la figura 3 se muestran algunos de los resultados obtenidos [13].

Finalmente, como resultado de la colaboración con la industria, se han desarrollado matrices de plano focal mediante la utilización de técnicas de litografía óptica y ataque seco sobre muestras tri-color de GaAs/AlGaAs. Dicha matriz consiste en una disposición de 512 x 12 pixels de 40 μm de lado cuyas prestaciones son similares a las medidas en dispositivos individuales. Actualmente se está trabajando en la definición de una red de difracción efectiva en la superficie de la oblea para su utilización en incidencia normal, así como en el desarrollo de la electrónica de lectura (*“Read Out Electronics”*) y en su integración con la matriz de detectores. La figura 4 muestra la micrografía electrónica de barrido (SEM) de la matriz donde se pueden apreciar los diferentes pixels sensibles a cada una de las longitudes de onda.

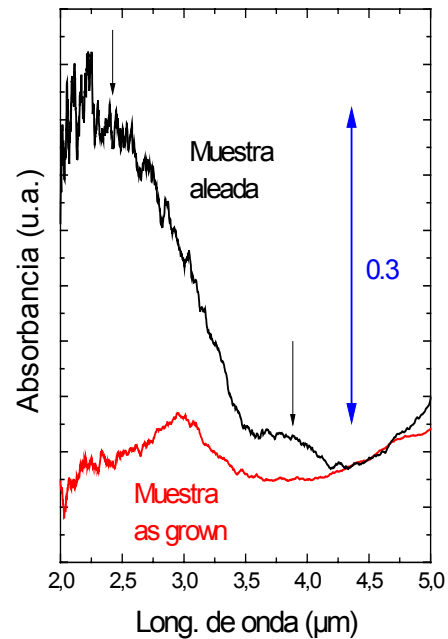


Fig. 3. Muestra de pozos de GaAsN con absorción por debajo de 4 μm

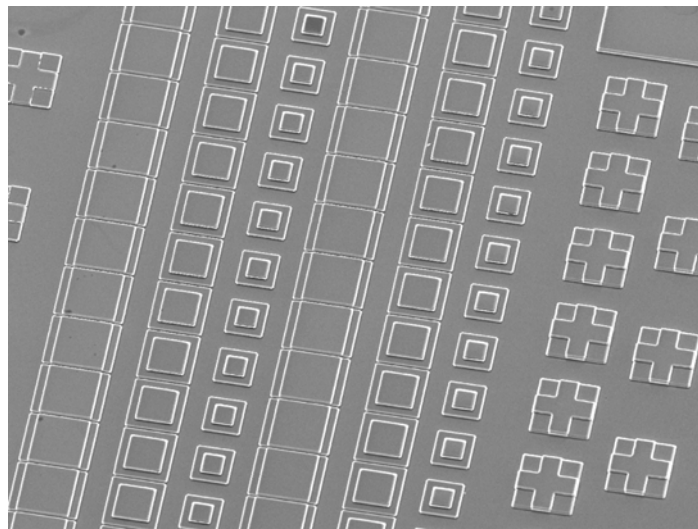


Fig.4 Matriz de plano focal con pixels tri-color

Referencias

- 1.- A.Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, J. Hernando, E. Calleja and E. Muñoz. G. Vergara, R. Almazán, L.J. Gómez, M. Verdú and M.T. Montojo , “*Growth and characterization of a Bound-to-Quasi continuum QWIP with Al-graded Triangular Confinement Barriers*”, IEEE Photonics Technology Letters **11** (12), 1999
- 2.- A. Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, J. Hernando, E. Calleja and E. Muñoz. G. Vergara, R. Almazán, F.J. Sánchez, M. Verdú and M.T. Montojo. “*Voltage-tunable two-color quantum well infrared detector with Al-graded triangular confinement barriers*”, Semiconductor Science and Technology **16** , 285-288, 2001
- 3.- J.Hernando, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, D. González, G. Aragón, R. García, A. Guzmán y E. Muñoz. “Effect of the In content in the normal incidence photoresponse of InGaAs/GaAs quantum well infrared photodetectors”, Applied Physics Letters **78** (16), 2001
- 4.- A.Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J.J. Sánchez, J. Hernando, E. Calleja and E. Muñoz. “*Optical characterization of Quantum Well Infrared Detector structures*”, Mid-Infrared Optoelectronics Materials and Devices (MIOMD98) Praga, 1998.
- 5.- A.Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J.J. Sánchez, J. Hernando, E. Calleja and E. Muñoz. “*Optical characterization of Quantum Well Infrared Detector structures*”, IEE Proceedings-Optoelectronics 146 (2) 1999.
- 6.- A.Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J.J. Sánchez, J. Hernando, E. Calleja and E. Muñoz. G. Vergara, M.T. Montojo, L.J. Gómez, P. Rodríguez, R. Almazán y M. Verdú, “Characterization of GaAs based Intersubband Infrared Detectors”, Proceedings NATO-IRIS **43** (3), 1998
- 7.- E. Luna, A. Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J. Miguel-Sánchez and E. Muñoz. “*GaAs-based modulation-doped quantum well infrared photodetectors for single and two-color detection in 3-5 μm* ”. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **8** (5), 992-997, 2002
- 8.- E.Luna, J.L. Sánchez-Rojas, A.Guzmán, J.M.G. Tijero and E. Muñoz. “*Modulation doped double barrier quantum well infrared detectors for photovoltaic operation in 3-5 μm* ”, IEEE Photonic Technology Letters, **15** (1), 105, 2003
- 9.- A. Guzmán, J.Hernando, E. Luna, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, E.Calleja, E. Muñoz, G.Vergara, M.T. Montojo, F.J. Sánchez, R.Almazán, M. Verdú. “Optimization of AlGaAs/AlAs/GaAs quantum well infrared detector structures”, 10th European Heterostructure Technology Workshop (HETECH), Günzburg (Ulm), Germany, 2000.
- 10.- E. Luna, A. Guzmán, A. Trampert, J.L. Sánchez-Rojas, E.Calleja. “On the growth conditions of 3-5 μm well doped AlGaAs/AlAs/GaAs infrared detectors and its relation to the photovoltaic effect studied by Transmission Electron Microscopy”. QWIP 2002 Workshop, Turin (Italia), 2002
- 11.- J.Hernando, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, A. Guzmán y E. Muñoz. “*High In content InGaAs/GaAs quantum well infrared photodetectors*”, 17th biennial IEEE Cornell University Conference on advanced concepts in high speed semiconductor devices and circuits, Itaca (New York), 2000.

- 12.- A.Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, J. Hernando, E. Calleja and E. Muñoz. G. Vergara, R. Almazán, L.J. Gómez, M. Verdú and M.T. Montojo, "Growth by MBE and characterization of two-color GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Detectors", Proceedings del Congreso de Dispositivos Electrónicos, Madrid, 1999.
- 13.- A. Guzmán, E. Luna, J. Miguel-Sánchez, E.Calleja and E. Muñoz. "*Study of GaAsN/AlAs/AlGaAs double barrier quantum wells grown by Molecular Beam Epitaxy as an alternative to infrared absorption below 4 μm* ", QWIP 2002 Workshop, Turín (Italia), 2002.

6.3 Sensores magnéticos planares

Los sensores fluxgate han sido ampliamente utilizados como sensores de campos magnéticos débiles desde la segunda guerra mundial (1-7). Su alta sensibilidad les hace idóneos para muchas aplicaciones, que van desde la detección de submarinos al guiado de naves aeroespaciales. El reto actual estriba en conseguir miniaturizar estos sensores, sin merma notable en su respuesta magnética, de manera que puedan integrarse en microsistemas. Esta integración facilitaría la producción y, en consecuencia, abarataría el costo de producción.

Podemos pensar en dos niveles de integración en cuanto al tamaño del sensor: del orden de centímetros, o del orden de milímetros. Por debajo de estas dimensiones resulta muy difícil conservar la sensibilidad del sensor, que depende en gran medida del tamaño del núcleo. En el primer caso, la tecnología permite utilizar técnicas de PCB, con por lo que su costo de producción es reducido y de gran facilidad de fabricación. Si se utilizan componentes SMD para la electrónica de tratamiento de la señal, esta tecnología es razonable ya que el tamaño del sensor sería similar al de la electrónica asociada.

En el segundo caso, la integración en dimensiones de milímetros, es solo razonable si en el mismo chip se integrase la electrónica asociada, de modo que el sensor final esté realmente miniaturizado (8) (9).

La miniaturización de estos sensores conlleva otros problemas asociados, pues la máxima sensibilidad teórica de un sensor depende del cociente entre el área de su sección recta y el factor desimanador del núcleo magnético. El factor desimanador a su vez depende de la relación entre la longitud del núcleo, en la dirección de medida, y la raíz cuadrada de área de su sección recta. Esto implica que si se desea disminuir las dimensiones, manteniendo su sensibilidad, hay que reducir su sección y, en especial, su espesor; pero, a su vez, una reducción de espesor implica un aumento del campo coercitivo, debido al aumento de la relación entre la rugosidad superficial y el espesor de la muestra. Así, p.ej. si el espesor es menor de 200 nm, la estructura de las paredes magnéticas cambia de paredes Bloch a paredes cross-tie o Neel, lo que implica un gran aumento del campo coercitivo. Por tanto, una miniaturización extrema implica la necesidad de altos campos excitadores y, en consecuencia, un gran aumento del consumo, que se puede paliar mediante técnicas de excitación no continuas pero a base de reducir prestaciones del dispositivo (10).

Por todos estos motivos, hemos optado en principio por el desarrollo de sensores integrados a nivel de PCB, donde los espesores de los núcleos deben ser del orden de varias micras. Recientemente, han aparecido gran número de trabajos sobre estos dispositivos (11) (12) (13), donde en general los núcleos magnéticos son de material amorfo obtenido por enfriamiento rápido, posteriormente adheridos al PCB, lo que dificulta su fabricación. Por ello, se ha optado, en una primera etapa, por desarrollar núcleos magnéticos que puedan ser crecidos directamente sobre PCB y hemos descartado las técnicas de crecimiento en vacío, dados los espesores requeridos. Los núcleos se han crecido por vía electrolítica, lo que abarata costos y permite un gran ahorro de material. Entre las diversas composiciones posibles se ha optado por núcleos amorfos de Co-P, pues este material crece con una fuerte anisotropía perpendicular a la superficie y, por tanto, con baja permeabilidad magnética (14). Para hacer desaparecer esta anisotropía, se crece el material con pulsos de corriente positiva y negativa, lo que da lugar a una película multicapa en la que se alternan las capas magnéticas y las no

magnéticas (15). De esta forma, se mejoran las características de estos materiales, pero aun así, están lejos de las que presentan los materiales amorfos obtenidos por enfriamiento rápido.

Controlando adecuadamente la modulación de corriente es posible obtener materiales con isotropía modulada (16) y variando en límites precisos la corriente, se consiguen crecer multicapas con modulación de la imanación de saturación, siendo posible controlar la anisotropía de material (Fig.1). En definitiva, somos capaces de obtener núcleos de propiedades magnéticas comparables a los mejores materiales blandos (17).

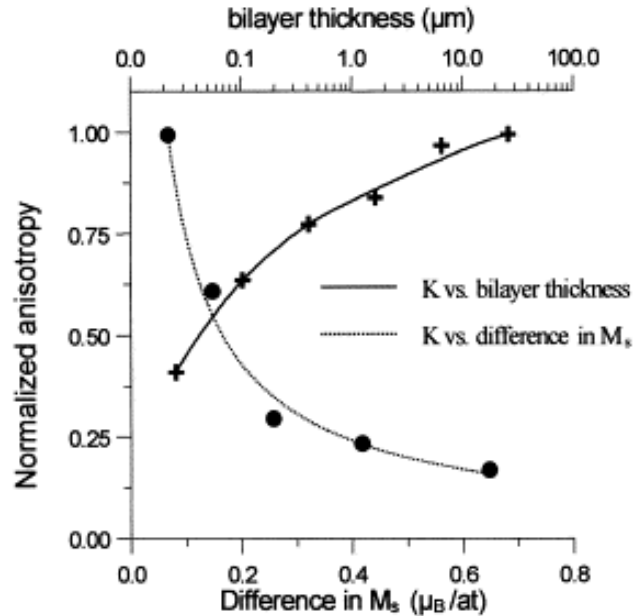


Fig. 1 Energía de anisotropía en función de la diferencia de imanación entre capas

A partir de estos materiales se puede desarrollar un sensor fluxgate utilizando técnicas PCB.

Existen dos posibles configuraciones de fluxgate planares :

- sensores donde los bobinados rodean los núcleos magnéticos. En este caso, se pueden utilizar configuraciones de flujo cerrado, donde el campo excitador imana fácilmente el núcleo magnético.
- sensores donde los carretes excitadores y detectores son carretes planares y, por tanto, no se pueden utilizar configuraciones de flujo cerrado

En el caso a) los bobinados se han realizado mediante pistas interconectadas entre dos placas. Las Figs. 2 y 3 muestran un esquema y las dimensiones del sensor. Su respuesta es lineal en un amplio rango y con buena sensibilidad.

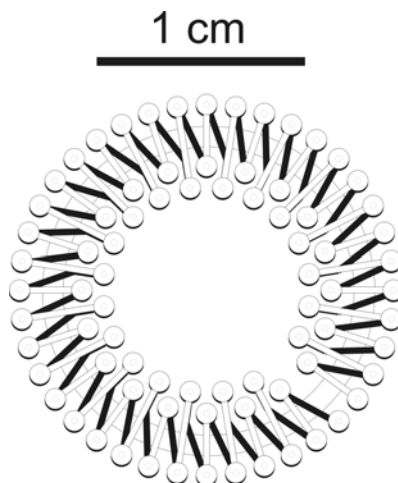


Fig. 2 Diseño del circuito primario del sensor.

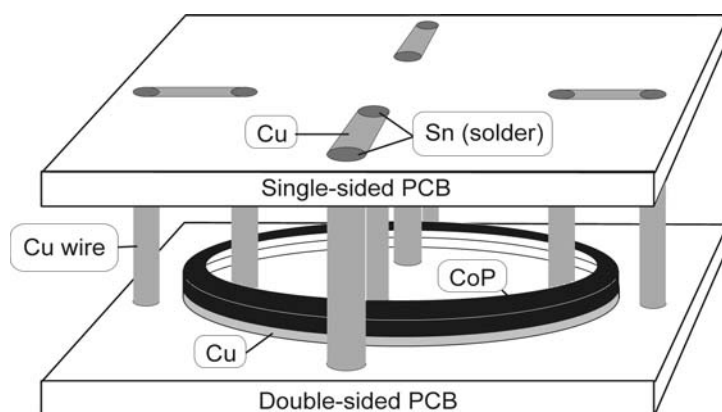


Fig. 3 Vista esquemática del sensor

La figura 4 muestra la respuesta de este fluxgate con la frecuencia para núcleos con distinto número de espiras. Como se puede observar la sensibilidad se incrementa linealmente con la frecuencia en el rango de medida. En un futuro será necesario incrementar este rango para determinar la sensibilidad máxima del dispositivo.

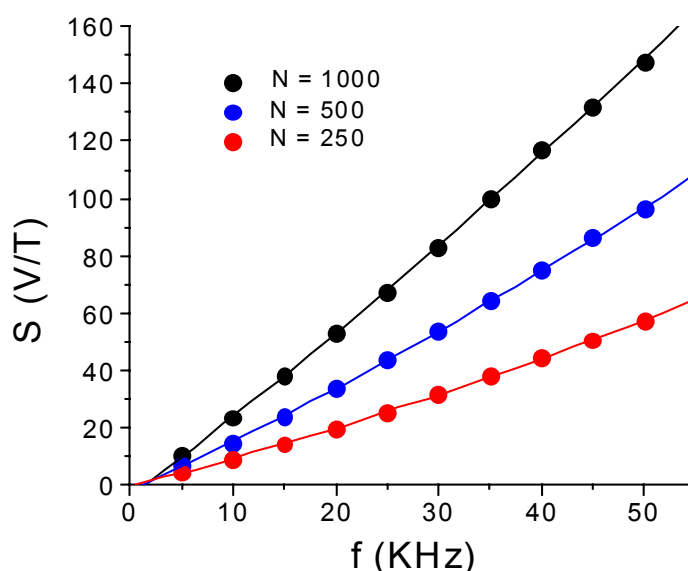


Fig. 4 Sensibilidad del fluxgate con la frecuencia para distintos espesores del núcleo

En la configuración de tipo b), los bobinados excitadores son espirales crecidas sobre un substrato de aislante. Sobre estas espirales se crecen o se pegan núcleos de material blando que son imanados en oposición. La diferencia de imanación entre ambos núcleos, debida al campo externo, es detectada mediante otro carrete espiral, figura 5. Los núcleos magnéticos presentan un gran campo desimanador por lo que son precisas grandes corrientes por el bobinado excitador para que el dispositivo funcione correctamente.

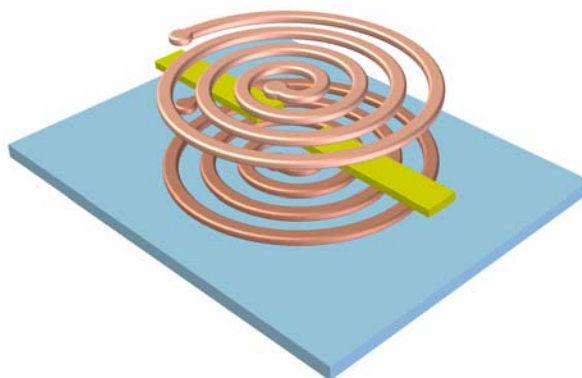


Fig. 5 Esquema del sensor con carretes planares en espiral crecidos sobre substrato de silicio.

Para evitar este inconveniente se ha crecido el sistema de núcleos y bobinados sobre un sustrato ferromagnético (una ferrita blanda), figura 6, de modo que el bobinado excitador imane la ferrita y el flujo se cierre a través de los núcleos sensores, lo que permite reducir en un factor 3 la corriente excitadora y el dispositivo tiene un funcionamiento adecuado.

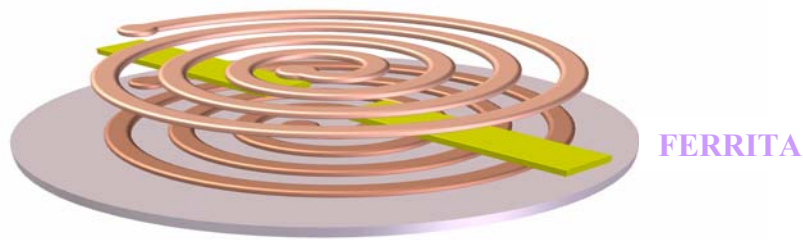


Fig. 6 Esquema del sensor sobre sustrato de ferrita

Las figuras 7 y 8 muestran la respuesta del sensor. Se observa que también presenta un comportamiento lineal con la frecuencia, si bien presenta algún problema de histéresis debido a las inhomogeneidades del campo.

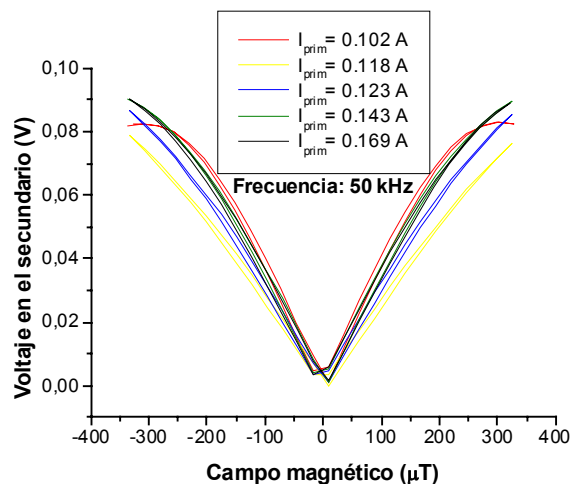


Fig. 7 Respuesta del sensor en función del campo magnético externo para distintas intensidades de excitación.

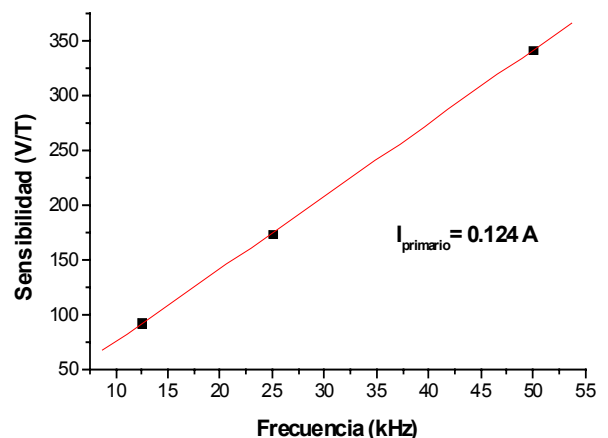


Fig. 8 Sensibilidad del sensor en función de la frecuencia de la corriente de excitación.

En resumen, hemos conseguido realizar, por primera vez en la bibliografía, un sensor fluxgate planar, tecnología PCB, con núcleo crecido mediante procesos compatibles con dicha tecnología y con microelectrónica. La sensibilidad y características del sensor están por encima de las de los sensores fluxgate planares, existentes en la bibliografía, donde el núcleo magnético es pegado al PCB, con los problemas que esto plantea. Asimismo, se ha mostrado la posibilidad de utilizar sustratos ferromagnéticos, tipo ferrita, para mejorar el consumo de los fluxgates de carretes planares.

Referencias

- 1.- Gordon, D.; Brown, R.; *"Recent advances in fluxgate magnetometry"*, IEEE Transactions on Magnetism, **8**, 76 -82, 1972.
- 2.- Primdahl-F. *"The fluxgate magnetometer"*, Journal-of-Physics-E-(Scientific-Instruments.- . **12**, 241-53, 1979.
- 3.- Ioan-C; Moldovanu-A; Macovei-C; Moldovanu-E, *"Extension of the frequency range of fluxgate magnetometers"*, Journal-of-Magnetism-and-Magnetic-Materials. **157-158**, 567-8, 1996
- 4.- Koch-RH; Deak-JG; Grinstein-G, *"Fundamental limits to magnetic-field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors"*, Applied-Physics-Letters. **75**, 3862-4,1999
- 5.- Ripka-P *"New directions in fluxgate sensors"*, Journal-of-Magnetism-and-Magnetic-Materials, **215-216** , 735-9, 2000.
- 6.- Korepanov-V; Berkman-R; Rakhlin-L; Klymovych-Y; Prystai-A; Marussenkova-A; Afanassenko-M, *"Advanced field magnetometers comparative study"*, Measurement. **29**, 137-46, 2001.
- 7.- Ripka, P, *"Magnetic Sensors and Magnetometers"*, (ed.Artech, Boston-London), 2001
- 8.- Schneider, M.; Kawahito, S.; Tadokoro, Y.; Baltes, H.; *"High sensitivity CMOS microfluxgate sensor"*, Electron Devices Meeting, 1997. Technical Digest., International , **7-10**, 907 -910, 1997.
- 9.- Chiesi-L; Kejik-P; Janossy-B; Popovic-RS, *"CMOS planar 2D micro-fluxgate sensor"*, Sensors-and-Actuators-A-(Physical), **A82**, 174-80, 2000.
- 10.- Ripka, P.; San On Choi; Tipek, A.; Kawahito, S.; Ishida, M., *"Pulse excitation of micro-fluxgate sensors"*, IEEE Transactions on Magnetism, **37**, 1998-2000, 2001
- 11.- Vincueria, I.; Tudanca, M.; Aroca, C.; Lopez, E.; Sánchez, M.C.; Sánchez, P., *"Flux-gate sensor based on planar technology"*, IEEE Transactions on Magnetism, **30** , 20-23, 5042 – 5045, 1994.
- 12.- Dezuari-O; Belloy-E; Gilbert-SE; Gijs-MAM, *"New hybrid technology for planar fluxgate sensor fabrication"*, IEEE-Transactions-on-Magnetism, **35**, 2111-17, 1999.
- 13.- Dezuari-O; Belloy-E; Gilbert-SE; Gijs-MAM, *"Printed circuit board integrated fluxgate sensor"*, Sensors-and-Actuators-A-(Physical), **A81**, 200-3, 2000.
- 14.- Riveiro-JM; Guijarro-MS; Rivero-G; Sánchez-MC, *"Magnetic domains in multilayered amorphous Co-P alloys"*, Journal-of-Physics-D-(Applied-Physics.), **15**, 145-52, 1982
- 15.- Riveiro-JM; Sánchez-MC; Rivero-G, *"Electrodeposited amorphous Co-P alloys with variable magnetic anisotropy"*, IEEE-Transactions-on-Magnetism, **MAG-17**, 1282-5,1981.
- 16.- Favieres-C; Aroca-C; Sánchez-MC; Madurga-V, *"Continuous change of surface magnetization direction from perpendicular to planar in soft magnetic CoP multilayers"*, Journal-of-Applied-Physics. **91**, 9995-10002, 2002.

- 17.- Perez-L; de-Abril-O; Sánchez-MC; Aroca-C; Lopez-E; Sánchez-P, "*Electrodeposited amorphous CoP multilayers with high permeability*", Journal-of-Magnetism-and-Magnetic-Materials. **215-216**; 337-9, 2000.

6.4 Nanoestructuras magnéticas moduladas para grabación magnética.

Introducción

La infraestructura del ISOM para la realización de procesos litográficos, de crecimiento y caracterización de muestras permite abordar el estudio de nanoestructuras magnéticas de gran actualidad, que en un futuro podrán ser aplicadas al desarrollo de nuevos dispositivos magnéticos. Una de las líneas del Grupo de Dispositivos Magnéticos del ISOM es el estudio de las nanoestructuras magnéticas moduladas, esto es, el estudio de materiales magnéticos en los que alguno de los parámetros que intervienen en la producción de una determinada estructura magnética (imanación de saturación, M_s ; canje, A_{ex} ; magnetostricción, λ_s ; anisotropía, K) están modulados en una, dos o tres dimensiones. Todos estos parámetros son cooperativos, es decir, la energía debida a cada uno de ellos es debida a la acción conjunta de muchos átomos. Es importante, en consecuencia, conocer la magnitud de estos parámetros y la relación entre los “alcances” de cada uno de ellos. La expresión “alcance” es bastante vaga y nos interesaría llegar a una definición algo más concreta. Para ello, podemos comparar el incremento de energía en un cierto volumen (un disco de radio r y espesor d , $d \ll r$) producido por la variación de cada uno de estos parámetros.

Energía de canje

La interacción de canje intenta que todos los espines estén paralelos. La densidad de energía de canje por unidad de volumen es (1)

$$W_{ex} = A \left\{ \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial z} \right)^2 \right\}$$
$$A = \frac{nJS^2}{a}$$

donde α indica la dirección de los espines, J es la constante de canje, a es la distancia entre átomos y n es un parámetro que depende de la estructura cristalina del material. Si los espines en vez de estar paralelos $W_{ex} = 0$, girasen de 0 a π , el incremento de energía del disco sería:

$$U_{ex} = \frac{A\pi^2}{d} \pi r^2 = \frac{\pi^2 AV}{d^2}$$
$$V = \pi r^2 d$$

siendo V el volumen del disco.

Energía de anisotropía

La existencia de un eje fácil en un material hace que los espines tiendan a orientarse en una determinada dirección privilegiada. La densidad de energía de anisotropía, por unidad de volumen, cuando la imanación forma un ángulo θ con la dirección de anisotropía es $W_k = -K \cos^2(\theta)$ donde K es una constante conocida como "energía de anisotropía". Si los

espines en vez de estar paralelos a la dirección de anisotropía $W_k = 0$, girasen de 0 a π el incremento de energía del disco sería:

$$U_k = \frac{KV}{2}$$

Energía magnetostática

La existencia de límites en el material produce una variación de M_s que hace que aparezcan polos magnéticos y por tanto un campo H . Si todos los espines están orientados en la misma dirección, aparecerá una densidad de energía por unidad de volumen

$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 H M_s$. Si girasen de 0 a π el incremento de energía del disco sería:

$$U_m = \frac{1}{2} M_s^2 \left(\left(\frac{1}{\pi} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{\pi d}{8r} \right) V$$

Energía elástica

El material magnético presenta una elongación que depende de la dirección de la imanación, por ello cuando se producen cambios en la dirección de ésta aparece una densidad de energía magnetoelástica por unidad de volumen:

$$W_\lambda = B \left\{ \left(\frac{\partial \alpha^2}{\partial x} \right) e_{xx} + \left(\frac{\partial \alpha^2}{\partial y} \right) e_{yy} + \left(\frac{\partial \alpha^2}{\partial z} \right) e_{zz} \right\}$$

$$B = \frac{\lambda_s (1 + \nu)}{Y} \frac{3}{2}$$

siendo Y el modulo de Young , ν el modulo de Poisson.

Si los espines en vez de estar paralelos $W_\lambda = 0$, girasen de 0 a π el incremento de energía del disco sería:

$$U_\lambda = \frac{9}{8} \frac{Y \lambda}{(1 + \nu)} V$$

Influencia de las dimensiones en las nanoestructuras magnéticas

Si comparamos estas energías vemos que la energía de canje se hace igual a la magnetostática para $d \sim \pi \sqrt{\frac{2A_{ex}}{K}}$ (en materiales ferromagnéticos esta distancia oscila entre 1 y $0.01 \mu m$).

En el caso de modulaciones de la dirección de anisotropía mayores que $\pi \sqrt{\frac{2A_{ex}}{K}}$ la imanación seguirá básicamente a la anisotropía, si bien este alineamiento estará perturbado

por la interacción de canje. Por debajo de esta distancia, la imanación estará alineada en una cierta dirección perturbada por la anisotropía, a no ser que se rompa o se debilite localmente el canje. Como ejemplos de estas situaciones podemos citar la inducción de anisotropías helicoidales en cintas amorfas, en las que la dirección de la anisotropía gira 180° en un espesor de $20\text{ }\mu\text{m}$. En este caso, la imanación sigue a la dirección de anisotropía, pero esta perturbada por el canje. Esta perturbación impide dos de las 4 posibles configuraciones helicoidales y da lugar a una configuración bi-estable (2) (3) (4) de la imanación que puede ser utilizada para desarrollar sensores magnetométricos basados en efectos magnetoópticos.

Una situación intermedia se produce cuando la anchura de la perturbación de la anisotropía es del orden de $\pi \sqrt{\frac{2A_{\text{ex}}}{K}}$, en cuyo caso se produce una fuerte interacción de la estructura magnética con la perturbación de anisotropía. Así, clásicamente, se sabe que para perturbaciones de la anisotropía del orden de la anchura de la pared aparecen máximos en el campo coercitivo (1) y, en el caso de anisotropías helicoidales inducidas, la interacción de la pared magnética con la perturbación de la anisotropía es máxima cuando la anchura de la pared magnética es igual a la anchura de la perturbación (5) (6).

Perturbaciones en la dirección de anisotropía menores que $\pi \sqrt{\frac{2A_{\text{ex}}}{K}}$ se pueden

conseguir creciendo por sputtering muestras de Ni Fe bajo un campo magnético. Si durante el crecimiento la muestra es rotada, se induce una anisotropía helicoidal, en la que el paso de la hélice depende de la velocidad de crecimiento y de la rotación del sustrato. Las muestras así crecidas son isótropas, aunque en realidad presentan una dispersión de la imanación, ya que la interacción de canje está perturbada por la anisotropía. Si se debilita la interacción de canje, creciendo entre las capas magnéticas una capa no magnética, aparecen en cada capa distintas direcciones de anisotropía, cuyas estructuras magnéticas interaccionan magnetostáticamente (7), Figura 1. Por tanto, para tamaños muy pequeños, la interacción de anisotropía y la magnetoelástica son despreciables frente a la interacción de canje.



Fig. 1 Dominios magnéticos en una tricapa (Py Cu Py) con anisotropías a 90° .

Si comparamos la interacción de canje y la magnetostática vemos que ambas se igualan cuando $d^3 = \frac{\pi^3 A_{\text{ex}} 16 r}{M_s^2 (1 - \pi^2)}$; por tanto, dependiendo del radio del disco, r , una energía

predomina sobre la otra o viceversa. En la Figura 2 vemos simulaciones en las que se presentan distintas configuraciones de la imanación en función del tamaño de un pequeño

rectángulo de material magnético, para una monocapa y una tricapa (magnética, no magnética, magnética) (8) (9). Como se puede observar, en algunos casos la energía magnetostática predomina sobre la de canje y tenemos configuraciones de imanación cerrada; en otros, predomina la de canje y tenemos configuraciones abiertas. Nosotros hemos obtenido pequeños rectángulos magnéticos en configuraciones monocapa y tricapa mediante procesos litográficos y hemos observado su estructura magnética mediante el microscopio de fuerzas magnéticas (MFM) del ISOM. La Figura 3 muestra una micrografía de las muestras y la Figura 4 (estructura magnética de una monocapa y una tricapa MFM) muestra la estructura magnética en una monocapa y en una tricapa. En la primera, la energía magnética debe romper a la de canje, provocando la aparición de dominios magnéticos, mientras que en la tricapa, el canje no existe entre las dos capas magnéticas y es energéticamente más favorable la aparición de imanaciones alternadas en cada capa, con lo que desaparecen los dominios magnéticos. La primera estructura no sirve para grabación magnética, mientras que la segunda puede ser perfectamente válida. Actualmente, estamos estudiando cómo estabilizar estas estructuras y distintos métodos para lectura y grabación de información usando dichas estructuras como memorias magnéticas de alta densidad.

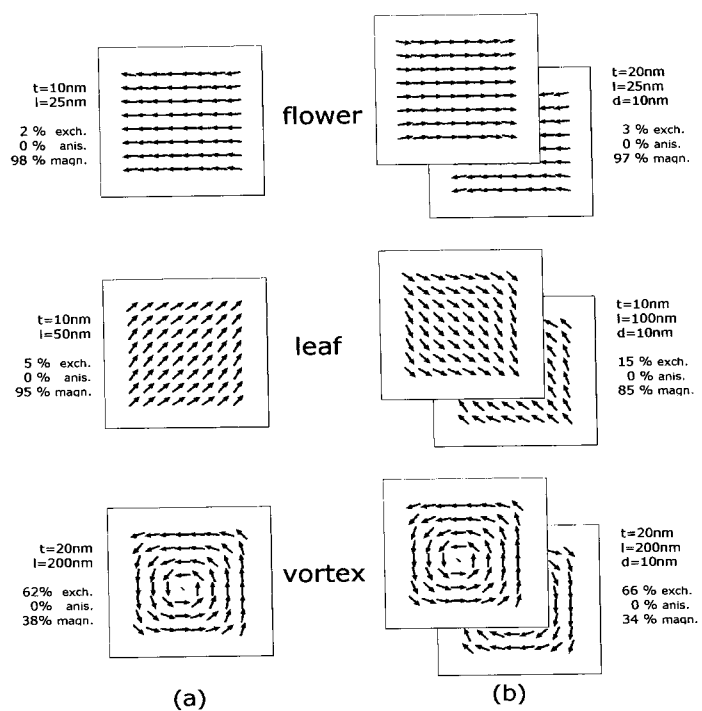


Fig. 2. Simulación de estructuras magnéticas de pequeños rectángulos ferromagnéticos

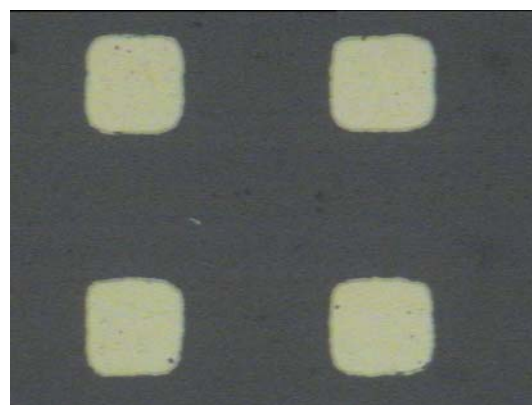


Fig. 3 Micrografía por SEM de micro rectángulos magnéticos de 5 μm de lado

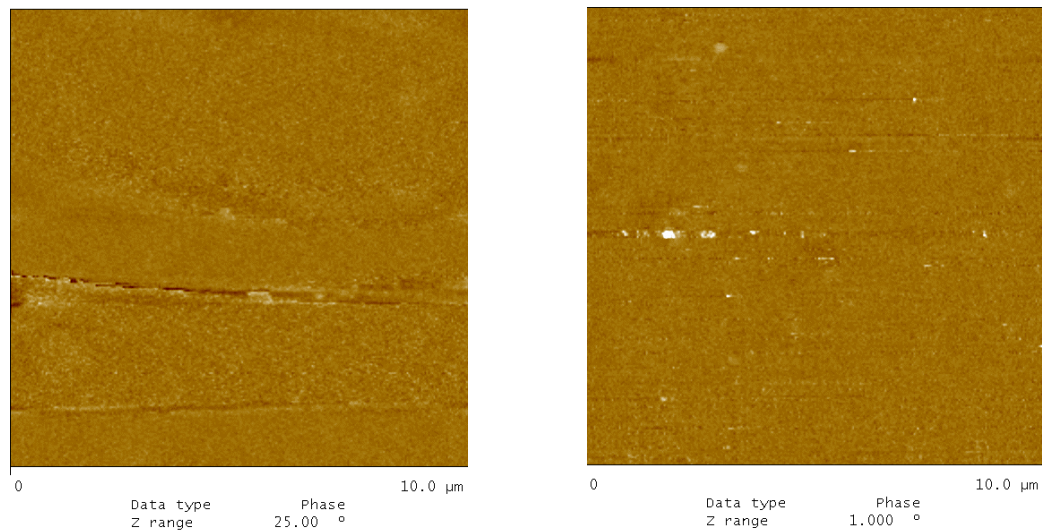


Fig. 4 Estructura magnética de una monocapa y de una tricapa, mediante MFM, donde se aprecia que en la primera hay 2 paredes magnéticas, en tanto que no existen en la segunda

REFERENCIAS

- (1) S. Chikazumi, Physics of Magnetism, John Wiley and Sons, 1964
- (2) M. Rodríguez et al. "Induction of biestability in low magnetostriction amorphous ribbons", J. Mag. Mag. Mat **133** , 36, 1994
- (3) A. Garcia et al. "Magnetization processes in samples with modulated anisotropy under the action of non uniform magnetic fields", J Appl Phys **78** , 3961, 1995.
- (4) M. Rodríguez et al. "Irreversible magnetization dynamic in samples with helical anisotropy", J Appl Phys **83**, 4835, 1998.
- (5) C. Aroca, P. Sanchez, E. Lopez , "Interaction of a Bloch domain wall with the helical anisotropy induced by itself", Phys Rev B (rapid communications) **34** , 490, 1986.
- (6) M. Maicas et al., "Domain wall simulations for different anisotropy configurations", Phys Rev B **47** , 3180, 1993.
- (7) J.L. Prieto et al , "Domain wall patterns in magnetostatically coupled bilayers", J. Mag. Mag. Mat **177**, 215, 1998.
- (8) M. Maicas et al "Micromagnetic structures in square magnetic nanodots". J. Mag. Mag. Mat, **242** , 1024, 2002.
- (9) M. Maicas et al., "Magnetic switching fields in square monolayers and bilayers", Comp. Mat. Sci. **25**, 525, 2002

6.5 Componentes y subsistemas para comunicaciones ópticas

En el ISOM nos hemos centrado principalmente en la aplicación de láseres de estado sólido a la comunicaciones ópticas en el rango espectral de 1.0 a 1.5 μm . Con el propósito de obtener emisión de luz en el infrarrojo se han seguido dos líneas de investigación diferentes: el desarrollo de diodos láser basados en pozos cuánticos de InGaAs crecido por MBE sobre sustratos de GaAs desorientado, y la incorporación de N al InGaAs con el objeto de aumentar la longitud de onda de la emisión. A continuación detallamos ambas líneas.

Láseres de pozos cuánticos de InGaAs/GaAs

Existe en la actualidad un gran interés por láseres en el rango de 1.0-1.3 μm , con decenas de mW de potencia, en áreas como la detección óptica de gases, instrumentación científica, metrología, bombeo de matrices ópticas de alta potencia, así como comunicación entre satélites. Hasta ahora el rango de longitudes de onda de 1.0 a 1.2 μm no se cubría de manera satisfactoria por tecnologías ya existentes y maduras basadas en GaInAsP/GaAs debido al pobre confinamiento de portadores y a las limitadas potencias de salida. Por otro lado, el tradicional sistema de materiales InGaAs/AlGaAs/(100)GaAs no permite alcanzar emisiones a mas de 1.06 μm debido a la aparición de dislocaciones en el pozo tensionado de InGaAs. Nuestro enfoque para obtener láseres de 1.0-1.3 μm se basa en las propiedades únicas del InGaAs/GaAs crecido epitaxialmente sobre (111)B GaAs [1], que permite en teoría obtener mayor incorporación de In y grosor del pozo, lo que se traduce en longitudes de onda de emisión más largas.

Se ha desarrollado un modelo teórico para estudiar las propiedades de pozos de InGaAs/(111)GaAs y el diseño de estructuras láser[2]. El modelo resuelve auto consistentemente las ecuaciones de Schrödinger y de Poisson teniendo en cuenta efectos del campo piezoeléctrico, no parabolicidad de la banda de valencia y efectos de muchos cuerpos. Basado en estas recomendaciones de diseño, se han fabricado con éxito láseres anchos con pozos de InGaAs crecido sobre (111)B GaAs (Fig. 1). Usando sustratos de (111)B GaAs desorientados 1° hacia (2 -1 -1) se han demostrado densidades de corriente umbrales menores a 150 A/cm^2 , con una eficiencia interna cuántica del 85 % y T_0 de 100 K. Sustratos de (111)B GaAs orientados en la dirección opuesta, es decir, 1° hacia (-2 1 1), han producido láseres con similares corriente umbral y T_0 , y con eficiencias cuánticas del 68 %. Longitudes de onda de láser de 1 μm se han alcanzado habitualmente, con una máxima récord de 1.11 μm en mono-modo (Fig. 1).

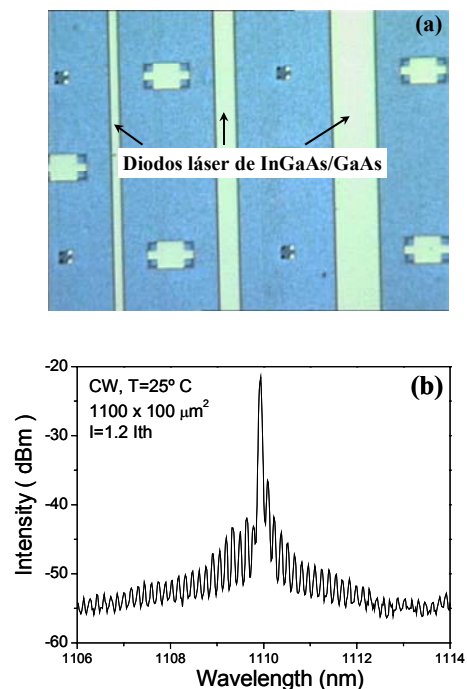


Fig. 1: (a) Fotografía de diodos láser de InGaAs/(111)GaAs. (b) Espectro de emisión láser para los mismos diodos.

Láseres de pozos cuánticos de InGaAsN/GaAs

Recientemente, el sistema InGaAs/GaAs ha sido propuesto para la realización de diodos láser de alto rendimiento emitiendo a 1.3 y 1.55 μm , en las ventanas de mínima atenuación de la fibra óptica [3]. Este potencial surge gracias a las inusuales propiedades de las aleaciones III-V donde el elemento del grupo V ha sido parcialmente reemplazado por N. Así, el reemplazar una pequeña cantidad de átomos de arsénico en el GaAs o InGaAs por nitrógeno reduce significativamente el gap de energía y cambia drásticamente la estructura electrónica. Esto abre interesantes posibilidades para la ingeniería de estructuras de bandas, y específicamente la posibilidad de obtener láseres emitiendo a largas longitudes de onda (1.3-1.55 μm) con alto rendimiento [4].

En el ISOM hemos desarrollado un modelo teórico basado en el band-anticrossing-model que nos permite investigar el impacto de añadir N al ternario InGaAs en la estructuras de bandas, y por lo tanto en la energía de la luz emitida así como en las características de dispositivos [5]. El análisis de diodos láser de InGaAsN/GaAs conduce a la siguiente conclusión: para poder obtener emisión de luz a 1.55 μm a temperatura ambiente es necesario un pozo cuántico de 80 Å de InGaAsN/GaAs con 40 % de In y 2.5 % de N [5]. Usando estas recomendaciones, el grupo de CRHEA, Francia, ha crecido por MBE varias estructuras que han sido analizadas y procesadas para obtener dispositivos en el ISOM.

Se ha demostrado emisión de luz de 1.4 a 1.5 μm usando pozos de InGaAsN/GaAs (Fig. 2), los cuales presentan excelente fotoluminiscencia a baja temperatura, incluso para longitudes de onda de 1.5 μm . Sin embargo, debido al efecto de la recombinación no-radiativa, responsable de acabar con la emisión de luz a altas temperaturas, la emisión a temperatura ambiente sólo puede alcanzarse con pozos cuánticos expuestos a un ciclo térmico rápido. Las bajas temperaturas de crecimiento necesarias para la incorporación de altas concentraciones de N en el pozo de InGaAsN son responsables de la formación de fuertes fluctuaciones composicionales y de aglomerados a lo largo del pozo, relacionados con la recombinación no radiativa. Un estudio detallado demuestra que se requieren temperaturas de aleado más bajas cuando el material presenta una mayor calidad cristalina y menor fluctuación composicional, y que muestras aleadas pueden emitir luz a largas longitudes de onda a temperatura ambiente (Fig. 2). Dispositivos de tipo p-i-n han sido procesados y analizados como primer paso hacia la obtención de diodos láser, y presentan excelente electroluminiscencia a baja temperatura, alcanzando 1.4 μm a temperatura ambiente (Fig. 3). Actualmente se están desarrollando diodos láser basados en InGaAsN/GaAs con el fin de obtener emisión láser a 1.5 μm .

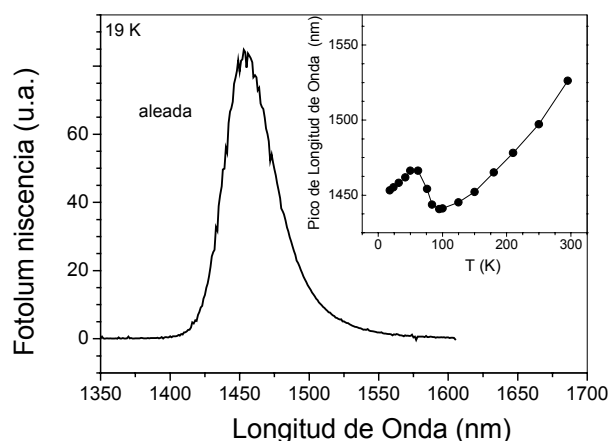


Fig. 2: Espectro de fotoluminiscencia de pozos de InGaAsN/GaAs donde se demuestra la posibilidad de alcanzar emisión a 1.5 μm a temperatura ambiente.

Una segunda línea de investigación en el ISOM está enfocada en el crecimiento por MBE de InGaAsN sobre substratos de GaAs con orientaciones diferentes de la (100), específicamente la (111)B, donde se obtuvieron excelentes resultados para diodos láseres de InGaAs/GaAs. El objetivo consiste en entender cómo se incorpora el N en otras superficies, y buscar un método que ayude a aumentar dicha incorporación manteniendo una alta calidad cristalina. Se está desarrollando un procedimiento para este tipo de crecimiento que indica la necesidad de usar flujos de As y velocidades de crecimiento mucho mayores que las del InGaAs/(111)GaAs. Usando este procedimiento se han crecido estructuras p-i-n sobre (111)B GaAs que contienen un pozo de InGaAsN y presentan superficies de gran calidad. Con estas estructuras se ha demostrado por primera vez la posibilidad de obtener excelente fotoluminiscencia una vez aleadas (Fig. 4). En la actualidad se está estudiando la incorporación de altas concentraciones de In y N en el pozo cuántico con el fin de alcanzar mayores longitudes de onda.

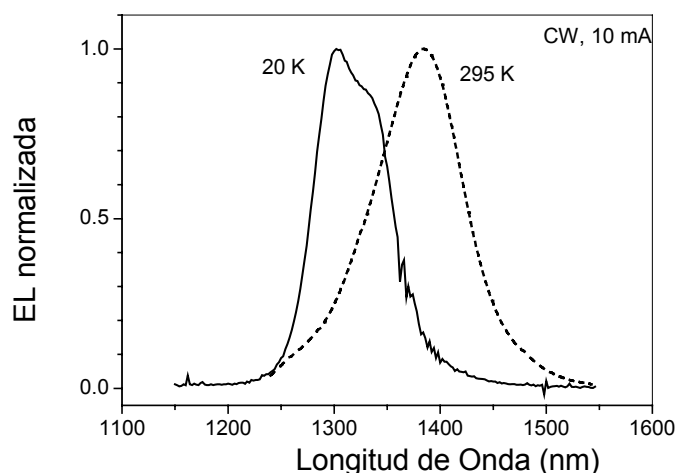


Fig. 3: Espectro de electroluminiscencia de un InGaAsN/GaAs P-I-N, alcanzando emisión a $1.4 \mu\text{m}$ a temperatura ambiente.

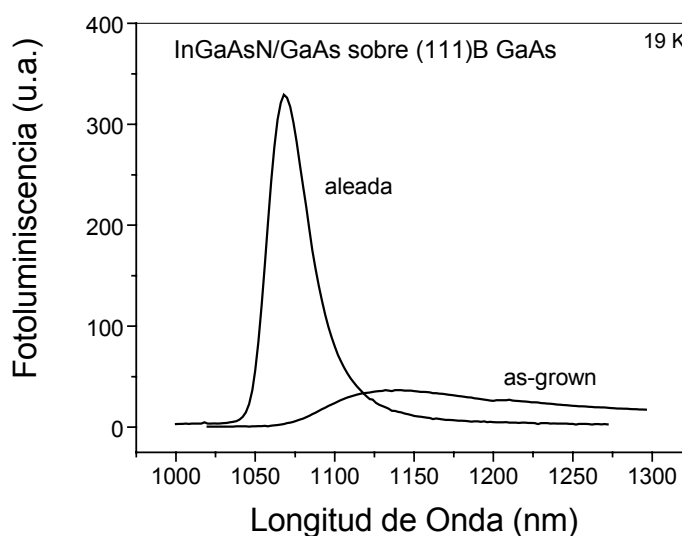


Fig. 4: Fotoluminiscencia de un pozo de InGaAsN crecido sobre (111)B-GaAs.

Referencias

- [1] J.J. Sánchez, J.M.G. Tijero, I. Izpura, J.L. Sánchez-Rojas, M. Hopkinson, M. Gutierrez, D. González, G. Aragón, R. García, “*Relaxation study of $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ Quantum-Well structures grown by MBE on (001) and (111)B GaAs for long wavelength applications*”, J. Cryst. Growth 206, 287 (1999).
- [2] J.M. Ulloa, L. Borruel, J.M.G. Tijero, J. Temmyo, I. Esquivias, I. Izpura, J.L. Sánchez-Rojas, “*Spontaneous emission study of (111) $InGaAs/GaAs$ quantum well lasers*”, Microelectronics Journal 33, 589 (2002).
- [3] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, Y. Yazawa, “*GaInAsN: A novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance*”, Jpn. J. Appl. Phys. 35, 1273 (1996).
- [4] S. Sato, Y. Osawa, T. Saitoh, I. Fujimura, “*Room-temperature pulsed operation of 1.3 μm laser diode*”, Electronics Letters 33, 1386 (1997).
- [5] J.M. Ulloa, J.L. Sánchez-Rojas, A. Hierro, J. M. G. Tijero, and E. Tournée, “*Effect of nitrogen on the band structure and material gain of $In_yGa_{1-y}As_{1-x}N_x/GaAs$ quantum wells*”, enviado a IEEE J. Selected Topics Quantum Electronics (2002).

6.6 LEDs de cavidad resonante de Nitruros III-V para comunicaciones

Resumen.

Las comunicaciones mediante fibra óptica de plástico requieren diodos electroluminiscentes (*light emitting diodes, LEDs*) de 510 nm, siendo los dispositivos más apropiados los LEDs de cavidad resonante (*resonant-cavity LEDs, RCLEDs*) basados en nitruros del grupo III. Estos dispositivos incluyen estructuras de pozos cuánticos (*multi-quantum-wells, MQW*) de InGaN/GaN, y reflectores de Bragg de GaN/AlGaIn. La epitaxia por haces moleculares (*molecular beam epitaxy, MBE*) proporciona algunas ventajas para la fabricación de RCLEDs de nitruros, como la elevada incorporación de In en la región activa, o la calidad de las intercaras del espejo. En esta línea de actividad se investigan y desarrollan RCLEDs de nitruros crecidos mediante MBE asistido por plasma de radio-frecuencia, con énfasis en a) el dopaje tipo p de GaN; b) la optimización del crecimiento, el diseño y la caracterización de microcavidades de AlGaIn/GaN; y c) el crecimiento de capas, pozos cuánticos y LEDs de InGaN/GaN, que se estudian mediante técnicas estructurales, eléctricas y ópticas. Finalmente, se diseñan y fabrican RCLEDs de nitruros que satisfagan las especificaciones de las aplicaciones de comunicaciones por fibra óptica de plástico.

Introducción: emisores de luz para fibras ópticas de plástico.

Los avances en los materiales y en el diseño de las fibras ópticas de plástico han mejorado las previsiones de mercado de las redes de comunicaciones para el hogar y automoción. Estas aplicaciones se basan en las ventajas de las fibras de plástico frente a los cables de cobre (inmunidad a interferencias EM y RF, ausencia de *crossstalk* entre fibras, aislamiento eléctrico, mayor capacidad de transmisión de datos, menor tamaño y peso), o a las fibras de vidrio (menores costes, conectores más fiables, e instalación y manipulación más sencillas). El desarrollo competitivo de estos sistemas requiere la disponibilidad de fuentes de luz eficientes que satisfagan las especificaciones impuestas por las fibras, como acoplamiento o mínimas pérdidas.

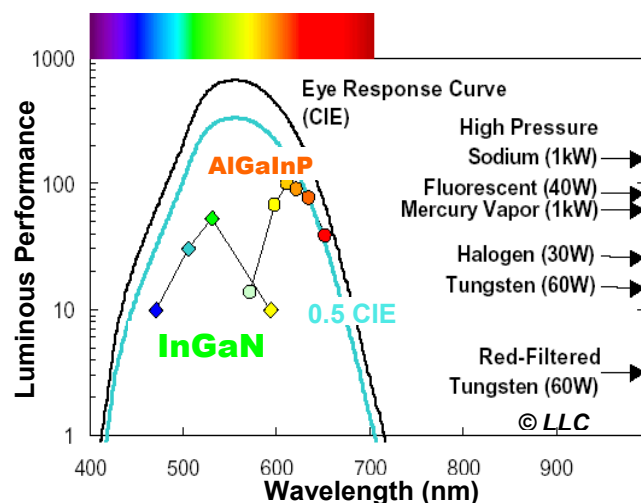
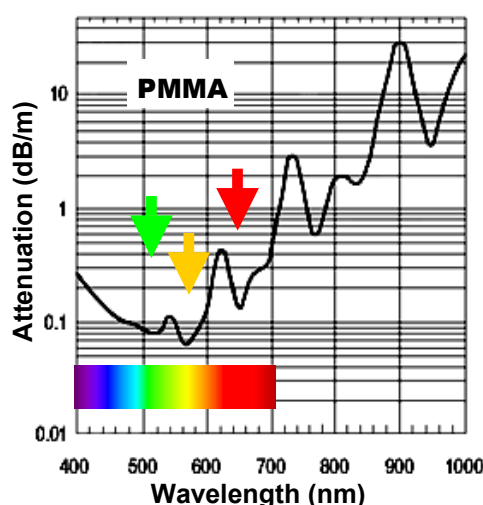


Fig.1.- Atenuación del PMMA, material típico en las fibras ópticas de plástico.

Fig.2.- Comparación de la luminosidad obtenida en LEDs de AlGaInP e InGaN, y otras fuentes.

Los diodos emisores de luz, LEDs, son unas fuentes de luz que pueden resultar más indicadas que los láseres, por precisar una electrónica más sencilla, y no ser tan sensibles a los problemas de realimentación óptica o dependencia con la temperatura. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes, como una eficiencia baja y una pobre pureza espectral. El LED de cavidad resonante, RCLED, ofrece muchas ventajas sobre los LEDs convencionales, como son la pureza espectral, mayor ancho de banda, así como eficiencia de extracción óptica y direccionalidad mejoradas que se traducen en mayor acoplamiento con la fibra. Además, el RCLED comparte muchos de los beneficios de los dispositivos de cavidad vertical: bajo precio, emisión perpendicular a la oblea (lo que permite *arrays* bidimensionales), mayor estabilidad térmica, y elevada fiabilidad.

Las longitudes de onda de menor atenuación en el poli-metil-metacrilato, PMMA, material más utilizado en el núcleo de las fibras de plástico, son 510, 570 y 650 nm (ver Fig. 1). De hecho, las fuentes actuales para aplicaciones con fibra son RCLEDs rojos a 650 nm, basados en estructuras de AlGaInP/AlInP crecidas sobre sustratos de GaAs. Sin embargo, el menor confinamiento electrónico de los LEDs de AlGaInP en el verde disminuye su eficiencia (ver Fig. 2), por lo que el mejor material para estas aplicaciones es InGaN. Además, los LEDs basados en nitruros, por ser éstos semiconductores de gap ancho, permiten operación a mayor temperatura con menor sensibilidad térmica.

Un RCLED de nitruros consiste en una estructura p-i-n, en que la zona intrínseca son pozos cuánticos (MQW) de InGaN/GaN, emparedada por dos espejos, siendo el de debajo del MQW un reflector Bragg (*distributed Bragg reflector*, DBR) de GaN/AlGaN (Fig.3). A pesar del enorme progreso en la tecnología de nitruros de la última década, persisten varios problemas, como la inexistencia de sustratos de GaN o la baja eficiencia del dopaje tipo p. Por otra parte, existen dificultades específicas de los RCLEDs de nitruros como la baja incorporación de In en el InGaN, que complica la fabricación de fuentes verdes, o la pequeña diferencia entre los índices de refracción de GaN y AlN, unida a sus desajustes de parámetros de red y térmicos, que perjudican la fabricación de espejos con alta reflectividad y calidad de superficie y estructural. Precisamente éstas son algunas razones para utilizar MBE en lugar de MOVPE (*metal organic vapour phase epitaxy*) en el crecimiento de RCLEDs de InGaN: 1º, aumentar el contenido de In en el LED, debido a la menor temperatura de crecimiento, y 2º, la calidad del DBR de AlGaN/GaN, por el mejor control de intercaras durante la epitaxia. La disponibilidad de sustratos de GaN para la homoepitaxia puede también contribuir a explotar las ventajas de la técnica de MBE de nitruros.

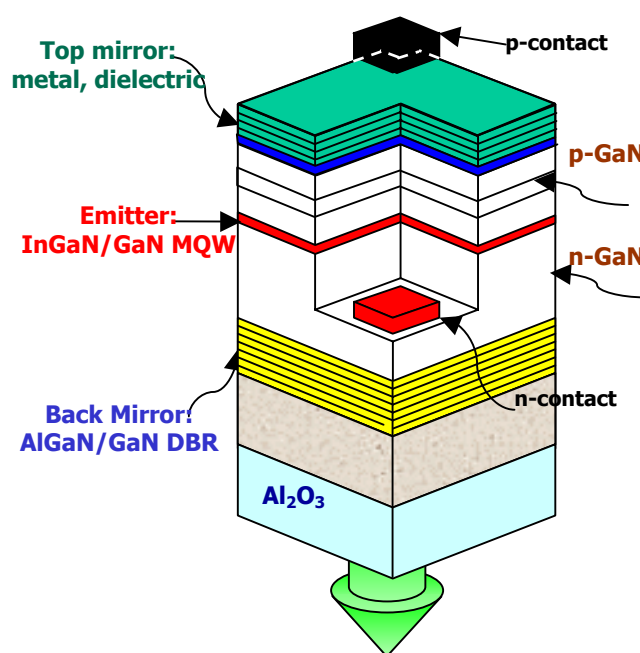


Fig. 3 Esquema de un RCLED de nitruro

Se describen a continuación el sistema de MBE, los sustratos y las condiciones de crecimiento utilizadas (apdo. 2). En la sección 3 se detallan las etapas principales en el

crecimiento de nitruros para RCLEDs (dopaje tipo p, heteroestructuras de AlGaIn/GaN, y MQWs y LEDs de InGaIn/GaN). En la sección 4 se muestran el diseño y la fabricación de los RCLEDs, indicándose algunos resultados sobre su comportamiento espectral y térmico. Una descripción más detallada se puede encontrar en [1] y las referencias que allí se citan.

Experimental.

La técnica de MBE presenta algunas ventajas sobre MOVPE para producir material de elevada calidad, como son i) menores riesgos de contaminación, debido al ambiente de ultra-alto vacío a la elevada pureza de las fuentes de material; ii) monitorización in-situ de la reconstrucción de superficie y el ambiente de crecimiento, mediante sistemas de RHEED y analizador de gases, respectivamente; iii) disponibilidad de fuentes sólidas de dopantes, que no precisan precursores; iv) excelente control de espesor e intercaras, y v) menor temperatura de crecimiento, T_G , que minimiza la desorción térmica y la segregación de In.

En MBE se utilizan dos fuentes distintas para el nitrógeno: amoníaco, NH_3 , el más utilizado en MOVPE, y N_2 . Algunos inconvenientes de NH_3 son la incorporación de hidrógeno, que crea defectos profundos y disminuye la eficiencia del dopaje p; y la necesidad de una mayor T_G para lograr la rotura molecular, lo que limita la incorporación de indio. Por su parte, la baja interacción de N_2 con la superficie de los nitruros y la elevada energía de ligadura del enlace N-N de las moléculas N_2 (9.5 eV) obligan a utilizar fuentes de plasma, bien de radio-frecuencia (RF) o de resonancia ciclotrón. Las bajas velocidades de crecimiento (0.2 - 1 $\mu m/h$) y cierto daño estructural se compensan por la ausencia de hidrógeno y una menor temperatura de crecimiento.

Todas las estructuras indicadas aquí fueron fabricadas en un sistema MBE MECA-2000 equipado con una fuente de plasma RF (Oxford HD25) para activar el N_2 . Para los elementos III (Ga, Al, In) y los dopantes (Si, Be, Mg) se emplean células de efusión estándar. Se han utilizado varios sustratos, incluidos Si (111), zafiro, y *templates* o pseudo-sustratos de GaN (capas gruesas, $>2 \mu m$, de GaN sobre zafiro). El parámetro determinante de todas las propiedades de los nitruros crecidos por MBE (microestructura, morfología, propiedades ópticas y eléctricas) es la proporción III/V efectiva en la superficie del sustrato, a su vez muy dependiente de T_G [2]. Mientras que las condiciones ricas en nitrógeno favorecen el crecimiento de columnas, se obtiene una morfología compacta en condiciones de estequiometría para todos los sustratos y capas de adaptación (*buffers*).

La elección de sustrato es un asunto de enorme relevancia en el crecimiento de nitruros. Si (111) es un sustrato económico que posibilita la integración. Se han obtenido algunos dispositivos optoelectrónicos (detectores y LEDs de UV) sobre este sustrato mediante MBE [3]. Sin embargo, la heteroepitaxia a T_G baja padece de elevadas densidades de dislocaciones, que pueden ser muy perjudiciales para las prestaciones de los RCLEDs. Además, el Si es opaco a la luz verde, lo que impide la fabricación de dispositivos de emisión trasera. Por tanto, se han fabricado los dispositivos utilizando pseudo-sustratos de GaN crecidos por MOVPE.

Los sustratos se recubren por detrás con Ti para monitorizar la temperatura, se limpian y se introducen en la cámara. Antes del crecimiento se calientan a 650°C durante 30 minutos. Primero se crece una capa de GaN –unos cientos de nm- a 700°C para comprobar las condiciones de flujo, observándose una reconstrucción superficial 2x2 indicativa de

crecimiento 2D. La temperatura en la oblea se controla mediante un pirómetro óptico. En general, para el crecimiento de GaN se utiliza T_G entre 660 y 700°C, un poco mayor (unos 30°C) para AlGaIn, y de unos 550°C para InGaIn. Más adelante se indican otros detalles para cada tipo de estructura.

La morfología y la estructura se estudian mediante las microscopías de fuerza atómica (AFM), de barrido electrónico (SEM), y de transmisión electrónica (TEM), así como por difracción de rayos X de alta resolución (HR-XRD). Las propiedades ópticas de las capas y estructuras se analizan mediante fotoluminiscencia (PL), mientras que mediante electroluminiscencia (EL) y reflectividad se caracterizan los LEDs y los espejos Bragg, respectivamente.

Nitruros para RCLEDs

Dopaje de GaN.

El magnesio, Mg, es el dopante más utilizado para tipo p, aunque se precisa una elevada cantidad por su bajo factor de ionización, por procesos de auto-compensación, y por la enorme densidad residual tipo n. Se han empleado también otros aceptores como Be, que es mucho más ligero que Mg como se ha comprobado por PL y PL resuelta en tiempo [4]. Por otra parte, como el dopaje con Mg disminuye la concentración de V_{Ga} , el “codopaje” simultáneo con Mg y Be puede aumentar la conductividad p, de lo que se han obtenido resultados prometedores [5].

Para los RCLEDs actuales se ha optimizado el dopaje de capas GaN:Mg variando la temperatura de la célula de Mg, T_{Mg} , entre 350 y 450°C. La intensidad de la banda de PL relacionada con el aceptor ligero disminuye al aumentar T_{Mg} , mientras que la morfología superficial se deteriora. Además, la resistencia de la capa también aumenta con dicha temperatura, de modo que se selecciona $T_{Mg}=350^\circ\text{C}$ para el dopaje. Por su parte, el dopaje tipo n se logra fácilmente con Si, hasta concentraciones en el rango de 10^{19} cm^{-3} [6].

Espejos de AlGaIn/GaN.

La región activa del RCLED irá sobre un espejo DBR de AlGaIn/GaN. Debido al pequeño contraste de índices de refracción de AlN/GaN, los espejos de alta reflectividad precisan multicapas de AlGaIn/GaN con muchos periodos y/o alta concentración de Al, x_{Al} , resultando así un sistema con elevado grado de deformación. Pero ha de evitarse la relajación para minimizar la densidad de dislocaciones, fatal para las prestaciones del RCLED. Se ha utilizado una simulación basada en el método *transfer matrix* para establecer los parámetros de diseño [7].

Los espejos DBR consisten en hasta $N=10$ periodos con x_{Al} variable entre 15 y 50%, crecidos sin paradas en las intercaras. Las capas tienen un espesor $\lambda/4$ para obtener reflectividad máxima a 510 nm. La temperatura del sustrato se eleva durante el crecimiento de las capas de AlGaIn en 20°-50°C, dependiendo de x_{Al} . En [7] se indican más detalles sobre las condiciones de crecimiento. Para determinar el *strain* de las estructuras, se han obtenido medidas de rayos X ω -2 θ . Los espectros se ajustan mediante un modelo dinámico utilizando como parámetros el espesor de las capas, la composición x_{Al} y el grado de relajación, como se indica en Fig. 4.a para un espejo de $N=10$ periodos. Para $N=10$ y $x_{Al}>30\%$, la superficie del

DBR muestra grietas. En otros casos, las fotografías de TEM revelan una excelente periodicidad y planitud en intercaras [8], apenas afectadas por las dislocaciones ascendentes - Fig. 4.b. Los espectros de reflectividad muestran un buen acuerdo con las simulaciones -Fig. 4.c-, con máximos superiores al 50% a 510 nm sin degradación estructural y, por tanto, aptos para la fabricación de RCLEDs de emisión posterior.

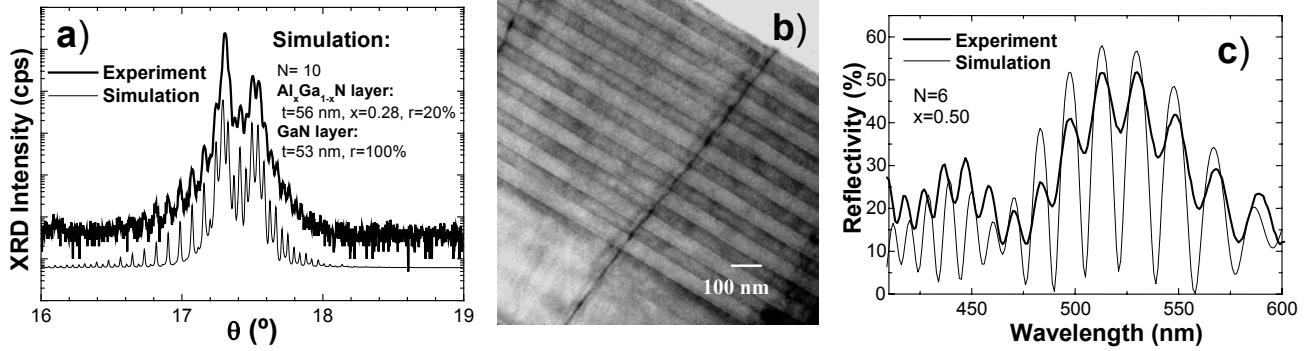


Fig. 4. a) Espectro de difracción de rayos X de un espejo Bragg de AlGaIn/GaN. b) Fotografía de alta resolución obtenida mediante TEM. c) Espectro de reflectividad y simulación mediante el método de la matriz de transferencia.

InGaIn: volumen y MQWs.

Los LEDs de alto brillo de InGaIn crecidos por MOVPE probablemente se deben a la recombinación de portadores localizados en *clusters* ricos en In, estando dicha localización favorecida por la enorme perturbación química y de tamaño provocada por cada átomo de InGaIn en el otro. Nuestro objetivo aquí es el desarrollo de RCLEDs verdes, que incluyen MQWs InGaIn/GaN con elevadas concentraciones de In.

La figura 5 muestra espectros de PL de dos series de capas de InGaIn, crecidas con flujos de Ga y a temperatura variable, respectivamente. Como era de esperar, la concentración de In disminuye con el cociente $[\text{Ga}]/[\text{In}]$ y con T_G , en este caso debido a desorción de In. Se ha estimado el parámetro de curvatura (*bowing parameter*) del InGaIn en 3.6 eV. Tanto el borde de absorción como las bandas de PL se ensanchan al aumentar en contenido de In [9].

Las barreras y pozos de las estructuras MQW se crecen sin interrupción en las intercaras, manteniendo constante la temperatura alrededor de 550°C. Fotografías de TEM revelan la elevada calidad de las intercaras, como se observa en la Fig. 6.a [10]. En la Fig. 6.b se muestra un espectro XRD de otra heteroestructura de InGaIn/GaN, cuyos picos satélite son también indicativos de dicha calidad. Mediante simulaciones se determinan los espesores de las capas y el contenido de In en los pozos.

Además de la proporción de flujos In/Ga y de la temperatura de crecimiento, otro parámetro en el diseño de la longitud de onda de la emisión es el espesor del pozo. Así, por ejemplo, la PL de pozos de InGaIn con $x_{\text{In}} = [0.12 - 0.16]$ y espesores $L_Z = [30 - 50 \text{ Å}]$ oscila entre 440 y 520 nm. Es de notar que condiciones de crecimiento similares en capas gruesas y MQW no proporcionan en mismo contenido de In. Por otra parte, la anchura de las bandas de PL son comparables a las encontradas típicamente en la literatura.

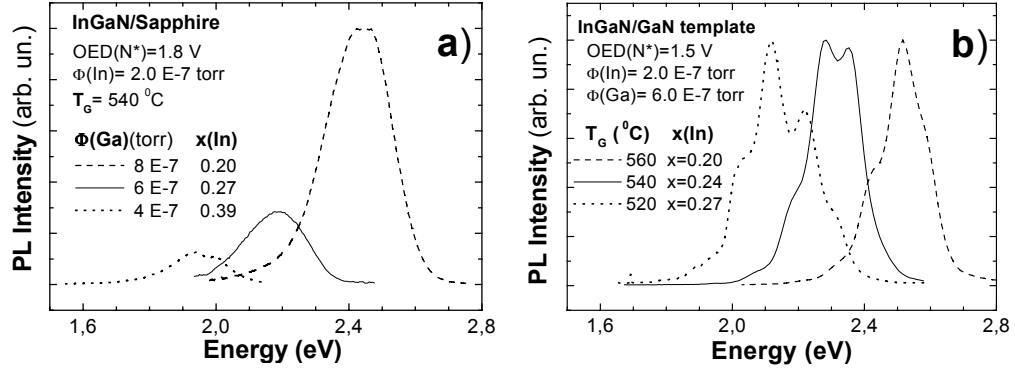


Fig.5. Espectros de PL a baja temperatura de capas de InGaN obtenidas bajo distintos flujos de Ga (a) y distintas temperaturas de crecimiento (b). La composición de las capas se obtuvo mediante difracción de rayos X.

La evolución con la temperatura de los espectros de PL de estructuras MQW con espesores de pozo menor de 3 nm muestra la forma en S indicativa de localización en el pozo [10], lo que favorece la emisión a temperatura ambiente y las hace útiles como región activa de los RCLEDs. Para espesores mayores de 3 nm ese efecto es menor, y los campos piezoeléctricos en el pozo contribuyen a reducir la intensidad de la emisión. En definitiva, la optimización de pozos para LEDs verdes sugiere incrementar x_{In} por encima del 20% con objeto de mantener su espesor por debajo de 3 nm.

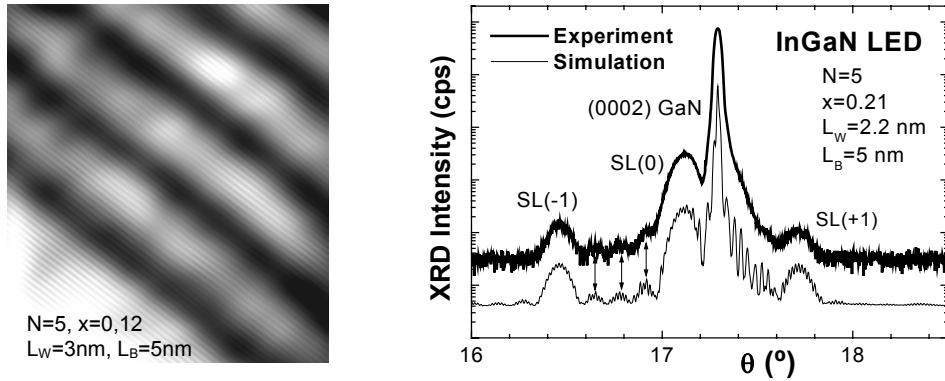


Fig. 6. Estructuras de MQW de InGaN/GaN: a) imagen de HRTEM; b) espectro de HRXRD y simulación.

Diseño, crecimiento y caracterización de RCLEDs.

El diseño de los dispositivos RCLED precisa de la concurrencia de una brillante EL a $\lambda_C=510$ nm, buena reflectividad del DBR a esta longitud de onda, una cavidad resonante también para λ_C , y que los pozos ocupen una posición antinodal. Ello exige el cuidadoso diseño en varias escalas de longitud, desde pozos de anchura de pocos nm, las capas $\lambda/4$ (unos 50 nm) del espejo, hasta la cavidad total.

En el proyecto AGETHA se han considerado varios diseños, incluyendo distintas longitudes de cavidad (tanto $3-\lambda$ como $1-\lambda$), varios espejos superiores (DBR de dieléctricos, capas metálicas), etc. El dispositivo que se ha desarrollado incluye un DBR de 7 periodos (capas de GaN y $Al_{0.17}Ga_{0.83}N$ de 52.5 nm y 54 nm, respectivamente), y estructuras de 5 pozos

de InGaN/GaN ($L_z=2.2$ nm, $x_{In}=0.25$) [11]. Las capas de GaN:Mg y Ga:Si presentan densidades de huecos y electrones superiores a 10^{17} cm⁻³ y 10^{19} cm⁻³, respectivamente. Con objeto de disponer de una referencia, se fabricó un LED convencional, idéntico excepto por el espejo.

Mediante ataque seco por RIE (*reactive ion etching*) se definieron las mesas hasta la capa de GaN:Si, y se utilizaron Ti/Al y Ni/Au como contactos tipo n y p, respectivamente. Finalmente se depositó una capa metálica muy reflectante como espejo anterior del RCLED (ver foto insertada en Fig. 7).

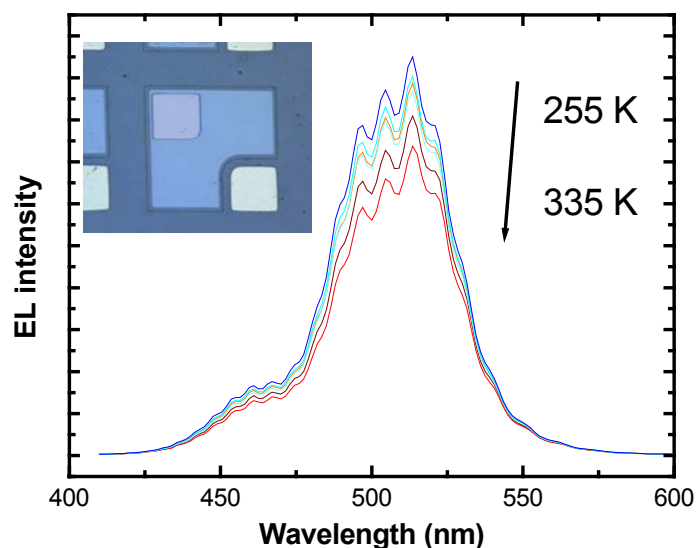


Fig.7. Espectros de EL de un RCLED a varias temperaturas.

Tanto el RCLED como el LED convencional emiten en el verde, si bien el primero con una intensidad muy superior. No se aprecian efectos de calentamiento en operación continua (cw) hasta corrientes de 20 mA, como se ha comprobado en experimentos bajo inyección pulsada. La figura 7 muestra espectros EL obtenidos a varias temperaturas, bajo excitación cw de 20 mA. Se obtienen coeficientes de variación térmica de la emisión de $\partial\lambda/\partial T = 0.033$ nm/K y $\partial I/\partial T = -0.31$ %/K, que satisfacen los requisitos para aplicaciones de automoción.

Conclusiones.

En este trabajo se ha demostrado que la técnica de crecimiento MBE permite fabricar espejos de Bragg de AlGaIn/GaN de elevada calidad en términos de reflectividad y estructura, así como LEDs verdes basados en estructuras de pozo cuántico de InGaIn/GaN. Además, se han obtenido RCLEDs de muchas mejores prestaciones que los LEDs convencionales, capaces de satisfacer las especificaciones térmicas y espectrales impuestas por las aplicaciones de automoción basadas en fibras ópticas de plástico.

Entre otros asuntos, los trabajos futuros deben ocuparse de nuevas estructuras RCLED (por ejemplo, cavidad $1-\lambda$) para aumentar la eficiencia, alternativas al dopaje p (co-dopajes

tanto de Be+Mg como aceptor-Si/O-aceptor), contactos más conductivos, y sustratos con menores densidades de dislocaciones.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado dentro del Proyecto de la UE AGETHA, del programa IST. Se agradece la fructífera colaboración con todos los socios del proyecto, y en particular con B. Beaumont y P. Gibart (CRHEA-CNRS, Valbonne), que proporcionaron los sustratos de GaN; T. McCormack (Trinity College, Dublin), por diseños de dispositivos; y P. Maaskant (NMRC, Cork) por medidas y discusiones. Asimismo se agradece la ayuda de M. Verdú y F.J. Sánchez (CIDA, Madrid) con la tecnología, y de P. Vennegues (CRHEA-CNRS, Valbonne) y A. Trampert, B. Jenichen, O. Bryt, U. Jahn, y K. Ploog (PDI, Berlin) en algunas etapas de la caracterización.

Referencias

- [1] F. Calle, F.B. Naranjo, S. Fernández, M.A. Sánchez-García, E. Calleja y E. Muñoz, Phys. Stat. Sol. (A) **192**, 277 (2002).
- [2] E. Calleja, M.A. Sánchez-García, F. Calle, F.B. Naranjo, E. Muñoz, U. Jahn, K. Ploog, J. Sánchez, J.M Calleja, K. Saarinen, Y P- Hautojärvi, Mat. Sci. Eng. B **82**, 2 (2001).
- [3] M.A. Sánchez-García, J.L. Pau, F.B. Naranjo, A. Jiménez, S. Fernández, J. Ristic, F. Calle, E. Calleja, Y E. Muñoz, Mat. Sci. Eng. B **93**, 190 (2002).
- [4] F.J. Sánchez, F. Calle, M.A. Sánchez-García, E. Calleja, E. Muñoz, C.H. Molloy, D.J. Somerford, J.J. Serrano, Y J.M. Blanco, Semicond. Sci. Technol. **13**, 1130-33 (1998).
- [5] F.B. Naranjo, M.A. Sánchez-García, J.L. Pau, A. Jiménez, E. Calleja, E. Muñoz, J. Oila, K. Saarinen, Y P. Hautojärvi, Phys. Stat. Sol. (A) **180**, 97 (2000)
- [6] M.A. Sánchez-García, E. Calleja, F.B. Naranjo, F.J. Sánchez, F. Calle, E. Muñoz, A.M. Sánchez, F.J. Pacheco, Y S.I. Molina, J. Crystal Growth **201-202**, 415 (1999).
- [7] S. Fernández, F.B. Naranjo, F. Calle, M.A. Sánchez-García, E. Calleja, A. Trampert, Y K.H. Ploog, Semicond. Sci. Technol. **16**, 913-917 (2001).
- [8] S. Fernández, F.B. Naranjo, F. Calle, M.A. Sánchez-García, E. Calleja, P. Vennegués, A. Trampert, Y K.H. Ploog, Appl. Phys. Lett. **79**, 2136-8 (2001).
- [9] F.B. Naranjo, M.A. Sánchez-García, F. Calle, E. Calleja, B. Jenichen, Y K.Ploog, Appl. Phys. Lett. **80**, 231-233 (2002).
- [10] F.B. Naranjo, S. Fernández, M.A. Sánchez-García, F. Calle, E. Calleja, A. Trampert, Y K.Ploog, Mat. Sci. Eng. B **93**, 131 (2002).
- [11] F.B. Naranjo, S. Fernández, M.A. Sánchez-García, F. Calle, Y E. Calleja, Appl. Phys. Lett. **80**, 2198 (2002).

6.7 Transistores HEMT de AlGaIn/GaN para microondas

Introducción

Los semiconductores de nitruro de galio (GaN) y su aleación de AlGaIn, han surgido en la última década como uno de los materiales más prometedores en el campo de los transistores de efecto campo, para aplicaciones de alta potencia y alta temperatura. Su principal ventaja es contar con un gap ancho, lo que le confiere gran estabilidad térmica y una alta tensión de ruptura (3 MV/cm frente a 0.5 MV/cm para InAlAs/InGaAs). Junto con el gran atractivo que presentan estos dispositivos desde el punto de vista tecnológico, los nitruros muestran a su vez nuevos fenómenos físicos, tales como la existencia de elevados campos de polarización, o grandes discontinuidades de bandas, que los distingue de los semiconductores III-V convencionales.

A pesar de los prometedores resultados publicados [1], estos distan mucho aún de los predichos mediante cálculos teóricos. Dos son las razones principales de esta discrepancia. Una de ellas es la calidad del material, debido fundamentalmente a la falta de un sustrato adecuado para el crecimiento homoepitaxial del GaN. Por otro lado, la poca madurez que presenta el procesamiento tecnológico hace que parámetros tan importantes como resistencias de contactos, y corrientes de fugas estén limitando enormemente las características potenciales de estos dispositivos. Algunas de las consecuencias de estas limitaciones se reflejan en la dispersión RF-DC, conocida como colapso de corriente, que parece estar causada por atrapamiento (*trapping*) de portadores por centros profundos localizados en determinadas regiones de la estructura del dispositivo. La carga asociada a estos portadores atrapados provoca una región de depleción en el canal de conducción, lo que provoca una severa degradación en las características de corriente del drenador.

Objetivos

El objetivo final es la fabricación de transistores de potencia capaces de operar en alta frecuencia (banda X), y con potencias de salida elevadas [2]. Sin embargo, en este primer periodo, y antes de establecer retos de potencia y/o frecuencia de trabajo de los dispositivos, se han abordado objetivos parciales imprescindibles para la obtención de dispositivos como son: diseño de dispositivos, mejorar la tecnología de fabricación y reproducibilidad, así como la caracterización de dispositivos (definir parámetros representativos del dispositivo final).

Con vista a una mayor libertad de parámetros de diseño del dispositivo, también se ha afrontado el reto de crecer las heteroestructuras de AlGaIn/GaN por Epitaxia de Haces Moleculares (MBE) en el ISOM. Esta iniciativa además se ve apoyada por el hecho de que esta técnica ha sido la más eficiente en el crecimiento de dispositivos similares basados en GaAs. Esto permite poder determinar la concentración de Al y espesor de la barrera de AlGaIn, y por lo tanto definir la concentración de carga del canal bidimensional (2D).

Para llevar a cabo estos objetivos se trabaja en varios ámbitos que cubren todo el espectro de posibilidades de mejora de los dispositivos HEMT de GaN. En los siguientes apartados se hace un resumen de los mismos, haciendo hincapié en las mejoras más significativas obtenidas hasta la fecha.

Desarrollo de máscaras

Se ha realizado un esfuerzo en el diseño de dispositivos, optimizados en base a los resultados experimentales obtenidos y a la tecnología a nuestro alcance. Como resultado de este estudio, se diseñó y fabricó una máscara de procesado para fotolitografía óptica de contacto, que contiene transistores con geometría de puerta en forma de T y de U, con longitudes de puerta entre 0.5 y 5 μm y con anchuras de puerta entre 75 y 1000 μm , en total 28 diseños distintos que permitirán la optimización del diseño final del dispositivo. Con objeto de comprobar la correcta realización de cada uno de los procesos tecnológicos relevantes en la fabricación, y monitorizar la uniformidad de los parámetros del material, cada bloque de transistores dispone de una zona de control del procesado que incluye barras Hall así como estructuras MIM, TLM, diodos Schottky, etc. El resultado del procesado de uno de estos dispositivos se puede ver en la Figura 1.

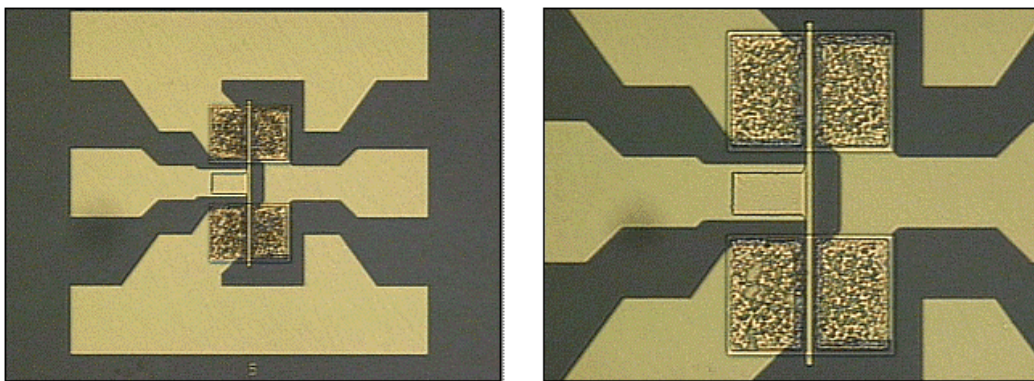


Fig. 1.- Transistor en forma de T fabricado en el ISOM.

Fabricación de transistores

En el procesado de transistores de GaN, se pueden distinguir las siguientes etapas: aislamiento de dispositivos (técnicas de ataque), contactos óhmicos, barreras Schottky y pasivación, las cuales deben ser optimizadas por separado. Una vez procesado el dispositivo se lleva a cabo la deposición de pistas de Au, para facilitar su manipulación [3]. En los siguientes apartados describimos someramente las características de cada uno de ellos, así como los últimos resultados obtenidos.

a) Aislamiento de dispositivos

El aislamiento se ha llevado a cabo por medio de *Ion Beam Milling*, usando un haz de Ar^+ . Para obtener aislamientos del orden de 5 $\text{M}\Omega$, se vio que era necesario realizar ataques de 200 nm de profundidad. Por otra parte, se está poniendo a punto un sistema de *Reactive Ion Etching* (RIE) basado en Cl, que esperamos que mejore las características de aislamiento y por tanto el funcionamiento del dispositivo terminado.

b) Contactos óhmicos: fuente y drenador

Para obtener las mayores características de salida del dispositivo es fundamental reducir al máximo las resistencias de contacto ($< 1 \Omega \cdot \text{mm}$). Para ello, se han probado distintos esquemas de metalización y aleados por RTA (Aleado térmico rápido) a diferentes temperaturas y tiempos. Hemos optimizado estos pasos hasta obtener resistencias de contacto de hasta $0.64 \Omega \text{mm}$ usando Ti/Al/Ti/Au (20/100/45/55 nm) y RTA a 850°C durante 60 s.

c) Barreras Schottky: puerta

Con la finalidad de mejorar las características de salida y frecuencia de los dispositivos es necesario tener cortas longitudes de puerta, y dado que el límite de la litografía óptica está entorno a $1 \mu\text{m}$ ha sido necesaria su definición mediante litografía por haz de electrones. Las barreras Schottky se han optimizado teniendo en cuenta su calidad eléctrica (factor de idealidad, altura de la barrera y bajas corrientes de fuga), así como su estabilidad térmica. Los mejores resultados se obtuvieron con Pt/Ti/Au para los contactos realizados por fotolitografía óptica de contacto [4] y Ni/Au para las puertas realizadas por litografía por haz de electrones. Hemos obtenido longitudes de puerta de $1 \mu\text{m}$ para fotolitografía y de hasta $0.19 \mu\text{m}$ para litografía por haz de electrones [5-6].

d) Pasivación

Independientemente de la ya conocida necesidad de pasivar la superficie de los dispositivos para preservarla, en el caso de los dispositivos basados en nitruros además la pasivación parece tener un efecto positivo sobre el *trapping*. Experimentalmente se ha comprobado que la deposición de capas de Si_xN_y pueden minimizar o evitar los efectos del trapping. Por esta razón se ha iniciado una línea de investigación del pasivante por medio de elipsometría y velocidad de ataque, así como por caracterización eléctrica. Hemos usado Si_xN_y como capa pasivante, con diferentes espesores y temperaturas de crecimiento por *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD).

Caracterización de transistores

Siguiendo el esquema presentado en el apartado anterior, se han fabricado una gran cantidad de transistores HEMT (ver Figura 1). Se han utilizado obleas crecidas por Deposición Química de Metalorgánicos en Fase Vapor (MOCVD) y por MBE asistido con fuente de plasma (PA-MBE). Las obleas crecidas por MOCVD son fruto de la colaboración con el Instituto belga INTEC/IMEC, mientras que las crecidas por PA-MBE se obtienen en nuestros laboratorios. La estructura de la capa activa del dispositivo es análoga en ambos casos. En la Figura 2 se puede ver la distribución de capas estándar de una heteroestructura HEMT,

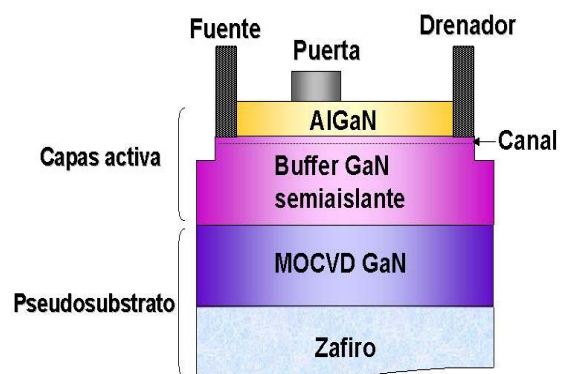


Fig. 2. Distribución de capas de una heteroestructura HEMT

crecida sobre un pseudo-substrato de GaN (capa de GaN sobre zafiro crecida por MOCVD). El espesor típico de la capa *buffer* semiaislante de GaN varían entre 1 y 2 μm , mientras que la barrera puede estar entre 300 y 200 Å, con concentraciones de Al entre el 20 y 40%.

La caracterización de los dispositivos fabricados incluye medidas en DC, pulsado, y medidas en RF de pequeña señal, todas ellas para diferentes longitudes y anchuras de puerta. Como ya se ha dicho anteriormente es fundamental evaluar los distintos efectos de *trapping*, por lo que, para evaluar este fenómeno, hemos comparado las medidas en continua (DC) y en pulsado, obteniendo diferencias significativas en algunas de las obleas procesadas (ver Figura 3).

Atendiendo a su diferente fabricación, dividimos los resultados presentados en este apartado en muestras crecidas por MOCVD y MBE.

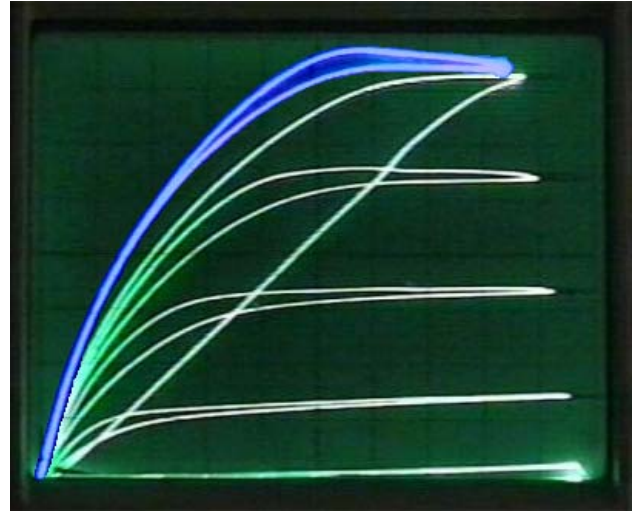


Fig 3.- Fenómeno de colapso de corriente en un transistor de AlGaIn/GaN. La curva azul representa las medidas en continua.

Muestras crecidas por MOCVD

Se ha realizado un estudio y análisis exhaustivo de las muestras crecidas por MOCVD cuyos resultados de caracterización se pueden encontrar en la Tabla 1. En esta Tabla, las muestras denominadas SH son las crecidas con la estructura de capas estándar presentada en la Figura 2 [7]. Las denominadas IH representan uno de los mayores avances en el crecimiento por MOCVD, debido a la inclusión de capas intermedias de AlN en la capa *buffer* de GaN [8]. Como se puede observar, el aumento en las características es significativo entre una estructura y la otra. A la hora de escribir esta memoria, los últimos resultados mostraban una mejora significativa en las características, obteniendo corrientes de saturación de hasta 1.5 A/mm para transistores con longitudes de puerta de 0.2 μm .

Muestra	L_G (μm)	W_G (μm)	I_{DS}^{max} (mA/mm)	g_M (mS/mm)	f_t (f_{max}) (GHz)
$\Omega 505c$ (IH)	0.35	75	1016.1	202.7	17.5 (40.0)
$\Omega 504$ (SH)	0.25	75	461.2	86.6	16.3 (23.4)
$\Omega 461$ (IH)	2	150	700.0	128.0	18.1 (24.1)
$\Omega 460$ (SH)	2	150	452.0	140.0	--

Tabla 1. Datos de caracterización eléctrica para muestras crecidas por MOCVD con (denominadas IH) y sin (denominadas SH) capas intermedias de AlN.

En los fenómenos de *trapping* no hemos observado una clara tendencia entre dispositivos u obleas, aunque el fenómeno aparece significativamente en bastantes de los dispositivos procesados.

Muestras crecidas por PA-MBE

Se han conseguido capas epitaxiales por PA-MBE con calidad comparable a las crecidas por MOCVD utilizadas como sustrato, como se ha podido comprobar tras una exhaustiva caracterización tanto de los pseudo-sustratos como de las heteroestructuras crecidas. Los dispositivos HEMT fabricados a partir de estas obleas se caracterizaron de la misma forma que los fabricados por MOCVD. Algunos de los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 2.

Muestra	L_G (μm)	W_G (μm)	I_{DS}^{max} (mA/mm)	g_M (mS/mm)	f_t (f_{max}) (GHz)
M609	0.6	75	600	227	10.6 (30.3)
		150	546	199	10.6 (25.2)
M552	0.7	75	1089	165	16.2 (40)
		150	990	154	22.7 (32.9)

Tabla 2.- Datos de caracterización eléctrica para dos de las muestras crecidas por PA-MBE

En cuanto a los estudios de colapso de corriente llevados a cabo por medio de medidas pulsadas en estos transistores, se observó que casi no presentan colapso de corriente (14% de caída máxima), independientemente de la muestra y de la longitud o anchura de puerta analizadas.

Referencias

- 1.- Mishra, U.K.; Parikh, P.; Yi-Feng Wu. *Proceedings of the IEEE* **90**, 1022 (2002).
- 2.- Estos objetivos se están llevando a cabo a través de tres proyectos de investigación. Uno de ellos con la Agencia Espacial Europea (ESA CONTRACT 13519/99/NL/MV), otro con la empresa INDRA a través del programa PROFIT (FIT-020100-2001-201) y el tercero con el Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA P 01 0920B-599).
- 3.- F. Calle, T. Palacios, E. Monroy, J. Grajal, M. Verdú, Z. Bougrioua, I. Moerman, *J. Mat. Sci.: Mat. Electronics*, (aceptado y pendiente de publicación)
- 4.- E.Monroy, F.Calle, T.Palacios, J.Sánchez-Osorio, M.Verdú, F.J.Sánchez, M.T.Montojo, F.Omnès, Z.Bougrioua, I.Moerman, and P.Ruterana, *physica stat. sol. (a)*, **188**, 367 (2001)
- 5.- T.Palacios, F.Calle, E.Monroy, J.Grajal, M.Eickhoff, O.Ambacher, F.Omnès, Z.Bougrioua, I.Moerman, and E.Muñoz; 11th European Heterostructure Technology Workshop, Padova (Italy), (2001).
- 6.- T. Palacios “Nanotecnología para dispositivos de alta frecuencia en nitruros III-V. Aplicación a Filtros SAW y transistores HEMT” Proyecto Fin de Carrera E.T.S.I.Telecomunicación, UPM (2001)

- 7.- Z. Bougrioua, I. Moerman, N. Sharma, R.H. Wallis, J. Cheyns, K. Jacobs, E.J. Thrush, L. Considine, R. Beanland, J.-L. Farvacque, C. Humphreys. *J. Cryst. Growth* **230**, 573 (2001)
- 8.- Z. Bougrioua, I. Moerman, L. Nistor, V. van Daele, E. Monroy, T. Palacios, F. Calle, M. Leroux. *physica stat. sol. (a)*, **195**, 93 (2003)

6.8 Dispositivos de ondas acústicas superficiales (SAW) basados en nitruros

Resumen

Se describen la tecnología y las propiedades de dispositivos de ondas acústicas superficiales (surface acoustic waves, SAW) fabricados sobre películas de nitruros del grupo III, AlN y GaN. Se muestran las excelentes características de estos materiales mediante la realización de filtros SAW con frecuencia central superior a 2.2 GHz. Se analiza asimismo el comportamiento térmico de estos filtros. Finalmente, se describe la integración de un generador de ondas acústicas con un fotodetector metal-semiconductor-metal, para ilustrar la sinergia fruto de tal integración.

Introducción

Los dispositivos de ondas acústicas superficiales (*surface acoustic waves*, SAW) se han convertido en la solución más utilizada para componentes de alta frecuencia en los sistemas de comunicación actuales por su estabilidad, precisión y compacidad [1]. Los filtros SAW constituyen además una plataforma ideal para su utilización como sensores [2], al modificar sus características de operación en función del ambiente externo, con aplicaciones en automoción (sensores de torque y presión), industriales (sensores físicos, de humedad, temperatura, o masa), medioambientales y médicas (sensores químicos y biológicos). Los sensores SAW ofrecen la ventaja adicional de poder transmitir la información sin necesidad de hilos ni de fuente de potencia cercana, lo que permite su uso en lugares de difícil acceso y en atmósferas agresivas.

La estructura de un dispositivo SAW consiste en una lámina de material piezoeléctrico sobre la que se fabrican dos transductores interdigitados (IDT) de tamaño micrométrico, capaces de convertir campos eléctricos de alta frecuencia (MHz-GHz) en ondas acústicas superficiales y viceversa. La figura 1.a muestra el esquema de operación: el IDT de entrada convierte la tensión aplicada en perturbaciones elásticas que se propagan por la superficie del material hasta el IDT de salida, que a su vez las transforma en tensión alterna que entrega a la carga. La onda elástica se excita de manera eficiente cuando la frecuencia de la señal de entrada f es tal que $f = v_s / \lambda$, donde v_s es la velocidad de propagación de la onda en la superficie, y $\lambda = 4d$ la periodicidad del IDT. Así, el rango de frecuencia de trabajo de los dispositivos está limitado por la velocidad de propagación y por los límites impuestos por la resolución litográfica en la fabricación de los electrodos. Para $v_s = 4000 \text{ ms}^{-1}$, con $d = 1 \text{ }\mu\text{m}$, se

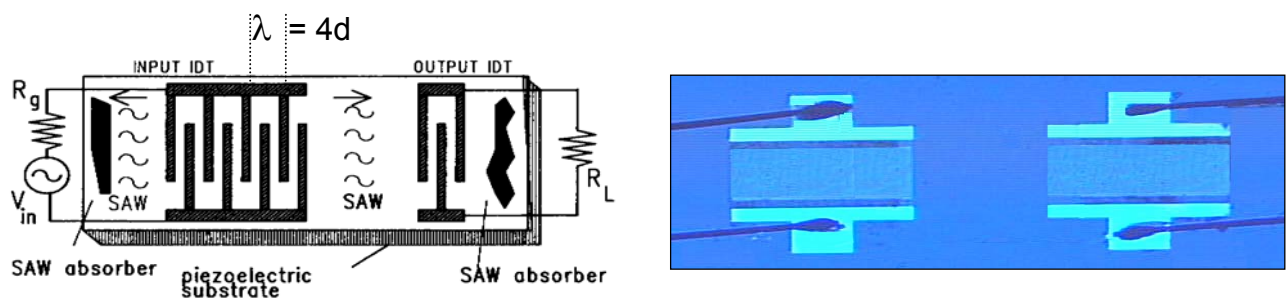


Fig.1. a) Esquema de un dispositivo SAW; b) Filtro SAW en AlN fabricado con litografía electrónica ($d=0.6 \text{ }\mu\text{m}$, $N=100$).

obtienen filtros de frecuencia central 1 GHz. Por su parte, el ancho de banda relativo, $\Delta f/f$, que define la selectividad en frecuencia del filtro, es inversamente proporcional al número de periodos del interdigitado.

Aunque los dispositivos SAW se fabrican habitualmente en cuarzo o LiNbO_3 , hay un enorme interés en identificar nuevos materiales en que puedan alcanzar nuevas o mejores prestaciones. Entre ellos, los nitruros III-N (GaN , AlN) combinan altos valores de velocidad SAW y factor de acoplamiento electro-mecánico con excelente estabilidad térmica y mecánica. Pero, además, su carácter de semiconductores de *gap* directo permite la integración de los dispositivos SAW con otros componentes electrónicos y optoelectrónicos.

En este resumen se recogen la fabricación y caracterización de filtros SAW sobre epicapas de AlGaN para aplicación en microondas, analizando sus prestaciones en función de la temperatura. Finalmente se presenta la integración de un generador SAW y un fotodetector de UV, y se discuten algunas de las nuevas aplicaciones fruto de esta integración.

Experimental

Los filtros SAW se fabricaron sobre capas de AlGaN de espesor entre 1 y 2 μm , crecidas sobre zafiro por técnicas epitaxiales (epitaxia por haces moleculares y deposición química de vapor con precursores metalorgánicos). Mediante microscopía de fuerza atómica y difracción de rayos X se comprobó su excelente calidad morfológica y estructural. La velocidad del sonido sobre la superficie fue determinada por espectroscopía Brillouin en distintas direcciones.

Se utilizó fotolitografía de contacto para la fabricación de IDTs de anchura de dedo y espaciado entre 2 y 6 μm , mientras que los dispositivos con patrones entre 0.5 y 2 μm se realizaron mediante litografía electrónica (ver foto en Fig. 1.b), según un procedimiento específico desarrollado para nitruros y otros materiales aislantes [3]. En todos los casos la distancia entre los electrodos era de 100λ . Tras la litografía se evaporó una capa de 30 nm de Ni, y en un segundo proceso litográfico se realizaron los pads mediante la deposición de la bicapa Ni/Au (30/70 nm).

La función de transferencia de los distintos dispositivos se midió con un analizador de redes HP8510C.

Caracterización de dispositivos SAW

Debido a las diferentes velocidades SAW de AlN ($v_{\text{SAW}} = 5790 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y GaN ($v_{\text{SAW}} = 3693 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) respecto al sustrato de zafiro ($v_{\text{SAW}} = 5495 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), se observan dos comportamientos diferentes [4]. En AlN , por la mayor velocidad de propagación, se produce una onda Rayleigh al aplicar una señal de RF al IDT de entrada, como se observa para dos filtros en la figura 2.a). Sin embargo, en GaN se originan tanto ondas acústicas Rayleigh como Love, esta última a mayor frecuencia. En la figura 2.b se muestra la función de transferencia de un filtro SAW en GaN ($\lambda=2.4 \mu\text{m}$) con ondas Rayleigh y Love a 1.6 GHz and 2.2 GHz. A partir de estas medidas, se determinan velocidades Rayleigh de $\sim 5000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para AlN y de $\sim 3700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para GaN , en buen acuerdo con las medidas de Brillouin. No se ha observado ninguna variación con la orientación.

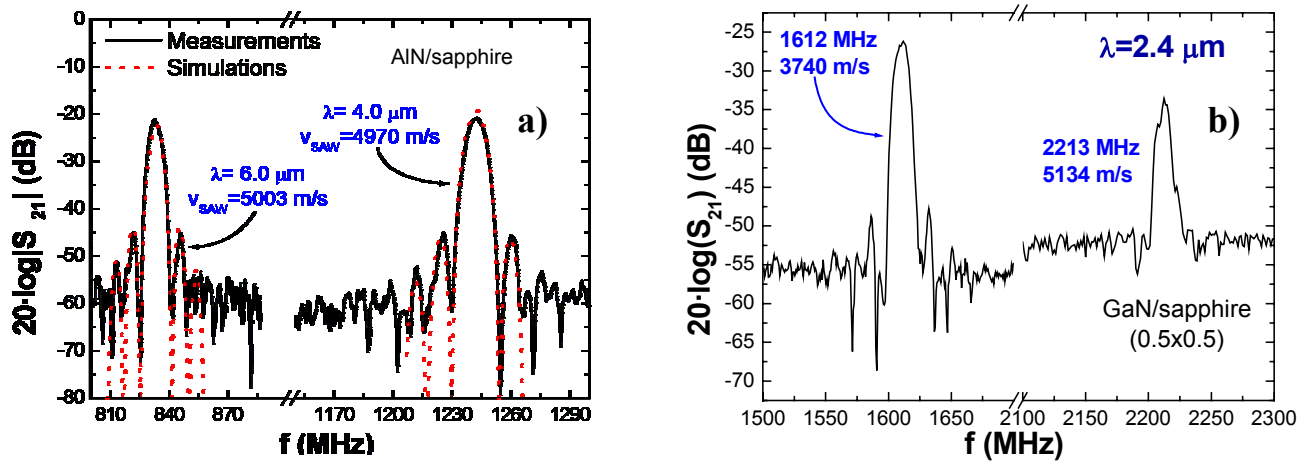


Fig.2. Funciones de transferencia de a) 2 filtros SAW en AlN, y b) un filtro SAW en GaN.

En la figura 3 se ilustra la influencia de la temperatura en la frecuencia de un filtro en AlN de $\lambda=24 \mu\text{m}$. Se estiman coeficientes térmicos (*thermal coefficient of delay*, TCD) de $-68 \text{ ppm}\cdot\text{C}^{-1}$ para AlN y $-43 \text{ ppm}\cdot\text{C}^{-1}$ para GaN. Estos valores son mayores de los esperados para nitruros, probablemente debido a la influencia del sustrato. Para explotar al máximo el potencial de estos dispositivos se deben diseñar filtros de frecuencias más elevadas o utilizar capas de mayor espesor, con objeto de reducir la proporción de onda acústica que se desplaza por el sustrato.

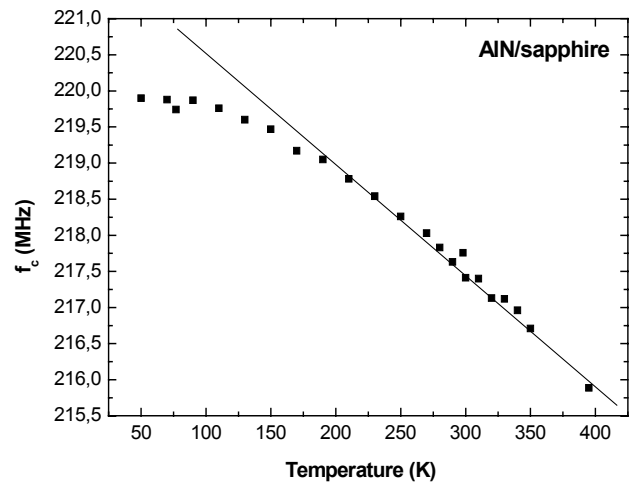


Fig. 3 Influencia de la temperatura en la frecuencia central del filtro SAW en AlN

Integración de SAW con optoelectrónica

Se ha estudiado la interacción de ondas acústicas y fotones para evaluar la posibilidad de sensores remotos. El montaje experimental se ilustra en la Fig. 4. Se dispone de un filtro SAW en GaN con $d=2 \mu\text{m}$. Uno de los IDT se conecta a un generador de señal RF para producir una onda SAW que se propague por la superficie del dispositivo, mientras que el segundo IDT se utiliza como un fotodetector metal-semiconductor-metal (MSM). Al iluminar exclusivamente la región entre los IDTs con luz UV (energía mayor que el gap de GaN), se detecta una corriente en el electrodo de salida. En el experimento se modifican la frecuencia como la potencia del generador de señal RF para observar su efecto en la fotocorriente.

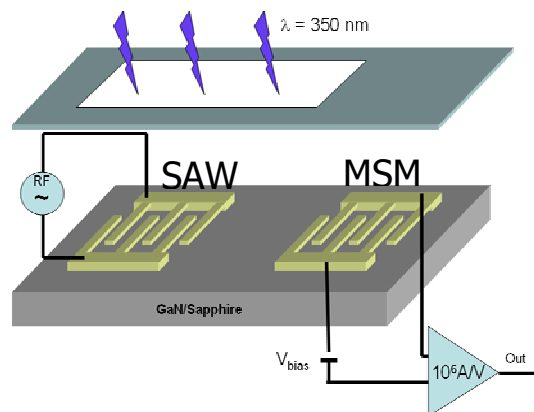


Fig.4. Montaje experimental para la integración de un generador SAW y un fotodetector de UV.

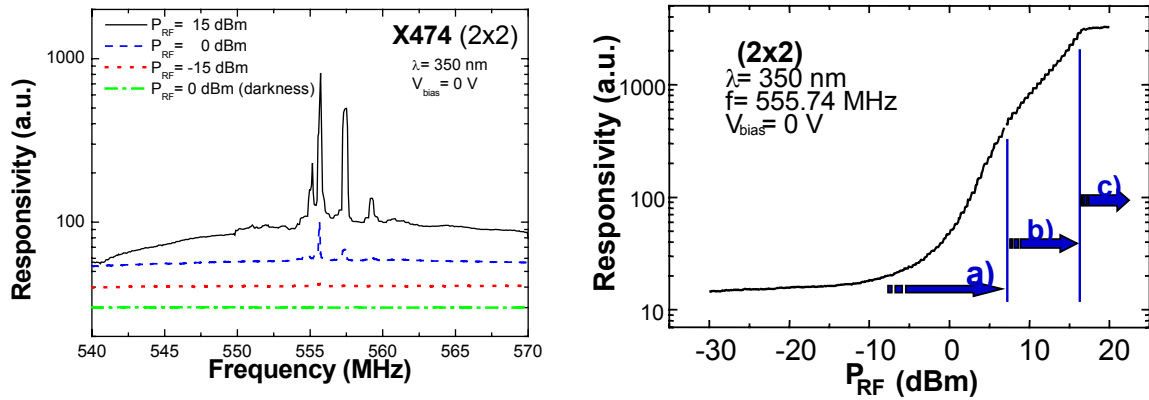


Fig. 5. a) Responsividad espectral de un detector MSM en función de la frecuencia de la señal en el IDT de entrada, para varias potencias. b) Responsividad del sensor remoto a la frecuencia central vs la potencia de entrada..

La figura 5 muestra la responsividad del detector MSM en función de la frecuencia de la señal RF a la entrada. Sin iluminación de la región entre los IDTs la corriente de oscuridad es muy baja, y no depende de la frecuencia RF. Sin embargo, bajo iluminación UV se observa un aumento en la respuesta cuando la frecuencia RF se sintoniza a la frecuencia central del SAW (en este caso de 555 MHz) [4]. Este aumento de la responsividad se debe al barrido de los portadores fotogenerados desde el lugar donde son creados hasta el IDT detector por la ondas acústicas. Sólo a la frecuencia central del filtro la generación de las ondas es eficiente, y en consecuencia el barrido de los pares electrón-hueco. Una vez que los portadores alcanzan el MSM, el campo eléctrico en las regiones de depleción de los contactos Schottky rompe los campos asociados a las ondas SAW y se produce la colección de la fotocorriente. La responsividad del detector puede ser controlada o bien ajustando la frecuencia de la señal de entrada, o modificando su potencia. La elevada especificidad del mecanismo sensor produce factores de calidad mayores de 10000.

Este fotodetector remoto asistido por SAW despierta nuevas expectativas. Entre las posibles aplicaciones se pueden mencionar técnicas como la tomografía y otros dispositivos de imagen, sensores y moduladores acusto-ópticos, etc.

Agradecimientos — Las muestras fueron crecidas por O. Ambacher y M. Eickhoff (Walter Schottky Institut, Berlin), y por F. Omnes (CRHEA-CNRS, Valbonne). Se agradece la colaboración de R. Jiménez y C. Prieto (ICMM-CSIC, Madrid), por la caracterización Brillouin, y de J. Grajal (Dpt. SSR-ETSIT, Madrid), por las medidas de alta frecuencia. Este trabajo está financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto TIC2001-2794).

Referencias

- [1] C. K. CAMPBELL, *Surface acoustic wave devices for mobile and wireless communications*, Academic Press, 1998.
- [2] D. S. BALLANTINE, *Acoustic wave sensors: theory, design, and physico-chemical applications*, Academic Press, 1997.
- [3] T. PALACIOS, F. CALLE, E. MONROY, Y E. MUÑOZ, J. Vac. Sci. Tech. B20, 2071 (2002).
- [4] T. PALACIOS, F. CALLE, J. GRAJAL, E. MONROY, M. EICKHOFF, O. AMBACHER, Y F. OMNÈS, Proc. 2002 IEEE Symp. on Ultrasonics, Munich. October 2002.

6.9 Nanocolumnas de Nitruros del Grupo III

El Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) posee una línea de investigación muy activa enfocada en el crecimiento epitaxial de estructuras semiconductoras mediante la técnica de epitaxia por haces moleculares (MBE). En la actualidad existen dos reactores de MBE: uno dedicado al crecimiento de materiales basados en arsénico (GaAs, AlAs, InAs) y otro a basados en nitrógeno (GaN, AlN, InN).

Los nitruros del grupo III (GaN, AlN, InN) han sido considerados durante muchos años como semiconductores ideales para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos que funcionen en el margen azul-ultravioleta (UV). La posibilidad de sintetizar los distintos compuestos ternarios, hacen que estas aleaciones de *gap* directo cubran un amplio espectro de energías, desde los 1,9 eV (rojo) del InN, pasando por 3,4 eV (UVB) del GaN, hasta los 6.2 eV (UVC) del AlN. Entre las muchas aplicaciones de interés, cabe destacar aquellas relacionadas con la industria de pantallas gráficas, el almacenamiento óptico de datos y la detección de radiación ultravioleta y sus implicaciones a la hora de estudiar la capa de ozono en la atmósfera. La naturaleza química de los enlaces en estos materiales hace que posean una gran estabilidad y resistencia en ambientes corrosivos y/o de alta temperatura, por lo que también son considerados como candidatos ideales para dispositivos de electrónica de alta temperatura o de alta potencia, y resistentes a radiación ionizante.

En la epitaxia por haces moleculares (MBE), el crecimiento de láminas delgadas se produce mediante la interacción de uno o más haces moleculares térmicos con la superficie de un sustrato cristalino a una temperatura determinada en condiciones de ultra alto vacío. Los haces moleculares se obtienen a partir de la evaporación de los elementos correspondientes (Ga, Al, In, As, etc), que se encuentran en forma sólida en células de efusión (tipo Knudsen convencionales). También existen fuentes gaseosas para elementos como el nitrógeno.

En el crecimiento por MBE de nitruros del grupo III, es necesaria la obtención de nitrógeno atómico para que reaccione con los elementos del grupo III, dado que el nitrógeno molecular tiene muy baja reactividad. En nuestro caso, la activación del nitrógeno se obtiene mediante la generación de un plasma utilizando una fuente de radio frecuencia (RF). Los dos parámetros más importantes que controlan el crecimiento por MBE de los Nitruros del grupo III son la temperatura del sustrato y la relación de flujos moleculares (o atómicos) de los elementos III y V (razón III/V) en la superficie de dicho sustrato. Esa razón III/V determina la estequiometría en la superficie de la capa crecida, e influye directamente tanto en la morfología como en las propiedades ópticas y eléctricas de la capa. Razones III/V $\ll 1$ (exceso de nitrógeno) dan lugar a un material formado por nanocolumnas (con diámetros entre 30 y 150 nm) de muy alta calidad cristalina (libre de dislocaciones y defectos) con una altísima eficiencia óptica (Figura 1). Cabe mencionar que la formación y crecimiento de las nanocolumnas se produce de una manera auto consistente (*self-organized*), sin necesidad de ningún proceso tecnológico, e independientemente del sustrato utilizado (silicio, zafiro, carburo de silicio). Son únicamente las condiciones de crecimiento mencionadas anteriormente las que determinan dicha morfología. El exceso de nitrógeno reduce la movilidad superficial del Ga dando lugar a agregaciones (*clusters*) de Ga líquido, a partir de las cuales se inicia el crecimiento vertical de la nanocolumna (crecimiento epitaxial vapor-líquido-sólido). La cantidad de exceso de nitrógeno (razón III/V) determina de esta forma la densidad de nanocolumnas y el diámetro promedio de ellas.

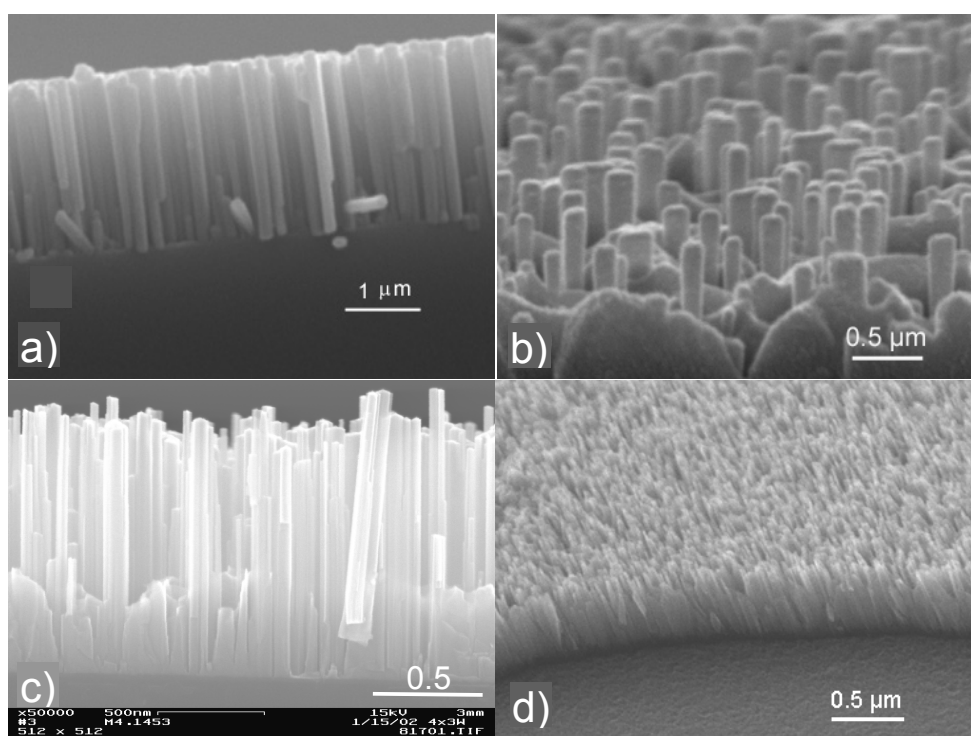


Fig. 1. Crecimiento de Nanocolumnas: (a) GaN sobre zafiro, (b) GaN sobre Si(111)

Durante la última década (1992-2002) se ha producido una gran actividad investigadora en el campo de los Nitruros-III dirigida principalmente a la fabricación de diodos LED y láseres eficientes emitiendo en el azul. Dentro de estos dispositivos, la calidad cristalina del material es fundamental para poder aumentar la eficiencia, necesitándose capas con una muy baja densidad de defectos (dislocaciones). Nanoestructuras y nanocavidades libres de defectos ofrecen un gran atractivo para estas aplicaciones por dos motivos principales. Por un lado se trata de un material cristalino libre de dislocaciones (comprobado por medidas de microscopía electrónica de transmisión, TEM) y por otro también ofrece la posibilidad de confinamiento de carga mediante estructuras cuánticas, dando lugar a dispositivos optoelectrónicos con mayores ganancias ópticas y menores corrientes de umbral. El trabajo realizado en el ISOM en este campo está centrado en el crecimiento por MBE de nanocolumnas de GaN y AlGaN con una calidad cristalina excepcional y una alta eficiencia óptica, sobre diferentes tipos de sustratos (Si(111), Al_2O_3 , SiC) [1].

En el crecimiento del ternario AlGaIn, el contenido de Al se controla por medio del flujo molecular de Al comparado con el flujo total del elemento III (Ga+Al). De esta forma se han crecido heteroestructuras de AlGaIn/GaN/AlGaIn obteniendo discos cuánticos de GaN (de 2 a 4 nm de espesor) como se aprecia en la Figura 2. Emisiones intensas de fotoluminiscencia (PL) y catodoluminiscencia (CL) confirman la existencia de confinamiento cuántico [2].

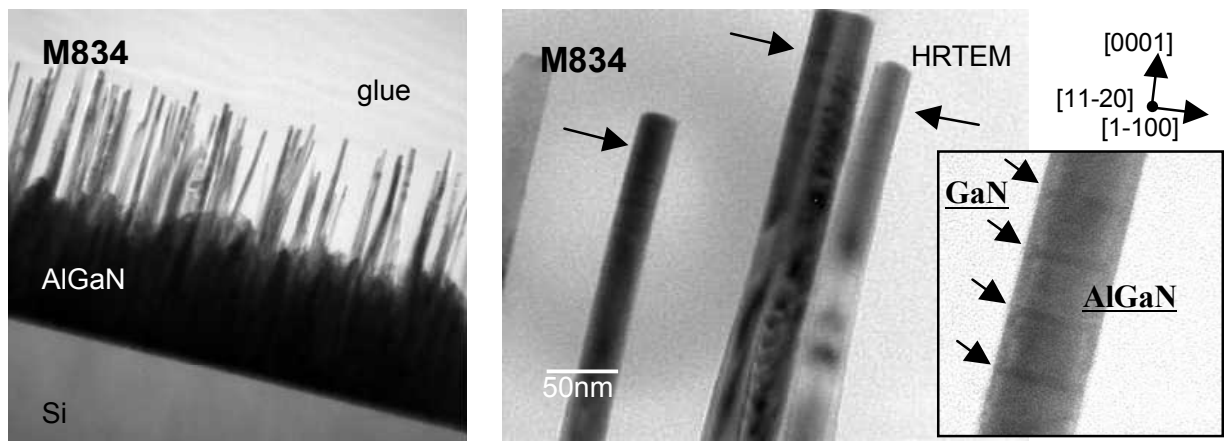


Fig. 2. Imágenes de TEM de alta resolución de una heteroestructura AlGaN/GaN/AlGaN crecida sobre Si(111).

Referencias

- [1] E. Calleja, M.A. Sánchez-García, F. J. Sánchez, F. Calle, F.B. Naranjo, E. Muñoz, U. Jahn, K.H. Ploog, “*Luminescence Properties and Defects in GaN Nanocolumns Grown by Molecular Beam Epitaxy*”, Phys. Rev. B **62**, 16826 (2000).
- [2] J.Ristic, M.A. Sánchez-García, J.M. Ulloa,, E. Calleja, J. Sanchez-Paramo, J.M. Calleja, U. Jahn, A. Trampert, K.H. Ploog, “*AlGaN Nanocolumns and AlGaN/GaN/AlGaN Nanostructures Grown by Molecular Beam Epitaxy*”, Phys. Stat. Solidi A **234**, 717 (2002).

7 PROYECTOS DE I+D

7.1 Proyectos de financiación pública nacional

- 1.- ***"Detectores de infrarrojo basados en superredes con heterouniones III-V"***
CICYT TIC97-0310-C02-01 1997-2000
Investigador Principal: José Luis Sánchez-Rojas Aldavero

- 2.- ***"Láseres sintonizables en la banda de 1-1,3 micras sobre sustratos de GaAs(111)B"***
CICYT TIC98-0826-C02 1998-2001
Investigador Principal: José Ignacio Izpura Torres

- 3.- ***"Desarrollo de Sensores Magnéticos Utilizando Técnicas Litográficas y de Sinterización",***
CICYT MAT98-0824-C02 1998-2000
Investigador Principal: Claudio Aroca Hernández-Ros

- 4.- ***"Detectores de AlGaN de bajo coste para sistema de medida de UV-B"***
CICYT CLI98-1660-CE 1998-2000
Investigador Principal: Elías Muñoz Merino

- 5.- ***"Láseres sintonizables en la banda de 1-1,3 micras sobre sustratos de GaAs(111)B"***
CICYT TIC99-1436 CE 1999-2002
Investigador Principal: José Ignacio Izpura Torres

- 6.- ***"Transistores de GaN para Microondas: Crecimiento Epitaxial por MBE de Nitruros II"***
CICYT MAT98-0823-C03-01 1999-2001
Investigador Principal: Enrique Calleja Pardo

- 7.- ***"Desarrollo de Sistemas Optoelectrónicos para la Monitorización de Contaminantes en Aguas Residuales"***
CAM 07M/008/99 1999-2001
Investigador Principal: Fernando Calle Gómez

- 8.- ***"Fabricación y Evaluación de nuevos dispositivos de nitruro de Galio para transmisores de potencia de microondas"***
INDRA-MCYT (PROFIT) 2001
Investigador Principal: Elías Muñoz Merino

- 9.- ***"Desarrollo de un sistema multisensor para la determinación de carga de grandes baterías y de microsensores magnéticos mediante tecnología planar"***
 CICYT MAT 2000-0330-P4-03 2001 - 2003
 Investigador Principal: Pedro Sánchez Sánchez
- 10.- ***"Detectores de Infrarrojo Mediante Pozo Cuántico para Monitorización de Contaminantes en el Aire"***
 CAM 07M/0039/2001 2001 - 2002
 Investigador Principal: Alvaro de Guzmán
- 11.- ***"Detectores de infrarrojo de heteroestructuras cuánticas sobre GaAs"***
 CICYT TIC 2000-0380-C03 2001 - 2003
 Investigador Principal: José Manuel García Tijero
- 12.- ***"Emisores en 510 nm para Aplicaciones de Alta Temperatura"***
 CICYT TIC 2000-1887-CE 2001 - 2004
 Investigador Principal: Enrique Calleja Pardo
- 13.- ***"Sensores planares y materiales nanoestructurados para su integración en dispositivos magnéticos"***
 MCYT MAT 2001-3554-C02-01 2001 - 2004
 Investigador Principal: Claudio Aroca Hernández-Ros
- 14.- ***"Tecnologías y Aplicaciones de Microsistemas Activos Inteligentes"***
 MCYT TIC 2001-3838-C03-01 2001 - 2004
 Investigador Principal ISOM (proy. coordinado): Elías Muñoz Merino
- 15.- ***"Crecimiento Epitaxial por Haces Moleculares (MBE) de Aleaciones de InGaAsN. Aplicación a Láseres en el rango 1.3 a 1.5 micras"***
 MCYT TIC 2001-3849 2001 - 2004
 Investigador Principal: Enrique Calleja Pardo
- 16.- ***"Tecnología de Fabricación de Dispositivos de Alta Frecuencia/Alta Temperatura basados en Nitruros"***
 MCYT TIC 2001-2794 2001 - 2004
 Investigador Principal: Fernando Calle Gómez

7.2 Proyectos con industrias y organismos nacionales

- 1.- ***"Filtros de Ondas Acústicas Superficiales para Telefonía Celular CDMA Basados en GaAs y AlN"***
AIRTEL Pr. 43700818107 1999-2000
Investigador Principal: Fernando Calle Gómez
- 2.- ***"Asistencia técnica. Estudio de viabilidad Proyecto PROVE"***
CIDA 2000
Investigador Principal: Pedro Sánchez Sánchez
- 3.- ***"Viabilidad HEMTs GaN"***
CIDA 2000
Investigador Principal: Enrique Calleja Pardo
- 4.- ***"Optimización detector IR de QW a 4,4 micras. Desarrollo de matrices"***
CIDA QWIPS-2 2000
Investigador Principal: José Luis Sánchez-Rojas Aldavero
- 5.- ***"Transistores de GaN de potencia para equipos perturbadores multibandas"***
CIDA HEMTS 1003800121 2000 - 2001
Investigador Principal: Fernando Calle Gómez
- 6.- ***"Sensores de llama para gasodomésticos mediante detectores de ultravioleta de GaN"***
PETRI (PTR95-0466-OP)- Mondragón Corporación Cooperativa - UPM 2000 - 2003
Investigador Principal: Elías Muñoz Merino
- 7.- ***"Asistencia Técnica. Realización del Procedimiento de Medida y Caracterización de Sensores Magnéticos"***
CIDA 1003810074 2001
Investigador Principal: Pedro Sánchez Sánchez
- 8.- ***"Diseño y Realización de Matriz de Detectores QWIPs Bicolores"***
CIDA QWIPS-3 2001
Investigador Principal: José Luis Sánchez-Rojas Aldavero
- 9.- ***"Desarrollo de Procedimientos de Medida de Transistores GaN"***
CIDA-HEMTS-2 1003810069 2001
Investigador Principal: Fernando Calle Gómez

- 10.- ***"Optimización de Técnicas de Procesado de Nitruro de Galio"***
 CIDA 1003800088 2001
 Investigador Principal: Elías Muñoz Merino
- 11.- ***"Desarrollo de Sensores Magnéticos"***
 CIDA 1003810048 2001-2002
 Investigador Principal: Pedro Sánchez Sánchez

7.3 Proyectos con financiación internacional

- 1.- ***“Development of GaN Substrates and Components”***
 ESA RFQ/3-9284/98/NL/MV 1999-2001
 Investigador Principal: Elías Muñoz Merino

- 2.- ***“Development of GaN Processing building blocks” (2ª fase)***
 ESA RFQ/3-9284/98/NL/MV 2001-2003
 Investigador Principal: Elías Muñoz Merino

- 3.- ***“Amber/Green emitters targeting high temperature applications”***
 ESPRIT AGHETA IST-1999-10292 2000 - 2003
 Investigador Principal: Enrique Calleja Pardo

- 4.- ***“GaAs based multicolor IR Photodetectors for focal plane array applications”***
 ONR-NICOP-QWIPS N00014 0010 366 2001- 2003
 Investigador Principal: Enrique Calleja Pardo

- 5.- ***“GaAs high index substrates for optoelectronics – GHISO”***
 ESPRIT 35112 GHISO EP 35112 1999-2001
 Investigador Principal: José Ignacio Izpura Torres

- 6.- ***“GaInAsN-based semiconductor heterostructures for 1.5 micron Optoelectronics”***
 ESPRIT-GINA 1.5 IST-2000-23678 2001-2004
 Investigador Principal: José Manuel García Tijero

- 7.- ***“P-type doping of GaN and AlGaIn layers grown by MBE”***
 ONR-NICOP-WIDEBANDGAP N00014-011-0828 2001- 2004
 Investigador Principal: Enrique Calleja Pardo

- 8.- ***“AlGaIn Solar-Blind UV photodetectors fabricated on Si(111) substrates”***
 ONERA-FRANCIA 2001-2003
 Investigador Principal: Elías Muñoz Merino

7.4 Acciones integradas internacionales

- 1.- ***“Fabricación de Transistores HEMT de AlGa_N/Ga_N sobre Si(111) para Microondas”***
Hispano-Alemana (Paul Drude Institut, Berlín) HA-1999-2002 1999-2002
Investigador Principal: Elías Muñoz Merino

- 2.- ***“Detectores de Infrarrojo basados en Pozos y Puntos Cuánticos de InGaAs/GaAs”***
Hispano-Británica (Univ. Sheffield) HB1999-0028 2000-2002
Investigador Principal: José Manuel García Tijero

- 3.- ***“Fabricación de fotodetectores de UV para aplicaciones en medio ambiente”***
Hispano-Marroquí 2000-2001
Investigador Principal: Elías Muñoz Merino

8 PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA

8.1 Publicaciones en revistas y libros

- M. Alcalá, E. López, C. Aroca, M.C. Sánchez, P. Sánchez
"Influence of hydrogen distribution on magnetic properties of amorphous samples"
Eur. Phys. J. B, 14, pp. 473-476, (2000)
- N. Blanco, E. Redondo, F. Calle, I. Martil, G. Gonzalez-Diaz
"High quality Si implanted InGaAs epitaxial layers and their application to n^+p junction devices"
J. Appl. Phys. 87, 3478-3482, (2000)
- A. Bouhdada, M. Hanzaz, P. Gibart, F. Omnès, E. Monroy, E. Muñoz,
"Modeling of the spectral response of $Al_xGa_{1-x}N$ Schottky ultraviolet photodetectors"
J. Appl. Phys. 87 (12), pp 8286-8290, (2000)
- A.F. Braña, C. Díaz-Paniagua, F. Batallan, J.A. Garrido, E. Muñoz, F. Omnes
"Scattering times in AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas from magnetoresistance measurements"
J. Appl. Phys. 88(2), pp 932-937, (2000)
- F. Calle, E. Monroy, E. Muñoz, F. Omnès, J.L. Pau, E. Calleja, F. Jaque, B. Beaumont, P. Gibart
"Nitride Photodetectors for UV Monitoring"
en "Advanced Nanoelectronics: Devices, Materials, and Computing". Memoirs of ISIR, vol. 57, p. 165-166.
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. Osaka, Japón, (2000)
- E. Calleja, M.A. Sánchez-García, F. Calle, F.B. Naranjo, E. Muñoz, U. Jahn, K. Ploog, J. Sánchez, J.M. Calleja, K. Saarinen, P. Hautojärvi
"Molecular beam epitaxy growth and doping of III-nitrides on Si(111): layer morphology and doping efficiency"
Mater. Sci. Eng. B 82, 2, (2001)
- E. Calleja, M.A. Sánchez-García, F.J. Sánchez, F. Calle, F.B. Naranjo, E. Muñoz, U. Jahn, K.H. Ploog, B. Monemar, K. Saarinen, P. Hautojarvi
"Luminescence properties of GaN nanocolumns grown by molecular beam epitaxy"
Phys. Rev. B 62, 16826, (2000)
- S. Cho, A. Majerfeld, A. Sanz-Hervas, J.J. Sánchez, J.L. Sánchez-Rojas, I. Izpura
"Determination of the pyroelectric coefficient in strained InGaAs/GaAs quantum wells grown on (111)B GaAs substrates"
J. Appl. Phys. 90 (2), 915-917, (2001)
- C. Córdoba, I. Aguirre de Cárcer, A. Pérez, A. Sanz, C. Angulo, P. Vila, E. Monroy, E. Muñoz, F. Jaque
"UV-B irradiance at Madrid during 1996, 1997, and 1998"
Journal of Geophy. Research Vol. 105, pp 4903-4906, (2000)
- M. Diaz Michelena, C. Aroca, M.C. Sánchez, E. López, P. Sánchez
"Optical vibrating sample magnetometer"
J. Mag. Mag. Mat. 215-216. Pp. 677-679, (2000)
- J. Dumont, E. Monroy, E. Muñoz, P. Boieriu, F. Omnès, R. Sporken
"Metal/GaN and metal/AlGaIn contacts studied by XPS depth profiles and by electrical measurements"
J. Cryst. Growth 230, pp. 562-567, (2001)

- J. Dumont, R. Caudano, R. Sporken, E. Monroy, E. Muñoz, B. Beaumont, P. Gibart
"Metal/GaN contacts studied by electron spectroscopies"
 MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 5S1, W11.79, (2000)
- C. Favieres, C. Aroca, M.C.Sánchez, V. Madurga
"Matteucci effect as exhibited by cylindrical CoP amorphous multilayers"
 J. Appl. Phys. 87, pp. 1889-1898, (2000)
- S. Fernández, F. B. Naranjo, F. Calle, M.A. Sánchez García, E. Calleja, P. Venegues, A. Trampert, K. H. Ploog
"High-Quality Distributed Bragg Reflectors based on $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ Multilayers grown by Molecular Beam Epitaxy"
 Appl. Phys. Lett. 79, pp 2136, (2001)
- S. Fernández, F. B. Naranjo, F. Calle, M.A. Sánchez García, E. Calleja, P. Venegues, A. Trampert, K. H. Ploog
"MBE-grown High-quality (Al, Ga)N/GaN Distributed Bragg Reflectors for Resonant Cavity LEDs"
 Semiconductor Science and Technology vol. 16, issue 11, pp. 913-917, (2001)
- T. Fleischmann, M. Moran, M. Hopkinson, H. Meidia, J.G. Rees, A.G. Cullis, J.L. Sánchez-Rojas, I. Izpura.
"Strained layer (111)B GaAs/InGaAs single quantum well lasers and the dependence of their characteristics upon indium composition".
 J. Appl. Phys. 89 (9), 4689-4696, (2001)
- J.A. Garrido, B.E. Doutz, J.A. Smart, J.R. Shealy, M.J. Muephy, W.J. Schaff, L.F. Eastman
"Low-frequency noise and mobility fluctuations in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors"
 Appl. Phys. Lett. 76, n 23, pp 3442-3444, (2000)
- A. Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, J. Hernando, E. Calleja, E. Muñoz
"Voltage-tunable two-color quantum well infrared detector with Al-graded triangular confinement barriers"
 Semicond. Sci. Technol. vol. 16, pp 285-288, (2001)
- M. Hanzaz, A. Bouhdada, E. Monroy, E. Muñoz, P. Gibart, F. Omnès
"Modeling of the spectral response of $Al_xGa_{1-x}N$ p-n junction photodetectors"
 Eur. Phys. J. Appl. Phys. 11, pp. 29-34, (2000)
- J. Hernando, J. L. Sánchez-Rojas, J. M. G. Tijero, D. Gonzalez, G. Aragon, R. García, A. Guzman Y E. Muñoz.
"Effect of Indium content on the normal incident photoresponse of InGaAs/GaAs quantum well infrared photodetectors"
 Appl. Phys. Lett. vol. 78, n 16, pp 2390-2393, (2001)
- J.F. Hochedez, P. Bergonzo, M.-C. Castex, P. Dhez, O. Hainaut, M. Sacchi, J. Alvarez, H. Boyer, A. Deneuville, P. Gibart, B. Guizard, J-P. Kleider, P. Lemaire, C. Mer, E. Monroy, E. Muñoz, P. Muret, F. Omnès, J.L. Pau, V. Ralchenko, D. Tromson, E. Verwichte, J.-C. Vial
"Diamond UV detectors for future solar physics missions"
 Diamond and Related Mat. 10, 673-680, (2001)
- J.I. Izpura
"Side contact effects on the capacitance properties of junction devices. Application to III-Nitrogen structures"
 Semicond. Sci. Technol. 16, 243-249, (2001)

- F.K. Koschnick, K. Michael, J.M. Spaeth, B. Beaumont, P. Gibart, E. Calleja, E. Muñoz
"Optically detected magnetic resonance study of defects in undoped, Be-doped, and Mg-doped GaN"
 Journal of Electronic Materials vol. 29, n 12, pp 1351-1355, (2000)
- E. Monroy, F. Calle, E. Muñoz, B. Beaumont, F.Omnes, P. Gibart
"Visible-blind Ultraviolet Photodetectors based on AlGaIn Alloys"
 Inst. Phys. Conf. Ser. vol. 166, p. 431-434. IOP Pub. Ltd., (2000)
- E. Monroy, F. Calle, J. L. Pau, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"AlGaIn-based UV photodetectors"
 J. Cryst. Growth 230, pp.541-547, (2001)
- E. Monroy, F. Calle, J. L. Pau, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"Application and performance of GaN based UV-detectors"
 Phys. Stat. Sol. A 185, pp. 91-97, (2001)
- E. Monroy, F. Calle, J. L. Pau, E. Muñoz, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, F. Omnès, Z. Bougrioua, I. Moerman, E. San Andrés
"Effect of dielectric layers on the performance of AlGaIn-based UV Schottky photodiodes"
 Phys. Stat. Sol. A 188, pp. 307-310, (2001)
- E. Monroy, F. Calle, J.L. Pau, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"Present Status of III-Nitride Based photodetectors"
 Mat. Res. Soc. Symp. Vol 622, T3.7, pp 1-12, (2000)
- E. Monroy, F. Calle, J.L. Pau, E. Muñoz, F. Omnès, P. Gibart
"Low-noise Metal-Insulator-Semiconductor UV Photodiodes based on GaN"
 Electron. Lett., 36, pp. 2096-2098, (2000)
- E. Monroy, F. Calle, J.L. Pau, F.J. Sánchez, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"Analysis and Modeling of $Al_xGa_{1-x}N$ -Based Schottky Barrier Photodiodes"
 J. Appl. Phys. 88, pp 2081-2091, (2000)
- E. Monroy, F. Calle, T. Palacios, J. Sánchez-Osorio, M. Verdú, F. J. Sánchez, M. T. Montojo, F. Omnès, Z. Bougrioua, I. Moerman
"Reliability of Schottky contacts on AlGaIn"
 Phys. Stat. Sol. A 188, pp. 899-903, (2001)
- E. Monroy, F. Vigué, F. Calle, I. Izpura, E. Muñoz, J.-P. Faurie
"Time response analysis of ZnSe and ZnMgBeSe based Schottky barrier photodetectors"
 Appl. Phys. Lett. 77, pp 2761-2763, (2000)
- E. Muñoz, E. Monroy, F. Calle, E. Calleja, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"AlGaIn-based UV detectors and applications"
 LEOS'99 12th Annual Meeting, IEEE 99 CH37009, v.1, p 96-97, (2000)
- E. Muñoz, E. Monroy, F. Calle, F. Omnès, P. Gibart
"AlGaIn Photodiodes for Monitoring the Solar UV Radiation"
 J. of Geophys. Research Vol. 105, pp 4865-4871, (2000)
- E. Muñoz, E. Monroy, J.L. Pau, F. Calle, E. Calleja, F. Omnes, B. Beaumont, P. Gibart
"AlGaIn-based UV Detectors and Applications"
 Phys. Stat. Sol.(a) 180, 293-300, (2000)
- E. Muñoz, E. Monroy, J.L. Pau, F. Calle, F. Omnès, P. Gibart
"III-Nitrides and the UV detection"
 J. Phys. Condensed Matter, 13, pp 7115-7137, (2001)

- P. Muret, A. Philippe, E. Monroy, E. Muñoz, B. Beaumont, F. Omnès, P. Gibart
"Deep levels in MOCVD n-type hexagonal gallium nitride studied by high resolution deep level transient spectroscopy"
 Mater. Sci. Eng. B 82, pp. 91-94, (2001)
- F.B. Naranjo, M.A. Sánchez-García, J.L. Pau, A. Jimenez, E. Calleja, E. Muñoz
"Study of the effects of Be and Mg co-doping in GaN layers"
 Phys. Stat. Sol. (a) 180, 97-102, (2000)
- F. Omnes, B. Beaumont, P. Gibart, E. Monroy, F. Calle, E. Muñoz, E. Dogheche
"Al_xGa_{1-x}N Based UV Photodetectors and Waveguides"
 SOTAPOCS proc. 2000-1, pp 205-219, (2000)
- F. Omnes, E. Monroy, B. Beaumont, F. Calle, E. Muñoz, P. Gibart
"AlGa_N based structures on sapphire for visible to solar blind Schottky barrier UV photodetectors: towards high performance device applications"
 Photodetectors : Materials and Devices V. SPIE Optoelectronics 3948, pp 234-249, (2000)
- F. Omnes, E. Monroy, F. Calle, E. Muñoz, B. Beaumont, P. Gibart
"Al_xGa_{1-x}N based UV visible-blind photodetector device applications"
 OptoElectronics Review 8 (1), pp 43-55, (2000)
- T. Palacios, F. Calle, M. Varela, C. Ballesteros, E. Monroy, F. B. Naranjo, M. A. Sánchez-García, E. Calleja, E. Muñoz
"Wet etching of GaN grown by molecular beam epitaxy on Si (111)"
 Semicond. Sci. Technol. 15, 996-1000 (2000)
- J.L. Pau, E. Monroy, E. Muñoz, F. Calle, M. A. Sánchez-García, E. Calleja
"Fast AlGa_N metal-semiconductor-metal photodetectors grown on Si(111)"
 Electron. Lett. 37, pp. 239-240, (2001)
- J.L. Pau, E. Monroy, F. B. Naranjo, E. Muñoz, F. Calle, M. A. Sánchez-García, E. Calleja
"AlGa_N photodetectors grown on Si(111) by Molecular Beam Epitaxy"
 J. Cryst. Growth 230, pp. 548-552, (2001)
- J.L. Pau, E. Monroy, F. B. Naranjo, E. Muñoz, F. Calle, M. A. Sánchez-García, E. Calleja
"High visible rejection AlGa_N photodetectors on Si(111) substrates"
 Appl. Phys. Lett. 76, pp. 2785-2787, (2000)
- L. Pérez, O. De Abril, M.C.Sánchez, C. Aroca, E. López, P. Sánchez
"Electrodeposited amorphous CoP multilayers with high permeability"
 J. Mag. Mat. 215-216, pp. 337- 339, (2000)
- J.L. Prieto, C. Aroca, E. López, M.C.Sánchez, P. Sánchez
"Magnetostrictive-piezoelectric magnetic sensor with current excitation"
 J. Mag. Mat. 215-216, pp.756-758, (2000)
- J.L. Prieto, P. Sánchez, C. Aroca, E. López, M.C. Sánchez, O. de Abril, L. Pérez
"Improving the characteristics in magnetostrictive-piezoelectric sensors when the viscous interface is removed"
 Sensors and Actuators 84, pp. 338-341, (2000)
- M.A. Rivero, E. López, C. Aroca, M. C. Sánchez, P. Sánchez
"Acoplamiento de paredes magnéticas en sandwiches de películas delgadas"
 Rev. Esp. Cerámica y Vidrio 39, pp. 355-358, (2000)

- M.A. Sánchez-García, F.B. Naranjo, J.L. Pau, A. Jiménez, E. Calleja, E. Muñoz
"Ultraviolet electroluminescence in GaN/AlGaN single heterojunction light emitting diodes grown on Si(111)"
 J. Appl. Phys. 87, pp 1596, (2000)
- J. Sánchez-Páramo, J.M. Calleja, M.A. Sánchez-García, E. Calleja
"Optical investigation of strain in Si-doped GaN films"
 Appl. Phys. Lett. 78, 4124, (2001)
- J.L. Sánchez-Rojas, J.A. Garrido, E. Muñoz
"Tailoring of internal fields in AlGaIn/GaN and InGaIn/GaN heterostructure devices"
 Phys. Rev. B 61, 4, pp 2773-2778, (2000)
- F. Vigué, E. Tournié, J.-P. Faurie, E. Monroy, F. Calle, E. Muñoz
"Visible-blind ultraviolet photodetectors based on ZnMgBeSe Schottky barrier diodes"
 Appl. Phys. Lett. 78, pp. 4192-4194, (2001)
- F. Vigué, P. de Mierry, J.-P. Faurie, E. Monroy, F. Calle, E. Muñoz
"High detectivity ZnSe-based Schottky barrier photodetectors for the blue and near-UV spectral range"
 Electron. Lett. 36, pp.826-827, (2000)

8.2 Contribuciones en Congresos

R.P.Almazán, E.López, M.C.Sánchez, P.Sánchez, C.Aroca

"Fabricación y caracterización de un inductor planar"

I Reunión Nacional de G.E.F.E.S. de la R.S.E.F.

Madrid (España), 2001

R.P.Almazán, L.Pérez, C.Aroca, M.C.Sánchez, E. López, P. Sánchez

"Magnetometric sensors based on planar spiral coils"

Soft Magnetic Materials Conference. SMM'15

Bilbao (España), 2001

F.Calle

"El Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología: Objetivos y actividades"

2ª Reunión Española de Optoelectrónica,

Barcelona (España), 2001

F.Calle, E. Monroy, J.M. Tirado, R. Ranchal, A. Jiménez, T. Palacios, E. Muñoz, J. Grajal, M. Verdú, F. J. Sánchez, and M. T. Montojo, Z. Bougrioua, and I. Moerman

"Fabrication and characterization of AlGaIn/GaN HEMTs"

11th European Heterostructure Technology Workshop

Padova (Italia), 2001

F.Calle, E. Monroy, E. Muñoz, F. Omnès, J.L. Pau, E. Calleja, F. Jaque, B. Beaumont, P. Gibart

"Nitride photodetectors for UV monitoring"

Third Sanken Int. Symp. (SIS-3) on "Advanced Nanoelectronics: Devices, Materials and Computing"

Osaka (Japón), 2000.

F.Calle, J.C. Martínez, J. Crespo, E. Monroy, E. Muñoz

"Viability of a GaN-based ultraviolet optoelectronic system for water quality monitoring"

2ª Reunión Española de Optoelectrónica,

Barcelona (España), 2001

E.Calleja

"Sensores para el Nuevo Siglo"

9as Jornadas de Electrónica Militar

Madrid (España), 2000

E.Calleja

"Growth of GaN on Si(111): Optical and Electrical Characterisation"

2ème Ecole Thematique du CNRS: Les Nitrures d'Elements III.

Orcières-Merlette (Francia), 2000

E.Calleja, M.A. Sánchez, F. Calle, F.B. Naranjo, E. Muñoz, U. Jahn, K. Ploog, J. Sánchez, J.M. Calleja

"MBE growth and doping of III-nitrides on Si(111): layer morphology and doping efficiency"

European Materials Research Society

Strasbourg (Francia), 2000

E.Calleja, M.A. Sánchez-García, F. Calle, F.B. Naranjo, E. Muñoz

"Growth and Doping of III-Nitrides by MBE"

TMS Workshop on "Doping, Dopants, and Carrier Dynamics in Wide Gap Semiconductors"
Copper Mountain, Colorado (USA), 2000

B.Corbett, P. Maaskant, M. Akhter, J. D. Lambkin, P. Gibart, P. de Mierry, D. Schenk, B. Beaumont, M-A Poisson, N. Proust, E. Calleja, M. A. Sánchez, F. Calle, T. McCormack, E. O'Reilly, D. Lancefield, A. Crawford, M Kamal-Saadi, K. Panzer, H. White

"High Temperature Nitride Sources for Plastic Optical Fibre Data Buses"

10th Int. Plastic Optical Fibres Conference
Amsterdam (Holanda), 2001

M.Eickhoff, O. Ambacher, G. Steinhoff, J. Schalwig, R. Neuberger, T. Palacios, E. Monroy, F. Calle, G. Müller, M. Stutzmann

"Novel Sensor Applications of group-III nitrides"

MRS Fall Meeting,
Boston (USA), 2001

S.Fernández, F.B. Naranjo, F. Calle, E. Calleja, A. Trampert, K.H. Ploog

"High-quality 10-period AlGaIn/GaN Bragg reflectors grown by MBE"

3ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos
Granada (España), 2001

S.Fernández, F.B. Naranjo, F. Calle, E. Calleja, A. Trampert, K.H. Ploog

"Growth and Characterization of High Quality Ten-period AlGaIn/GaN Bragg reflectors grown by MBE"

European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

S.Fernández, F.B. Naranjo, F. Calle, E. Calleja, M. Varela, A.R. Landa-Cánovas, C. Ballesteros

"MBE-grown AlGaIn/GaN distributed Bragg reflectors for green resonant cavity LEDs"

2ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL-01
Barcelona (España), 2001

A.Guzmán, E. Luna, J.Hernando, J.M.G.Tijero, D.Gonzalez, G.Aragón, R.García, J.L.Sánchez-Rojas

"Transiciones intersubbanda en pozos cuánticos GaAs/AlGaAs e InGaAs/GaAs".

I Reunión Nacional de G.E.F.E.S. de la R.S.E.F.
Madrid (España), 2001

A.Guzmán, J.Hernando, E. Luna, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, E.Calleja, E.Muñoz, G.Vergara, M.T. Montojo, F.J. Sánchez, R.Almazán, M. Verdú

"Optimization of AlGaAs/AlAs/GaAs quantum well infrared detector structures"

10th European Heterostructure Technology Workshop (HETECH)
Günzburg, Ulm (Alemania), 2000.

J.Hernando, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, A. Guzmán y E. Muñoz.

"Normal-incident photoresponse of InGaAs/GaAs quantum-well infrared photodetectors"

6th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells
Monterrey, California (USA), 2001

- J.Hernando, J.L. Sánchez-Rojas, J.M.G. Tijero, A. Guzmán y E. Muñoz.
"High In content InGaAs/GaAs quantum well infrared photodetectors",
 17th biennial IEEE Cornell University Conference on advanced concepts in high speed semiconductor devices and circuits"
 Itaca, New York (USA), 2000
- E.Luna, J.L. Sánchez-Rojas, A. Guzmán, J.M.G. Tijero, J.Hernando, E.Calleja and E. Muñoz.
"Modulation-doped quantum well infrared detectors for photovoltaic detection in 3-5 μm "
 6th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells".
 Monterey, California (USA), 2001
- M.Maicas, M. Rodriguez, E. López,C.Aroca, P. Sánchez, M.C.Sánchez
"Magnetic switching fields in square monolayer and bilayer nanodots"
 Simulation of Physical Phenomena in Technological Applications
 Madrid (España), 2001
- M.Maicas, M.A. Rivero,C.Aroca, P. Sánchez, E. López, M.C.Sánchez
"Micromagnetic structures in square magnetic nanodots"
 Joint European Magnetic Simposia. JEMS'01
 Grenoble (Francia), 2001
- M.D.Michelena,F.Montero,C.Aroca, P. Sánchez, E. López, M.C.Sánchez
"Piezoelectric-magnetostrictive magnetic sensors using stripe actuators"
 Joint European Magnetic Simposia. JEMS'01
 Grenoble (Francia), 2001
- E.Monroy, F. Calle, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"Present status of III-Nitride UV Photodetectors"
 Wide Bandgap Electronic Devices. MRS Spring Meeting.
 San Francisco (USA), 2000
- E.Monroy, F. Calle, J.L. Pau, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"Application and performance of GaN based UV-detectors"
 Heraeus Seminar on "New Materials for Multifunctional Sensor Applications
 Munich (Alemania), 2000.
- E.Monroy, F. Calle, J.L. Pau, E. Muñoz, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"AlGaIn-based UV Photovoltaic detectors"
 4th European GaN Workshop
 Nottingham (Reino Unido), 2000
- E.Monroy, F. Calle, J.L. Pau, E. Muñoz, M. Verdú, F.J. Sánchez, M.T. Montojo, F. Omnes, Z. Bougrioua, I. Moerman
"Effect of dielectric layers on the performance of AlGaIn-based UV Schottky photodiodes"
 Int. Conf. Nitride Semiconductor - 2001
 Denver (USA), 2001.

E.Monroy, F. Calle, T. Palacios, J. Sánchez-Orsorio, M. Verdú, F.J. Sánchez, M.T. Montojo, F. Omnes, Z. Bougrioua, I. Moerman
"Reliability of Schottky contacts on AlGaN"
Int. Conf. Nitride Semiconductor - 2001
Denver (USA), 2001.

E.Muñoz, E. Monroy, J.L. Pau, F.Calle, M.A. Sánchez, E.Calleja, F.Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"(AlGa)N Ultraviolet Photodetectors on sapphire and Si substrates"
Int. Workshop "Physics of Light-Matter Coupling in Nitrides".
St. Nectaire-Clermont Ferrand (Francia), 2000.

E.Muñoz, E. Monroy, J.L. Pau, F. Calle, E. Calleja, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"AlGaN-based UV Detectors and Applications"
Int. Symp. Blue Laser and LED 2000
Zeuthen (Alemania), 2000

E.Muñoz, E. Monroy, J.L. Pau, F. Calle, M.A. Sánchez, E. Calleja, F. Omnès, B. Beaumont, P. Gibart
"(AlGa)N Ultraviolet Photodetectors on sapphire and Si substrates"
Workshop Compound Semiconductors and Integrated Circuits, WOCSDICE
Atenas (Grecia), 2000

F.B.Naranjo, M.A. Sánchez-García, J.L. Pau, A. Jimenez, E. Calleja, E. Muñoz
"GaN-based ultraviolet light emitting diode on Si(111)"
3rd International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes
Berlín (Alemania), 2000

F.B.Naranjo, S. Fernández, M.A. Sánchez-García, F. Calle, E. Calleja, A. Trampert, K.H. Ploog
"Structural and Optical Characterization of Thick InGaN Layers and InGaN/GaN MWQs grown by MBE"
European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

F.Omnès, E. Monroy, B. Beaumont, E.H. Dogheche, F. Calle, E. Muñoz, P. Gibart
"AlGaN based UV photodetectors and waveguides"
State-of-the-art Program on Compound Semiconductors, 32nd Int. Symp. of the Electrochemical Society
Toronto (Canadá), 2000

F.Omnès, E. Monroy, B. Beaumont, F. Calle, E. Muñoz, P. Gibart
"AlGaN based structures on sapphire for visible-blind Schottky-barrier UV photodetectors: towards high performance device applications"
Photonics SPIE Int. Symp. - Optoelectronics 2000.
San Jose (USA), 2000

T.Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, C. Prieto
"Nanotechnology for SAW devices on AlN epilayers"
European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

T.Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher and C. Prieto
"Nanotechnology for SAW devices on AlN Epilayers "
11th International Travelling Summer School in Microwaves and Lightwaves.
Madrid (España), 2001

T.Palacios, F. Calle, E. Monroy, J. Grajal, M. Eickhoff, O. Ambacher, F. Omnès, Z. Bougrioua, I. Moerman, and E. Muñoz
"Sub-micron technology in group-III nitrides: Application to electronic devices"
11th European Heterostructure Technology Workshop
Padova (Italia), 2001

T.Palacios, F. Calle, E. Monroy, O. de Abril, C. Prieto, C. Zaldo
"Design and processing of SAW devices on AlN epilayers"
3ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos
Granada (España), 2001

J.L.Pau, E. Monroy, F. Naranjo, E. Muñoz, F. Calle, M.A. Sánchez-García, E. Calleja
"AlGaN photodetectors grown on Si(111) by molecular beam epitaxy"
4th European GaN Workshop
Nottingham (Reino Unido), 2000

J.L.Pau, E. Monroy, M. A.Sánchez-García, E. Calleja, E. Muñoz
"AlGaN ultraviolet photodetectors grown by molecular beam epitaxy on Si(111) substrates"
European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

J.L.Pau, F.B. Naranjo, A. Jiménez, M.A Sánchez-García, E.Calleja, E. Muñoz
"Optical Spectroscopy of AlGaN/GaN HFET structures"
European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

J.L.Pau, F.B. Naranjo, A. Jiménez, M.A Sánchez-García, E.Calleja, E-Muñoz
"Growth of AlGaN on Si(111), Al₂O₃ (0001) and GaN (001) by Plasma-Assisted MBE"
European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

L.Pérez, K. Attenborough, J. De Boeck, J.P. Celis, C. Aroca, P. Sánchez, E. López, M.C. Sánchez
"Magnetic properties of CoNiFe alloys electrodeposited under potential and current control conditions"
Joint European Magnetic Simposia. JEMS'01
Grenoble (Francia), 2001

L.Pérez, O. De Abril, E. López, M.C. Sánchez, P. Sánchez, C. Aroca
"Materiales magnéticos electrodepositados para su aplicación en nuevos dispositivos"
I Reunión Nacional de G.E.F.E.S. de la R.S.E.F.
Madrid (España), 2001

R.Ranchal, M. Torija, E. López, M.C. Sánchez, P. Sánchez, C. Aroca
"Estudio de propiedades eléctricas y magnéticas en películas de Permalloy/Cu/Permalloy"
I Reunión Nacional de G.E.F.E.S. de la R.S.E.F.
Madrid (España), 2001

R.Ranchal, M. Torija, E. López, M.C.Sánchez, C.Aroca, P. Sánchez
"Magnetoresistance in permalloy-copper-permalloy thin films"
Trends on Nanotechnology 2001
Segovia (España), 2001

R.Ranchal, M. Torija, E. López, C.Aroca, P. Sánchez, M.C.Sánchez
"Magnetoresistance in sandwiches of soft magnetic materials"
"Soft Magnetic Materials Conference". SMM'15
Bilbao (España), 2001

J.Ristic, M.A. Sánchez-Garcia, E. Calleja, A. Perez-Rodriguez, A. Roman-Rodriguez, C. Serre
"Growth of GaN layers on SiC/Si(111) substrates by molecular beam epitaxy"
European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

M.A.Rivero, E.López, M.C.Sánchez, P.Sánchez, C.Aroca
"Acoplamiento magnético en microestructuras de película delgada tipo sandwich"
I Reunión Nacional de G.E.F.E.S. de la R.S.E.F.
Madrid (España), 2001

M.A.Rivero, M. Maicas, C. Aroca, E. López, M.C.Sánchez, P. Sánchez
"Magnetic domain coupling in nano and micro arrays of square bilayer films"
Trends in Nanotechnology
Toledo (España), 2000

M.A.Rivero, M. Maicas, E. López, C.Aroca, P. Sánchez, M.C.Sánchez
"Magnetoimpedance in magnetic bilayers of Permalloy/Copper/Permalloy"
Soft Magnetic Materials Conference. SMM'15
Bilbao (España), 2001

J.Rubio-Zuazo, R.J. Jiménez-Rioboó, C. Prieto, T. Palacios, F. Calle, E. Monroy, M.A. Sánchez-García
"Brillouin Characterization of the acoustic-waves phase-velocity in AlGaIn epilayers Brillouin Characterization of the acoustic-waves phase-velocity in AlGaIn epilayers"
European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001
Strasbourg (Francia), 2001

M.A.Sánchez, E. Calleja, E. Muñoz, F. Calle, F. Naranjo, J.L. Pau, A. Jiménez, S. Fernández, J. Ristic
"Growth of III-Nitrides on Si(111) and GaN templates: challenges and prospects"
Advanced Workshop: Future Trends in Microelectronics.
Ile de Bendor (Francia), Junio 2001.

A.M.Sánchez, F.J. Pacheco, S.I. Molina, R. García, P. Ruterana, F. Calle, T.A. Palacios, M.A. Sánchez, E. Calleja
"Influence of AlN-buffer layer thickness on the inversion domain distribution of GaN grown on Si(111) substrates"
European Material Research Symposium
Strasbourg (Francia), 2001

A.M.Sánchez, F.J. Pacheco, S.I. Molina, R. Garcia, P. Ruterana, G. Nouet, M.A. Sánchez-Garcia, E. Calleja

"The origin of inversion domains in GaN grown by MBE on (111)Si"

European Material Research Symposium

Strasbourg (Francia), 2001

M.A.Sánchez-García

"Crecimiento y caracterización de Nitruros del grupo III por epitaxia de haces moleculares"

I Reunión Nacional de G.E.F.E.S. de la R.S.E.F.

Madrid (España), 2001

M.A.Sánchez-García, J.L. Pau, F.Naranjo A. Jiménez, S. Fernández, J. Ristic, F. Calle, E. Calleja and E. Muñoz

"Plasma-assisted MBE growth of group-III nitrides: from basics to device applications"

European Material Research Symposium, Spring Meeting 2001

Strasbourg (Francia), 2001

H.P.D.Schenk, E. Feltin, M. Laügt, P. Vennegues, O. Tottereau, P. de Mierry, M. Vaille, P. Gibart, S. Fernández, F. Calle

"Study of AlGaIn/GaN and AlN/GaN Bragg mirrors grown on Al₂O₃ and Si(111) by MOVPE"

Int. Conf. Nitride Semiconductor - 2001

Denver (USA), 2001.

8.3 Conferencias invitadas

Fernando Calle Gómez

El Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología: Objetivos y actividades
OPTOEL'01, 2ª Reunión Española de Optoelectrónica, Barcelona (España), Julio 2001.

Enrique Calleja Pardo

"Growth and Doping of III-Nitrides by MBE"

TMS Workshop on "Doping, Dopants, and Carrier Dynamics in Wide Gap Semiconductors",
Copper Mountain, Colorado (USA), 2000

Enrique Calleja Pardo

"MBE Growth and Doping of III-Nitrides on Si(111): Layer Morphology and Doping Efficiency"

European MRS Conference, SymposiumC: Group III Nitrides, Strasbourg (Francia), 2000

Enrique Calleja Pardo

"Growth of GaN on Si(111): Optical and Electrical Characterisation"

2^{ème} Ecole Thematique du CNRS: Les Nitrures d'Elements III. Orcières-Merlette (Francia),
2000

Enrique Calleja Pardo

"La Física en la Revolución de la Información y las Comunicaciones"

Universidad de Santander, Facultad de Ciencias, Santander (España), 2000

Enrique Calleja Pardo

"AlGaN-based UV Detectors and Applications"

Int. Symp. Blue Laser and LED 2000. Zeuthen (Alemania), 2000

Enrique Calleja Pardo

"(AlGa)N Ultraviolet Photodetectors on sapphire and Si substrates"

Int. Workshop "Physics of Light-Matter Coupling in Nitrides". St. Nectaire-Clermont Ferrand
(Francia), 2000

Eva Monroy Fernández

"Present status of III-Nitride UV Photodetectors"

Wide Bandgap Electronic Devices. 2000 MRS Spring Meeting. San Francisco (USA), 2000.

Eva Monroy Fernández

"AlGaN-based UV Photovoltaic detectors"

4th European GaN Workshop. Nottingham (Reino Unido), 2000.

Eva Monroy Fernández

Application and performance of GaN based UV-detectors,

Heraeus Seminar on "New Materials for Multifunctional Sensor Applications". Munich
(Alemania), 2000.

Elías Muñoz Merino

"AlGaN-based UV Detectors and Applications"

Int. Symp. Blue Laser and LED 2000. Zeuthen (Alemania), 2000

Elías Muñoz Merino

"(AlGa)N Ultraviolet Photodetectors on sapphire and Si substrates"

Int. Workshop "Physics of Light-Matter Coupling in Nitrides". St. Nectaire-Clermont Ferrand (Francia), 2000

Elías Muñoz Merino

"Gallium Nitride Substrates and Components"

Wide Band Gap Technology Meeting, ESA-ESTEC, Noordwijk (Noruega), 2001

Elías Muñoz Merino

"(AlGa)N Ultraviolet Photodetectors on sapphire and Si substrates"

Workshop Compound Semiconductors and Integrated Circuits, WOCSDICE. Atenas (Grecia), 2000.

Miguel Angel Sánchez-García

"Plasma-assisted MBE growth of group-III nitrides: from basics to device applications"

E-MRS 2001, Strasbourg (Francia), 2001.

8.4 Tesis Doctorales

Título: *"Desarrollo y caracterización de fotodetectores de radiación ultravioleta basados en nitruros del grupo III-V"*

Doctorando: Eva María Monroy Fernández

Director/es: Elías Muñoz Merino, Fernando Calle Gómez

Universidad: Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ing. De Telecomunicación, 2000

Calificación: Apto, "Cum Laude"

Premio extraordinario de doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid

Premio COIT-AEIT

Título: *"Desarrollo de fotodetectores bi-color de infrarrojos con pozos cuánticos de GaAs/AlGaAs"*

Doctorando: Álvaro de Guzmán Fernández González

Director/es: Jose Luis Sánchez Rojas, Elías Muñoz Merino

Universidad: Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ing. De Telecomunicación, 2000

Calificación: Apto, "Cum Laude"

Título: *"Fabricación, caracterización y modelado de transistores de heterounión de efecto campo basados en AlGaIn/GaN"*

Doctorando: José Antonio Garrido Ariza

Director/es: Elías Muñoz Merino

Universidad: Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ing. De Telecomunicación, 2000

Calificación: Apto, "Cum Laude"

Título: *"Crecimiento y caracterización de nitruros del grupo III sobre Si(111) por epitaxia de haces moleculares"*

Doctorando: Miguel Ángel Sánchez García

Director/es: Enrique Calleja Pardo

Universidad: Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ing. De Telecomunicación, 2000

Calificación: Apto, "Cum Laude"

Premio extraordinario de doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid

8.5 Proyectos Fin de Carrera

- Título: *Diseño de un sistema de radioenlace para equipos de medición de radiación UV solar*
Autor: Carlos María Díaz González
Director: Elías Muñoz Merino
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 3 de febrero de 2000
- Título: *Diseño y realización de un equipo portátil para la detección de la radiación UV solar*
Autor: Enrique Cordero Blanco
Director: Elías Muñoz Merino
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 5 de mayo de 2000
- Título: *Contribución al diseño y automatización de un espectrómetro de fotorreflectancia y aplicación al GaN*
Autor: Juan A. Garrido Rodríguez
Director: Fernando Calle Gómez
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 14 de julio de 2000
- Título: *Modelado de la capacidad y transporte de portadores en fotodetectores de pozo cuántico*
Autor: Oscar García del Saz
Director: José Luis Sánchez Rojas Aldavero
Calificación: Sobresaliente, 9 p. Fecha: 19 de julio de 2000
- Título: *Aplicación para la caracterización de un diodo láser usando una fuente pulsante de precisión*
Autor: José Luiz Díaz Robledo
Director: José Luiz Sánchez Rojas Aldavero
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 25 de julio de 2000
- Título: *Dispositivos analógicos programables*
Autor: Pedro Manuel Fernández García
Director: José Ignacio Izpura Torres
Calificación: Sobresaliente, 9'5 p. Fecha: 25 de julio de 2000
- Título: *Sistema portátil de sensores múltiples para la determinación de la radiación solar ultravioleta*
Autor: Jorge Zafra Brenlla
Director: Elías Muñoz Merino
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 16 de octubre de 2000
- Título: *Diseño de un sistema automatizado de caracterización y fotodetectores de radiación ultravioleta*
Autor: Vicente Espuela Sánchez
Director: Eva María Monroy Fernández
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 5 de abril de 2001

Título: *Estudio de transmisión óptica del agua para la detección de contaminantes*
Autor: Javier Crispín Martínez Sáenz
Director: Fernando Calle Gómez
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 18 septiembre 2001

Título: *Nanotecnología para dispositivos de alta frecuencia en nitruros III-V*
Autor: Tomás Apóstol Palacios Gutiérrez
Director: Fernando Calle Gómez
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 20 septiembre 2001
- Premio al Mejor PFC en Tecnologías Básicas de la Inf. y las Com., del COIT/AEIT.

Título: *Medidas de detectividad en dispositivos cuánticos de detección de infrarrojo*
Autor: Javier Miguel Sánchez
Director: Alvaro de Guzmán Fernández
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 27 septiembre 2001

Título: *Diseño y desarrollo de una matriz bicolor de detectores de infrarrojo basados en pozos cuánticos para un sistema de visión nocturna*
Autor: Eduardo Casanueva Jiménez
Director: José Luis Sánchez Rojas Aldavero
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 28 septiembre 2001

Título: *Automatización de un equipo de epitaxia por haces moleculares (M.B.E)*
Autor: Antonio Luna García de la Infanta
Director: Alvaro de Guzmán Fernández
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 28 septiembre 2001

Título: *Simulación y diseño de detectores de infrarrojo de pozo cuántico*
Autor: Elicio Daniel Garda Borrachina
Director: Jose Luis Sánchez Rojas Aldavero
Calificación: Matrícula de Honor, 10 p. Fecha: 23 de octubre de 2001

9 COLABORACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

9.1 Internacionales

- Adaptive Research Systems (Kyoto, Japón)
- Centre de Recherche de L'Hetero-epitaxie et ses Applications, CRHEA-CNRS (Valbonne, Francia)
- Instituto Paul Drude (Berlín, Alemania)
- Instituto Walter Schottky (Munich, Alemania)
- Laboratoire d'Analyse et Applications des Systèmes LAAS-CNRS (Toulouse, Francia)
- National Microelectronics Research Center (Cork, Irlanda)
- Northwestern University (Chicago, USA)
- NTT, Laboratorios de Investigación Básica (Atsugi, Japón)
- Universidad de California Santa Bárbara (USA)
- Universidad de Cambridge (UK)
- Universidad de Colorado Boulder (USA)
- Universidad de Cornell (USA)
- Universidad de Sheffield (UK)
- Universidad de Gante – IMEC (Bélgica)
- Universidad Técnica de Munich (Alemania)

9.2 Nacionales

- Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada, CIDA
- Centro de Investigaciones Energéticas y Medio Ambientales, CIEMAT
- Centro Nacional de Microelectrónica, Inst. Microelectrónica de Barcelona, CNM-IMB
- Corporación Cooperativa Mondragón
- Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMM
- Instituto de Microelectrónica de Madrid, IMM
- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA
- Tudor-Exide
- Universidad Autónoma de Madrid
- Universidad Complutense de Madrid
- Universidad Politécnica de Madrid
- Universidad de Cádiz
- Universidad Miguel Hernández, de Elche
- Universidad de Oviedo

9.3 Estancias en el exterior de miembros del ISOM

Álvaro de Guzmán Fernández Sánchez			
<i>"Centre de Recherche sur l' Hétéro-Epitaxie et ses Applications" (CRHEA-CNRS)</i>			
Valbonne	Francia	2001	16 semanas
Álvaro de Guzmán Fernández Sánchez			
<i>"Paul Drude Institut für Festkörperelektronik " (PDI)</i>			
Berlín	Alemania	2001	8 semanas
Ana Jiménez Martín			
<i>"Dept. Electrical and Computer Engineering", Universidad de California Santa Barbara</i>			
Santa Bárbara, California	USA	2001	12 semanas
Jorge Julián Sánchez			
<i>"III-V Facility del Electronic Engineering Department", University of Sheffield</i>			
Sheffield	U.K.	2000	5 semanas
Esperanza Luna G ^a de la Infanta			
<i>"Paul Drude Institut für Festkörperelektronik " (PDI)</i>			
Berlín	Alemania	2001	12 semanas
Esperanza Luna G ^a de la Infanta			
<i>"III-V Facility del Electronic Engineering Department", University of Sheffield</i>			
Sheffield	U.K.	2001	2 semanas
Elías Muñoz Merino			
<i>"Centre de Recherche sur l' Hétéro-Epitaxie et ses Applications" (CRHEA-CNRS)</i>			
Valbonne	Francia	2000	5 semanas
Elías Muñoz Merino			
<i>"Centre de Recherche sur l' Hétéro-Epitaxie et ses Applications" (CRHEA-CNRS)</i>			
Valbonne	Francia	2001	4 semanas
Tomás Palacios Gutiérrez			
<i>"CERN"</i>			
Ginebra	Suiza	2000	12 semanas
José Luis Pau Vizcaíno			
<i>"Materials Departament", Universidad de California Santa Barbara</i>			
Santa Bárbara, California	USA	2000	11 semanas
José Luis Pau Vizcaíno			
<i>Laboratorios asociados al Royal Observatory of Belgium: Institut d'astrophysique spatiale, Laboratoire de génie électrique y Laboratoire de Physique des Lasers.</i>			
Paris	Francia	2001	4 semanas

Lucas Pérez García

"Dpto MTM (Metalurgia e Ingeniería de Materiales)", Katholieke Universiteit Leuven

Lovaina

Bélgica

2001

20 semanas

9.4 Otras actividades de I+D

Miembro del Comité de Programa

Dr. Fernando Calle Gómez

Título: European Heterostructure Technology Workshop, HETECH

Fecha: 2001.

Dr. Enrique Calleja Pardo

Título: 4th Int. Conf. On Nitride Semiconductors (ICNS-4), (Denver, Colorado, USA).

Fecha: 2001.

Dr. Enrique Calleja Pardo

Título: 11th European Workshop on Molecular Beam Epitaxy (Germany).

Fecha: 2001.

Dr. Enrique Calleja Pardo

Título: Symposium on III-Nitrides, European MRS-2001, (Strasbourg, Francia).

Fecha: 2001.

Dr. Elías Muñoz Merino

Título: 4th European GaN Workshop (EGW-4), (Nottingham, Inglaterra).

Fecha: 2000.

Presidente de Sesión en Congresos

Dr. Fernando Calle Gómez

Título: European Material Research Society , Spring Meeting, (Strasbourg, Francia).

Fecha: 2001.

Dr. Fernando Calle Gómez

Título: Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'01 (Barcelona, España)

Fecha: 2001.

Dr. Enrique Calleja Pardo

Título: European MRS-2001, Symposium H: Group III-Nitrides, (Strasbourg, Francia).

Fecha: 2001.

Dr. Enrique Calleja Pardo

Título: 4th European GaN Workshop (EGW-4), (Nottingham, Inglaterra).

Fecha: 2000.

Dr. Elías Muñoz Merino

Título: 3rd Int. Symp. on Blue Laser and Light Emitting Diodes. (Berlin, Alemania)

Fecha: 2000.

9.5 Visitas y estancias de científicos externos al ISOM

Prof. Klaus Ploog

Director del Instituto Paul Drude, Berlin (Alemania)

4 semanas, 2000

9.6 Conferencias impartidas en el Instituto

Dr. FRANCK OMNES
CRHEA-CNRS, Valbonne, Francia
Growth of AlGa_N by MOVPE
27 de febrero de 2000

Prof. MANFRED PILKUHN
Mikrostrukturlabor, Universität Stuttgart, Alemania
Short Channel Effects in Ga_N HEMTs
17 de noviembre de 2000

Prof. JAMES SPECK
Universidad de California Santa Barbara, USA
Growth of nitrides by Molecular Beam Epitaxy
27 de noviembre de 2000

Dr. ALEJANDRO BRAÑA DE CAL
Instituto de Ciencia de los Materiales de Madrid-CSIC
"Magnetorresistencia en Heteroestructuras de AlGa_N/Ga_N: tiempos de vida"
19 de enero de 2001

Dra. LAURA M. LECHUGA
Centro Nacional de Microelectrónica - C.S.I.C.
ARROW structures as optimized transducers for the development of high sensitive optical immunosensors
9 de marzo de 2001

Prof. ALEX ZASLAVSKY
Division of Engineering, Brown University (USA)
Tunneling in silicon-based heterostructures: from strain spectroscopy to novel devices
4 de abril de 2001

Prof. MANFRED PILKUHN
Mikrostrukturlabor, Universität Stuttgart, Alemania
Molecular Electronics
6 de abril de 2001

Profs. MARTA ELENA DÍAZ GARCÍA y ROSANA BADÍA
Grupo de Biosensores, Dpto. de Química Física y Analítica, Universidad de Oviedo
Fases sensoras luminiscentes para compuestos de interés biológico y medioambiental
4 de mayo de 2001

Dr. JORGE J. SANCHEZ
Alcatel Optronics, París, Francia.
Comunicaciones por fibra óptica: Perspectivas para el nuevo milenio.
25 de mayo de 2001

Prof. ARNOLDO MAJERFELD
University of Boulder, Colorado, USA
Piezo and Piroelectricity in (111)A GaAs-based lasers
28 de mayo de 2001

Prof. THOMAS H. MYERS
Department of Physics, West Virginia University (USA)
The Effect of Surface Polarity on Growth Kinetics and Doping During Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy of GaN
12 de junio de 2001

Dr. JORGE M. GARCÍA
Instituto de Microelectronica de Madrid, CNM-CSIC
Nanoestructuras auto-ensambladas para dispositivos optoelectronicos: puntos, anillos e hilos.
28 de septiembre de 2001

10 SERVICIOS A OTRAS INSTITUCIONES

Centre de Recherche de L'Hetero-epitaxie et ses Applications, CRHEA-CNRS (Valbonne, Francia)

Dres. Pierre Gibart, Philippe de Mierry

Medida de reflectividad de espejos Bragg para LEDs

Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada, CIDA

Dres. M^a Tesesa Montojo, Germán Vergara

Detectores de IR lejano

Centro de Investigaciones Energéticas y Medio Ambientales, CIEMAT

Dr. Julio Cárame

Medida de superficies por Microscopía de Barrido Electrónico

Centro Nacional de Microelectrónica- CNM-IMB

Dr. José Millán

Estudio implantaciones de C en Si.

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICM

Dr. Carlos Zaldo

Procesado de dispositivos de ondas acústicas superficiales basados en ZnO

Universidad Autónoma de Madrid

Dr. Ginés Lifante

Material columnar de GaN y AlGa

Universidad Complutense de Madrid

Dras. Eloísa López y M^a Carmen Sánchez Trujillo

Procesos de fotolitografía

Dpto. Ciencia de Materiales, ETSI Caminos, Universidad Politécnica de Madrid

Prof. Manuel Elices

Evaporaciones metálicas

Medida de materiales por Microscopía de Barrido Electrónico

Dpto. Electrónica Física, ETSI Telecomunicación e Instituto de Energía Solar, UPM

Dr. Carlos Algora

Medida de fotoluminiscencia de material para células solares

Medida de difracción de rayos X de material para células solares

Caracterización C-V de células solares

Dpto. Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Miguel Hernández, Elche

Dr. Ángel Luis Álvarez

Medida de espesores de películas orgánicas

Dpto. Química Analítica, Universidad de Oviedo
Dra. Rosana Badía
Deposición de películas orgánicas

11 CURSOS DE FORMACIÓN

11.1 Cursos de Doctorado

Programa: Tecnología de la información y de las comunicaciones.
Título: ***Técnicas de Caracterización Óptica***
Profesor: Fernando Calle Gómez
Cursos 1999-2000, 2000-2001

Programa: Tecnología de la información y de las comunicaciones.
Título: ***Técnicas de Caracterización Electro-Óptica***
Profesor: Fernando Calle Gómez
Curso 2001-2002

Programa: Tecnología de la información y de las comunicaciones.
Título: ***Dispositivos Semiconductores de Baja Dimensionalidad***
Profesor: Enrique Calleja Pardo
Curso 2000-2001, 2001-2002

Programa: Tecnología de la información y de las comunicaciones.
Título: ***Electrónica de Alta Velocidad***
Profesor: Elías Muñoz Merino
Cursos 2000-2001, 2001-2002

Programa: Tecnología de la información y de las comunicaciones.
Título: ***Seminario de Actualización en Electrónica***
Profesor: Elías Muñoz Merino
Cursos 2000-2001, 2001-2002

Programa: Tecnología de la información y de las comunicaciones.
Título: ***Materiales y Dispositivos Magnéticos***
Profesor: Pedro Sánchez Sánchez y Claudio Aroca Hernández-Ros
Curso 2000-2001

11.2 Seminarios del Instituto

D. Jorge Hernando, D. J. L Pau, D. Tomás Palacios

Resumen de las visitas realizadas a distintos centros de investigación extranjeros.

10 de noviembre de 2000

D. Jorge Hernando

Detectores de infrarrojo de pozo cuántico de InGaAs/GaAs: Efecto del contenido de Indio en la detección en incidencia normal

1 de diciembre de 2000

D. Jorge Hernando

InGaAs/GaAs Quantum Well Infrared Photodetectors sobre GaAs (001)

1 de diciembre de 2000

D. José Luis Pau

El Cuaternario AlInGaN

15 de diciembre de 2000

D. Lucas Pérez García

Producción de CoNiFe electrodepositado para aplicaciones en Microelectrónica

26 de enero de 2001

D. Fernando Naranjo

Crecimiento por MBE y caracterización óptica de capas de InGaN bulk

23 de febrero de 2001

D^a. Esperanza Luna

Influencia de la estructura de potencial en los detectores de infrarrojo por pozo cuántico en 3-5 micras: Comportamiento fotovoltaico. Segunda Parte

18 de mayo de 2001

D. Jorge Hernando

QWIPS sobre GaAs (111) B

15 de junio de 2001

D^a. Ana Jiménez

Mesa redonda sobre contactos óhmicos sobre GaN: ¿donde estamos?, ¿cómo mejorar?

22 de junio de 2001

D. Fernando Naranjo

Caracterización estructural de capas de InGaN mediante Rayos X

5 de octubre de 2001

D. José María Ulloa

Estudio de laseres de pozo cuántico de InGaAs/GaAs (111), mediante medidas de emisión espontánea

26 de octubre de 2001

D^a. Susana Fernández
DBRs: Nuevos diseños para incorporarlos en RCLEDs
30 de noviembre de 2001

D^a. Ana Jiménez
JFETs de GaN
14 de diciembre de 2001

12 ENTIDADES FINANCIADORAS (PROYECTOS Y CONTRATOS)

- Agencia Espacial Europea-ESTEC
- Airtel
- Comité Conjunto España USA para la Cooperación Científica
- Comunidad Autónoma de Madrid
- Cuarto Programa Marco de Investigación de la Unión Europea
- Exide-Tudor
- Fondos de Investigación para el Desarrollo Europeo (FEDER)
- INDRA
- Ministerio de Ciencia y Tecnología
- Ministerio de Defensa-CIDA
- Mondragón Corporación Corporativa
- Office of Naval Research (ONR-USA)
- ONERA (Francia)
- Quinto Programa Marco de Investigación de la Unión Europea
- Secretaría de Estado de Educación, Universidades, Investigación y Desarrollo.
Plan Nacional de I+D

13 PERSONAL



Director:

Elías Muñoz Merino

Subdirector:

Pedro Sánchez Sánchez

Secretario y Gestor CT:

Fernando Calle Gómez

Administrador:

Enrique Calleja Pardo

Coordinador de Tecnologías:

Claudio Aroca Hernández-Ros

NOMBRE	E-MAIL
Investigadores principales:	
Claudio Aroca Hernández-Ros	caroca@fis.upm.es
Fernando Calle Gómez	calle@die.upm.es
Enrique Calleja Pardo	calleja@die.upm.es
Álvaro de Guzmán Fernández Sánchez	guzman@die.upm.es
José Manuel García Tijero	
José Ignacio Izpura Torres	
Elías Muñoz Merino	elias@die.upm.es
José L.Sánchez-Rojas Aldavero	
Pedro Sánchez Sánchez	psanchez@fis.upm.es
Doctores:	
Ángel Luis Álvarez Castillo	al.alvarez@umh.es
Alejandro Braña de Cal	abranha@die.upm.es (*)
José Antonio Garrido Ariza	jose.garrido@wsi.tu-muenchen.de
Jorge Hernando García	hernando@die.upm.es
Adrián Hierro Cano	ahierro@die.upm.es (*)
Eva Monroy Fernández	
José L. Prieto Martín	jpgrieto@fis.upm.es
Miguel Angel Sánchez García	sanchez@die.upm.es
Estudiantes 3er ciclo:	
Oscar Abril Torralba	oscarabr@material.fis.ucm.es
Pablo Pedro Cubilla Bonnetier	ppcubilla@die.upm.es
David Ciudad Río-Pérez	dciedad@fis.upm.es (*)
Andrés Díaz Gil	adiaz@die.upm.es
Marina Díaz Michelena	michelena@fis.upm.es
Yago J. Fernández de Bobadilla Lorenzo	yjfernandez@die.upm.es (*)
Susana Fernández Ruano	susana@die.upm.es
Miguel González-Guerrero Bartolomé	mgonzalez@fis.upm.es (*)
Ana Jiménez Martín	ajimenez@die.upm.es
Esperanza Luna G ^a de la Infanta	luna@die.upm.es
Javier Miguel Sánchez	jmiguel@die.upm.es
Fernando Naranjo Vega	naranjo@die.upm.es
Tomás Palacios Gutiérrez	tpalacios@die.upm.es
José Luis Pau Vizcaíno	jpgau@die.upm.es
Jorge Pedrós Ayala	jpedros@die.upm.es
Rosa M ^a Pérez Almazán	
Lucas Pérez García	lucas@material.fis.ucm.es
Rocío Ranchal Sánchez	rociran@fis.ucm.es
Jelena Ristic	jelena@die.upm.es
Carlos Rivera de Lucas	crivera@die.upm.es
Miguel Angel Rivero Rodríguez	marivero@fis.ucm.es
José Luis Ruiz Salazar	

José María Tirado Martín	jmtirado@die.upm.es
José María Ulloa Herrero	ulloa@die.upm.es
Personal de Administración y Servicios	
Fernando Contreras González	fernando@etsit.upm.es
Alicia Fraile Chamizo	alicia@die.upm.es
Oscar García González	oscar@die.upm.es
Montserrat Juárez Migueláñez	montse.isom@die.upm.es
María Teresa Pérez de Lama	maite.isom@die.upm.es
Investigadores asociados	
Eloisa López Pérez	elolopez@fis.ucm.es
M ^a Carmen Sánchez Trujillo	santruji@fis.ucm.es
Otros colaboradores	
Rosana Badía	rbadia2@sauron.quimica.uniovi.es
Eduardo Casanueva Jiménez	micus@eurielec.etsit.upm.es
Alfonso Fernández Sánchez	

(*) Se incorporaron al ISOM posteriormente al 2001

