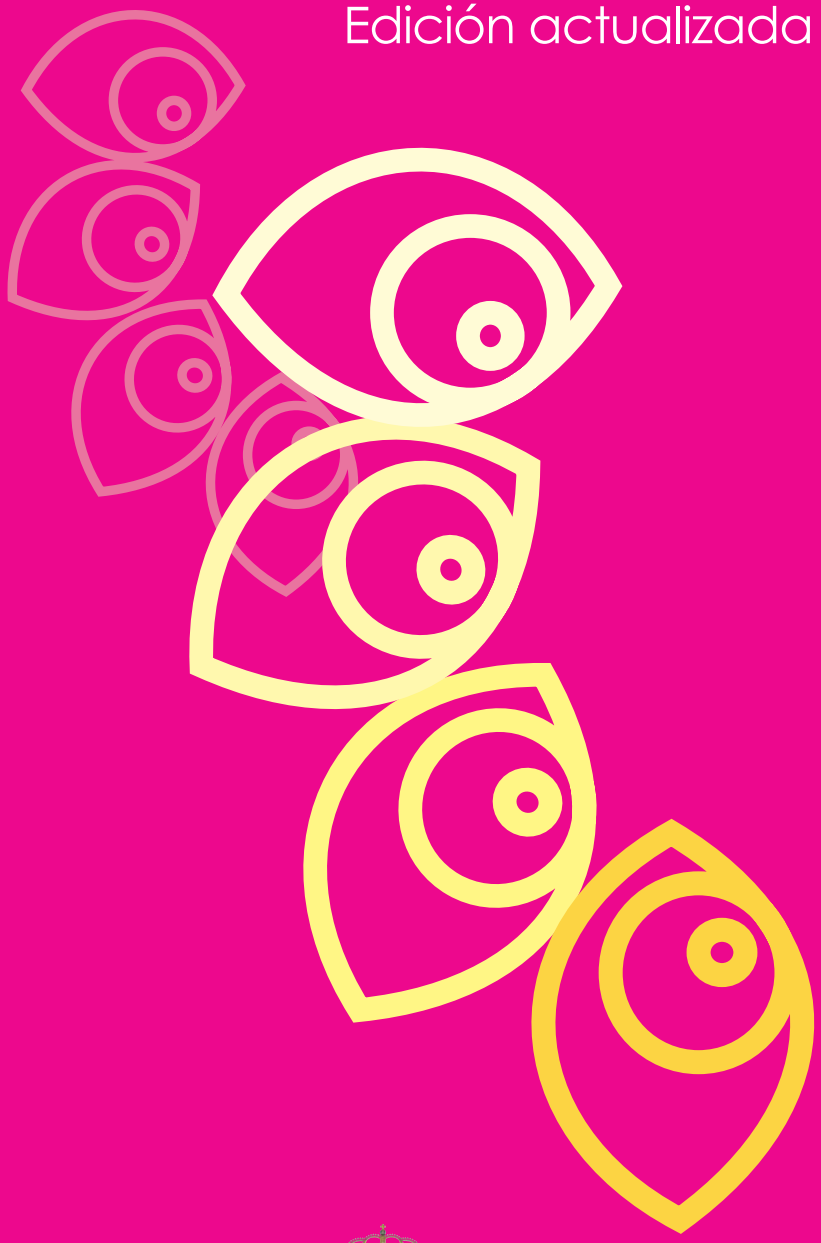
08 Monografías del SOPT

Tecnología de Semiconductores GaN y SiC

Edición actualizada 2010



MINISTERIO DE DEFENSA

08 Monografías del SOPT

Tecnología de Semiconductores GaN y SiC

Edición actualizada 2010

SOPT
SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

http://www.mde.es/areasTematicas/investigacionDesarrollo/sistemas/

MINISTERIO DE DEFENSA

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES
http://www.publicacionesoficiales.boe.es

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
DIRECCIÓN GENERAL DE RELACIONES INSTITUCIONALES

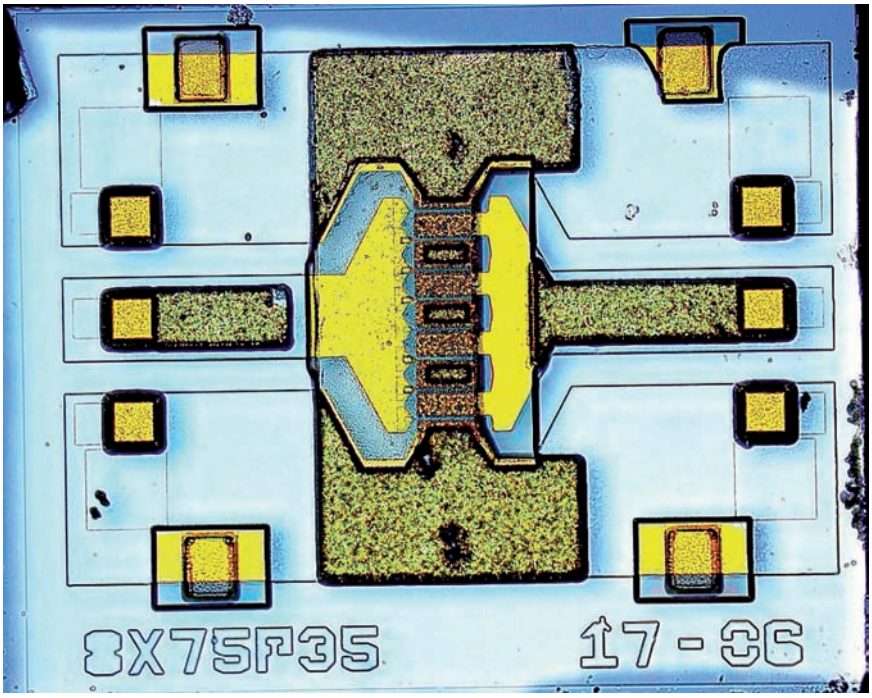
NIPO: 075-11-017-8 (edición en papel)
Depósito Legal: M-7171-2011
Imprime: Imprenta del Ministerio de Defensa
Tirada: 300 ejemplares
Fecha de edición: febrero, 2011

NIPO: 075-11-018-3 (edición en línea)

administración electrónica

En esta edición se ha utilizado papel libre de cloro obtenido a partir de bosques gestionados de forma sostenible certificada.

TECNOLOGÍAS DE SEMICONDUCTORES GaN Y SiC
EDICIÓN ACTUALIZADA 2010



Transistor HEMT de GaN. Proyecto KORRIGAN. (Fuente: Ministerio de Defensa)

SUMARIO

PRÓLOGO 9

1. INTRODUCCIÓN 11

1.1. Organización de la Monografía 17
1.2. Resumen histórico 18

2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEMICONDUCTORES WBG 23

2.1. Panorámica general 25

2.1.1. Nitruros del grupo III 25
2.1.2. Carburo de silicio 28

2.2. Estructura cristalina 28

2.2.1. GaN y materiales relacionados 28
2.2.2. SiC 30

2.3. Características del material crecido 30

2.3.1. Tecnología de GaN 30
2.3.2. Tecnología de SiC 32

2.4. Propiedades mecánicas 33
2.5. Propiedades piezoeléctricas 33
2.6. Propiedades de la estructura de bandas 33
2.7. Propiedades ópticas 34
2.8. Comparación de las principales propiedades eléctricas 35

3. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN Y PROCESADO 37

3.1. Fabricación de material: nitruros del grupo III 39

3.1.1. Crecimiento de sustratos nativos 41
3.1.2. Crecimiento epitaxial 43

3.2. Procesado de dispositivos 48

3.2.1. Etapas de procesado 49
3.2.2. Técnicas de procesado 52
3.2.3. Control del procesado 54
3.2.4. Estudios de fiabilidad 55

4. DISPOSITIVOS 57

4.1. Diodos emisores de luz 59

4.1.1. Basados en nitruros del grupo III 59
4.1.2. Basados en SiC 65

4.2. Dispositivos de RF y electrónica de potencia 65

4.2.1. Transistores de alta movilidad electrónica basados en nitruros 65
4.2.2. Transistores y conmutadores eléctricos basados en SiC 73

4.3. Fotodetectores 81

4.3.1. GaN y compuestos relacionados 81
4.3.2. Fotodetectores basados en SiC 86

4.4. Otros dispositivos 87

4.4.1. Basados en nitruros del grupo III 87
4.4.2. Basados en SiC 88

5. APLICACIONES 89

5.1. Sector de defensa 91

5.1.1. Electrónica de radiofrecuencia de alta potencia y gran ancho de banda 94
5.1.2. Optoelectrónica: detección de UV 105
5.1.3. Optoelectrónica: emisores de UV 109
5.1.4. Optoelectrónica: emisión y detección en las longitudes de onda del azul y verde 112
5.1.5. Electrónica de potencia 115

5.2. Sector civil 124

5.2.1. Electrónica de radiofrecuencia 124
5.2.2. Electrónica de potencia 125
5.2.3. Emisores de luz 126
5.2.4. Detectores de luz 128
5.2.5. Otras aplicaciones 129

5.3. Perspectivas de mercado 130

5.3.1. Diodos electroluminiscentes (LED) 130
5.3.2. Diodos láser 132
5.3.3. Fotodetectores 133
5.3.4. Electrónica de RF 133
5.3.5. Electrónica operando a alta temperatura 136
5.3.6. Datos específicos del SiC 136

6. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN NITRURO DE GALIO Y CARBURO DE SILICIO 137

6.1. Proyecto KORRIGAN 139

6.1.1. Trabajos realizados 140
6.1.2. Participación nacional 143
6.1.3. Conclusiones 144

6.2. España 145

6.2.1. Proyecto RUE (Dispositivos Semiconductores Avanzados de Gap Ancho para el Uso Racional de la Energía) . 145

6.3. Europa 147

6.3.1. Proyecto BOLD (Blind to the Optical Light Detectors) 147
6.3.2. Proyecto E3CAR (Energy Efficcient Electrical Car) .. 148
6.3.3. Proyecto GREAT (GaN Reliability Enhancement and Technology Transfer Initiative) 149
6.3.4. Proyecto «High Temperature Protection Diodes for Solar Cell Panels» 150
6.3.5. Proyecto MANGA (Manufacturable GaN) 150
6.3.6. Proyecto MAGNUS (KORRIGAN 2) 151
6.3.7. Proyecto MANSiC 152

6.4. Estados Unidos 152

6.4.1. WBGS-RF (Wide Bandgap Semiconductor technology – Radio Frequency) 153

6.4.2. WBGS-HPE (Wide Bandgap Semiconductor technology – High Power Electronics) 154
6.4.3. Proyecto NEXT (Nitride Electronic NeXt generation Technology) 155

6.5. Japón 156

6.5.1. ERATO (Exploratory Research for Advanced Technology). Nakamura Inhomogenous Crystal Project 156

6.6 Otros proyectos 157

7. TENDENCIAS FUTURAS 161

ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS 167

ANEXO A: ENTIDADES 175

A.1. España 178
A.2. Europa 182
A.3. Estados Unidos 194
A.4. Japón 200

BIBLIOGRAFÍA 207

CONGRESOS Y CONFERENCIAS 215

PRÓLOGO

La presente Monografía ha sido realizada por el Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT) de la Subdirección de Tecnología e Innovación (SDG TECIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM).

Quiero felicitar a todos los que han hecho posible esta Monografía, y en concreto a los técnicos del Observatorio Tecnológico de Electrónica, Yolanda Benzi Rabazas y Fernando Íñigo Villacorta, y al técnico del Nodo Gestor, Guillermo González Muñoz de Morales, por su dedicación y esfuerzo. También, extender este agradecimiento al resto de colaboradores del Observatorio Tecnológico de Electrónica, en concreto a Marina Verdú Herce y Carlos Rivera de Lucas del Área Optrónica y Acústica / Unidad de sensores, micro y nanotecnología del Instituto Tecnológico «La Marañosa» (ITM) y a Germán Vergara Ogando de la SDG TECIN, además de al resto de miembros del SOPT, que han contribuido a que podamos tener hoy este trabajo en nuestras manos.

C.F Ing. José María Riola Rodríguez
Jefe del SOPT
Subdirección de Tecnología e Innovación
Dirección General de Armamento y Material

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo pasado, el descubrimiento de que los materiales semiconductores podían utilizarse para fabricar dispositivos electrónicos que realizaran las mismas funciones que las válvulas de vacío, hizo posible la aparición de los primeros circuitos integrados y dio comienzo a una revolución tecnológica sin precedentes que ha transformado profundamente nuestra sociedad.

Desde entonces, se ha producido un vertiginoso desarrollo de las tecnologías relacionadas con dichos materiales, tanto las que se refieren a la obtención y síntesis del propio material semiconductor como a las de fabricación de los dispositivos sobre dicho material. En la actualidad, existe una gran variedad de materiales semiconductores que se pueden emplear para fabricar dispositivos electrónicos y fotónicos con un amplio espectro de características y aplicaciones.

Entre los materiales semiconductores con mayor potencial futuro destacan los de banda prohibida[1] ancha, particularmente el **nitruro de galio** (**GaN**) y el **carburo de silicio** (**SiC**). Las excepcionales propiedades físicas de estos materiales hacen que sean especialmente adecuados para aplicaciones electrónicas de alta frecuencia y alta potencia, confiriéndoles además una elevada resistencia frente a las altas temperaturas, la radiación y los ambientes químicos extremos.

En lo que se refiere a las aplicaciones optoelectrónicas, los nitruros han hecho posible extender el rango de funcionamiento de los LED (Light Emitting Diode) y diodos láser hasta la región del ultravioleta, lo que ha iniciado una auténtica revolución en sectores como el de la iluminación, las telecomunicaciones y la electrónica de consumo.

---

[1] En la jerga técnica se suele hablar de gap, haciendo referencia al término original en lengua anglosajona. A lo largo de la monografía se utilizarán indistintamente las denominaciones «semiconductores de gap ancho», «semiconductores de banda prohibida ancha» o «semiconductores WBG (Wide Band Gap)» para referirse a estos materiales. En estos materiales, el rango de energías de la banda prohibida está comprendida entre los 2 y 7 eV.

El sector de defensa es sin duda uno de los ámbitos donde el impacto de los semiconductores de banda prohibida ancha será más profundo, provocando cambios verdaderamente disruptivos en las capacidades militares que dependen de las tecnologías de radiofrecuencia, de electrónica de potencia y de optoelectrónica.

Así, en el caso de la **electrónica de radiofrecuencia (RF)**, el GaN permitirá desarrollar amplificadores de RF que podrán suministrar hasta cien veces más potencia que los actuales dispositivos basados en arseniuro de galio (GaAs), lo que convertirá al nitruro de galio en la primera tecnología de estado sólido que podrá competir en prestaciones con la tecnología de tubos de vacío de electrones (TWT, klystron, etc.). La sustitución de estos tubos de vacío por dispositivos de GaN permitirá construir radares y sistemas de guerra electrónica con unas prestaciones sin precedentes, reduciendo además el peso, volumen y coste de fabricación de dichos equipos.

Figura 1.1. Los dispositivos de RF basados en GaN y SiC serán claves en los sensores y sistemas de misión de las plataformas militares futuras. (Fuente: Ministerio de Defensa).

En lo que se refiere a la **electrónica de potencia**, la capacidad de los componentes de carburo de silicio (fundamentalmente conmutadores y conversores de potencia) para operar a altas temperaturas con niveles elevados de potencia los convierten en elementos indispensables de los sistemas de propulsión y distribución eléctrica de los futuros vehículos militares híbridos o completamente eléctricos. Este tipo de vehículos aportarán importantes beneficios en el desarrollo de las operaciones militares futuras, entre los que destacan la reducción del consumo de energía, la mejora de la movilidad de la plataforma y la reducción de la huella logística. Por lo tanto, la tecnología de semiconductores de gap ancho resultará uno de los elementos clave que permitirán mitigar el grave problema del suministro de energía en los escenarios operativos.

En lo que se refiere a aplicaciones **optoelectrónicas** para defensa, los materiales de gap ancho permitirán implementar emisores y fotodetectores de luz ultravioleta (UV) de reducido peso y volumen, bajo coste de fabricación y capacidad de operación en condiciones ambientales extremas. Estos dispositivos jugarán un papel fundamental en multitud de aplicaciones en defensa: detección de agentes químicos y biológicos, esterilización de sustancias contaminadas, detección del lanzamiento y aproximación de misiles, detección de disparos (francotiradores, RPG, etc.).

Por lo tanto, debido a que numerosas capacidades militares futuras dependerán de la madurez tecnológica alcanzada en el desarrollo de dispositivos basados en estos materiales, los Ministerios de Defensa de los países avanzados consideran de **importancia estratégica** conseguir el dominio de estas tecnologías. Este gran interés de la comunidad internacional de defensa está contribuyendo a que los semiconductores de gap ancho sean uno de los campos de investigación más activos en la actualidad.

Además, la tecnología de semiconductores de gap ancho está recibiendo un impulso decisivo por parte del sector civil, donde la demanda de materiales como el GaN y el SiC está experimentando un acelerado crecimiento en aplicaciones como:

– Iluminación general, donde se espera que, alrededor del año 2025, los LED basados en GaN dominen el mercado y lleguen a reemplazar a la tecnología tradicional de lámparas incandescentes.

– Generación, transporte y distribución de energía eléctrica, donde los dispositivos de SiC representarán un salto tecnológico en la eficiencia energética de la red eléctrica.
– Vehículos híbridos y completamente eléctricos, donde los dispositivos basados en GaN y SiC resultarán elementos esenciales, tanto de los sistemas de propulsión como de distribución de energía del vehículo.
– Electrónica de consumo, principalmente terminales de telefonía móvil, dispositivos de almacenamiento óptico (como *Blu-Ray Disc*™) e impresoras láser.

Este empuje desde el sector civil reportará grandes beneficios al sector de defensa, contribuyendo a acelerar el avance y la maduración de estas tecnologías para su aplicación a los equipos y sistemas militares.

A modo de conclusión, podemos afirmar que las excepcionales propiedades de los semiconductores de gap ancho y sus revolucionarias aplicaciones convertirán a estos materiales en una de las tecnologías clave del siglo XXI, constituyendo uno de los grandes pilares sobre los que se apoyarán los avances tecnológicos de los próximos años.

Figura 1.2. Los dispositivos de GaN y SiC formarán parte de los futuros sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica. (Fuente: Isdefe).

1.1. Organización de la Monografía

Uno de los objetivos planteados al comienzo de los trabajos de redacción de la monografía fue tratar de conseguir un texto accesible a un amplio abanico de lectores, tanto los familiarizados con las tecnologías de semiconductores como los que tuviesen un conocimiento más básico. Por esta razón, se decidió utilizar un enfoque fundamentalmente divulgativo a la hora de escribir el documento.

Sin embargo, debido al rigor técnico que ha sido necesario mantener en algunos de los temas tratados, algunos de los capítulos resultarán más difíciles de comprender para el lector no especializado en la materia. A grandes rasgos, los capítulos capítulos 2, 3 y 4 son los que presentan un mayor contenido técnico, mientras que los capítulos 5, 6 y 7 son los más divulgativos y asequibles para el lector medio.

Se resumen a continuación los contenidos de cada capítulo:

- En el capítulo 2 se repasan las principales propiedades físicas de los semiconductores GaN y SiC, de las cuáles se derivan las excepcionales características que presentan los dispositivos fabricados con estos materiales. Se describirán las principales propiedades eléctricas, mecánicas, ópticas y piezoeléctricas de los compuestos de gap ancho más importantes, resultado de su correspondiente disposición cristalina y estructura de bandas.
- En el capítulo 3 se describen las principales técnicas de fabricación de estos materiales. La dificultad en la obtención de sustratos nativos de GaN ha sido un obstáculo en la fabricación de dispositivos con este material semiconductor, y continúa siendo en la actualidad uno de los principales retos tecnológicos a superar.
- En el capítulo 4 se describen exhaustivamente los principales tipos de dispositivos electrónicos y optoelectrónicos que se fabrican con estos semiconductores, así como el estado del arte de los mismos. Los dispositivos considerados son los que se encuentran más relacionados con las aplicaciones de defensa.
- En el capítulo 5 se recogen las principales aplicaciones de los semiconductores de gap ancho, tanto en el sector de defensa como en el sector civil y las perspectivas de mercado que ofrecen estos materiales. Algunas de estas aplicaciones son tan importantes que justificarían por sí solas el desarrollo completo de estas tecnologías de semiconductores.

– El capítulo 6 recoge algunos de los principales proyectos e iniciativas a nivel mundial que se están llevando a cabo en las tecnologías de semiconductores de gap ancho. Estos proyectos atestiguan el enorme interés internacional que suscitan estas tecnologías, así como su importancia estratégica para los países más avanzados del mundo.
– Finalmente, el capítulo 7 describe las principales tendencias y evolución futura de las tecnologías de GaN y SiC.

La monografía se completa con un detallado anexo que recopila las entidades más relevantes a nivel mundial en tecnologías de semiconductores de gap ancho (empresas, centros de investigación, universidades, etc.), con especial atención a las entidades más significativas a nivel nacional.

Figura 1.3.Cristal de GaN crecido mediante la técnica desarrollada por la empresa Ammono. (Fuente: Robert Laska)

1.2. Resumen histórico

Conocer la historia de los nitruros es importante para poder explicar cuáles han sido las claves del éxito de esta tecnología, sus limitaciones presentes y futuras, los avances producidos y las razones que justifican algunas de las soluciones adoptadas en el diseño y fabricación de dispositivos para aplicaciones concretas. La orientación que puede tomar la investigación en los próximos años es, en buena medida, una respuesta a los problemas ya encontrados en el pasado y el presente. Por otro lado, el desarrollo de los nitruros del grupo III también se relaciona con el del SiC, por lo que su evolución puede ayudar a entender algunos de los pasos dados en esta tecnología.

El primer intento aislado de sintetizar GaN (y también nitruro de indio (InN)) se remonta a 1938 cuando los investigadores Jusa y Hahn utilizaron un procedimiento químico consistente en hacer pasar un flujo de amonia-

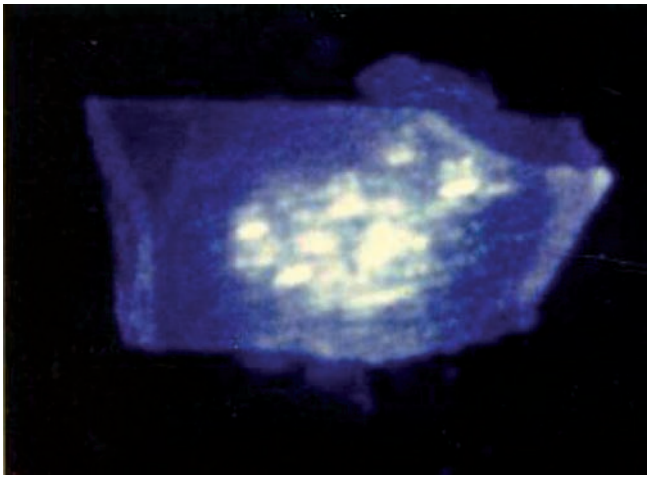


Figura 1.4. Primer diodo electroluminiscente de GaN dopado con Mg emitiendo en la región del violeta [Fuente: H. P. Maruska, D.A. Stevenson, J. I. Pankove, Appl. Phys. Lett. 22, (1973)].

co sobre galio (Ga) metálico calentado a alta temperatura. Este trabajo, aunque no fue relevante desde el punto de vista práctico, ya apuntaba a la existencia de un interés en la producción de este material. Posteriormente, hubo algún otro intento de fabricar GaN en Alemania sin consecuencias destacables, hasta que en 1969, Herbert Maruska, trabajador de *Radio Corporation of America* (RCA), hizo crecer una capa de este material sobre un sustrato de zafiro por una técnica de epitaxia en fase vapor mediante hidruros (HVPE) siguiendo las instrucciones del investigador James Tietjen. El objetivo de RCA era desarrollar pantallas planas de televisión basadas en diodos electroluminiscentes (*Light Emitting Diodes* o LED). Las razones para seleccionar el zafiro fueron su robustez, nula reactividad con el precursor de amoníaco y su disponibilidad. La temperatura de crecimiento de 850 °C determinada por diferentes experimentos fue similar a la actual.

El trabajo de Maruska no se limitó al crecimiento del material, como cabía esperar teniendo en cuenta el objetivo inicial marcado por la empresa. La fabricación de emisores de luz requería capacidad de dopaje tipo p y n para las diferentes capas de la estructura del dispositivo. Desafortunadamente, la alta concentración de electrones del material ($10^{18} - 10^{20}$ cm^{-3}) y, por tanto, su carácter tipo n intrínseco, imposibilitó por aquel entonces un dopaje tipo p eficiente (sólo se llegó a compensar la concentración intrínseca). Los esfuerzos en dopaje tipo p se realizaron, primero con impurezas de zinc (Zn) y, después con magnesio (Mg), dopante empleado actualmente. El origen de la alta concentración de electrones se atribuyó a las vacantes de nitrógeno. Aún así, Maruska junto con Pankove consiguieron los primeros LED de nitruros, uno de los cuales se muestra en la Figura 1.4. El cierre de

este proyecto, debido a motivos económicos y de mala gestión supuso, posiblemente, un retraso importante en la implantación de esta tecnología.

Por aquel entonces, el procedimiento de fabricación del SiC se había mejorado notablemente, dando como resultado la fabricación de diodos electroluminiscentes en azul. Aunque la eficiencia no era muy alta, estos dispositivos llegaron a ser comerciales y sólo fueron desplazados por los nitruros en la década de 1990. También se fabricaron LED emitiendo en amarillo basados en SiC en la Unión Soviética.

Sin embargo, fueron los japoneses los que, siguiendo las bases sentadas por el grupo de la RCA, apostaron por la tecnología de GaN hasta conseguir la fabricación de dispositivos eficientes. De forma resumida, se pueden citar los trabajos de Matsumoto y Aoki, Akasaki y Hayashi, Yoshida *et al.*, y Amano *et al.* en la síntesis de GaN y AlN por diversos métodos (sublimación, epitaxia por haces moleculares, evaporación reactiva y GaN usando capas de amortiguamiento de AlN). Uno de los hitos fundamentales de su éxito fue, no obstante, la consecución del dopaje tipo p de las capas por Amano *et al.* mediante activación del dopante de Mg por irradiación de electrones de baja energía y la posterior fabricación de una unión p-n de GaN. Este proceso se mejoró por Nakamura *et al.* cambiando la irradiación de electrones por un proceso de recocido térmico rápido. Añadiendo estos trabajos a la mejora en la calidad de las capas y la estructura de los LED, que incluía así pozos cuánticos de InGaN, se llegaron a producir los primeros dispositivos eficientes, que pronto se comercializarían por Nichia Chemical Industries. El gran artífice del paso del material al dispositico fue Shuji Nakamura, reconocido mundialmente por su aportación a esta tecnología.

Otros trabajos de interés fueron los de Karpinski *et al.*, que representa un intento por fabricar GaN usando un procedimiento a alta presión, Manasevit *et al.*, que publicó el primer crecimiento de GaN mediante depósito químico en fase vapor con precursores metalorgánicos, y Dingle *et al.*, que demostró la emisión estimulada de GaN a baja temperatura.

La evolución comentada hasta ahora refleja la preocupación inicial en el crecimiento del material de partida. Posteriormente, los desarrollos en la calidad del material han sido acompañados de trabajos de carácter más fundamental para explotar todas la propiedades de los nitruros y de optimización para aplicaciones concretas en optoelectrónica y electrónica de alta frecuencia y alta potencia. La cantidad de trabajos hace difícil hacer una revisión completa y justa de todas las aportaciones, por lo que

a modo orientativo se proporciona una breve cronología de algunos resultados destacados acaecidos a partir del impulso dado por Nakamura en el dopaje tipo p de las capas de GaN.

Evento	Año
Fotodetector de ultravioleta	1992
LED de ultravioleta de alto brillo basado en (Al,Ga)N	1992
Epitaxia de (In,Ga)N de alta calidad	1993
Estructura de pozos cuánticos múltiples basada en (In,Ga)N	1993
Transistor de efecto de campo (FET)	1993
Transistor de alta movilidad electrónica (HEMT)	1993
LED azul basado en pozos cuánticos	1993
Transistor bipolar de unión	1994
LED comerciales	1995
Láser azul pulsado	1995
Láser azul de onda contínua, operación a temperatura ambiente	1996
Fotodetectores ciegos al sol	1996
Matriz bidimensional de detectores de GaN	1997
Emisor de luz crecido a lo largo de una orientación no polar	2000
Fotodetector sensible a la polarización de la luz	2006
Láseres basados en orientaciones no polares o semipolares	2006
Primer diodo láser emisor en el verde	2009

Tabla 1.1. Algunos eventos destacados en la cronología más reciente del GaN y materiales relacionados.

También, en la década de 1990 se produjeron avances significativos en la preparación de SiC. Concretamente, en 1991 se introdujeron en el mercado sustratos en volumen de 6H-SiC y, poco después, en 1994 de 4H-SiC. La aparición de estos sustratos comerciales fue beneficiosa para la tecnología de SiC pensando en aplicaciones de electrónica de potencia. En el caso del GaN, este sustrato también se ha utilizado para mejorar las prestaciones de los dispositivos en el crecimiento heteroepitaxial.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEMICONDUCTORES WBG

2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEMICONDUCTORES WBG

En este capítulo se revisan las principales propiedades de los nitruros del grupo III (AlN, InN, GaN y sus aleaciones) y el SiC. El lector interesado en profundizar en las ventajas que ofrecen este tipo de materiales encontrará útiles las tablas-resumen de propiedades que se recogen en los distintos apartados, así como los comentarios que se anexan en cada caso. El primer apartado proporciona una panorámica general de las propiedades, donde se hace referencia sólo a los datos más relevantes que se suelen presentar como justificación del potencial de estas tecnologías.

Obviamente, los resultados alcanzados desde un punto de vista práctico distan de cumplir con una extrapolación directa de las figuras de mérito teóricas. Las no idealidades encontradas en el desarrollo de la tecnología condicionan la pérdida de prestaciones que se observan en el funcionamiento y fiabilidad de los dispositivos. No obstante, las no idealidades pueden, en algunos casos, generar ventajas insospechadas, como sucedió con el efecto que producía la localización electrónica sobre la eficiencia de emisión en los pozos cuánticos de (In,Ga)N.

2.1. Panorámica general

2.1.1. Nitruros del grupo III

La familia de semiconductores del GaN se postula como una de las piezas clave para el desarrollo de un sinfín de tecnologías electrónicas incluyendo dispositivos de radiofrecuencia, fotodetectores, emisores de luz, sensores químicos, dispositivos electromecánicos y acusto-ópticos. Las expectativas creadas desde la aparición de los primeros diodos electroluminiscentes basados en nitruros de carácter comercial han sido beneficiosas para realimentar el interés en otras tecnologías.

Las razones técnicas que confieren una ventaja competitiva de estos materiales frente a otros semiconductores se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Posibilidad de sintonización de la energía de la banda prohibida desde el infrarrojo cercano (0,7 eV o aproximadamente 1.770 nm empleando InN) hasta el ultravioleta profundo (6,2 eV o aproximadamente 200 nm empleando AlN). Esta propiedad es prácticamente única dentro de los semiconductores, lo que permite que los nitruros sean adecuados para formar la parte activa de emisores o detectores selectivos en muchas aplicaciones optoelectrónicas. El alto valor de la energía de la banda prohibida de algunos de los compuestos, unido a la baja concentración intrínseca, hace también que sean candidatos para la operación a altas temperaturas.
- La estructura cristalina más estable es la wurtzita en todos los binarios más comunes y el tipo de alineamiento de la banda prohibida es directo en todos los casos. Estas características son ventajosas cuando se forman heteroestructuras.
- Alta resistencia a la radiación ionizante debido a las elevadas energías de enlace del AlN (11,52 eV/átomo), el GaN (8,92 eV/átomo) y, en menor medida, del InN (7,72 eV/átomo), así como a la alta densidad de empaquetamiento del material. Al mismo tiempo, la reactividad química de los nitruros es baja, resultando en un material adecuado para diseñar dispositivos que pueden operar en entornos agresivos o para aplicaciones espaciales.
- Alta velocidad de saturación (aproximadamente 1.5×10^7 cm/s en el GaN) y movilidad, especialmente cuando se forma un gas bidimensional. Estas propiedades hacen que los nitruros sean indicados para aplicaciones de alta frecuencia.
- Alto valor para el campo eléctrico de ruptura (aproximadamente 3 MV/cm para el GaN y 11,7 MV/cm para el AlN), lo que permite soportar altos voltajes como los usados en aplicaciones de alta potencia. Esta característica, combinada con las propiedades del punto anterior, convierten a los nitruros en uno de los materiales con mayor potencial para desarrollar aplicaciones de alta potencia en radiofrecuencia. El inconveniente se encuentra en la capacidad de disipar calor.
- Posee propiedades piezoeléctricas que pueden ser aprovechadas para fabricar filtros de ondas acústicas superficiales, NEMS (Nanoelectromechanical Systems) u otro tipo de dispositivos con capacidades mejoradas (transistores con autodopaje, fotodetectores con ga-

nancia, etc.). Los valores de los coeficientes piezoeléctricos son más altos que en la mayoría de los semiconductores. Además, exhiben un alto valor de polarización espontánea.

– Alta energía de ligadura del excitón (28 meV para el GaN), que permite mejorar las prestaciones de dispositivos optoelectrónicos incluso a temperatura ambiente como, por ejemplo, en el caso de los electromoduladores de absorción.
– Compatibilidad del GaN con sistemas biológicos (no presenta la toxicidad de otros compuestos como, por ejemplo, el GaAs).
– Localización de portadores en nanoestructuras formadas de manera intrínseca cuando se emplea In en las aleaciones o compuestos. Esta propiedad puede ser una ventaja como se ha demostrado en el caso de los emisores de luz.

No obstante, los dispositivos basados en nitruros adolecen todavía de una serie de problemas que es necesario resolver antes de poder cumplir con todas las expectativas generadas. El origen de estos problemas reside fundamentalmente en la imposibilidad práctica de fabricar sustratos nativos de nitruros con los medios disponibles actualmente (existen algunos laboratorios que sí han demostrado esta capacidad, pero no se ha extendido su uso a nivel comercial).

Como resultado, es necesario utilizar sustratos desajustados en red, típicamente zafiro o carburo de silicio, que tienden a producir una larga densidad de defectos en la estructura cristalina de la epitaxia de nitruros. Uno de los defectos más característico son las dislocaciones (alcanzando densidades tan altas como $10^9 – 10^{10}$ cm^{-2} en zafiro, por ejemplo), que si bien parecen tener un efecto menos dramático de lo esperado sobre la recombinación radiativa en LED, pueden jugar un papel más crítico en la fiabilidad y estabilidad de otros dispositivos electrónicos. Desde el punto de vista práctico, es necesario mejorar los aspectos de reproducibilidad y fiabilidad de la tecnología, al mismo tiempo que se trata de reducir la densidad de defectos presentes en el material.

A diferencia de otras tecnologías que pueden resultar desplazadas por materiales basados en carbono (fundamentalmente grafeno), los semiconductores WBG tienen un nicho de mercado muy claro en aplicaciones que requieran alta potencia o que operen a alta temperatura. En el capítulo 5, se apunta que este mercado, a pesar de permanecer poco explorado, resulta muy atractivo para justificar una inversión rentable a medio o largo plazo. Por este motivo, se prevé que los nitruros estén presentes en el mercado ofreciendo soluciones competitivas durante muchos años.

2.1.2. Carburo de silicio

El SiC posee una serie de propiedades que, al igual que en el caso del GaN, lo hacen interesante para operar a alta temperatura, alta frecuencia y alta potencia. En particular, estas propiedades se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Energía de la banda prohibida grande. Dependiendo del politipo, el valor concreto puede estar entre 2,39 eV y 3,3 eV.
- Alta conductividad térmica (370 W/mK para el politipo 4H y 490 W/mK para el politipo 6H). Para algún politipo es mayor que la del cobre a temperatura ambiente.
- Alto campo eléctrico de ruptura (3 – 5 MV/cm), reportando valores similares al GaN.
- Alta velocidad de saturación, alcanzando valores de 2×10^7 cm/s.
- Alta estabilidad térmica.
- Buen comportamiento químico (inerte).

Muchas de las consideraciones realizadas para el GaN son aplicables al caso del SiC. Las diferencias fundamentales aparecen en el valor de la conductividad térmica, en la estructura de bandas (energía de la banda prohibida y tipo de alineamiento) y en la capacidad de formar heteroestructuras.

2.2. Estructura cristalina

2.2.1. GaN y materiales relacionados

La configuración más estable termodinámicamente a temperatura y presión ambiente para el GaN es la estructura cristalina denominada wurtzita. La wurtzita se compone de dos estructuras hexagonales compactas desplazadas entre sí 3/8 de la altura c de la celda tomada como referencia y correspondientes a cada uno de los átomos del binario (véase la Figura 2.1).

Otra estructura cristalina de interés en la que puede encontrarse el GaN es la zinc-blenda. Algunos trabajos de investigación han estudiado las propiedades de este politipo para entender aspectos básicos del material, como defectos producidos por inclusiones cúbicas, o simplemente para valorarlo como una alternativa tecnológica. Sin embargo, la mayoría de los resultados hasta el momento se han producido para el GaN en

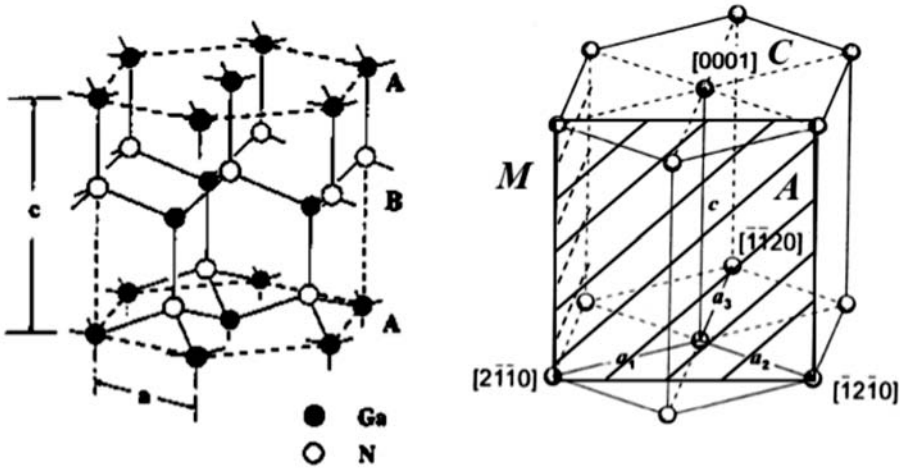


Figura 2.1. Estructura cristalina del GaN en fase wurtzita. En la parte de la izquierda se muestra la distribución de átomos en función de su naturaleza química. En la parte de la derecha se muestran las direcciones y planos principales. (Fuente: Tesis Doctoral de Carlos Rivera de Lucas, UPM).

fase wurtzita, dado que las condiciones de crecimiento no favorecen la fabricación de estructuras tipo zinc-blenda. En adelante, se considerará que el GaN es de tipo wurtzita salvo que se haga mención explícita de lo contrario. Los otros binarios analizados en la monografía, AlN e InN, se comportan de manera análoga a este respecto.

Un resultado destacable que se puede observar en la Figura 2.1 es la ausencia de simetría de inversión, lo que confiere al material de un carácter polar, origen de muchas de sus propiedades más características. Los planos *M* y *A* mostrados en la misma figura gozan de un menor número de propiedades de simetría que el plano *C*. Su característica común es que contienen el eje de rotación c del prisma hexagonal y, como se verá más adelante, no exhiben polarización espontánea en la dirección de crecimiento de las capas.

La definición elemental de la estructura cristalina se completa con los parámetros de red (*a* y *c* en una estructura hexagonal). La Tabla 2.1 muestra el valor de estos parámetros para cada uno de los compuestos binarios que suelen constituir las aleaciones y las capas empleadas en la fabricación de dispositivos. También se ha incluido el valor del coeficiente de expansión térmica por su importancia como parámetro para el crecimiento del material.

	InN	GaN	AlN
***a* (Å)**	3,540	3,189	3,112
***C* (Å)**	5,705	5,186	4,980
Coeficientes de expansión térmica (K^{-1})	$\Delta a/a$=3,15x10^{-6} $\Delta c/c$=4,20x10^{-6} T=360 K	$\Delta a/a$=5,59x10^{-6} $\Delta c/c$=3,17x10^{-6} 300 K<T<700 K	$\Delta a/a$=4,2x10^{-6} $\Delta c/c$=5,3x10^{-6} T=300 K

Tabla 2.1. Parámetros de red de los nitruros del grupo III a temperatura ambiente determinados por difracción de rayos X.

2.2.2. SiC

El SiC se puede encontrar en un gran número de politipos. Los más comunes son 3C-SiC, 4H-SiC y 6H-SiC. El número que precede a SiC indica la periodicidad de la secuencia de apilamiento de capas atómicas y la letra (C o H) denota la estructura cristalina (cúbica o hexagonal, respectivamente). En todos los politipos, la distancia entre átomos vecinos de Si o C, *a*, es 3,08 Å. La relación entre los parámetros de red para los politipos hexagonales es, sin embargo, diferente. Por ejemplo, el 4H-SiC posee una relación *c/a* de 3,271, mientras que su valor aumenta a 4,908 para el 6H-SiC.

2.3. Características del material crecido

2.3.1. Tecnología de GaN

La elevada temperatura (2500 ºC) y presión (45.000 atm.) de fusión del GaN hacen inviable su fabricación en lingotes de forma análoga a lo que sucede con otros materiales. Esta dificultad práctica se convierte en un problema de primer orden cuando se desea fabricar dispositivos. La carencia de sustratos de GaN obliga a crecer las capas de este material heteroepitaxialmente, es decir, sobre sustratos formados por otros materiales. La Tabla 2.2 presenta las características de algunos de los sustratos usados típicamente para crecimiento de los nitruros. Se puede observar cómo los parámetros de red y, por tanto, el desajuste para el crecimiento epitaxial del GaN difieren en valores muy significativos (nótese que el aluminato de litio presenta una estructura tetragonal). La utilización masiva del Al_2O_3 (zafiro) para la fabricación de capas de GaN se debe fundamentalmente al coste. Otros sustratos que han recibido atención han sido el Si y el GaAs por la posibilidad de integrar funciones electrónicas o de otro tipo en estos materiales.

	Al_2O_3 (zafiro) (Hexagonal)	6H-SiC (Hexagonal)	γ-$LiAlO_2$ (Tetragonal)	ZnO (Hexagonal)
***a* (Å)**	4,758	3,0812	5,1687	3,250
***c* (Å)**	12,991	15,102	6,2679	5,207
Ajuste || *a*	$a_{GaN} \parallel a_{Al_2O_3} / \sqrt{3}$	$a_{GaN} \parallel a_{SiC}$	$a_{GaN} \parallel c_{LiAlO_2} / 2$	$a_{GaN} \parallel a_{ZnO}$
Ajuste || *c*	-	$c_{GaN} \parallel c_{SiC}$	$c_{GaN} \parallel a_{LiAlO_2}$	$c_{GaN} \parallel c_{ZnO}$
Desajuste de red	-49% (-13%)	-3,1%	-0,3% || c -1,7% ⊥ c	2,1%
Coeficientes de expansión térmica (K^{-1})	7,5 x10^{-6}	3,2 x10^{-6}	7,5 x10^{-6}	$\Delta a/a$=4,56x10^{-6} $\Delta c/c$=2,56x10^{-6} T=300 K

Tabla 2.2. Características de algunos de los principales sustratos utilizados en el crecimiento de los nitruros del grupo III. La diferencia entre los parámetros de red del GaN y el Al_2O_3 se convierte en el desajuste real (entre paréntesis).

Las consecuencias derivadas de emplear sustratos no ajustados en red se aprecian en las peores prestaciones de los dispositivos fabricados, así como en una menor fiabilidad. El origen de esta pérdida global de calidad del material se encuentra en la alta densidad de defectos de carácter estructural, principalmente dislocaciones (en densidades tan altas como $10^9 - 10^{10}$ cm^{-2}), que se forman debido al desajuste de red con el sustrato. Las dislocaciones pueden actuar como centros de recombinación no radiativa o de dispersión. En el Capítulo 3, se detallan las técnicas de crecimiento estándar que permiten fabricar estos materiales. Conviene notar que, a pesar de la dificultad de crecimiento de sustratos de GaN, existen algunos grupos que han sido capaces de fabricarlos. El coste y otras consideraciones han hecho que la distribución de este material permanezca en un ámbito muy limitado.

Otros aspectos relevantes del material son:

i. **Formación de aleaciones.** La elevada diferencia en la distancia interatómica para el InN con respecto al GaN (11% como se aprecia en la Tabla 2.1) genera una mezcla inestable que puede dar lugar a fluctuaciones en composición y separación de fase. Así, las aleaciones de (In,Ga)N exhiben una microestructura que modifica las propiedades ópticas y eléctricas del material. El principal resultado es la formación de estados localizados que favorecen la emisión de luz en los dispositivos optoelectrónicos (la explicación del fenómeno de la

localización es un asunto controvertido que se escapa del contenido de esta monografía). Los problemas en la fabricación con el AlN son menores, aunque la energía elástica acumulada cuando se crecen multicapas puede producir roturas (*cracks*) en el material.

ii. **Dopaje.** El dopaje en GaN se realiza fundamentalmente con Si (energía de donor de 30 meV) para obtener una conductividad tipo n (electrones) y con Mg (energía de aceptor de 230 meV) para obtener una conductividad tipo p (huecos). La energía de activación de las impurezas de Mg es muy elevada, de forma que sólo una pequeña fracción se ioniza a temperatura ambiente con la consiguiente necesidad de incrementar el dopaje para alcanzar la conductividad deseada. Sin embargo, el dopaje no puede incrementarse más allá de 10^{20} cm^{-3}, ya que la calidad cristalina del material empeora notablemente a partir de esta concentración. El límite práctico de concentración de huecos permanece así en 10^{18} cm^{-3} a temperatura ambiente. También merece la pena destacar que el H pasiva el Mg, siendo necesario realizar un recocido para activar los aceptores en este caso.

2.3.2. Tecnología de SiC

A diferencia de lo que ocurre con el GaN, el SiC puede fabricarse en volumen más fácilmente. Por tanto, desaparecen los problemas asociados a la carencia de sustratos ajustados en red. Las técnicas empleadas en el crecimiento de sustratos son el proceso Acheson (la calidad de este material no es suficiente para aplicaciones electrónicas) y el proceso Lely, que fue modificado a finales de la década de 1970 y, en su versión de producción, a finales de la década de 1980. La compañía Cree Research Inc. fue precursora de la tecnología comercial de estos sustratos.

El principal inconveniente de los sustratos es la formación de microtuberías (*micropipes*) en densidades de $10^2 - 10^3$ cm^{-2}. Estas microtuberías son huecos pequeños que penetran el sustrato con tamaños que rondan entre 0,1 y 5 μm. Otro problema es la formación de una estructura de mosaicos observable en las medidas de rayos X y que se debe a la diferente orientación de dominios dentro de las capas.

El SiC se suele dopar con Al y N para conseguir conductividades de tipo p y n, respectivamente.

2.4. Propiedades mecánicas

La Tabla 2.3 ilustra los valores de las constantes elásticas (C_{ij}) determinadas para los diferentes binarios AlN, GaN e InN.

	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{13} (GPa)	C_{33} (GPa)	C_{44} (GPa)
AlN	396	137	108	373	116
GaN	390	145	106	398	105
InN	223	115	92	224	48

Tabla 2.3. Constantes elásticas para el AlN, GaN e InN.

2.5. Propiedades piezoeléctricas

Las constantes piezoeléctricas juegan un papel muy importante en la determinación de las propiedades de los dispositivos. La Tabla 2.4 recoge los valores de las constantes piezoeléctricas (e_{ij}) incluyendo la polarización espontánea.

	e_{13} (C/m^2)	e_{33} (C/m^2)	e_{15} (C/m^2)	P_{sp} (C/m^2)
AlN	-0,50	1,79	-0,48	-0,081
GaN	-0,35	1,27	-0,30	-0,029
InN	-0,57	0,97	-	-0,032

Tabla 2.4. Constantes piezoeléctricas para el AlN, GaN e InN.

El valor del coeficiente electrostrictivo M_{33} para el GaN es del orden de 10^{-22} m^{2}V^{-2} según cálculos teóricos recientes.

2.6. Propiedades de la estructura de bandas

La Tabla 2.5 resume algunas de las propiedades más básicas de la estructura de bandas para cada uno de los binarios analizados. En particular, se proporcionan los valores de la energía del ancho de banda prohibido (E_g), los desdoblamientos por efecto del campo cristalino (Δ_{cr}) y de la interacción espín-órbita (Δ_{so}), y las masas efectivas en las direcciones paralela ($m_e^{\parallel}$) y perpendicular al eje c ($m_e^{\perp}$).

Parámetros	AlN	GaN	InN
E_g (eV)	6,23	3,507	0,69
Δ_{cr} (eV)	-0,164	0,019	0,041
Δ_{so} (eV)	0,019	0,014	0,001
$m_e^{\parallel}$	0,28	0,20	0,12
$m_e^{\perp}$	0,32	0,20	0,12

Tabla 2.5 Parámetros básicos de la estructura de bandas del AlN, GaN e InN.

2.7. Propiedades ópticas

La Tabla 2.6 recoge las propiedades ópticas básicas para cada unos de los compuestos AlN, GaN e InN. El valor del índice de refracción y del coeficiente de absorción pueden verse modificados por la calidad estructural de las capas (conviene diferenciar entre material epitaxial, policristalino y amorfo) y la concentración de portadores. También debe tenerse en cuenta que ambos valores dependen de la frecuencia y la orientación cristalina (típicamente para direcciones paralela y perpendicular al eje c, excepto cuando se introduce estrés en el material). El coeficiente de absorción está dado para energías cercanas a las correspondientes a la banda prohibida. Otro parámetro de interés desde el punto de vista óptico es la energía del fonón óptico.

Parámetros	AlN	GaN	InN
n_r	2,1–2,2	2,3	2,9
α (cm^{-1})	>10^4	7,5×10^4	>10^4
$\hbar\omega_{LO}$ (meV)	99	91,2	73

Tabla 2.6 Parámetros ópticos básicos para el AlN, GaN e InN.

2.8. Comparación de las principales propiedades eléctricas

En este apartado, se comparan las propiedades de los principales semiconductores usados para aplicaciones de electrónica de altas prestaciones (véase Tabla 2.7).

	Si	GaAs	InP	4H-SiC	GaN
μ_e (cm^2/Vs)	1300	4500	8500	700	1200 (Bulk) 2000 (2DEG)
ν_{sat} (cm/s)	1×10^7	1×10^7	1×10^7	2×10^7	2×10^7
ν_{peak} (cm/s)	N/A	$2{,}1\times10^7$	$2{,}3\times10^7$	N/A	$2{,}7\times10^7$
N_{2DEG} (cm^{-2})	N/A	$\sim4\times10^{12}$	$\sim5\times10^{12}$	N/A	$1{,}2\times10^{13}$
ε_r	11,8	12,8	12,5	10	9
T_c (W/cmK)	1,5	0,43	0,68	3,7	1,3
E_{break} (MV/cm)	0,3	0,4	0,5	3	3,3

Tabla 2.7. Comparación de parámetros básicos para la fabricación de transistores de altas prestaciones.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

3. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN Y PROCESADO

3. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN Y PROCESADO

En el caso de los semiconductores, existe una clara división entre las técnicas de fabricación u obtención del material y las técnicas de procesado, entendiendo estas últimas como las que permiten el desarrollo de dispositivos a partir de una lámina de material. Desde un punto de vista más técnico, la fabricación del material base se suele denominar crecimiento, para enfatizar el modo en el que se produce el proceso de formación de las capas. La funcionalidad añadida por el procesado posterior tiende a concentrarse cerca de la superficie del material. De ahí que las capas que se crecen cerca de la superficie deban tener un mejor control de sus propiedades. La técnica de fabricación de estas últimas capas se conoce como epitaxia. El resto del material pertenece a lo que se podría denominar como sustrato. Esta diferencia es importante en el caso de los nitruros del grupo III, ya que la obtención de sustratos no es una tarea fácil. Así, las epitaxias de nitruros se crecen sobre sustratos de otros materiales (heteroepitaxia). El procesado no es menos importante que la fabricación del material en la determinación de las propiedades de los dispositivos, aunque emplea técnicas menos especializadas (fotolitografía, ataque, metalización de contactos,…). Los siguientes apartados pretenden proporcionar una visión general de las técnicas de fabricación empleadas.

3.1. Fabricación de material: Nitruros del grupo III

La fabricación de obleas de GaN de calidad y tamaño suficiente a bajo coste es uno de los hitos más deseados en el desarrollo de esta tecnología. En la actualidad, ya se han planteado algunas soluciones que podrían llegar a convertirse en un estándar comercial. Sin embargo, mientras su implantación no sea una realidad, la mayor parte del material se seguirá fabricando mediante crecimiento heteroepitaxial sobre sustratos no nativos como el SiC en sus diferentes politipos hexagonales (4H-SiC y 6H-SiC), el Si o el zafiro. También se ha popularizado el uso de pseu-

do-sustratos de GaN u otras aleaciones o compuestos de nitruros del grupo III como paso previo al crecimiento de las epitaxias. Estos pseudo-sustratos, que se conocen comúnmente como *templates*, surgen para facilitar el trabajo a los desarrolladores de dispositivos, especializando la tarea básica de reducir los defectos ocasionados por el desacoplo existente entre las redes cristalinas para el crecimiento heteroepitaxial. De esta manera, se separa el trabajo orientado a mejorar la calidad del material base de la fabricación de las estructuras que forman los dispositivos mediante técnicas epitaxiales.

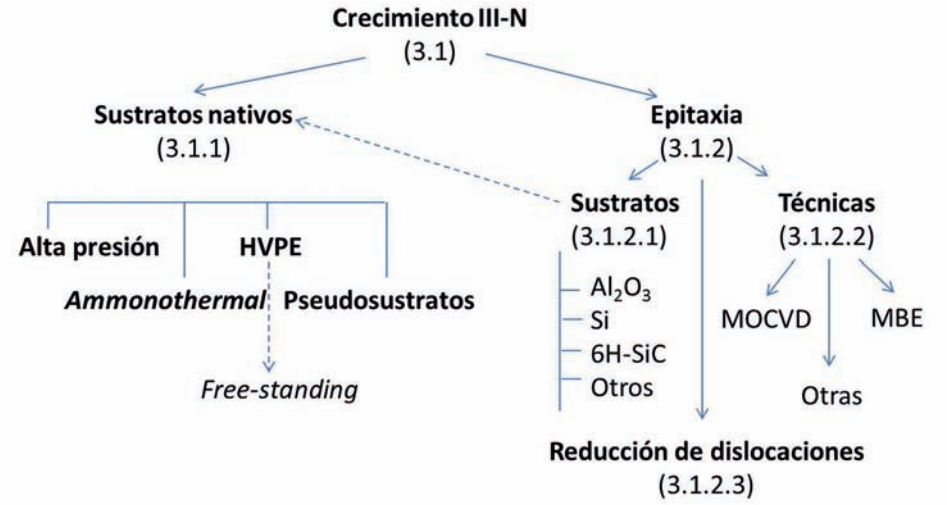


Figura 3.1. Clasificación de los métodos de crecimiento incluyendo los aspectos más relevantes de la tecnología actual. Los números entre paréntesis indican el apartado del texto que trata la materia a la que hacen referencia (Fuente: Carlos Rivera de Lucas, ITM, Ministerio de Defensa).

En los siguientes apartados se explicarán brevemente algunas de las técnicas de crecimiento más empleadas y su relación con las propiedades del material, así como el motivo de la elección de los sustratos para las diferentes aplicaciones (véase Figura 3.1). Los resultados presentados en este capítulo se refieren al crecimiento de capas y sustratos orientados según el plano C, es decir, a lo largo del eje c. Las tendencias actuales muestran que el crecimiento a lo largo de otras orientaciones no polares tales como la $[1\bar{1}00]$ o la $[11\bar{2}0]$ permiten mejorar las prestaciones de los dispositivos, fundamentalmente optoelectrónicos,

además de añadir nuevas funcionalidades útiles para el desarrollo de aplicaciones avanzadas.

3.1.1. Crecimiento de sustratos nativos

La alta presión parcial de nitrógeno, necesaria para alcanzar la temperatura de fusión del GaN (véase capítulo 2) dificulta el proceso de fabricación directo de capas de este material en volumen (por ejemplo, usando el método Czochralski). Existen, no obstante, varias estrategias para obtener sustratos de GaN de calidad cristalina suficiente para realizar dispositivos y estructuras válidos para aplicaciones electrónicas y optoelectrónicas. La primera consiste en optimizar las condiciones de presión y temperatura jugando con las distintas variables de estado termodinámicas para conseguir que se sintetice el material. Las velocidades de crecimiento usando este tipo de estrategias son del orden de 5 – 10 μm por hora. La segunda consiste en depositar capas gruesas por epitaxia en fase vapor mediante hidruros (*Hydride Vapor Phase Epitaxy* o HVPE) sobre sustratos de Si o zafiro. Las capas gruesas de nitruros así crecidas se suelen separar del sustrato en un proceso posterior. La tercera se basa en crecer capas epitaxiales, típicamente por depósito químico en fase vapor con precursores metalorgánicos (*Metalorganic Chemical Vapour Deposition* o MOCVD), con espesores suficientes para ofrecer unos determinados parámetros de calidad del material (grado de deformación, densidad de dislocaciones, concentración residual, etc.). Esta estrategia, que no utiliza técnicas de crecimiento en volumen, se corresponde con la variante de fabricación de pseudosustratos mencionada anteriormente, ya que no permite obtener material *free-standing* como en el caso anterior.

Algunas de las principales técnicas de fabricación usadas en cada una de las estrategias anteriores son las siguientes:

a) Crecimiento a alta presión a partir de soluciones de GaN

Esta técnica permite la fabricación de monocristales de GaN de alta calidad estructural. Se basa en el crecimiento de placas de GaN a partir de una solución formada por N atómico disuelto en Ga líquido sometida a una alta presión de N_2 (~20.000 atmósferas). La solución tiene que mantenerse en un recipiente cerrado bajo un gradiente de temperatura donde la parte que se encuentra en contacto con el gas está a ~1650 ºC y la parte en la que se precipita el GaN (en el interior de la disolución) a ~1550 ºC. El crecimiento no necesita de la exis-

tencia de una semilla de GaN, aunque, de no usarse, es fuertemente anisótropo.

Los principales inconvenientes de esta técnica son el tiempo de crecimiento, el tamaño final de las obleas (el espesor de las paredes del recipiente depende de forma cúbica con el volumen de la cámara interior) y la alta concentración residual. La concentración residual, atribuida fundamentalmente a contaminación de oxígeno, se ha reducido notablemente con los avances en la fabricación.

b) Crecimiento «amonotérmico» (*ammonothermal growth*)

Esta tecnología adapta el método de fabricación de los cristales de cuarzo a los nitruros. Para ello, se introduce la materia prima de nitruro de galio mediante amidas alcalinas-metálicas mineralizadas y Ga metálico en el compartimento superior de una autoclave (recipiente específico capaz de soportar altas temperaturas y presiones). En la parte inferior de la autoclave, se deposita amoniaco dentro de un recipiente justo debajo de un compartimento donde se colocan las semillas para el crecimiento de GaN. El proceso consiste básicamente en calentar el amoniaco hasta conseguir que alcance un estado de fluido supercrítico (aumentando al mismo tiempo la presión) de forma que la solución resultante pueda atacar y disolver la materia prima de GaN. Esta solución se transporta por convección a la parte más fría de la cámara de la autoclave. Finalmente, el GaN se separa de la solución adhiriéndose a la semilla para formar el cristal. Las condiciones de temperatura y presión son menos exigentes que en el caso anterior, suponiendo valores en torno a 500 ºC y 5.000 atmósferas, respectivamente. El diseño de la autoclave es crítico para optimizar el proceso de crecimiento.

Esta técnica produce en la actualidad monocristales de GaN de 2 pulgadas con alta calidad estructural y baja contaminación residual. Se espera que en el futuro próximo se puedan fabricar obleas de 4 pulgadas, permitiendo así reducir el coste de producción.

c) Crecimiento por HVPE. Técnicas de separación de sustrato

El crecimiento por HVPE es una técnica común en la fabricación de semiconductores. El proceso de crecimiento comporta transporte de los compuestos en forma de vapor hasta el sustrato. Una vez han alcanzado el sustrato, estos compuestos se descomponen y se incor-

poran en su superficie. Los mecanismos que afectan al crecimiento son de naturaleza química, es decir, basados en reacciones entre los diferentes compuestos. Típicamente, las temperaturas a las que se producen estos procesos son elevadas (entre 1000 y 1200 ºC). La presión, sin embargo, es de 1 atmósfera.

La química utilizada en el crecimiento de los nitruros emplea como precursores de los elementos del grupo III y el grupo V, respectivamente, un haluro, como el GaCl, y un hidruro, como el NH_3. La reacción química se puede escribir como:

$$GaCl(g)+ NH_3(g) \rightarrow GaN(s)+HCl(g)+H_2(g),$$

donde g y s denotan fase gaseosa y sólida, respectivamente. También se pueden incluir dopantes mediante silano (SiH_4) o Mg. En el caso del Mg, es importante reducir la concentración de hidrógeno en la zona donde se encuentra el sustrato para evitar que se formen complejos H:Mg, con la consecuente reducción de la conductividad de las capas.

Las velocidades de crecimiento obtenidas por este método rondan las 10-300 μm por hora, permitiendo la fabricación de capas gruesas a bajo coste. La liberación de las capas de sus respectivos sustratos para conseguir GaN *free-standing* se puede realizar mediante diversas técnicas:

– Ataque químico (por ejemplo, para Si o GaAs).
– Ataque por iones reactivos (por ejemplo, para SiC).
– Láser *lift-off* (por ejemplo, para zafiro).

En el caso de la técnica de láser *lift-off* se requieren densidades de energía en torno a 200 mJ/cm^2 para GaN-HVPE crecido sobre zafiro usando, por ejemplo, un láser de YAG:Nd ($\lambda = 355$ nm) por conmutación Q (Q-*switched* láser). Este proceso debe llevarse a cabo a temperaturas rondando los 650-700 ºC.

3.1.2. Crecimiento epitaxial

En este apartado se describen y comparan las diferentes técnicas de crecimiento epitaxial, haciendo énfasis en los resultados más relevantes y las características que ofrecen cada uno de los distintos métodos.

3.1.2.1. Sustratos

Debido a las dificultades en la fabricación de material en volumen de alta calidad cristalina, la elección de sustrato para crecimiento epitaxial ha sido una tarea obligada para los desarrolladores de material. Las características de algunos de los sustratos más comúnmente empleados son:

- **Zafiro:** tiene como principal ventaja la posibilidad de obtener obleas de gran área a bajo coste. Su principal inconveniente es que presenta una baja conductividad térmica.
- **Silicio:** la ventaja comparativa más interesante es la posibilidad de integración de dispositivos basados en nitruros con tecnología CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) estándar. Por el contrario, la calidad cristalina del material es pobre como consecuencia de los altos desajustes de red y coeficientes de expansión térmica, así como los problemas de interdifusión.
- **Carburo de silicio:** presenta como ventajas un bajo desajuste de red y de coeficiente de expansión térmica, así como una elevada conductividad térmica. La desventaja más notable es su elevado precio.

Existen otros muchos materiales que se pueden emplear como sustratos, entre los que destacan el ZnO y el GaAs. La opción preferida para fabricar dispositivos de altas prestaciones es el 6H-SiC. El zafiro, por otra parte, es el sustrato más usado en aplicaciones de bajo coste, dado que proporciona los mejores resultados de compromiso entre calidad cristalina del material y prestaciones de los dispositivos fabricados.

Figura 3.2. Sistema MOCVD Veeco TurboDisc® K465 para crecimiento de GaN. (Fuente: Veeco).

Para materiales crecidos a lo largo de orientaciones no polares se han utilizado los mismos materiales cambiando el plano sobre el que se realiza el crecimiento (por ejemplo, zafiro plano R o 6H-SiC plano A), así como otros sustratos (por ejemplo, γ-$LiAlO_2$).

3.1.2.2. Técnicas

Existen dos técnicas destacadas para crecimiento epitaxial de estructuras basadas en nitruros del grupo III, el depósito químico en fase vapor con precursores metalorgánicos (*Metalorganic Chemical Vapour Deposition* o MOCVD) y la epitaxia por haces moleculares (*Molecular Beam Epitaxy* o MBE). Cada técnica presenta sus ventajas e inconvenientes, aunque la mayor parte de los productos comerciales hacen uso en la actualidad de los sistemas MOCVD. En este apartado, sólo se hace referencia al GaN como ejemplo. El crecimiento de las aleaciones con In o Al, así como de los compuestos InN y AlN, presentan sus propias particularidades y requerirían un tratamiento más extenso y especializado.

a) MOCVD (véase un equipo real en la Figura 3.2)

El crecimiento por MOCVD de GaN se distingue del de otras tecnologías por la reacción compleja que se produce en fase gaseosa entre los precursores de nitrógeno y galio. Normalmente, estos precursores de nitrógeno y galio suelen ser NH_3 y $Ga(CH_3)_3$ (trimetilgalio) o $Ga(C_2H_5)_3$ (trietilgalio), respectivamente. La reacción entre el NH_3 y el $Ga(CH_3)_3$ da lugar a la formación de aductos que a su vez pueden evolucionar produciendo otra serie de reacciones incontroladas. La inestabilidad química tiene como consecuencia una alta no uniformidad en la velocidad de crecimiento. La reacción básica en el MOCVD de GaN con los precursores anteriores es la siguiente:

$$Ga(CH_3)_3 + NH_3 \rightarrow GaN$$

Para prevenir la aparición de inhomogeneidades en el espesor y la composición de las capas crecidas, así como la mezcla prematura de los gases reactantes, se suele recurrir a diseños específicos de la cámara de crecimiento. Es habitual que los sustratos roten durante el crecimiento precisamente para garantizar que se cumpla este requisito. El sustrato es otro factor decisivo en el método de crecimiento y las propiedades finales de las capas crecidas.

El crecimiento directo de GaN por MOCVD sobre zafiro no resulta en dispositivos aptos para el desarrollo de aplicaciones. La nucleación se produce, en este caso, por islas aisladas. La diferencia entre los parámetros de red y el coeficiente de expansión térmica (véase el apartado 2.3.1) aconsejan un crecimiento en varias etapas, que incluye un tratamiento de la superficie, seguido del depósito de un surfactante y una capa de nitridación de baja temperatura (450 – 600 ºC) de

GaN o AlN, un tratamiento térmico y el crecimiento de la capa a alta temperatura (1050 – 1100 ºC). La capa de nitridación puede formarse mediante un proceso 2D o 3D dependiendo de la implementación concreta. Las velocidades de crecimiento rondan 1 – 3 μm por hora. En el apartado 3.1.2.3. se proporcionan más detalles acerca de las capas amortiguadoras y las técnicas de filtrado de dislocaciones habituales.

En el caso del crecimiento de GaN sobre 6H-SiC no es necesario emplear una capa de nitridación de baja temperatura. No obstante, sí se requiere crecer una capa amortiguadora a baja temperatura de AlN o (Al, Ga)N.

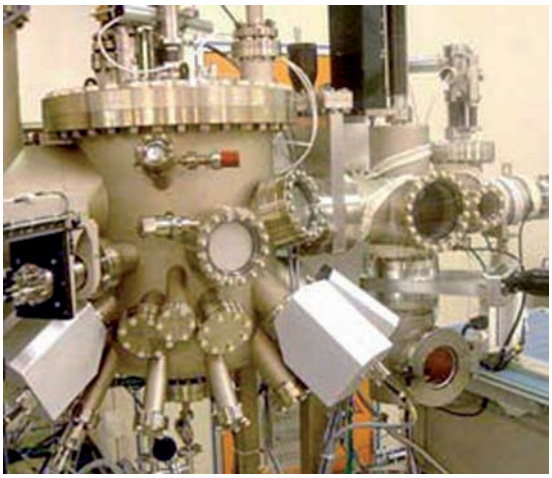


Figura 3.3. Sistema MBE Compact 21® de Riber. (Fuente: Riber).

b) MBE (véase un equipo real en la Figura 3.3)

A diferencia del sistema de crecimiento por MOCVD, el MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) opera en condiciones de ultra alto vacío. La desorción de átomos en alto vacío limita la temperatura de crecimiento a un valor inferior al que se emplea usando un sistema de MOCVD. La temperatura óptima de crecimiento para GaN se sitúa en torno a 650 – 750 ºC, excepto cuando se usa NH_3 como precursor. Los valores de temperatura se tienen que modificar en caso de crecer InN (valores unos 100 ºC más bajos) y AlN (valores unos 100 ºC más altos), análogamente a lo que sucede con el MOCVD. El crecimiento por MBE comparte la dificultad técnica de conseguir nitrógeno activo con el MOCVD. La diferencia en la forma de conseguir nitrógeno activo se traduce en distintos tipos de sistemas MBE:

– NH_3-MBE: el crecimiento se basa en la descomposición por pirólisis de las moléculas de NH_3 cuando llegan al sustrato. El producto de la reacción produce un exceso de hidrógeno.
– ECR (*Electron Cyclotron Resonance*) MBE: el crecimiento se basa en la formación de un plasma de nitrógeno usando la resonancia

ciclotrón de electrones a 2,45 GHz. Aparecen, por tanto, diferentes especies de N (radicales moleculares, atómicos e iones).

– RF-MBE: el crecimiento se basa en un plasma de nitrógeno como en el caso anterior, pero generado mediante excitación en radiofrecuencia (típicamente a 13,56 MHz).

El GaN se forma como resultado de la reacción producida entre los átomos de Ga y las diferentes especies de N o NH_3, según sea el caso. La velocidad de crecimiento es ligeramente inferior al caso del MOCVD.

Los reactores MOCVD han producido resultados sistemáticos más adecuados para el desarrollo de dispositivos (fundamentalmente LED y láser) que en el caso del MBE. Sin embargo, existen algunas ventajas del MBE sobre el MOCVD en términos de control de crecimiento, contaminación (por trabajar en alto vacío y no requerir determinadas especies químicas) y calidad de intercaras.

c) Otras

Existen diversas técnicas de crecimiento de materiales que se han adaptado al caso de los nitruros del grupo III con objeto de producir materiales a bajo coste o en diferentes condiciones (por ejemplo, baja temperatura). Algunos ejemplos son *sputtering* o RPE-LICVD (*Remote Plasma Enhanced-Laser-Induced Chemical Vapor Deposition*).

3.1.2.3. Capas amortiguadoras y ELOG

Las capas amortiguadoras son uno de los elementos esenciales en la mejora del material crecido tanto por MOCVD como por MBE. Como se ha comentado en el apartado 3.1.2.2, la imposibilidad de crecer directamente la capa de GaN teniendo que adaptar las condiciones del sustrato a la capa crecida fuerza a la existencia de capas intermedias. La función de este tipo de capas es la de filtrar dislocaciones y permitir el crecimiento en buenas condiciones para generar material compacto.

Los materiales empleados en las capas amortiguadoras son típicamente GaN, (Al,Ga)N y AlN. Estas capas se depositan a baja temperatura para crecimiento por MOCVD. En el crecimiento por MBE, por el contrario, el depósito suele realizarse a alta temperatura. Las estructuras que conforman las capas amortiguadoras también pueden ser diversas: superredes, bicapas, etc. y su inclusión también tiene efecto sobre el estrés global de la capa crecida.

Otra estrategia más efectiva para reducir la densidad de dislocaciones es la conocida como recrecimiento epitaxial lateral (*Epitaxial Lateral Overgrowth* o ELOG). Consiste en crecer una capa de la manera convencional con su capa amortiguadora (espesor de 1 ó 2 μm) y a continuación depositar una capa fina (100 – 200 nm) de SiO_2 o Si_3N_4 donde se abrirán ventanas mediante ataque húmedo. Posteriormente, se recrece la capa de GaN bajo condiciones similares a las estándar. El recrecimiento es preferencial en la zona de las ventanas, cambiando la dirección de propagación de las dislocaciones. La reducción de dislocaciones mediante la técnica ELOG ha alcanzado factores tan elevados como 10^4.

3.2. Procesado de dispositivos

En este apartado se intentarán describir los pasos tecnológicos más relevantes a la hora de procesar un dispositivo de GaN. Sin duda, por su interés en múltiples aplicaciones, los transistores de alta movilidad electrónica HEMT, véase la Figura 3.4, son el ejemplo más representativo

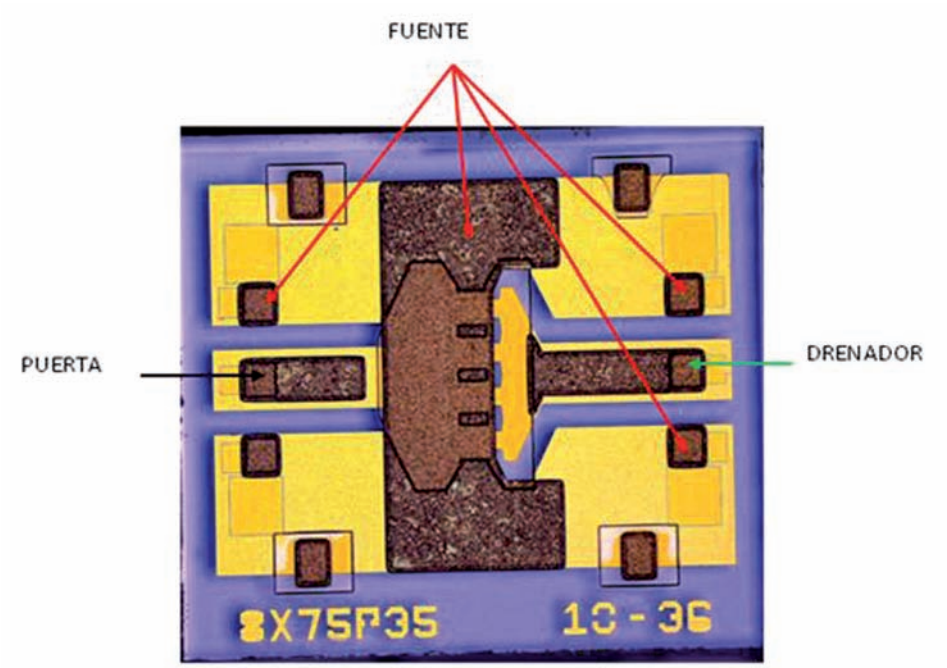


Figura 3.4. HEMT de GaN, «multifinger» 8x75 μm. Fabricado por III-V Lab para el proyecto KORRIGAN. (Fuente: Ministerio de Defensa).

que va a permitir ilustrar de una forma más clara los pasos tecnológicos asociados a la fabricación de este tipo de dispositivos.

La fabricación completa de un transistor de alta movilidad electrónica de GaN requiere un elevado número de etapas, desde el diseño y fabricación del conjunto de máscaras hasta el encapsulado final.

3.2.1. Etapas de procesado

3.2.1.1. Contactos metálicos

Estos dispositivos constan de tres contactos metálicos, la fuente, el drenador y la puerta. Los dos primeros son contactos de tipo óhmico, es decir, de baja resistencia y comportamiento lineal, que sirven para inyectar y extraer la corriente del dispositivo. En la puerta, por el contrario, se forma un contacto Schottky rectificante, cuya misión consiste en modular la corriente que fluye a través del transistor, entre fuente y drenador, abriendo y cerrando el canal de GaN.

a.1) **Contactos óhmicos**: el primer paso es el depósito de la estructura multicapa, típicamente de Ti/Al/Ni/Au o Ti/Al/Pt/Au, por evaporación térmica o por pulverización catódica *sputtering* (véase la Figura 3.5). Conforme se deposita esta estructura metálica no tiene carácter óhmico, por lo que tras el depósito hay que proceder a un aleado térmico para conseguir resistividades bajas del contacto. Para ello, generalmente se usan equipos de aleado térmico rápido (RTA), con los que es posible conseguir temperaturas muy altas en unos pocos segundos. La resistividad y morfología superficial de los contactos son los factores determinantes para la optimización de los mismos. Ambas características dependen del ciclo óptimo de aleado (tiempo y temperatura) y de la elección de los metales y sus espesores. Una buena morfología superficial es fundamental para conseguir una definición excelente de los contactos, de manera que se pueda reducir la distancia fuente-puerta y, por consiguiente, reducir la resistencia en serie de la fuente. Otra particularidad importante que deben cumplir para aplicaciones de electrónica de alta potencia es la estabilidad térmica hasta 350 °C. En este caso, es preferible introducir metales refractarios en la estructura de metalización, como el W o el WSix. Estos contactos muestran un comportamiento térmicamente estable hasta temperaturas próximas a los 800ºC.

Figura 3.5. Sistema sputtering Leybol Z-550, deposito de capas metálicas sobre obleas de 2" y 4". (Fuente: Ministerio de Defensa).

a.2) **Contacto Schottky:** la evaporación directa de un metal sobre el semiconductor, AlGaN, da lugar a una barrera de potencial suficientemente alta para formar este tipo de contactos. Las estructuras metálicas más utilizadas son: Au, Ni/Au o Pt/Au. Desde el punto de vista de las aplicaciones de los transistores HEMT, para obtener alta eficiencia de potencia añadida (PAE) en el rango de altas frecuencias (microondas) es necesario que la longitud de puerta sea muy pequeña. Con el objetivo de soslayar los problemas denominados «efectos del canal corto» y «pérdida del control de la carga del canal por el terminal de puerta» derivados de la miniaturización de las estructuras, han surgido los dispositivos multipuerta, que tienen como objetivo aumentar la corriente y, por lo tanto, la velocidad de conmutación de los dispositivos.

Tras el depósito de los metales de contacto, el siguiente paso consiste en definir y aislar el dispositivo.

3.2.1.2. Aislamiento de dispositivos

Las estructuras «mesa» para el aislamiento de dispositivos requieren ataques anisótropos y velocidades elevadas. Ambos requisitos no se pueden logran con ataques húmedos (debido a la resistencia que presenta el GaN a los mismos), por lo que generalmente se recurre a las técnicas de ataque seco basadas en gases clorados. La tecnología más utilizada es el RIE (*Reactive Ion Etching*). En ocasiones se utilizan técnicas alternativas tales como la implantación iónica (Ion Implantation) o el IBM (Ion Beam Milling) donde la estructura mesa se obtiene por bombardeo físico del haz de iones inertes sobre el material.

Una vez aislado el dispositivo del resto, se procede al depósito de una capa pasivante que tiene una doble función: proteger el dispositivo del ambiente y eliminar cualquier efecto eléctrico no deseado que empeore las prestaciones del transistor durante su funcionamiento.

3.2.1.3. Capas de protección y pasivado

Las películas de Si_3N_4 o de SiO_2, depositadas por las técnicas PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition*) o ICP-CVD (*Inductively Coupled Plasma Chemical Vapour Deposition*), véase un equipo típico en la Figura 3.6, se utilizan como capas de protección para evitar que se produzca una reacción química entre la superficie del semiconductor y la atmósfera (oxígeno, humedad, etc.), contribuyendo a la estabilización y a la protección del dispositivo y sus prestaciones durante la fase de fabricación. Estas películas deben cumplir ciertos requisitos, como son una buena adherencia para soportar las tensiones mecánicas y térmicas que se pueden producir durante la fabricación y a lo largo de la vida útil del dispositivo, además de evitar la capacidad parásita que reduce la ganancia de RF.

El objetivo de estas películas, utilizadas como capas de pasivado son dos: reducir, o si es posible eliminar, los efectos de colapso que hacen que la corriente de los dispositivos HEMT decrezca drásticamente al incrementar la frecuencia y reducir la corriente de fugas de puerta y el ruido.

En el apartado anterior se ha presentado un resumen de los pasos más importantes que hay que realizar durante la fabricación de un transistor HEMT. A continuación se presentan las técnicas más utilizadas para realizar dicho procesado.

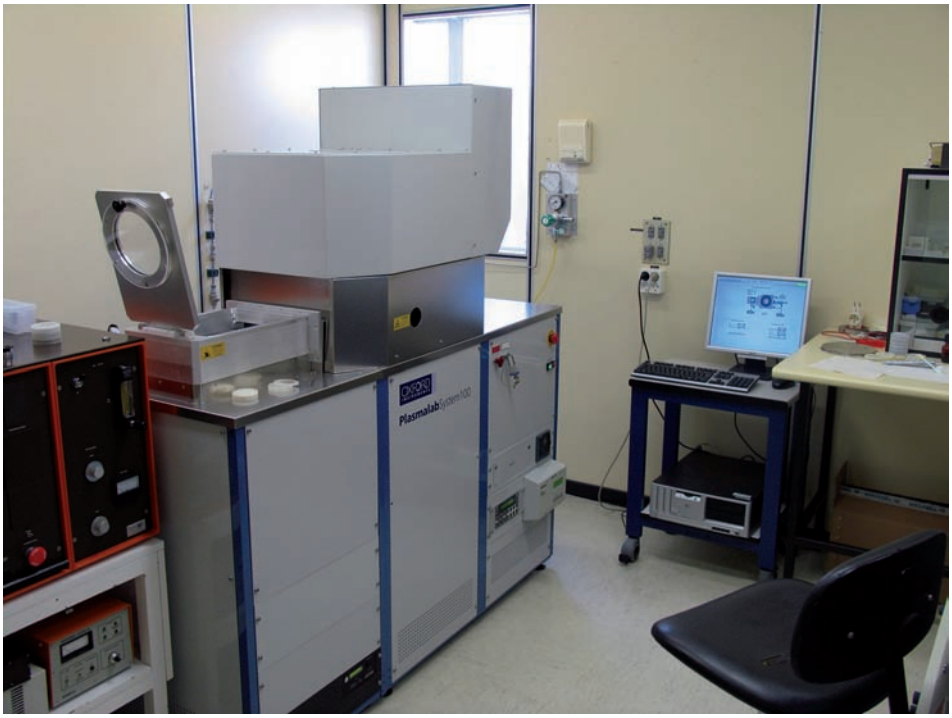


Figura 3.6. System 100 ICP Oxford Instrument para depósito de capas dieléctricas. (Fuente: Ministerio de Defensa).

3.2.2. Técnicas de procesado

– Depósito de láminas metálicas

PVD (*Physical Vapour Deposition*): consiste en el calentamiento hasta la evaporación del material que se pretende depositar. El vapor del material acaba condensándose en forma de lámina delgada sobre las superficies frías del sustrato y de las paredes de la cámara de vacío. La evaporación del material puede realizarse por efecto Joule o mediante un haz de electrones.

Sputtering: el material a depositar, denominado blanco, se bombardea con un haz de iones acelerados. Mediante esta técnica es posible depositar materiales refractarios (punto de fusión elevado).

– Aleado

RTA (*Rapid Thermal Annealing*): permite obtener temperaturas elevadas en pocos segundos. La temperatura la suministra la lámpara de infrarrojo, durante el aleado hay una purga continua de un gas inerte que impide la oxidación y contaminación.

– Aislamiento de dispositivos

RIE (*Reactive Ion Etching)*: se basa en generar un plasma mediante descarga de arco, de gases reactivos. Al introducirse los iones en la cámara de reacción son adsorbidos por la superficie, produciendo una reacción química de ataque entre la capa y los gases del plasma. Los productos de la reacción son especies volátiles transportadas hacia el exterior.

IBM (*Ion Beam Milling)*: se ioniza el gas inerte y posteriormente es colimado formando un haz de iones que incide en la muestra eliminado el material. Dicha eliminación del material, en este caso, se produce exclusivamente por bombardeo físico.

Implantación Iónica (*Ion Implantation*): los iones del elemento deseado son electrostáticamente acelerados hasta alcanzar una alta energía. Estos iones impactan con el material, cambiando sus propiedades físicas.

– Depósito de capas dieléctricas

PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition*): se forma un plasma con los gases precursores que reaccionan dando lugar a un nuevo producto, el cual se condensa en forma de lámina delgada sobre el sustrato. Uno de los mayores inconvenientes de esta técnica es que, debido a la gran variedad de especies excitadas en el plasma, se da la presencia en el material depositado de impurezas provenientes de los productos de descomposición de los gases reactantes.

ICP-CVD (*Inductively Coupled Plasma-Chemical Vapour Deposition*): estas técnicas de plasma de alta densidad permiten realizar el depósito a temperaturas bajas (hasta temperatura ambiente). Otra de las ventajas, es que al ser independientes las cámaras de ionización de los gases y la de trabajo, es posible utilizar como gas precursor nitrógeno (necesita mayor energía de disociación), en lugar de amoniaco, evitando la incorporación excesiva de hidrógeno.

3.2.3. Control del procesado

Figura 3.7. Estación de puntas con caja de aislamiento para la caracterización eléctrica, C-V y G-f, de los dispositivos. (Fuente: Ministerio de Defensa).

Como hemos visto anteriormente, el procesado de un dispositivo de GaN es complejo y lleva asociado varios pasos tecnológicos utilizando diferentes técnicas. Esta complejidad exige que para el control de las etapas de procesado se incorpore en las máscaras una PCM (*Process Control Module*). Está formada por una serie de estructuras test tales como la TLM (*Transmission Line Method*), para la medida de la resistencia de los contactos óhmicos; las barras Hall, para la medida de la concentración y movilidad de los portadores en la epitaxia; las MIM (*Metal-Insulator-Metal*) y MIS (*Metal-Insulator-Semiconductor*), para la caracterización del pasivado y medidas de fugas en los diodos Schottky (medidas C-V y G-f, véase la Figura 3.7); las Leakage Test, para medida de aislamiento de los dispositivos. Cada etapa del procesado es controlada mediante las estructuras de test incorporadas en la PCM.

Mejoras tecnológicas en el procesado

A pesar de los avances logrados en el procesado de dispositivos HEMTs de GaN, existen todavía procesos donde es posible seguir mejorando y madurando la tecnología. Uno de ellos es la adherencia de las capas de pasivado, relacionada con la necesidad de introducir mejoras tales como: a) limpieza «*in situ*» previa al depósito, con plasmas de N_2, N_2O y NH_3 o mezcla de ellos, que es necesario optimizar, o bien b) con el estudio del impacto que tiene la presencia de H_2 en la capa de Si_3N_4, que disminuye su estabilidad térmica, degradando el dispositivo cuando se

somete a un tratamiento térmico en etapas posteriores de fabricación. Con la optimización de las técnicas de depósito de plasma de alta densidad, ICP-CVD, con las que es posible utilizar el gas N_2, como precursor de nitrógeno en lugar del NH_3 (utilizado en las técnicas de depósito por PECVD) se evitaría la incorporación del H en las capas depositadas y como consecuencia mejoraría su adherencia.

Del mismo modo, será necesario optimizar la tecnología de formación de los contactos óhmicos para minimizar la resistencia de los contactos y mejorar la morfología superficie con el objeto de evitar su degradación cuando se someten a estrés térmico.

3.2.4. Estudios de fiabilidad

El objetivo de los estudios de fiabilidad, realizados sobre dispositivos tales como los transistores HEMTs de GaN, es asociar los fallos de funcionamiento, tanto iniciales como después de un tiempo de operación, con fallos en la estructura/procesado del transistor. Una de las técnicas más utilizadas en los estudios de fiabilidad es la observación directa, por microscopía óptica, de la región de las puertas. Esta técnica exige, como paso previo, dejar al descubierto dicha zona ya sea mediante la ingeniería inversa (eliminación selectiva de capas), o mediante el pulido de la metalización posterior y ligero adelgazamiento del sustrato de SiC. Este tipo de técnicas ha permitido asociar la corriente de fugas, en la etapa inicial de los transistores, a fallos de procesado tales como la falta de adherencia de la metalización del contacto de puerta, en unos casos, o a la ausencia de parte de esta metalización en otros, véase la Figura 3.8, después de un tiempo de funcionamiento. Por su parte, en algunos estudios de fiabilidad realizados sobre dispositivos que han fallado en funcionamiento han demostrado que la corriente de fugas suele estar asociada a la degradación de los contactos y a puertas «quemadas», como consecuencia de la alta temperatura alcanzada en esta zona durante el funcionamiento.

Por otra parte, existen estudios de fiabilidad basados en el análisis estadístico de los fallos que presentan los dispositivos, HEMT de GaN, después de los diferentes test de envejecimiento a los que se les somete. Concretamente: a) HTRB: polarización inversa en puerta a alta temperatura (200º C); b) OCT: canal abierto, alta densidad de corriente (100 a 200ºC); c) HTOL: portadores calientes a 300ºC y d) IDQ: campo eléctrico elevado, 80ºC. Se utiliza el método estadístico convencional de la curva de Weibull para medir la tasa de fallo MTTF *(Mean Time To Failure)*. Este

parámetro es difícil de obtener, debido a que la mayoría de los fallos se producen durante la «tasa de fallos infantiles», como consecuencia, de la falta de madurez en la tecnología y del escaso número de dispositivos disponibles.

Por último, mencionar que es posible el desarrollo de modelos matemáticos a partir de medidas llevadas a cabo en diferentes test de fallos, estudiando la evolución temporal de magnitudes como la transconductancia, corriente de saturación de drenador, tensión de *pinch-off*, corriente de fugas en puerta y tensión de polarización de puerta, etc. Los resultados obtenidos estarán directamente ligados con la madurez de la tecnología.

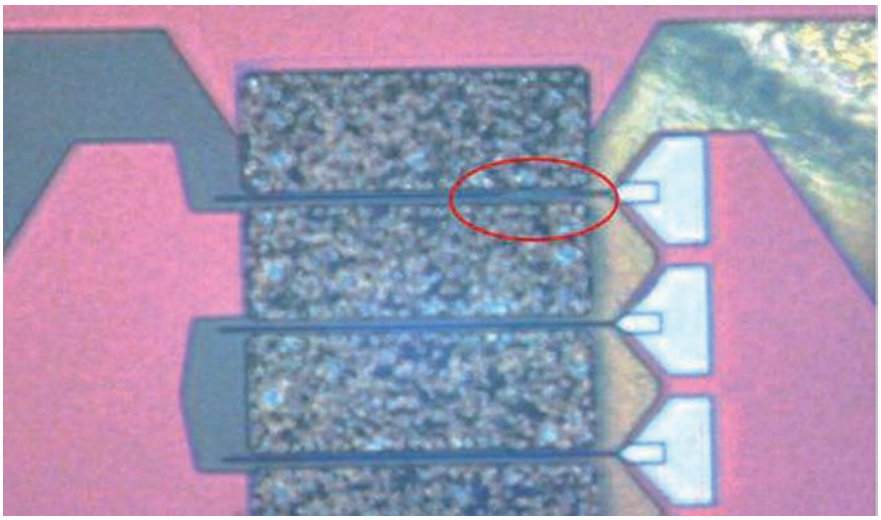


Figura 3.8. En la figura se observa, a través del sustrato de SiC, la ausencia de parte de la metalización de puerta. (Fuente: Ministerio de Defensa).

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

4. DISPOSITIVOS

4. DISPOSITIVOS

En este capítulo, se revisan las propiedades de los principales dispositivos fabricados usando las tecnologías de GaN y SiC. Los semiconductores basados en nitruros del grupo III han permitido desarrollar dispositivos competitivos para aplicaciones tanto electrónicas como optoelectrónicas. Por otra parte, los dispositivos basados en SiC han demostrado una gran potencialidad para su uso dentro del nicho de mercado de la alta potencia (tanto en conmutación como en radiofrecuencia).

4.1. Diodos emisores de luz

4.1.1. Basados en nitruros del grupo III

Los diodos emisores de luz fueron los primeros dispositivos fabricados usando nitruros y los más buscados desde los orígenes de esta tecnología. La razón, ya apuntada en capítulos anteriores, es que la energía de los fotones emitidos está ligada directamente con la energía de la banda prohibida en procesos interbanda. Por tanto, es posible fabricar emisores de luz basados en nitruros cubriendo un ancho rango espectral desde el infrarrojo (0,7 eV o 2,5 μm para InN) hasta el ultravioleta (6,2 eV o 200 nm para AlN). Esta propiedad es única dentro de los semiconductores, exceptuando el caso del ZnO y materiales relacionados. Por otra parte, el tipo de alineamiento directo entre el mínimo de energía de la banda de conducción y el máximo de energía de la banda de valencia para todos los compuestos de nitruros utilizados (InN, AlN, GaN y sus aleaciones) favorece una emisión eficiente.

El funcionamiento de los emisores de luz de estado sólido se basa en crear las condiciones necesarias para que se produzca una recombinación eficiente de electrones y huecos en un proceso en el que se libera energía en forma de luz. La forma más convencional de conseguirlo consiste en inyectar electrones y huecos en una zona localizada desde regiones tipo n y p de un material semiconductor, respectivamente, creando una pobla-

ción significativa de ambos tipos de portadores. La energía de recombinación (interbanda) es similar a la energía de la banda prohibida del material donde se confinan los portadores. Si bien esta es la idea general, existen muchos factores relativos principalmente a los procesos electrónicos y ópticos que suceden dentro del material que afectan a la eficiencia final de emisión. Para optimizar la emisión final, se han ideado estructuras que mejoran las propiedades de confinamiento eléctrico y óptico. Estas estructuras están formadas por multicapas con dimensiones nanométricas crecidas en condiciones pseudomórficas, típicamente pozos cuánticos. En función de las características de la emisión, se puede hablar de dos tipos de dispositivos que presentan estructuras ligeramente diferentes: el **diodo electroluminiscente** (**LED**), caracterizado por poseer una emisión dominada por la recombinación espontánea, y el **diodo láser**, caracterizado por emitir luz de alta pureza espectral y densidad de potencia, resultante de un proceso de emisión estimulada.

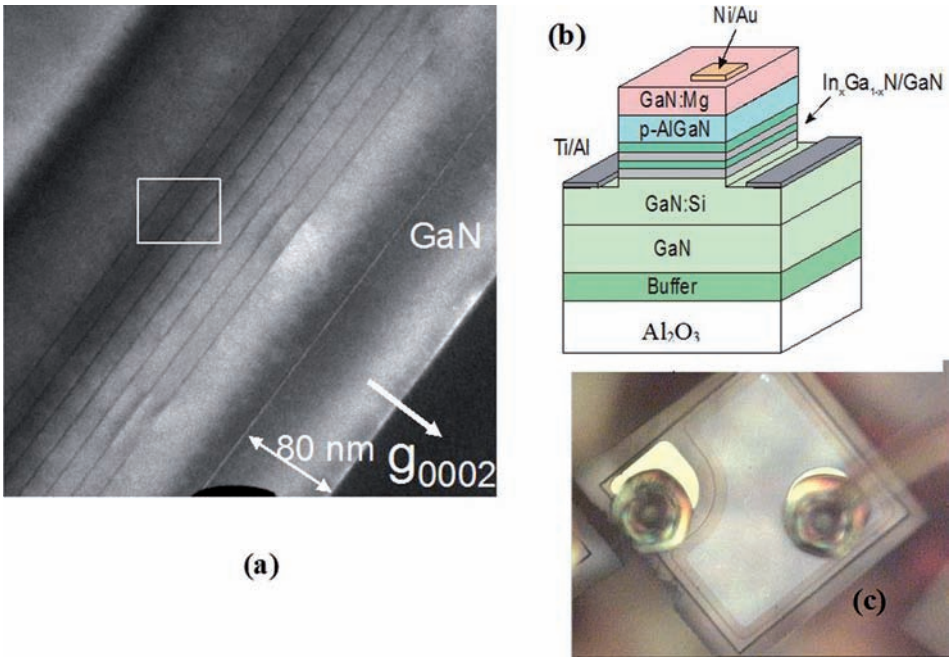


Figura 4.1. (a) Imagen de microscopía de transmisión electrónica (Transmission Electron Microscopy o TEM) de la estructura de un LED de pozos cuánticos de (In,Ga)N/GaN. (b) Dibujo esquemático de la sección transversal de un diodo p-n con pozos cuánticos insertados en su región activa. (c) Fotografía de la vista frontal de un diodo de 300×300 μm^2 con geometría en L. (Fuente: Adaptado de la Tesis Doctoral de Carlos Rivera de Lucas, UPM).

En la Figura 4.1, se muestra la estructura de un LED de pozos cuánticos de (In,Ga)N/GaN usado para aplicaciones comerciales. Los detalles de la sección transversal de la estructura revelan que, además de la zona activa formada por los pozos cuánticos, existen otras capas críticas. Concretamente, merece la pena mencionar la existencia de una barrera de bloqueo de electrones de (Al,Ga)N. Esta capa barrera se usa para compensar la diferencia en el transporte de cada uno de los portadores, así como la diferencia de carga libre entre las zonas n y p. La apariencia final de un LED en formato chip se puede observar en la Figura 4.1(c). Aquí se puede apreciar que el área dejada para los *pads* de soldadura se minimiza con objeto de no obstaculizar la emisión de luz.

4.1.1.1. Tecnología básica de procesado

La tecnología de LED y láseres está ampliamente documentada en diversos libros de referecia relacionados con la optoelectrónica. Por ello, en este apartado, sólo se explican los elementos que se consideran más específicos de los nitruros, aunque no tienen por qué ser exclusivos de los dispositivos fabricados con este tipo de materiales. Tampoco se hará mención a la infinidad de pequeñas variantes que existen en el procesado, dado que una revisión de esta índole queda fuera del objetivo de esta breve reseña.

El flujo típico de fabricación de un LED consiste en seis pasos: ataque mesa para definición de contactos, depósito de la metalización semitransparente (Ni/Au con un espesor total en torno a 10 nm) y de la metalización de *pad* para formar el contacto superior en la zona tipo p, aleado del contacto superior, metalización de la zona n para formar el contacto inferior, y aleado de este último contacto. La zona tipo p requiere, en general, una temperatura mayor de aledo debido a la menor resistividad de las capas. En muestras que presentan una alta concentración de hidrógeno, compensando así el carácter aceptor de Mg, es conveniente someter al material a un proceso adicional de recocido térmico de alta temperatura en un ambiente inerte (nitrógeno gas). Esta práctica era común en los comienzos de los nitruros. De hecho, la mejora en la efectividad del dopaje con Mg fue uno de los hitos fundamentales en el desarrollo de los nitruros como se ha comentado en los capítulos precedentes.

Otro procesado que está relacionado con la esencia de los emisores de luz es el relativo a la mejora en la extracción de la luz. La tecnología epitaxial de semiconductores favorece la reflexión total interna, reduciendo

así la eficiencia de emisión de luz fuera del material. Este comportamiento se puede modificar creando superficies con geometrías más adecuadas o haciendo uso de otros fenómenos físicos que producen efectos similares (cristales fotónicos o estructuras que se aprovechan de las propiedades de los plasmones superficiales y de su acoplo con la radiación de la luz). Una estrategia que ha tenido mucho éxito, tanto que incluso se ha implantado en diversas compañías dedicadas a la fabricación de LED, es el uso de superficies formadas por microconos (las eficiencias de extracción de luz se acercan al 70% frente al 10-20% de los diodos convencionales). Otras alternativas teóricamente superiores como la de fabricar LED con superficies esféricas son inviables desde de un punto de vista práctico.

4.1.1.2. Evolución

La evolución de los emisores de luz con estos materiales ha estado ligada intrínsecamente a los avances más fundamentales de esta tecnología. Los diodos electroluminiscentes fueron los impulsores de la «revolución de los nitruros». En primer lugar, por la carencia de soluciones tecnológicas alternativas, ya que en la parte más energética del rango de visible no existía un competidor sólido (en la actualidad se postula el ZnO). En segundo lugar, porque el conjunto de aplicaciones potenciales hacía viable económicamente el desarrollo de estos dispositivos en términos de mercado. Y, en tercer lugar, porque los nitruros están basados en materiales que no son tóxicos, a diferencia de la mayoría de los compuestos III-V y II-VI.

Algunos hitos destacados relacionados con el desarrollo de los emisores de luz son los siguientes:

1. La mejora contínua en la calidad del material crecido, con objeto de reducir fundamentalmente la alta densidad de dislocaciones, especialmente para su aplicación en diodos láser. En general, se ha considerado que las propiedades optoelectrónicas obtenidas en las estructuras crecidas por depósito químico en fase vapor con precursores metalorgánicos (MOCVD) son mejores que las obtenidas cuando se crece por epitaxia de haces moleculares (MBE). La necesidad de reducir defectos ha motivado también la búsqueda de sustratos o pseudosustratos (*templates*) de alta calidad. Algunas técnicas de filtrado o reducción de dislocaciones son, por ejemplo, la inclusión de capas amortiguadoras de AlN o superredes, o el recrecimiento epitaxial late-

ral (ELOG). La densidad de dislocaciones puede llegar a reducirse por debajo de 10^6 cm^{-2} usando algunas de estas técnicas, lo que permite fabricar diodos láser con prestaciones aceptables.

2. El descubrimiento de la elevada eficiencia de los nitruros como emisores de luz está relacionado con características intrínsecas de la microestructura y el comportamiento del In dentro de las aleaciones de (In,Ga)N. Este fenómeno, conocido como localización, explica cómo es posible que se produzca un dominio de la recombinación radiativa a pesar de la alta densidad de dislocaciones. Este factor diferencia a los nitruros de otros materiales. Como aspecto negativo cabe mencionar que se produce un ensanchamiento espectral de la emisión. En aleaciones de (Al,Ga)N la situación es ligeramente diferente, dando lugar a resultados más pobres en términos de eficiencia.

3. La optimización del dopaje tipo p ha sido crucial en el desarrollo de los LED y láseres. El inconveniente encontrado ha sido la elevada energía de activación de los dopantes, típicamente Be y Mg, siendo este último el más utilizado por producir mejores resultados. Desde el punto de vista tecnológico, se encontró que el dopaje con Mg favorecía la incorporación de hidrógeno y la formación de vacantes. Esta dificultad se puede salvar de varias maneras como se ha apuntado anteriormente. Por otra parte, el incremento de la concentración de dopantes a altos valores (por encima de $10^{19} - 10^{20}$ cm^{-3}) puede empeorar la calidad cristalina (formación de dominios de inversión, por ejemplo).

4. La investigación de materiales crecidos a lo largo de orientaciones no polares o semipolares. Uno de los principales problemas de la tecnología de nitruros es la formación de campos internos debido a las discontinuidades de polarización que surgen en las heteroestructuras. Estos campos internos son suficientemente intensos para separar electrones de huecos de forma que la eficiencia de emisión se reduzca por un factor considerable. Afortunadamente, existe una manera de suprimir este efecto cambiando la orientación de crecimiento, típicamente a lo largo del eje c de la estructura wurtzita, a orientaciones no polares, como las que corresponden al plano M o al plano A, o semipolares, como el plano $(10\bar{1}3)$. Esta técnica conlleva de nuevo la optimización de la calidad del material y actualmente es un temas de gran interés.

5. La gestión de los problemas térmicos en los emisores de alta potencia. Las dos aproximaciones más inmediatas para resolver el problema, es decir, la reducción de la generación de calor y la mejora en la disipación de potencia, se han abordado a través de los avances producidos en la calidad cristalina y el uso de elementos externos y de diseño (sustratos de alta conductividad térmica como el cobre, diversas geometrías de la estructura,...). Algunos factores que deben tenerse en consideración son la disipación Joule que tiene lugar en los contactos, el número de pozos cuánticos, el contenido de Al en la barrera o la ineficacia de incrementar el dopaje como solución (al mismo tiempo se reduce la movilidad en el material). La solución al problema de la disipación térmica es vital para el mercado de alta potencia. Este es un tema abierto de gran interés práctico.

6. Los contactos tipo p para diodos, especialmente para emisores que operan a longitudes de onda más cortas. El incremento de la resistencia de contacto no sólo es un problema térmico, sino también eléctrico.

4.1.1.3. Estado del arte

El uso comercial de esta tecnología demuestra que las prestaciones ofrecidas cumplen una serie de mínimos de calidad. En concreto los emisores de nitruros están llamados a sustituir a las lámparas incandescentes y a los fluorescentes en aplicaciones de iluminación general y serán también empleados en aplicaciones de esterilización, comunicaciones o almacenamiento de datos.

Figura 4.2. LED verdes de GaN.
(Fuente Cambrige Centre for GaN).

Algunos datos recientes sobre las prestaciones de estos dispositivos son:

– Se han fabricado LED emitiendo desde el rojo (conteni-

dos de In superiores al 50%) hasta 200 nm. El rango espectral de los láseres queda reducido a longitudes de onda desde el verde hasta el ultravioleta cercano. La eficiencia de los emisores de nitruros en el verde (véase Figura 4.2) sigue siendo todavía muy baja.

– Los LED blancos basados en nitruros producen eficiencias de iluminación superiores a 150 lm/W y se prevé que llegarán a 200 lm/W.
– La eficiencia de los emisores crecidos a lo largo de orientaciones no polares o semipolares es ya cercana (a pesar de ser una tecnología más inmadura) a los mejores valores obtenidos para emisores convencionales.

4.1.2. Basados en SiC

El SiC no es un material adecuado para la emisión de luz debido a la naturaleza indirecta de su banda prohibida. No obstante, como consecuencia de la imposibilidad de fabricar otros materiales más apropiados, se llegaron a desarrollar LED emitiendo en longitudes de onda del azul a finales de la década de 1960. La eficiencia en la conversión electroóptica no superó el 0,005% en las etapas iniciales y sólo se alcanzó el 0,03% como mejor resultado ya en la década de 1990. Merece la pena mencionar que se llegaron a comercializar este tipo de diodos.

La utilización de otros semiconductores WBG (como el GaN o el ZnO y sus materiales relacionados) ha provocado que el SiC deje de tener valor como material para la fabricación de emisores de luz.

4.2. Dispositivos de RF y electrónica de potencia

4.2.1. Transistores de alta movilidad electrónica basados en nitruros

El principal dispositivo electrónico de radiofrecuencia fabricado usando nitruros del grupo III es el transistor de alta movilidad electrónica HEMT (*High Electron Mobility Transistor*). Los HEMT de nitruros ofrecen ventajas muy prometedoras sobre otros transistores que utilizan materiales WBG como el SiC. Si bien algunos de estos materiales también poseen un alto campo eléctrico de ruptura y una alta velocidad de saturación de los electrones, sólo los nitruros han demostrado que pueden combinar estas propiedades con una mayor capacidad intrínseca para formar heteroestructuras.

Para entender un poco mejor en qué se traduce esta ventaja en la práctica, conviene repasar brevemente el principio de funcionamiento del HEMT. El HEMT es un dispositivo cuya estructura más básica está compuesta por dos capas, una barrera y un sustrato, que a la vez actúa como capa activa. El material de la barrera, que tiene una energía de la banda prohibida más grande, suele ser una aleación (compuesto ternario) del material de sustrato crecido en condiciones pseudomórficas, lo que permite mejorar las propiedades de la estructura en términos de calidad cristalina. En el caso de los HEMT de nitruros, la barrera suele ser de (Al,Ga)N, típicamente con un contenido de Al del 25%, y el sustrato de GaN. La idea subyacente consiste en crear una región de conducción de alta movilidad donde los portadores (electrones, en general) están separados de las impurezas que los han generado. Esta región, conocida como canal, aparece en la estructura como consecuencia de la formación de un pozo cuántico en el sustrato cerca de la intercara con el material barrera. Aplicando un voltaje transversal al canal, es posible modificar su distribución de electrones, llegando incluso a vaciarlo para ciertos valores. De esta manera, se consigue un comportamiento similar al de un transistor de efecto de campo, pero con un canal que posee propiedades mejoradas. El gas de electrones que se forma en el canal suele denominarse gas bidimensional o 2DEG (*Two-Dimensional Electron Gas*) debido a que está sometido a un confinamiento cuántico en la dirección de crecimiento de las capas y, por tanto, sólo permite que los portadores se muevan libremente en dos dimensiones.

La polarización, tanto piezoeléctrica como, fundamentalmente, espontánea, presente en los nitruros confiere a los transistores basados en este material una interesante propiedad de «autodopaje», que facilita la acumulación de electrones en el canal provenientes, por ejemplo, de la superficie. Así, se evita en mayor medida el efecto que podría tener el potencial de dispersión y las distorsiones introducidas en la red cristalina al introducir átomos dopantes.

Conviene mencionar, aunque sea de forma muy breve, la importancia que tiene la elección del sustrato sobre las características de los transistores. Como se explicó en el capítulo 2, la dificultad para fabricar sustratos nativos es uno de los mayores inconvenientes que presenta la tecnología de GaN. Los defectos generados por crecer heteroepitaxialmente se traducen en un funcionamiento peor de lo esperado. Teniendo en cuenta que los HEMT son dispositivos sometidos a condiciones extremas de campo eléctrico y densidad de corriente, los defectos pueden jugar un

papel crítico. Además, cuando el transistor opera a altas densidades de corriente y alto voltaje, aparece un problema asociado a la disipación de potencia, en el que el sustrato también tiene mucha influencia. Este problema se incrementa al emplear heteroestructuras, donde el canal tiene que soportar elevadas temperaturas. Un análisis rápido de los sustratos más usados indica lo siguiente:

a) El gran desajuste de red del silicio sólo hace interesante este material para integración con otro tipo de electrónica y como solución intermedia al problema de la disipación térmica.
b) El zafiro es un material de bajo coste donde se han obtenido buenos resultados con respecto a la calidad cristalina, pero presenta problemas para la evacuación de calor.
c) El carburo de silicio (politipos 4H y 6H) es el candidato escogido para HEMT de altas prestaciones, tanto por la calidad del material como por su conductividad térmica. El uso de carburo de silicio se popularizó en nitruros precisamente para fabricar HEMT, pero el elevado coste de los sustratos favorece la investigación en otras opciones más económicas.

El éxito de la implantación de una tecnología de radiofrecuencia basada en nitruros del grupo III residirá no sólo en las prestaciones que ofrezca esta tecnología, sino también en el coste y la fiabilidad de los componentes que se fabriquen finalmente. A pesar de que la competencia en este ámbito es elevada, el esfuerzo realizado hasta ahora parece indicar que existe un nicho de mercado claro, tanto desde el punto de vista civil

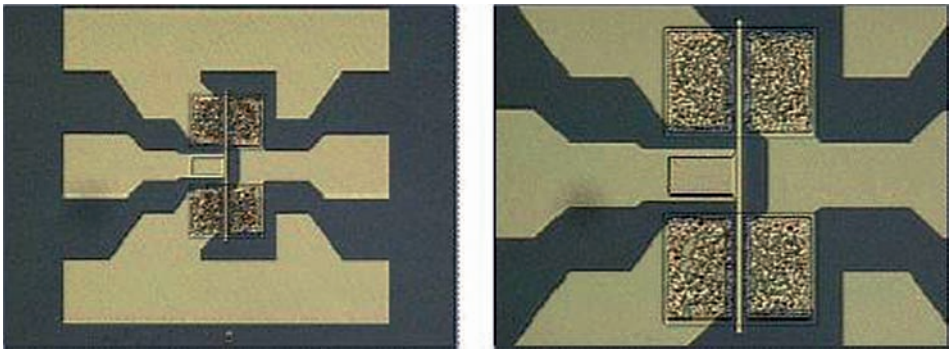


Figura 4.3. Vista frontal de la estructura de un transistor HEMT, donde se pueden distinguir los contactos óhmicos (zonas con apariencia más rugosa debida al aleado), los contactos de puerta y los pads de soldadura para facilitar la conexión eléctrica externa. (Fuente: Ministerio de Defensa).

como militar. De hecho, como se mencionará en el capítulo 5, las perspectivas son bastante favorables, ya que se ha conseguido desplazar (aunque sea ligeramente) parte del mercado que dominaban otras tecnologías más maduras.

4.2.1.1. Tecnología básica de procesado

La fabricación de transistores HEMT estándar requiere de varios procesos tecnológicos, de manera similar a lo que ocurre con otros dispositivos. Sin embargo, debido a las altas prestaciones que se requieren para estos dispositivos, muchos de los procesos llegan a ser críticos. A continuación, se describen de forma breve los procesos más importantes, indicando sus particularidades:

1. Limpieza: se ha demostrado que la contaminación de carbono y oxígeno puede afectar al comportamiento eléctrico de la estructura. Algunos estudios indican que los tratamientos de plasma de O_2 y N_2, y los tratamientos térmicos reducen la contaminación de carbono de la superficie. La composición de oxígeno se reduce cuando se aplican baños de HCl o HF (ataque del óxido formado en la superficie).

2. Fotolitografía: es un proceso crítico cuando se fabrican dispositivos de tamaño submicrónico. La fotolitografía por haz de electrones puede condicionar el metal utilizado en la puerta y su espesor, así como la temperatura de procesado.

3. Metalizaciones y aleado de los contactos óhmicos: la metalización de los contactos óhmicos suele realizarse mediante multicapas de Ti/Al/Ni/Au. Cada metal dentro de la multicapa tiene diferentes funciones, ya sea como barrera para interdifusión, para adherencia o para cumplir con su papel funcional. El aleado de los contactos óhmicos se produce a alta temperatura, superior a 800 ºC dependiendo del sistema concreto, excepto en el caso de que el sustrato sea de Si. Aleados sucesivos pueden reducir la resistencia de contacto, pero también pueden aumentar la resistencia de hoja, por lo que su uso debe ser considerado con cautela. En cuanto a la metalización de puerta, se han empleado típicamente bicapas de Ni/Au o Mo/Au (para alta temperatura), o tricapas de Pt/Ti/Au. El tipo y la calidad de la metalización de puerta determinan parámetros básicos del dispositivo como la trasconductancia, la corriente de fugas, o su comportamiento frente a la temperatura y la degradación.

4. Depósito del pasivante: se ha comprobado que la pasivación superficial mejora las propiedades de dispersión DC a RF debido a los estados de trampas en la superficie (fenómeno conocido como colapso de corriente, atribuido también a trampas en el volumen de la estructura). El material más comúnmente usado como pasivante es el SiN_x. Las características del pasivante dependen del método de depósito y del sustrato, resultando en valores diferentes para su composición química (rico en nitrógeno o silicio), estado de deformación y cristalinidad.
5. Aislamiento eléctrico y control de la distribución del campo eléctrico: el aislamiento de los transistores entre sí se puede realizar mediante implantación iónica o ataque. Por otra parte, la utilización de pantallas metálicas para modificar la distribución de campo eléctrico (*field plates*) se ha convertido en un elemento esencial de los HEMT de altas prestaciones. El motivo es triple: permiten incrementar el voltaje de ruptura, reducir la dispersión (adicionalmente a la pasivación) y mejorar aspectos relacionados con la degradación de los dispositivos. Estos *field plates* se colocan en la zona de drenador-puerta, donde el campo eléctrico alcanza su máxima intensidad.

La figura 4.3 muestra la vista frontal (desde arriba) de un transistor HEMT de (Al,Ga)N/GaN de doble puerta típico, donde se pueden apreciar los detalles de la geometría de los contactos. Este dispositivo no emplea *field plate*.

4.2.1.2. Evolución

El nacimiento de los transistores HEMT basados en nitruros es prácticamente simultáneo al desarrollo de los diodos electroluminiscentes liderado por Nakamura. Como se ha comentado en el capítulo 1, se puede considerar que la demostración de la mejora en la movilidad utilizando heteroestructuras de (Al,Ga)N/GaN en 1991 supuso el primer acercamiento al desarrollo posterior de los HEMT. Aún así, hicieron falta casi 5 años hasta que se empezaron a alcanzar resultados visibles usando esta tecnología.

Los primeros estudios estuvieron enfocados a caracterizar las propiedades básicas del material y de los dispositivos, demostrando así la viabilidad de un desarrollo práctico para su uso comercial o específico. Posteriormente, se propusieron estructuras avanzadas para mejorar las prestaciones de los transistores, tarea que todavía está inconclusa. En

la actualidad, existe mucho interés por temas relacionados con la fiabilidad y la optimización final de los dispositivos y procesos de fabricación, debido a que el desarrollo de los HEMT está migrando paulatinamente al ámbito industrial.

Algunos de los hitos tecnológicos, muchos de ellos aplicables fuera del campo de los nitruros, se pueden resumir en la siguiente lista:

1. Se han logrado niveles de impurezas por debajo del límite de detección que proporciona la técnica SIMS para capas de GaN crecidas epitaxialmente. Los perfiles de capacidad-voltaje (C – V) también han revelado que no se acumula carga de forma apreciable en la vecindad de la intercara con el sustrato soporte (típicamente SiC).
2. La introducción de una fina capa espaciadora de AlN (en torno a 1 nm) ha permitido reducir la resistencia de hoja como consecuencia del incremento de la movilidad, asociado a una menor rugosidad de intercara (téngase en cuenta que es un material binario), y del aumento en la densidad de carga en el canal, debido a la mayor discontinuidad de banda entre la barrera y el sustrato de GaN y a la diferencia en los campos de polarización.
3. Se han empleado estructuras de tipo pozo cuántico o doble heteroestructura para mejorar el confinamiento de los electrones, reduciendo así los efectos de canal corto (interesante para operación a altas frecuencias) e incrementando el aislamiento hacia el sustrato. En este mismo sentido, se ha explotado también el uso de sustratos de (Al,Ga)N, así como de capas de (In,Ga)N para bloquear el paso de electrones hacia el sustrato.
4. El dopaje con Fe, Be o C ha sido utilizado exitosamente para reducir las corrientes de fugas hacia el sustrato.
5. Se ha mejorado la resistencia de contacto añadiendo capas de terminación (*cap layers*) dopadas sobre la heteroestructura.
6. La pasivación usando SiN_x ha permitido mejorar las prestaciones de los transistores en términos de dispersión DC a RF, así como la estabilidad de los estados superficiales.
7. Se ha demostrado una mejora en el voltaje de operación y en el comportamiento frente a la dispersión DC a RF usando *field plates*. Se han probado *field plates* conectados a puerta, donde aumenta la capacidad drenador-puerta y puede producirse una realimentación

negativa incrementada por efecto Miller, o a fuente, que resuelve los problemas de la configuración anterior a costa de otros inconvenientes (por apantallamiento Faraday, por ejemplo). En general, la configuración de *field plate* conectado a fuente ha demostrado ser más eficiente.

8. Se ha investigado una tecnología *deep-recessed* como alternativa a la pasivación para eliminar el efecto de la dispersión. Esta tecnología se basa en que el efecto de los estados de superficie sobre el canal disminuye con el espesor de la barrera. La implementación se ha llevado a cabo aumentando la distancia entre la superficie y el canal mediante capas de terminación de (Al,Ga)N o GaN que no necesitan estar pasivadas. La inclusión de estas capas ha supuesto una modificación de los procesos correspondientes a los contactos óhmicos y de puerta.
9. Se ha usado el (In,Al,Ga)N como material de barrera para conseguir un material ajustado en red con el sustrato, al mismo tiempo que se incrementa la carga en el canal debido al alto valor de la polarización espontánea.
10. Se han fabricado transistores metal-óxido-semiconductor-HEMT (MOSHEMT) basados en nitruros para aprovechar las ventajas de las estructuras MOS y HEMT simultáneamente. Concretamente, la estructura MOS se ha realizado depositando dieléctricos como, por ejemplo, SiO_2, AlO, AlN o HfO_2, sobre la heteroestructura. La mejora en la supresión de la corriente de fugas ha sido notable.
11. Se han desarrollado tecnologías de contactos no dopados mediante implantación para aumentar la frecuencia de operación. De esta manera, es posible conseguir distancias drenador-puerta y fuente-puerta más pequeñas. Con el mismo objetivo de ampliar la frecuencia de operación se han diseñado transistores con barreras más finas, en este caso de AlN para mantener las densidades de carga en el canal.

4.2.1.3. Características

La Tabla 4.1 resume las principales figuras de mérito utilizadas en la caracterización de materiales para su utilización en aplicaciones de alta potencia a alta frecuencia. Los valores mostrados en la tabla indican capacidades potenciales basadas en propiedades intrínsecas de cada uno de los materiales. Obviamente, pueden existir otros criterios que

determinen la viabilidad final de una solución frente a otra (por ejemplo, el caso del diamante, que por problemas tecnológicos ha permanecido en segundo plano). Se puede observar que los mejores resultados se obtienen para los materiales de la familia de nitruros (GaN y AlN), el carburo de silicio y el diamante.

	Figuras de mérito				
Material Semiconductor	JFOM $\left[\frac{E_C v_s}{2\pi}\right]^2$	BFOM $\varepsilon\mu E_C^3$	HMFOM $Ec\sqrt{\mu}$	HCAFOM $\varepsilon\sqrt{\mu}\ E_C^2$	HTFOM $\frac{\sigma_{th}}{\varepsilon E_C}$
InSb	0,0003	0,000003	0,02	0,0001	28,9
InAs	0,36	0,1	0,7	0,1	1,2
GaSb	0,31	0,001	0,1	0,02	1,1
InP	23,2	19,1	3,3	5,8	0,3
GaAs	15,4	16,1	3,3	5,8	0,3
GaN	635,8	658,2	8,8	74,6	0,1
AlN	5867,7	33462,0	34,6	968,0	0,1
Ge	0,004	0,1	0,6	0,3	1,0
Si	1	1	1	1	1
GaP	7,9	6,3	1,4	4,5	0,3
4H-SiC	628,01	493,7	7,5	65,9	0,6
Diamond	641,78	5251,0	23,8	220,5	1,7

Tabla 4.1. Principales figuras de mérito (Johnson, Baliga y las propuestas por Huang) utilizadas en la comparación de materiales para aplicaciones que requieren alta potencia y alta frecuencia. [Fuente: Basado en J.L. Hudgins, G.S. Simin, E. Santi, M.A. Khan «An Assessment of Wide Bandgap Semiconductors for Power Devices» IEEE Tran. Pow. Elect. 18 (2003) 907-915].

Las figuras de mérito definidas por Huang se basan en la descripción de la curva de carga en la puerta. Los resultados, en este caso, son peores que los correspondientes a las figuras de mérito clásicas de Johnson (que relacionan el campo eléctrico de ruptura con la velocidad de saturación de los electrones) y Baliga (pensada para primar la minimización de las pérdidas por conducción). Pero, en cualquier caso, los valores calculados otorgan una posición destacada a los nitruros, excepto para

el HTFOM. Esta última figura de mérito será mayor cuanto menor sea la temperatura alcanzada en condiciones de funcionamiento, con el área óptima y el mínimo de pérdidas de potencia.

Los dispositivos basados en nitruros cumplen también con algunas características deseables en electrónica de RF:

i. Alta densidad de potencia.
ii. Alto voltaje de operación.
iii. Alta impedancia de entrada.
iv. Linealidad.

Los circuitos integrados monolíticos de microondas (MMIC) se aprovechan de estas ventajas desde el punto de vista de diseño, ya que la alta densidad de potencia resulta en una capacidad parásita más baja por vatio de potencia de salida y el alto voltaje de operación da lugar a impedancias de salida más altas. En general, el diseño de las redes de acoplo es más simple y se puede realizar en anchos de banda más grandes.

4.2.1.4. Estado del arte

Algunos de los resultados más destacados obtenidos recientemente indican una tendencia muy prometedora para estos materiales:

– 40 W/mm de densidad de potencia a 4 GHz.
– 17 W/mm con una PAE (eficiencia de potencia añadida) del 50% a 80 V y 4 GHz sin pasivación.
– 10,5 W/mm con una PAE del 34% a 30 V y 40 GHz.
– 4 A/mm de densidad de corriente máxima.
– 230 GHz de frecuencia máxima y 150 GHz de frecuencia de corte para dispositivos no pasivados.
– El producto voltaje-frecuencia-ganancia para HEMT con *field plate* conectado a fuente se acerca a 10 kV-GHz (el más alto conocido por ahora para un semiconductor).
– Amplificadores de alta potencia funcionando a una potencia y a una eficiencia de 521 W y 72,4%, respectivamente, a 3,55 GHz.

4.2.2. Transistores y conmutadores eléctricos basados en SiC

Como se ha apuntado anteriormente, el SiC es un material adecuado para desarrollar dispositivos que operen bajo condiciones de alto voltaje, alta corriente y alta temperatura. La principal aplicación de estos dispo-

sitivos es para conmutación de estado sólido de altas prestaciones y bajo coste. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se han fabricado diversos tipos de dispositivos de potencia basados en SiC.

Los conmutadores de potencia que utilizan semiconductores se pueden agrupar en tres categorías: bipolares, unipolares y Bi-MOS (esta última categoría es una combinación de las dos anteriores). A su vez, los dispositivos pertenecientes a estas categorías se pueden clasificar según su número de terminales (dos o tres terminales) y la relación de la conductividad del material con el tipo de portador que controla la conducción (dispositivos de minoritarios o mayoritarios). La tecnología de SiC es adecuada para realizar la mayoría de estos dispositivos. A continuación se comentan las características de los tipos de dispositivos semiconductores más utilizados en aplicaciones de potencia:

a) Diodos de potencia: son dispositivos de dos terminales usados para conmutación no controlada. Exhiben dos modos de operación, directa e inversa, correspondientes a dos estados, conducción y corte o bloqueo, respectivamente. La disipación de potencia limita la corriente máxima que pueden soportar en conducción debido a que al mismo tiempo se produce una ligera caída de voltaje. En inversa, los diodos dejan pasar una corriente muy pequeña, que sólo puede producir pérdidas de potencia significativas en condiciones de alto voltaje y alta temperatura. Otra fuente de pérdidas de potencia ocurre en la propia conmutación del estado en conducción al estado en corte y viceversa. Los tipos de diodos de potencia más utilizados están basados en uniones p-n (dispositivos de minoritarios) y estructuras de barrera Schottky (dispositivos de mayoritarios). Los diodos p-n son capaces de soportar altos voltajes y permitir el paso de altas corrientes en conducción. Los diodos de barrera Schottky son dispositivos que permiten una conmutación más rápida y suelen tener valores más bajos de voltaje máximo tanto en conducción como en inversa. La aplicación principal de estos diodos de potencia es en rectificación de potencia alterna a potencia continua.

b) Tiristores de potencia: son dispositivos de minoritarios formados por cuatro capas que alternan materiales con conductividades tipo n y tipo p, constituyendo lo que podría ser la estructura de dos transistores bipolares, uno p-n-p y otro n-p-n, que comparten dos zonas comunes (las bases y los colectores se cruzan para cada uno de los transistores). Además de los terminales asociados al ánodo y al cátodo, poseen un tercer terminal de control. Presentan tres modos de funcionamiento, dos en

directa y uno en inversa, donde un modo en directa se corresponde a un estado en conducción, disparado en función de las condiciones de polarización de los terminales de puerta y ánodo, y el resto actúan en corte. Algunos tipos de tiristores de potencia de interés incluyen los tiristores donde el corte se puede controlar únicamente a través del terminal de puerta (*Gate Turn-Off* o GTO *thyristors*) y los tiristores de corte por emisor (*Emitter Turn-Off* o ETO *thyristor*), que usan tecnología MOS (metal-óxido-semiconductor) para facilitar el corte en estructuras GTO. Los tiristores son adecuados para aplicaciones de potencia tanto en alterna (AC) como en continua (DC) cuando se emplean estructuras tipo GTO.

c) Transistor bipolar de puerta aislada (*Insulated Gate Bipolar Transistor* o IGBT): son dispositivos de minoritarios que combinan una estructura de puerta aislada controlada por efecto de campo con una estructura de transistor bipolar de potencia para realizar la conmutación. De manera similar a los tiristores, los IGBT pueden operar en tres modos de funcionamiento. Sin embargo, las características de bloqueo de corriente suelen ser asimétricas. La ventaja de adoptar una estructura híbrida se aprecia en la mayor capacidad de conmutación de potencia a alta frecuencia. Algunas aplicaciones de los IGBT son, por ejemplo, en conmutación de fuentes de potencia y en control de motores.

d) Transistores de efecto de campo (*Field Effect Transistor* o FET): son dispositivos de mayoritarios en los que la conductividad de la capa semiconductora activa se modula por efecto de un campo eléctrico. Por tanto, además de los dos terminales necesarios para establecer el flujo de corriente, denominados drenador y fuente, poseen un tercer terminal de control, denominado puerta. Existe una gran variedad de dispositivos FET de potencia. Los más empleados en el caso del SiC son los FET de estructura metal-óxido-semiconductor (*metal-oxide-semiconductor field effect transistor* o MOSFET) de potencia, típicamente de geometría vertical co-planar de doble difusión/implantación iónica (DMOSFET) y sus variantes, así como los FET de unión metal-semiconductor (M*etal-Semiconductor Field Effect Transistor* o MESFET) de potencia. La diferencia esencial entre ambos tipos de transistores radica en la estructura que controla el terminal de puerta, como indica su nombre, y, por tanto, la modulación del campo eléctrico. Desde el punto de vista de aplicaciones, los MESFET se usan a frecuencias más altas, ya que poseen un mejor comportamiento en este rango, mientras que los DMOSFET permiten manejar potencias más altas en su margen de funcionamiento de interés. Los modos de operación básicos de un MOSFET de potencia se corres-

ponden con las regiones: lineal, de saturación y de bloqueo en directa. Las dos primeras se refieren al estado en conducción, donde el valor de la resistencia entre terminales determina la disipación de potencia. La tercera al estado de corte, cuya limitación de bloqueo de corriente viene dada por el voltaje de ruptura que se produce por efecto avalancha. En general, estos dispositivos son adecuados para aplicaciones de radiofrecuencia y conmutación de alta velocidad.

4.2.2.1. Tecnología básica de procesado

La gran variedad de dispositivos de potencia hace que una revisión exhaustiva de la tecnología de procesado sea una tarea inabordable en el contexto de esta monografía. Por otra parte, los aspectos tecnológicos de los dispositivos de SiC son materia de investigación y revisión continua, por lo que sólo merece la pena destacar los aspectos más significativos que afectan a la comprensión del estado del arte de esta tecnología. A continuación se describen brevemente algunos resultados:

a) Diodos de potencia p-i-n y Schottky

Los diodos p-i-n convencionales están formados por una epicapa tipo $n-$ (la concentración de impurezas suele diseñarse en torno a 10^{14} cm^{-3}) de ~100 μm de espesor crecida sobre un sustrato 4H-SiC (0001) (desorientado un ángulo de 8º para mantener el politipo durante el crecimiento) tipo $n+$, que actúa como cátodo, y una capa tipo p (típicamente en torno a 10^{18} cm^{-3}) formada por implantación iónica de Al con un espesor de ~1 μm, que actúa como ánodo. La estructura es, por tanto, vertical, a diferencia de lo que suele ser común en el GaN. Los contactos tipo p suelen ser de Al o aleaciones de Al/Ti, mientras que los contactos tipo n suelen ser de Ni. El aleado se puede realizar a una temperatura de 1000 ºC durante 3 minutos. Para mejorar la calidad de los contactos es habitual incrementar el dopaje de las capas adyacentes al depósito del metal.

Los diodos Schottky presentan una estructura similar excepto que la capa p no es necesaria. Existen, no obstante, diseños más complejos en los que se introducen zonas p+ dentro de la capa activa. Los contactos Schottky se pueden realizar mediante Ni, Ti o Pt dependiendo de la temperatura de operación requerida.

La principal particularidad tecnológica de ambos dispositivos con respecto a sus homólogos usados en otras aplicaciones diferentes a

las de potencia proviene del uso de anillos de terminación. La misión de los anillos de terminación consiste en prevenir la acumulación de energía debida a la intensificación del campo eléctrico en la periferia de la estructura en el estado de bloqueo de corriente a alto voltaje. Pueden ser de dos tipos: resistivos (*resistive termination extension* o RTE) o de unión (*junction termination extension* o JTE). Básicamente, se forman implantando impurezas tipo p (en el caso resistivo puede ser otra especie que dañe la superficie) como extensión al metal (diodo Schottky) o cerca de donde se produce la unión (diodo p-i-n, en una zona definida por ataque mesa). La diferencia entre los anillos RTE y JTE se debe a que en el segundo caso se activan las impurezas, mientras que en el primero sólo se hace un recocido térmico para recuperar parte del daño causado por la implantación. Este tipo de estructura se emplea en otros dispositivos de potencia. También conviene destacar que la estructura de los p-i-n se suele pasivar mediante oxidación térmica (nótese que el proceso de oxidación térmica no es compatible con un depósito previo del contacto Schottky aunque sí posterior).

b) Tiristores

Los tiristores de SiC presentan una estructura convencional formada por cinco epicapas crecidas sobre un sustrato 4H-SiC tipo n ligeramente desorientado (8º). Un ejemplo concreto de tiristor n-p-n-p (el p-n-p-n requiere sustratos $p+$) consiste en una estructura donde la capa $p-$ de bloqueo (base) posee un espesor de 50 μm, la capa n de puerta un espesor de ~2,5 μm, la capa $p+$ del ánodo un espesor de ~1,5 μm y el sustrato (y también cátodo) tipo $n+$ un espesor de ~300 μm. La concentración de dopaje de la capa $p-$ de bloqueo está en torno a 5×10^{14} cm^{-3}, mientras que los dopajes de ánodo y cátodo son aproximadamente $>10^{19}$ cm^{-3} y $>10^{18}$ cm^{-3}, respectivamente, para mejorar la inyección en la base. Además de otros detalles de interés en el diseño (pozos $n+$ para los contactos de puerta y área de las zonas definidas por los ataques mesa de puerta y capa $p-$ de bloqueo, entre otros), este tipo de dispositivos emplean también estructuras JTE (tipo n) en la capa $p-$.

c) IGBT

Análogamente al caso de los diodos y tiristores, las estructuras IGBT se crecen sobre un sustrato de 4H-SiC a lo largo del eje [0001] con una desorientación de 8º. Tecnológicamente no existe ningún

proceso específico para este tipo de dispositivo. Por un lado, combina la estructura de un MOSFET, donde es necesario depositar (o crecer) capas de SiO_2 debajo de la puerta (un espesor típico podría ser 50 nm) y como óxido de campo (~1 μm), así como depositar polisilicio encima del óxido en la puerta, con la estructura de un transistor bipolar. Por otro, requiere de los complementos propios de los dispositivos de potencia, como anillos de guarda realizados por implantación iónica de Al. El dopaje implantado se activa por recocido térmico a alta temperatura (1600 °C). La Figura 4.4 muestra el esquema de una estructura p-IGBT estándar desarrollada por Cree Inc.

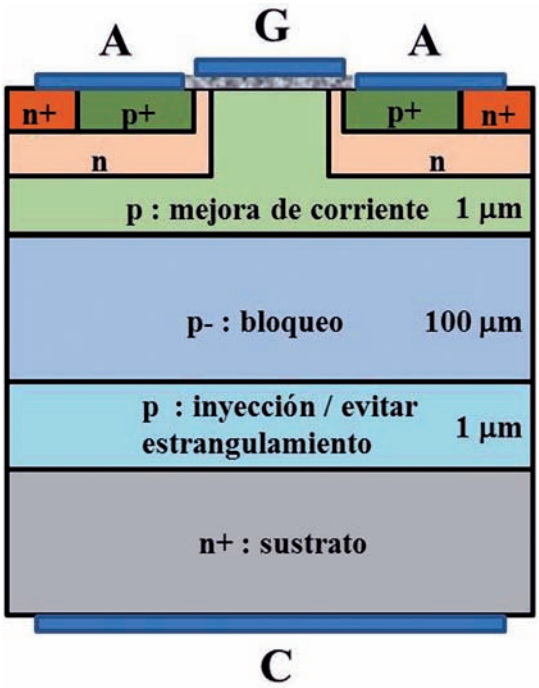


Figura 4.4. Sección transversal de la estructura de un p-IGBT donde se indica el tipo de conductividad (p o n) y la función de algunas capas de interés. Los terminales de puerta, ánodo y cátodo se han renombrado en la figura como G, A y C, respectivamente. Las conductividades tipo p y n se consiguieron por implantación iónica usando Al y N, respectivamente. (Fuente: Carlos Rivera de Lucas, ITM, Ministerio de Defensa).

d) DMOSFET

La estructura de un MOSFET de potencia no difiere mucho de la utilizada con otros materiales y para otras aplicaciones. No obstante, conviene comentar que este tipo de transistores tienen una geometría vertical, donde habitualmente la fuente y la puerta se sitúan en la superficie de la epicapa y el drenador en la cara del sustrato. El diseño de la estructura debe considerar la elección de la concentración de dopaje de la epicapa y su espesor para determinar el valor de voltaje de bloqueo, así como la concentración de dopaje del pozo situado en el canal donde se producirá la inversión. Por ejemplo, se pueden usar valores de concentración y espesor de 6×10^{15} cm^{-3}

y 12 μm para la epicapa, respectivamente, para obtener un voltaje de bloqueo de hasta 1200 V. Otros factores de diseño incluyen las dimensiones de los pozos, el canal y los espesores del óxido y el polisilicio de puerta. Merece la pena mencionar que, en general, el óxido de la puerta se crece térmicamente debido a su repetibilidad y estabilidad. Este óxido se nitrida en ambiente de NO y N_2O para reducir la densidad de estados de intercara que se forma en la estructura MOS.

e) MESFET

El proceso de fabricación de los MESFET de SiC es relativamente simple debido, en parte, a que presenta una estructura planar en la que no son necesarios muchos procesos de implatación iónica y litografía. La baja anisotropía eléctrica y la mejor movilidad del politipo 4H-SiC en comparación con el 6H-SiC hacen que este sea el material preferido para aplicaciones de alta frecuencia (en general, para cualquier aplicación electrónica donde el SiC sea el material activo). Valores típicos de dopaje para el canal en MESFET de SiC tipo n son superiores a 10^{17} cm^{-3}. Este dopaje se incrementa en las zonas $n+$ de los contactos por implantación iónica de P (o N). Los contactos óhmicos se pueden fabricar con Ni aleado a ~1000 ºC. En el contacto de la puerta, por otra parte, se pueden emplear tricapas de Ni/Pt/Au. La pasivación de la superficie se puede llevar a cabo mediante depósito de SiN_x. Aunque se utilicen sustratos resistivos, los dispositivos se pueden aislar entre sí por ataque mesa usando química de Cl_2, por ejemplo.

4.2.2.2. Características

Las características deseables en el caso de los dispositivos de RF son las ya expuestas en el apartado 4.2.1.3. Los requisitos para los conmutadores de potencia se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

i. Alto voltaje de bloqueo para permitir desarrollar un mayor número de aplicaciones e incrementar la fiabilidad.
ii. Baja resistencia específica en activa (*specific on-resistance*) para reducir las pérdidas en conducción.
iii. Operación a alta frecuencia para reducir el tamaño del sistema.
iv. Baja capacidad para reducir las pérdidas de conmutación e incrementar la frecuencia de funcionamiento.

4.2.2.3. Estado del arte

La evolución de los transistores y conmutadores de alta potencia de SiC se ha centrado, al igual que en el caso del GaN y sus materiales relacionados, en mejorar los aspectos de la tecnología. En el caso de los MESFET, los problemas de estabilidad de corriente y dispersión de frecuencia relacionados con defectos o estados superficiales también están presentes en la tecnología de SiC. A continuación se resumen algunos resultados destacados que se refieren a 4H-SiC, salvo que se especifique lo contrario.

a) Diodos de potencia p-i-n y Schottky

- Se han obtenido voltajes de bloqueo de 2,2 kV y 10 kV con resistencias específicas en activa de 2,5 mΩcm^2 y 6 mΩcm^2, respectivamente, en diodos de barrera Schottky.
- La capacidad de manejo de corriente ha alcanzado 100 A con un rendimiento del 79% en diodos de barrera Schottky.
- Se ha obtenido un voltaje de bloqueo de 19,5 kV con una resistencia específica en activa de 6,5 mΩcm^2 en diodos p-i-n.
- La capacidad de manejo de corriente de los diodos p-i-n ha alcanzado 100 A para un voltaje de bloqueo de 5,2 kV. Además, estos dispositivos parecen mostrar un buen comportamiento a alta temperatura (es decir, no muestran degradación significativa de la resistencia específica en activa ni de la corriente de fugas operando bajo estas condiciones).

b) Tiristores

- Se han obtenido voltajes de bloqueo de 12,7 kV. El principal inconveniente tecnológico es el desarrollo de dispositivos de área grande sin defectos para poder incrementar la capacidad de manejo de corriente (ahora limitada a decenas de amperios).
- Las expectativas que ofrece este tipo de dispositivo basado en SiC son únicas debido a que permite inyectar ambos tipos de portadores y modular fuertemente la conductividad de la capa de bloqueo (conocida como región de deriva o *drift region*). Se espera que se alcancen voltajes de bloqueo entre 10 y 25 kV.

c) IGBT

- Se han publicado recientemente valores de resistencia específica en activa tan bajos como 14 mΩcm^2 para p-IGBT de 12 kV.

– Se han fabricado estructuras p-IGBT sobre epicapas diseñadas para bloquear 20 kV. Estos IGBT incrementan en un factor 1,2 la capacidad de manejo de corriente con respecto a estructuras tipo MOSFET.

d) DMOSFET

– El máximo voltaje de bloqueo empleado ha sido 10 kV para un DMOSFET con una resistencia específica en activa de 111 mΩcm^2 a temperatura ambiente y un tiempo de apagado de 40 ns usando un circuito de carga inductivo.
– Se ha obtenido una resistencia específica en activa tan baja como 6,95 mΩcm^2 para un DMOSFET de 1,2 kV.
– Los problemas que deben resolverse para asegurar una implantación comercial competitiva son la baja movilidad del canal, la fiabilidad a largo plazo de la capa de SiO_2 sometida a condiciones de operación de alto campo y alta temperatura, y la mejora del voltaje umbral a alta temperatura.

e) MESFET

Algunos resultados destacados son los siguientes:

– 22 GHz de frecuencia de corte y 50 GHz de frecuencia máxima en MESFET con longitud y anchura de puerta de 0,45 μm y 250 μm, respectivamente.
– 7,2 W/mm a 3 GHz de densidad de potencia de salida usando sustratos semi-aislantes.
– 120 W de potencia de salida total en modo pulsado y 80 W en modo continuo a 3,1 GHz.
– Operación a 873 K con dispositivos basados en 6H-SiC.
– Baja degradación observada en pruebas de fiabilidad (0,3 dB en la ganancia lineal y 0,4 dB en la potencia de saturación).

4.3. Fotodetectores

4.3.1. GaN y compuestos relacionados

La utilización de los nitruros del grupo III en la fabricación de fotodetectores también se ha considerado como una solución de interés industrial tanto a nivel comercial como desde el punto de vista de defensa y espacio. Pese a que las aplicaciones de este tipo de fotodetectores no

suponen un volumen de negocio comparable al que proporcionan las aplicaciones de los diodos electroluminiscentes o los transistores de alta movilidad electrónica, existen otros factores que hacen atractivo su uso y que han justificado las inversiones en investigación y desarrollo realizadas durante muchos años por varios países, especialmente Estados Unidos. Estos factores se pueden resumir en dos puntos:

1. Mejora en las prestaciones: los fotodetectores basados en nitruros mejoran las prestaciones de este tipo de dispositivos en relación con otros materiales (típicamente en comparación con silicio por ser el material más comúnmente empleado), para detección en el rango de ultravioleta. Las ventajas potenciales incluyen mejoras en la detectividad máxima, en la selectividad espectral, y en la resistencia a la radiación de alta energía, así como una capacidad superior de operación a alta temperatura y una facilidad intrínseca para formar las heteroestructuras necesarias en la fabricación de dispositivos avanzados (véase la parte de propiedades generales del apartado 2.1.1.). Otra cuestión de importancia en la valoración de esta tecnología es que permite extender el rango de operación hacia el visible e incluso el infrarrojo sin tener que emplear estructuras avanzadas.
2. Factores tecnológicos: la posibilidad de integración de fotodetectores y emisores de luz, así como transistores u otros dispositivos, supone una ventaja clara de los nitruros con respecto a otros materiales WBG.

Tradicionalmente, los detectores de luz se han agrupado en térmicos y fotónicos en función del mecanismo utilizado para detectar la luz. Los detectores térmicos basan su funcionamiento en la variación de temperatura que se produce cuando el material absorbe parte de la energía proveniente de la radiación incidente. La señal de salida aparece como consecuencia del cambio en una propiedad del material debido a esta variación de la temperatura. Por ejemplo, en los detectores de tipo piroeléctrico se mide un cambio en la polarización, mientras que en los detectores bolométricos se mide un cambio en la resistencia eléctrica. A diferencia de los detectores térmicos, los detectores de tipo fotónico (típicamente denominados fotodetectores) convierten la energía proveniente de la radiación luminosa en energía eléctrica, en un proceso de absorción en el que los fotones interaccionan con los electrones del material de forma que se altera su distribución en función de la energía. El cambio en la distribución de energía de los electrones se puede medir externamente a través de la variación de una magnitud eléctrica (corriente o voltaje).

Los detectores de luz más interesantes basados en nitruros del grupo III se encuadran dentro del grupo de los fotodetectores. Los fotodetectores son intrínsecamente selectivos a la longitud de onda de la radiación incidente, además de ser más sensibles y rápidos que los térmicos, y se pueden clasificar a su vez en dispositivos fotoeléctricos y fotográficos. Aquí sólo se mencionarán fotodetectores del primer tipo en cualquiera de sus tres clases: fotoconductivos, fotovoltaicos y fotoemisivos.

4.3.1.1. Tecnología básica de procesado

Las estructuras básicas empleadas en la fabricación de los fotodiodos son de tipo planar con electrodos interdigitados o basados en otras geometrías (típicamente para fotodiodos metal-semiconductor-metal o fotodiodos de barrera Schottky como se muestra en la Figura 4.5), o de tipo mesa definidas mediante ataque selectivo del material (típicamente para uniones p-n, que requieren contactos en distintas capas, o fotodiodos Schottky de altas prestaciones). Los metales usados para formar los contactos varían en función de si se buscan características óhmicas (bicapas de Ti/Al o multicapas de Ti/Al/Ni/Au aleadas a diferentes temperaturas para material tipo n) o de tipo rectificante (bicapas de Ni/Au o capas de Pt y Au para material tipo n), así como en función de la conductividad del material, ya sea tipo n o tipo p (con las mismas metalizaciones se intercambia la característica óhmica con la rectificante y viceversa). Otra

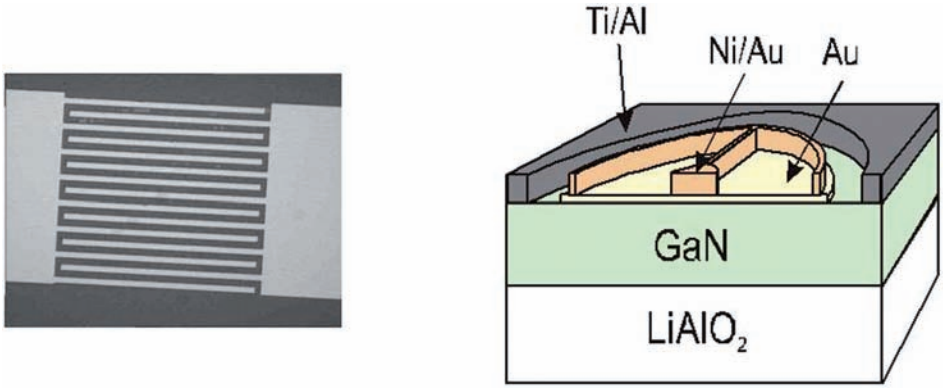


Figura 4.5. (a) Imagen de la estructura interdigitada de un fotodiodo metal-semiconductor-metal obtenida mediante un microscopio de barrido electrónico. (b) Dibujo esquemático de la estructura de un fotodiodo Schottky con tecnología planar basado en GaN crecido a lo largo de una orientación según el plano M. (Fuente: Adaptado de la Tesis Doctoral de Carlos Rivera de Lucas, UPM).

cuestión de importancia es la configuración que se utiliza para colectar la luz. Básicamente, existen dos posibilidades: iluminación frontal o a través del sustrato (posterior). Cuando la incidencia es frontal, conviene tener en cuenta la absorción en el metal. En cambio, si la iluminación es posterior, las metalizaciones no afectarán a la respuesta salvo que la absorción sea incompleta, siendo el sustrato el que podrá producir un efecto de filtrado, que puede ser útil para conseguir respuestas espectrales paso banda. En ambos casos, la utilización de recubrimientos antirreflectantes es recomendable para optimizar la colección de luz en la zona activa.

4.3.1.2. Evolución

El desarrollo de los fotodetectores basados en nitruros estuvo ligado en una etapa inicial a las mejoras en la calidad del material crecido. En esta etapa, se fabricaron estructuras simples como fotoconductores de (Al,Ga)N y fotodiodos de barrera Schottky, crecidos por MOCVD o MBE, con la intención de conocer las características de los dispositivos y su relación con la calidad del material. Al ser dispositivos que manejan señales débiles, la absorción por debajo de la energía de la banda prohibida y los procesos de atrapamiento en defectos eran aspectos relevantes (por ejemplo, el fenómeno de la fotoconductividad persistente, que podía prolongarse por periodos incluso de días, o la dinámica debida a los defectos asociados a la llamada banda amarilla, por generar un espectro característico de fotoluminiscencia en torno a esa banda). La principal prestación ofrecida por estos fotodetectores era la selectividad espectral, principalmente para aplicaciones donde se requería una respuesta «ciega» a la luz solar (conocida según su terminología anglosajona como *solar blind*). Este periodo abarcó desde los comienzos de la expansión de los nitruros hasta principios de la primera década del presente siglo.

Más tarde, se introdujeron innovaciones en el diseño de los fotodetectores para mejorar sus prestaciones en términos de selectividad, ruido, responsividad y velocidad. A modo de ejemplo, se alcanzaron valores de detectividad específica más altos que 10^{13} $cmHz^{1/2}W^{-1}$ y se lograron tiempos de respuesta del orden de 1 ps. Si bien el efecto de la calidad del material sobre las prestaciones de los dispositivos seguía y sigue siendo un tema de interés, el número de trabajos centrados en esta tarea se redujo considerablemente a favor de un énfasis sobre el dispositivo.

Actualmente, la investigación está enfocada sobre diferentes líneas relacionadas con la optimización de los dispositivos, la fabricación de matrices de fotodetectores y la fabricación de fotodiodos de alta sensibilidad, fundamentalmente basados en el mecanismo de avalancha o con características especiales (sensibilidad a la polarización de la luz o basados en la absorción en pozos cuánticos, ya sea interbanda o intersubbanda). Recientemente se han fabricado diodos de avalancha basados en nitruros crecidos a lo largo de orientaciones no polares. Los coeficientes de ionización por impacto parecen mejorar usando este tipo de materiales.

También merece la pena destacar que la mayoría del trabajo se ha centrado en desarrollar fotodetectores operando en el rango de ultravioleta. Sin embargo, las propiedades de los nitruros confieren una clara ventaja potencial de estos materiales para aplicaciones en el visible e infrarrojo, siendo también adecuados para detección de altas energías (ultravioleta de vacío y rayos X) debido a su alta resistencia a la radiación. La utilización de materiales basados en aleaciones con In empeora las prestaciones de los dispositivos, debido, en general, a que presentan una alta concentración de portadores no intencionada para contenidos de In relativamente bajos

4.3.1.3. Características y estado del arte

Desde el punto de vista de las aplicaciones, las características deseables que deberían cumplir los fotodetectores se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Selectividad espectral adaptada a la aplicación y contraste frente a la radiación de fondo a longitudes de onda que se encuentren fuera de la banda de interés.
2. Alta eficiencia cuántica o responsividad.
3. Linealidad y alto rango dinámico de operación.
4. Bajo ruido electrónico.
5. Alta estabilidad.
6. Alta velocidad de respuesta.

La tecnología de los nitruros ofrece soluciones que cumplen con las especificaciones anteriores:

1. Se han alcanzado valores de contraste tan altos como 10^6, típicamente mejores que 10^4.
2. Se han fabricado fotodetectores operando desde cerca de 550 nm hasta ultravioleta de vacío por debajo de 50 nm.
3. Se ha demostrado que la sensibilidad a la polarización puede producir una respuesta paso banda con una anchura espectral algo mayor de 5 nm.
4. Se han fabricado fotodetectores con respuesta paso banda y de varios colores en distintos rangos espectrales del visible y ultravioleta.
5. La ganancia de los diodos de avalancha ha alcanzado valores en torno a 3×10^3 en GaN. Aún así, los dispositivos todavía son de tamaño muy pequeño (0,002 mm^2).
6. Se han publicado valores de ganancia del orden de 10^6 en fotodiodos de pozos cuánticos.
7. La detectividad de los fotodetectores del estado del arte está en torno a 10^{13}-10^{14} $cmHz^{1/2}W^{-1}$.
8. Se han fabricado fotodetectores con sensibilidad intrínseca a la polarización de la luz y valores de rechazo entre las diferentes polarizaciones tan altos como 7,25 (menor que el valor teórico). Este valor se puede incrementar recurriendo al diseño de un sistema específico.

4.3.2. Fotodetectores basados en SiC

Las propiedades más interesantes del SiC para la fabricación de fotodetectores son su energía de la banda prohibida y la posibilidad de usar sustratos nativos. La energía de la banda prohibida es parecida a la del GaN, lo que hace que los fotodetectores de SiC exhiban ventajas similares desde el punto de vista de ruido y rechazo de luz a longitudes de onda de visible e infrarrojo. Sin embargo, donde claramente presentan una ventaja competitiva es en la posibilidad de fabricar de manera natural fotodiodos verticales (es decir, con un contacto posterior) y regiones de carga espacial que pueden ser de varias micras. Por el contrario, el tipo de alineamiento de la banda prohibida del SiC es indirecto, lo que resulta en un coeficiente de absorción cerca de la energía de la banda prohibida más bajo. Tampoco permite la fabricación de heteroestructuras con la misma versatilidad que ofrecen los nitruros, haciendo inviable la fabricación de dispositivos avanzados.

Los principales dispositivos fabricados como fotodetectores han sido los diodos de unión p-n y los diodos de barrera Schotkky.

(a) Diodos de unión p-n: gran parte de la investigación en estos dispositivos se ha dedicado a la optimización de la calidad del material. Los fotodiodos fabricados usando el politipo 6H-SiC ofrecen las mejores prestaciones en este sentido. Los dopantes para las capas p y n son, típicamente, el Al y el N, respectivamente. En cuanto a prestaciones, merece la pena destacar que las responsividades alcanzadas están en torno a 150-175 mA/W (eficiencia cuántica del 70-85%), con corrientes en oscuridad de 10^{-9} A/cm^2 a 10 V. La ruptura por avalancha se produce a voltajes muy elevados.

(b) Diodos de barrera Schottky: el interés sobre estos fotodiodos procede del hecho de que el método de fabricación es más simple. El carácter rectificante de estos fotodiodos es en general bueno, con factores de idealidad medidos de 1,2, alturas de barrera de 1 eV para material tipo n y 2 eV para material tipo p, y fugas que llegan a estar por debajo de 1 pA a 10 V en inversa. La responsividad es ligeramente inferior a la que presentan los diodos de unión p-n.

Los resultados recientes en diodos de avalancha indican que los fotodetectores basados en SiC son una alternativa sólida para aplicaciones en ultravioleta o altas temperaturas. Se han medido valores de ganancia de 20.000 con responsividades más altas que 10^{13} cmHz$^{1/2}$W^{-1}.

4.4. Otros dispositivos

4.4.1. Basados en nitruros del grupo III

Los dispositivos mencionados en los epígrafes anteriores son los más relevantes por el impacto que pueden tener en el mercado. Sin embargo, las propiedades de los nitruros son muy ricas en casi todos los aspectos, favoreciendo multitud de aplicaciones, muchas de ellas en investigación:

– **Filtros de ondas acústicas superficiales** (SAW) para aplicaciones en radiofrecuencia y acusto-ópticas. La piezoelectricidad inherente en estos materiales en su estructura wurtzita permite la transducción de señales acústicas en eléctricas y viceversa. Teniendo en cuenta la baja reactividad de la superficie, el acoplo electromecánico, la velocidad del sonido y el valor de las constantes mecánicas, los nitruros y, especialmente el AlN, ofrecen propiedades muy ventajosas con respecto a

otros materiales como la integración, la posibilidad de modificación de las propiedades creando nanoestructuras, un buen comportamiento en ambientes agresivos, etc. La interacción de las ondas acústicas con la luz también es un área de investigación que ha generado aplicaciones interesantes como la emisión de fotones individuales, útiles en computación y comunicaciones cuánticas.

- **Espintrónica** para tecnologías de la información. Existen trabajos que indican que las propiedades del GaN dopado con Mn y otros átomos (Fe, Cr o Ni) podrían hacer muy atractivo el material como semiconductor ferromagnético (por ejemplo, se ha encontrado una alta temperatura de Curie en material sin optimizar). Las propiedades ferromagnéticas de los materiales WBG requieren mayor estudio.
- **NEMS** para aplicaciones en ambientes agresivos. Las propiedades piezoeléctricas pueden conferir un grado de diseño extra para la actuación de estos dispositivos.
- **Cristales fotónicos** para mejorar las propiedades ópticas de detectores y emisores. Aunque la densidad de defectos no es tan crítica para muchas de estas aplicaciones, aparecen otras dificultades asociadas a la tecnología de fabricación (ataque en los NEMS o cristales fotónicos, contactos en los filtros SAW...).

4.4.2. Basados en SiC

Además de los dispositivos electrónicos y optoelectrónicos, merece la pena destacar el uso del SiC como material base para la realización de sistemas electromecánicos (*MicroElectroMechanical Systems* o MEMS), especialmente pensados para ambientes agresivos, análogamente a lo que sucede con el GaN.

Las aplicaciones de los MEMS de SiC son diversas. Algunos ejemplos son sensores de temperatura, sensores de gas, sensores de presión, dispositivos resonantes y atomizadores.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

5. APLICACIONES

5. APLICACIONES

5.1. Sector de defensa

El desarrollo de la tecnología de semiconductores de gap ancho, fundamentalmente de GaN y SiC, ha sido considerado como estratégico por los Ministerios de Defensa de los países más avanzados del mundo. Numerosas capacidades militares futuras dependerán de la madurez tecnológica alcanzada en el desarrollo de dispositivos basados en estos materiales. Dicha madurez tecnológica resultará esencial a la hora de obtener ventajas operativas frente a nuestros oponentes.

Las generaciones anteriores de semiconductores como silicio, arseniuros, fosfuros, etc. presentan severas limitaciones para satisfacer los cada vez más exigentes requisitos de los sistemas electrónicos de defensa, fundamentalmente en lo que se refiere a generación y gestión de alta potencia, operación a altas frecuencias y en un gran ancho de banda y resistencia a las altas temperaturas y ambientes muy severos.

En la siguiente tabla se resumen, dentro del sector de defensa, los ámbitos de aplicación más importantes de los dispositivos basados en materiales de gap ancho.

Ámbito	Aplicación	Dispositivos
Electrónica de radiofrecuencia de alta potencia y gran ancho de banda	• Radar (multifunción, *seekers*, etc.) • ESM • ECM (incluyendo inhibidores para lucha contra RC-IED) • Comunicaciones • Aviónica • Espacio	- Dispositivos discretos (Transistores HEMT, conmutadores, barras de potencia, etc.) - Amplificadores de alta potencia (HPA) - Amplificadores de bajo ruido (LNA) - Amplificadores de banda ancha - Módulos T/R - MMIC - Antenas activas de apuntamiento electrónico (AESA) para el conformado de haz
Optoelectrónica: detección de UV	• Sistemas de alarma de misiles (MWS) • Detectores de fuego de armas portátiles (MPW): MANPADS, RPG, francotiradores, etc. • Detección de agentes biológicos y químicos • Comunicaciones seguras (satélite y NLOS) • Comunicaciones ópticas submarinas • Caracterización de la combustión para el desarrollo de turbinas	- Detectores discretos de UV - Detectores SBD (Solar Blind Detectors) - Matrices de plano focal sensibles al UV - Detectores de agentes químicos y biológicos

Optoelectrónica: emisión en UV	• Purificación de agua, aire y superficies • Detección de agentes biológicos y quimicos • Comunicaciones Seguras (satélite y NLOS) • Perturbadores • Iluminación de consumo reducido	- LED - Láseres
Optoelectrónica: emisión y detección en las longitudes de onda del azul y el verde	• Comunicaciones ópticas submarinas • LIDAR para ASW y MCM • Miras láser • Armas no letales	- LED - Láseres - Detectores de longitudes de onda del verde y del azul
Electrónica de potencia	• Propulsión híbrida o completamente eléctrica (plataformas navales, terrestres, aéreas y espaciales, tanto tripuladas como no tripuladas) • Cañones electromagnéticos • Distribución de energía en plataformas.	- Convertidores de potencia - Conmutadores de potencia - Diodos de potencia

Tabla 5.1. Resumen de los ámbitos de aplicación más importantes de los dispositivos basados en WBG en el sector de defensa.

Algunas de estas aplicaciones son tan relevantes que por sí solas justificarían el desarrollo de este tipo de tecnologías. Esto da una idea del potencial y la importancia que este tipo de materiales representará para los sistemas y las capacidades militares futuras.

En los siguientes apartados se desarrollan en detalle las principales aplicaciones de los semiconductores WBG en cada uno de los cinco ámbitos mencionados en la tabla: electrónica de RF de alta potencia y gran ancho de banda; detección de UV; emisión de UV; emisión y detección en las longitudes de onda del azul y el verde y electrónica de potencia.

5.1.1. Electrónica de radiofrecuencia de alta potencia y gran ancho de banda

5.1.1.1. Tecnologías actuales

En la actualidad, los sistemas de electrónica de RF de alta potencia están basados en dos tecnologías fundamentales: la tecnología de tubos de vacío y la tecnología de estado sólido.

La tecnología de tubos de vacío es una tecnología madura con más de 50 años de antigüedad. Los principales tipos de amplificadores de RF basados en esta tecnología son los magnetrones, tubos controlados por rejilla, klystrons, tubos de onda progresiva (TWT) y amplificadores CFA (*Cross Field Amplifiers*). Este tipo de tecnologías ofrecen muy altas potencias a altas frecuencias, pero tienen el inconveniente de que son elementos muy voluminosos, frágiles, costosos y difíciles de fabricar.

El principal dispositivo de tubo de vacío utilizado en aplicaciones de defensa es el tubo de onda progresiva (TWT). Este dispositivo es capaz de suministrar elevados niveles de potencia en grandes anchos de banda, con eficiencias superiores al 60%. Además, estos dispositivos han demostrado tener una alta fiabilidad y una larga vida operativa, superior a los 20 años.

En lo que se refiere a la tecnología de estado sólido, los dispositivos utilizados actualmente en electrónica de radiofrecuencia están basados en dos materiales semiconductores principales: el arseniuro de galio (GaAs) y el silicio (Si). La gran ventaja de la tecnología de estado sólido frente a los tubos de vacío es la reducción en los costes de fabricación de los componentes y el menor peso y volumen de los mismos, aunque presentan unas prestaciones notablemente inferiores en potencia, ancho de banda y fiabilidad:

– Dispositivos de GaAs

  Desarrollada entre las décadas de los 80 y principios de los 90 del pasado siglo, la tecnología de GaAs es hoy por hoy una tecnología

madura con un amplio volumen de mercado, principalmente en el sector de la telefonía móvil. Los dispositivos de GaAs se utilizan en amplificadores *pre-driver*, *driver* y de etapa final en el rango de microondas y de milimétricas. Utilizan voltajes de entrada de hasta 30 V. Sin embargo, las limitaciones inherentes al material impiden su utilización en aplicaciones de alta potencia, con lo que supone que los dispositivos basados en este tipo de material tengan que ser combinados con dispositivos de tubos de vacío para algunas aplicaciones radar.

– Dispositivos de Silicio

A pesar del papel esencial del silicio en el sector actual de la electrónica y de la microelectrónica, este material no ofrece buenas prestaciones a altas frecuencias y en elevados anchos de banda. Los amplificadores de estado sólido basados en silicio suelen estar compuestos de una combinación de transistores del tipo BiCMOS (*Bipolar* CMOS) y LDCMOS (*Laterally diffused* CMOS) funcionando a tensiones de polarización de 28 V, aunque, últimamente se pueden encontrar este tipo de dispositivos trabajando hasta tensiones de 50 V. Los amplifica-

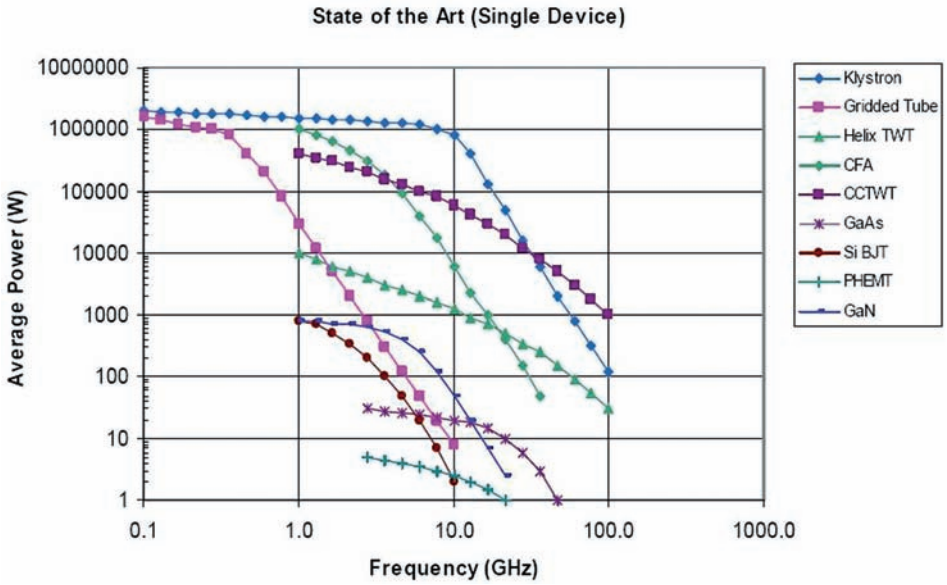


Figura 5.1. Comparación del estado del arte en el año 2004 de varias tecnologías empleadas en dispositivos de alta potencia y alta frecuencia. (Fuente: R.J. Trew, 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2004 MIKON 2004, Volume 1, 17-19 May 2004).

dores basados en LDCMOS pueden trabajar a frecuencias máximas de unos 3,5 GHz. Los valores típicos de potencia que manejan los dispositivos de Si están por debajo de los 200 W, aunque es posible obtener con módulos multi-etapas hasta 1000 W a 1 GHz.

En la figura 5.1 se muestra una comparativa entre las prestaciones de distintos dispositivos de tubos de vacío y dispositivos de estado sólido. Aunque las previsiones son que, a medio plazo, los tubos vayan siendo sustituidos por dispositivos de estado sólido, se debe hacer notar que todavía habrá aplicaciones cuyos requisitos de potencia exigirán la utilización de este tipo de tubos, ya que la tecnología de estado sólido está aún muy lejos de poder suministrar los megavatios de potencia a frecuencias de hasta 40 GHz que proporcionan los klystron o los girotrones.

Dentro de los sistemas de RF militares, el ámbito donde las tecnologías de alta potencia juegan un papel más fundamental es el de las antenas de apuntamiento electrónico. Estas antenas resultan, hoy por hoy, esenciales para proporcionar capacidades militares críticas, y se espera que en el futuro adquieran una relevancia aún mayor. Debido al gran impacto que tienen las tecnologías de RF de alta potencia en las prestaciones de este tipo de antenas, se ha considerado conveniente describir brevemente sus características (ver 5.1.1.2.) antes de seguir con el desarrollo del capítulo.

5.1.1.2. Las antenas de apuntamiento electrónico

Las antenas de apuntamiento electrónico (o ESA, por su acrónimo en inglés) constituyen uno de los elementos esenciales de los sistemas de RF militares de altas prestaciones (radar, guerra electrónica, etc.). La gran rapidez con las que estas antenas pueden apuntar a distintas direcciones del espacio, unida a su capacidad para formar múltiples haces independientes, permiten incrementar notablemente las capacidades de los sistemas de RF asociados. Por ejemplo, en el caso de los sistemas radar, las antenas ESA hacen posible realizar el seguimiento casi simultáneo de múltiples objetivos, o bien emplear los distintos haces en diversas funciones (exploración, seguimiento, etc., véase la Figura. 5.2).

Las antenas de apuntamiento electrónico son antenas de tipo *array*[2], formadas por la combinación de múltiples antenas elementales. El número de elementos varía en función del tipo de aplicación y de la frecuencia

[2] El vocablo inglés *array* se traduce al castellano como «agrupación»

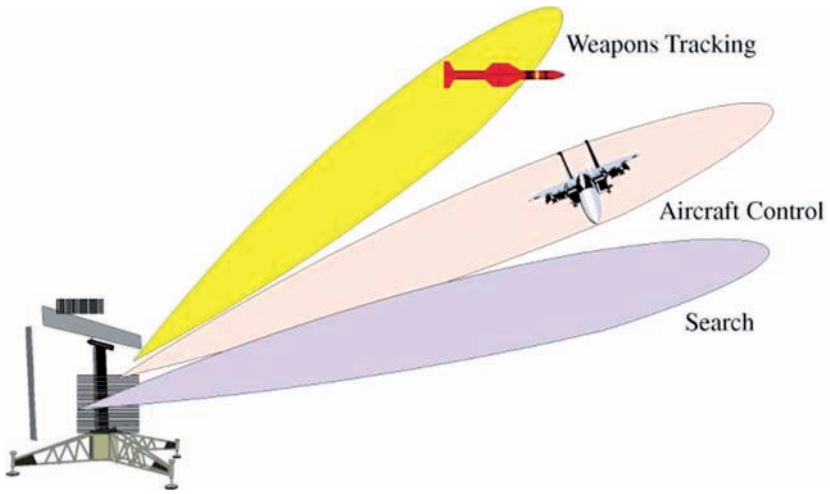


Figura 5.2. Formación de múltiples haces en un radar ESA. Cada haz se dedica a una función diferente. (Fuente: «Airborne Radar Systems», Jane's Avionics, 19 March 2009).

de operación. Por ejemplo, en el caso de los radares de los aviones de combate, el número típico de elementos es del orden de 1000 (veáse Figura 5.3).

Las antenas de apuntamiento electrónico se construyen siguiendo dos arquitecturas básicas, denominadas en inglés PESA y AESA:

– En las antenas pasivas de apuntamiento electrónico (PESA), la potencia radiada por la antena es generada por un único transmisor central que distribuye la señal a todos los elementos del *array*. En recepción, el camino es el inverso, combinándose las señales recibidas por los elementos del *array* hacia un amplificador de bajo ruido (LNA) central.
– En las antenas activas de apuntamiento electrónico (AESA), no existe un transmisor/receptor central, sino que cada elemento del *array* dispone de su propio módulo transmisor/receptor (módulo T/R).

Las prestaciones de las antenas AESA son notablemente superiores a las de las PESA, proporcionando las siguientes ventajas:

– Capacidad avanzada de formación de haces: el hecho de que cada elemento disponga de su propio módulo T/R proporciona una gran flexibilidad a la hora de agruparlos entre sí para realizar diferentes tareas en paralelo.

– Mayor sensibilidad del sistema, gracias que en las AESA los LNA están muy próximos a los elementos del *array*. En el caso de sistemas radar o ESM, esto se traduciría en mayores alcances de detección.
– Aumento de fiabilidad: la existencia en las AESA de un elevado número de módulos T/R proporciona al sistema una gran robustez y tolerancia frente a fallos. Así, cuando un módulo T/R deja de funcionar, las prestaciones del sistema no se degradan de manera importante. A medida que se van produciendo fallos en otros módulos, las prestaciones del sistema se siguen degradando paulatinamente, pero la antena sigue funcionando. Esta característica supone una diferencia fundamental con las antenas PESA, en las que cualquier fallo en el único transmisor/receptor que poseen provoca que estas antenas dejen de funcionar completamente.
– Reducción de peso y tamaño de la antena: debido a que en las AESA la amplificación de potencia tiene lugar a nivel de elemento del array, y no a nivel central, se evita que circulen señales con altos niveles de potencia por la red de distribución y, en consecuencia, se evita tener que utilizar las pesadas y voluminosas guías de onda para distribuir dicha señal.

Figura 5.3. Radar RACR (Raytheon Advanced Combat Radar) de la empresa Raytheon, instalado para pruebas en un F-16 de la USAF. La antena del radar es de tipo AESA (Fuente: Raytheon).

El principal obstáculo al que tradicionalmente se han enfrentado las AESA es el elevado coste de fabricación de los módulos T/R asociados, debido fundamentalmente a la inmadurez de dichas tecnologías de fabricación. Sin embargo, estos costes se han ido progresivamente reduciendo, y en la actualidad los nuevos programas de radares para aviones de combate están basados en su mayoría en antenas de tipo AESA implementadas con circuitos monolíticos integrados (MMIC) de GaAs (véase la Figura 5.3).

Las principales tendencias futuras para los sistemas militares de RF es que éstos sean **multifunción** (es decir, que realicen las funciones de radar, guerra electrónica, comunicaciones, etc., utilizando un *hardware* común de RF), **modulares y escalables** (para reducir los costes de fabricación), de reducido peso y volumen y **conformables** a la superficie de la plataforma. Para poder cumplir estas exigentes características, será imprescindible utilizar antenas AESA de altas prestaciones en dichos sistemas futuros.

5.1.1.3. Condicionantes tecnológicos

La configuración (AESA o PESA) utilizada para la implementación de antenas de apuntamiento electrónico está condicionada por el tipo de tecnología utilizada.

Así, aunque la tecnología de tubos de vacío proporciona mayor potencia y ancho de banda que la tecnología de estado sólido, el elevado tamaño y peso de dispositivos como el TWT o el klystron impiden su utilización en configuraciones de tipo AESA. Para intentar solucionar este problema, algunos fabricantes han construido versiones reducidas de estos dispositivos (por ej., los «mini-TWT»), que aunque se pueden emplear en algunas configuraciones de tipo AESA, siguen presentando un tamaño y peso elevado en comparación con los dispositivos de estado sólido.

Por el contrario, la tecnología de estado sólido resulta idónea para la implementación de las antenas AESA. Los módulos T/R necesarios para dichas antenas se pueden fabricar utilizando tecnologías de circuitos integrados de microondas (MMIC), obteniendo dispositivos de reducido tamaño y peso que pueden integrarse con cada uno de los elementos del *array*.

En la actualidad, las antenas AESA utilizadas en aplicaciones de defensa están basadas en GaAs. A pesar de que la tecnología del arseniuro de galio ya gozaba de un elevado grado de madurez en sectores como

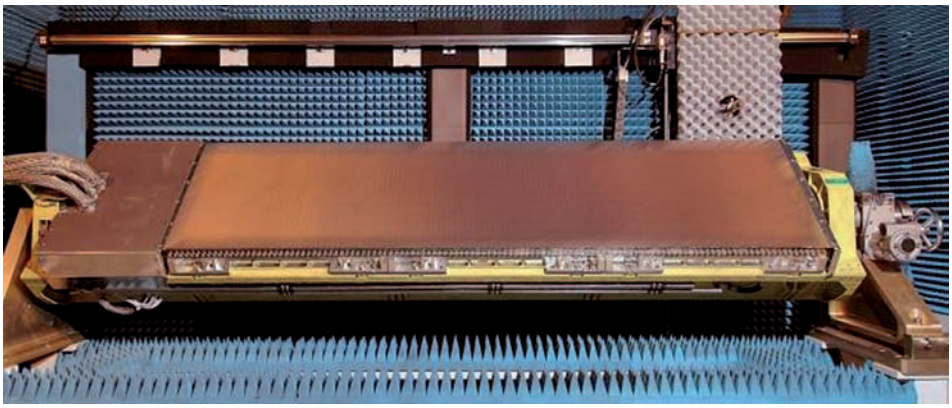


Figura 5.4. Radar SOSTAR-X, construido dentro del programa de I+D europeo del mismo nombre en el que participaron Alemania, España, Francia, Italia y Holanda. Es un radar AESA en banda X con capacidades SAR/GMTI. (Fuente: EADS).

el de la telefonía móvil, las exigentes prestaciones de los sistemas militares y los elevados costes de fabricación de los módulos T/R han ido retrasando su plena incorporación al ámbito de defensa hasta fechas recientes. Hoy por hoy, las antenas AESA basadas en GaAs ya son la

Figura 5.5. Destructor «Type 45» de la Royal Navy. El radar SAMPSON de defensa aérea (de tipo AESA) está instalado en el interior de la esfera situada en lo alto del mástil de proa. (Fuente: Royal Navy).

fuerza dominante en el ámbito de los radares para aviones de combate o FCR (véase la Figura. 5.3), y se están incorporando también a otros sistemas de defensa como los radares de vigilancia SAR/GMTI (véase la Figura 5.4) y los radares navales de defensa aérea (como, por ejemplo, el radar multifunción SAMPSON de BAE Systems, instalado en los destructores «Type 45» de la Royal Navy, véase la Figura 5.5).

A pesar de estos avances, el GaAs adolece de varias limitaciones tecnológicas, inherentes al propio material, que impiden su utilización en aplicaciones de alta potencia y gran ancho de banda. Esta situación sufrirá una transformación radical con la introducción de la tecnología de GaN en las antenas AESA. Este material WBG permitirá verdaderamente explotar todo el potencial de las antenas AESA, como se explicará en detalle en el siguiente apartado.

5.1.1.4. Materiales semiconductores WBG

Los límites inherentes asociados a otros tipos de tecnologías más maduras hacen que los futuros sistemas militares necesiten del desarrollo de la tecnología de semiconductores WBG, principalmente del GaN. La utilización de dispositivos basados en este material semiconductor introducirá cambios revolucionarios en las prestaciones de los sistemas militares de RF. Así, el GaN permitirá desarrollar amplificadores de estado sólido que podrán suministrar (teóricamente) hasta **cien veces más potencia** que los actuales dispositivos basados en GaAs, lo que convertirá al nitruro de galio en la primera tecnología de estado sólido que podrá competir en prestaciones con la tecnología de tubos de vacío (TWT, klystron, etc.) (véase la Figura 5.6). La sustitución de los pesados y voluminosos tubos de vacío por dispositivos de estado sólido permitirá conseguir importantes reducciones en el peso y el tamaño de los equipos de RF, facilitando su integración en plataformas no tripuladas como los UAV.

Por otro lado, las propiedades físicas del GaN permiten implementar dispositivos de RF con capacidad de operar en un amplio rango de frecuencias (dispositivos de banda ancha), lo que facilita el desarrollo de los sistemas multifunción de RF (radar, guerra electrónica y comunicaciones). Además, el GaN puede utilizarse no sólo para fabricar amplificadores de alta potencia (HPA), sino también amplificadores de bajo ruido (LNA) y el resto de componentes de los módulos T/R (conmutadores, desfasadores, etc.), lo que hace posible reducir los costes de fabricación al elaborar el módulo completo con un mismo proceso tecnológico.

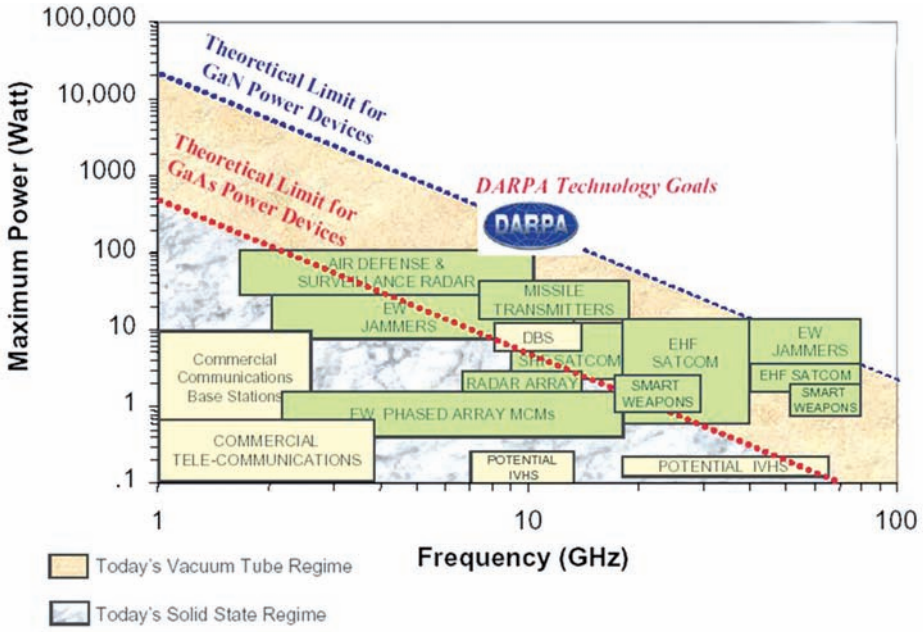


Figura 5.6. Limitaciones de la tecnología actual de GaAs y mejoras esperadas con el desarrollo de las tecnologías de GaN. (Fuente DARPA-MTO año 2000).

Por último, el desarrollo de las tecnologías de gestión térmica, empaquetado e integración (LTCC, etc.) de los dispositivos de GaN facilitarán el desarrollo de antenas AESA que se podrán adaptar a la geometría de cualquier superficie de la plataforma (antenas conformables).

En los siguientes puntos se recogen las principales ventajas tecnológicas de los dispositivos de RF basados en GaN:

– Los HPA de GaN son más pequeños, robustos y eficientes, presentando mayores márgenes de operación. Este tipo de dispositivos proporcionan una relación alta entre la corriente de pico y la capacidad de salida, así como un voltaje de ruptura muy alto, además de una gran capacidad de gestionar una gran densidad de potencia. Esta combinación es única y permite a los diseñadores abrir nuevas vías para alcanzar mejores prestaciones que las encontradas con otras tecnologías alternativas.
– Los LNA de GaN permiten *front-ends* de RF más robustos, lo que se puede llegar a traducir en la desaparición del limitador (lo que aumen-

taría la sensibilidad del sistema y permitiría disminuir el volumen y el peso del módulo T/R).

- Se puede reemplazar el limitador por un conmutador de GaN el cual puede ser integrado monolíticamente en el HPA.
- La gestión térmica de los módulos T/R de GaN será mucho más simple como consecuencia de la baja resistencia térmica entre la base de los MMIC y el canal, de los efectos de dispersión térmica debidos a la conductividad de los sustratos de SiC y de la mayor temperatura que soporta el GaN frente a los circuitos convencionales de GaAs.
- Como conclusión de los puntos anteriores, se puede afirmar que los módulos T/R basados en GaN tendrán menor tamaño y peso, menor coste y serán más robustos.
- Diseños más avanzados de HPA basados en GaN permitirán obtener mayores eficiencias, con ahorros significativos en potencia y en gestión térmica. En este sentido, la baja capacidad parásita y el alto voltaje de ruptura de los HEMT de GaN convierten a este tipo de dispositivos en ideales para fabricar amplificadores que trabajen en clase E y F.
- El incremento de la potencia de los dispositivos basados en GaN permitirá la utilización de ciclos de trabajo más cortos para la misma potencia media, dando como resultado más visibilidad de los objetivos radar.
- Al permitir mayores densidades de potencia, el desarrollo de dispositivos GaN va a permitir más flexibilidad a los diseñadores de radar para seleccionar factores de forma menores y de esta manera alcanzar mayores prestaciones en situaciones con *clutter* elevado.
- El acoplo de impedancias de entrada y de salida será más sencillo para dispositivos basados en GaN. De esta forma se generará más potencia en todo el ancho de banda, lo que permite el uso de una apertura de antena común. En este sentido, el GaN será una tecnología muy beneficiosa en el desarrollo de radares multibanda, los cuales presentan claras ventajas tales como mayor distancia de seguimiento, mejor funcionamiento en condiciones meteorológicas desfavorables (lluvia, etc.), mejor tolerancia contra perturbaciones, mayor libertad para escoger la forma de la onda y mejores prestaciones para el reconocimiento de blancos.
- Una extensión natural de los radares multibanda es la implantación de aperturas multifunción. Una combinación de multiplexado de tiempo y frecuencia permitirá incorporar al sistema radar una gran variedad de funciones tales como la guerra electrónica, comunicaciones y sistemas de control.

Las ventajas expuestas en los párrafos anteriores permiten concluir que el GaN, merced a su utilización en los módulos T/R de las antenas AESA (véase Figura 5.7.), permitirá dotar a los sistemas militares de RF de unas prestaciones sin precedentes y de unas capacidades verdaderamente revolucionarias:

- Sistemas radar y ESM de mayor alcance y sensibilidad (mayores distancias de detección de blancos más pequeños o de menor sección radar, así como de emisores de menor potencia de transmisión).
- Sistemas ECM más potentes y eficaces, y de menor peso y tamaño.
- Sistemas multifunción que integran todas las funciones de RF necesarias en la plataforma (Radar, Guerra Electrónica, comunicaciones, etc.).
- Integración y conformabilidad a la superficie de la plataforma.
- Sistemas de RF de reducido peso, volumen y coste de fabricación.

Estas razones justifican que las tecnologías asociadas con este material semiconductor hayan sido consideradas como estratégicas por parte de los Ministerios de Defensa de los países más avanzados.

Figura 5.7. Radar AMSAR (Airborne Multirole Multifunction Solid-state Active-array Radar). AESA basada en GaAs. En el futuro, los módulos T/R (en la imagen, situados inmediatamente detrás de la superficie radiante) estarán fabricados en GaN. (Fuente, THALES).

5.1.2. Optoelectrónica: Detección de UV

Otro campo en el que los semiconductores WBG tienen un amplio número de aplicaciones para defensa es el de la detección de radiación ultravioleta. Existen multitud de aplicaciones militares relacionadas con el este tipo de dispositivos. La obtención de nuevos detectores UV cada vez más baratos y sensibles es fundamental para la obtención de nuevas capacidades militares tales como:

- **Detección de fuego** (francotiradores, MANPADS, RPG, etc.): el fogonazo del cañón de un rifle o del propulsante en el lanzamiento de granadas puede ser detectado por su intensa emisión UV. Para este tipo de aplicaciones es muy ventajoso trabajar en la región ciega al Sol (240-290 nm), pues el número de falsas alarmas se ve disminuido de una forma muy importante.
- **Detección de agentes químicos y biológicos:** La mayoría de las sustancias orgánicas e inorgánicas presentan líneas de absorción y emisión características en el espectro UV.
- **Detección de la pluma de misiles:** la pluma de un misil (véase la Figura 5.8) emite radiación UV, por lo que la detección de dicha emisión se puede utilizar en sistemas de alarma de misiles (MWS).
- **Caracterización de la combustión de turbinas:** los productos de la combustión de una turbina emiten gases calientes característicos, muchas de cuyas emisiones se encuentran en el UV.
- **Comunicaciones seguras:** la capa de ozono impide que sean detectadas las comunicaciones entre satélites por medio de emisión de luz UV.
- **Comunicaciones tácticas NLOS:** muy útiles en zonas urbanas de corto alcance, donde la línea de visión directa entre transmisor y receptor está obstaculizada y es importante la seguridad y discreción del enlace (Véase la Figura 5.9).

La mayoría de estas aplicaciones requieren dispositivos de poco volumen, poco peso, muy robustos y compactos que soporten condiciones ambientales extremas. Los dispositivos de estado sólido basados en estos semiconductores WBG son únicos a la hora de satisfacer todos los requisitos exigidos. Los nitruros ternarios y cuaternarios presentan altas eficiencias cuánticas, bajo ruido, un gran rango dinámico y son, además, químicamente inertes.

Figura 5.8. Los semiconductores WBG se pueden emplear para fabricar detectores de la radiación UV emitida por la pluma de un misil, con la ventaja adicional de ser «ciegos» a la radiación solar. (Fuente: Ministerio de Defensa).

5.1.2.1. Tecnologías actuales

– Tubos fotomultiplicadores

Tradicionalmente los dispositivos más utilizados como detectores de UV han sido los tubos fotomultiplicadores (PMT). Este tipo de dispositivos presentan muy bajas corrientes de oscuridad y una gran sensibilidad, pero su ancho de banda es pequeño y su tamaño elevado, lo que limita su rango de aplicaciones (por ejemplo, no se puede realizar con ellos matrices para imagen).

– Dispositivos de Si

Como alternativa a los PMT, existen los diodos de avalancha (APD) de silicio. Los dispositivos de este tipo comercialmente disponibles tienen buenas eficiencias cuánticas en la región UV ciega al Sol, pero tienen el inconveniente de que requieren filtros ópticos muy exigentes que permitan rechazar la luz solar adecuadamente. La densidad de corriente de oscuridad típica de este tipo de sensores es de 100 nA/cm^2 a temperatura ambiente para ganancias de 10, lo que les convierte en detectores

adecuados para aplicaciones en las que el nivel de señal sea medio-alto. Además de la óptica, presentan otro inconveniente importante: las corrientes de fuga de estos dispositivos se vuelven excesivamente elevadas a medida que aumenta la temperatura de funcionamiento, lo que les impide trabajar a altas temperaturas.

5.1.2.2. Materiales WBG

Mientras que los detectores de Si y los PMT representan tecnologías maduras y disponibles comercialmente, los detectores basados en semiconductores WBG tales como el SiC y el GaN, están todavía en desarrollo. Una de las grandes ventajas de los semiconductores WBG es que permiten construir **detectores de UV ciegos a la radiación solar** (*Solar Blind UV detectors*), es decir, pueden detectar objetos que radian en ciertas ventanas del espectro (240 – 290 nm) sin la perturbación que representa la radiación solar en esa parte del espectro electromagnético. En la práctica esto significa que no requieren una óptica UV demasiado exigente como le ocurre al Si y a los PMT.

Por las bajas corrientes de oscuridad que presentan y su alto voltaje de ruptura, quizás los dispositivos detectores más utilizados y con mayor potencial son los diodos PIN de AlGaN. En la actualidad, es posible encontrar detectores PIN de GaN con responsividades tan altas como 0,4 A/W a 365 nm y 0,15 A/W a 270 nm. A pesar de que los CCD de Si adelgazados presentan buenas eficiencias cuánticas en el UV, el difícil y complicado desarrollo de su óptica asociada, (sobre todo de filtros) en el UV no ha permitido alcanzar los resultados esperados. Se están realizando grandes esfuerzos en desarrollar matrices de plano focal de AlGaN que trabajen en la región ciega al sol. Como resultado, hoy se pueden encontrar matrices detectoras de gran formato, 320x256 elementos, y con «pitchs» tan pequeños como 30 micras para su utilización en cámaras de imagen. Este tipo de dispositivos funciona a temperatura ambiente aunque se suele presentar en empaquetados herméticos con estabilizadores de temperatura (TEC). La solución más prometedora para obtener matrices de plano focal que trabajen en el UV llega de la mano de combinar (hibridar) dos tecnologías de gran proyección: CMOS y AlGaN que trabaje en la región ciega al sol. Su tecnología es compleja y es necesario que los sustratos sobre los que se procesan los dispositivos sean adelgazados con el objeto de que la radiación les pueda llegar por detrás y así permitir su hibridación mediante técnicas *flip chip* con la electrónica de lectura CMOS.

Otro tipo de dispositivos detectores de UV son los fotodiodos de avalancha (APD). Este tipo de dispositivos suelen tener más sensibilidad que los diodos PIN (5-10 dBs mayor). Se ha avanzado mucho y hoy es posible encontrar APD de GaN con ganancias de 1000 y densidad de corriente de oscuridad de 100 nA/cm^2 trabajando en la región ciega al Sol[3]. Por otra parte, los APD de SiC también han demostrado altas eficiencias cuánticas y muy bajas corrientes de oscuridad. Recientemente se han publicado excelentes resultados tales como densidades de corriente de oscuridad de 63 nA/cm^2 con una ganancia de 10.000 y una potencia equivalente al ruido tan baja como 20 fW[4].

Además, cabe destacar los **dispositivos contadores de fotones**, los cuales son ideales en aplicaciones en los que la señal es muy débil tales como LADAR (*Laser Detection and Ranging*), detección de bio-aerosoles, comunicaciones e imágenes de bajo nivel de luz. En esta línea se han intensificado los esfuerzos a la hora de desarrollar diodos de avalancha de UV profundo (DUV-APD). Ellos serían una alternativa a los actuales tubos intensificadores o fotomultiplicadores (PMT). Este tipo de dispositivos pueden trabajar en modo Geiger (GM-APD) gracias a sus altas eficiencias y en un futuro no muy lejano se prevé poder fabricar matrices de plano focal (FPA) que permitirán abrir nuevas perspectivas en el ámbito de la imagen UV.

Los materiales WBG también se pueden utilizar para la **detección de agentes químicos y biológicos**. Este campo tiene un gran recorrido y hay un interés creciente en el desarrollo de láminas delgadas «funcionalizadas» y nanohilos de materiales semiconductores WBG (GaN, InN, ZnO y SiC) para la detección de gases y biomoléculas. La «funcionalización» de superficies con óxidos, polímeros y nitruros aumenta la sensibilidad de detección de gases y de soluciones iónicas. El uso de láminas de encimas o anticuerpos sobre la superficie del semiconductor permite la detección muy específica de un gran número de antígenos de interés en los campos de seguridad y defensa.

[3] Véanse los artículos Limb, J.B. et al, «GaN UV avalanche photodiodes grown on 6H-SiC substrates with SiN passivation» Electronics Letters 44,(4), 313 (2008) y Jiang H et al «Low dark current high performance AlGaN solar blind p-i-n photodiodes» Japanese Journal of Applied Physics 47 (3) 1541 (2008).

[4] Véase el artículo Bai X., et al «High detection sensitivity of UV 4H-SiC APDs» IEEE J. Quantum Electron Dec. 43 (12) 1159 (2007).

5.1.3. Optoelectrónica: emisores de UV

Las aplicaciones asociadas al desarrollo de emisores de luz UV basados en semiconductores WBG son importantes. Dichas aplicaciones van desde la descontaminación de agua hasta la generación de luz blanca. Quizás una de las aplicaciones más prometedoras de este tipo de dispositivos sean las técnicas relacionadas con la discriminación entre bioagentes y otros tipos de organismos naturales, mediante la fluorescencia inducida por láser/LED. Esta técnica consiste en iluminar la muestra con una fuente de radiación UV, cuya fluorescencia depende de la presencia o ausencia del organismo biológico buscado. El objetivo es hacer que estos detectores sean suficientemente pequeños para que puedan ser llevados en la mano o puestos a modo de detectores de humo en edificios, etc.

Otra aplicación muy interesante de LED y láseres de UV es su uso en **comunicaciones tácticas fuera de la línea de visión directa (NLOS)**. Se trata de utilizar nuevos sistemas de comunicación que sean difíciles de interceptar y perturbar. Los transmisores/receptores de UV permitirán implementar redes de sensores desatendidos para comunicaciones en operaciones militares urbanas. Este tipo de sistemas (NLOS) se aprovechan de la fuerte dispersión que sufren las radiaciones electromagnéticas de muy corta longitud de onda debido a los aerosoles y moléculas de la atmósfera. Aunque presentan distancias de transmisión cortas, son muy difíciles de interceptar y perturbar (véase la Figura 5.9).

La purificación de agua, aire y superficies es otra de las aplicaciones que tienen los emisores de luz UV. La radiación de muy corta longitud de onda (UV profundo) es muy efectiva en la eliminación de bacterias y virus. Los LED son dispositivos muy prometedores para este tipo de aplicaciones por ser pequeños, robustos y muy eficientes. A modo de ejemplo, los soldados de operaciones especiales desplegados en zonas remotas obtendrían beneficios potenciales de esta tecnología mediante el uso de LED de UV dentro de las botellas de agua, lo que minimizaría en gran medida el riesgo sanitario de los expedicionarios (véase la Figura 5.10). Del mismo modo, los LED de UV han sido utilizados en purificadores de aire y en sistemas descontaminantes de superficies, de gran utilidad no sólo para defensa, sino también para la industria civil.

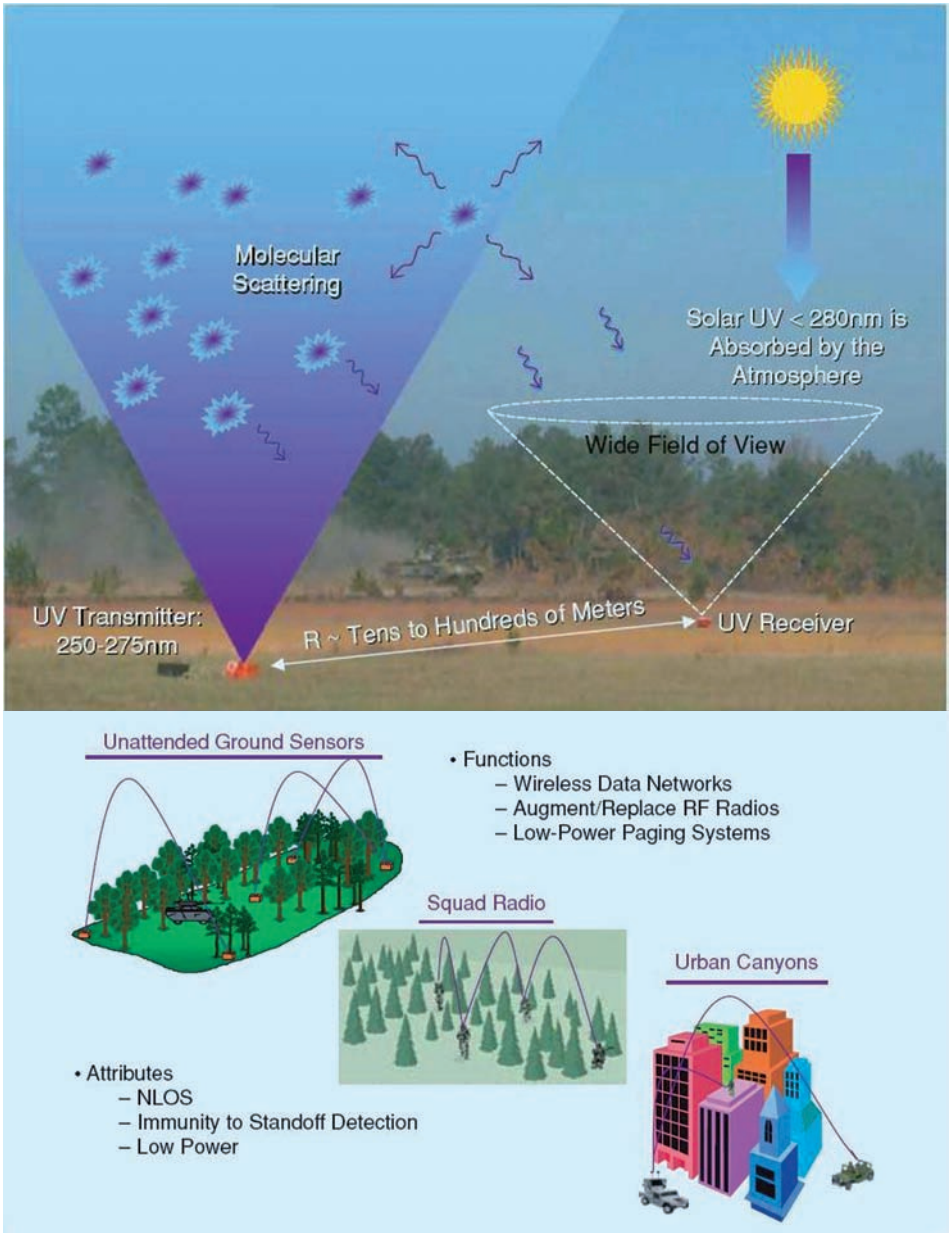


Figura 5.9. Enlace de comunicaciones NLOS basado en ultravioleta. Imagen superior: esquema de funcionamiento: el transmisor emite un haz de UV que es dispersado isotrópicamente por los gases atmosféricos. Receptores de amplio ángulo de visión (WFoV) detectan la señal UV dispersada. Imagen inferior: escenarios típicos de aplicación para comunicaciones NLOS en UV (Fuente: G.A. Shaw, A.M. Siegel, J. Model, IEEE LEOS Newsletter 19, 26 (2005)).

Figura 5.10. Los emisores de UV se podrían utilizar para la esterilización de aguas contaminadas, como alternativa a los sistemas basados en filtros de carbón activado como el que se muestra en la imagen (botella Lifesaver). (Fuente, Lifesaver Systems).

Otras aplicaciones que pueden tener un interés importante para defensa es el diseño de nuevos designadores de objetivos, iluminación de bajo consumo, dispositivos de energía dirigida, etc. En este punto también es interesante destacar las aplicaciones de este tipo de dispositivos UV en el curado de polímeros y epoxies y en el procesado de sustancias químicas y láminas protectoras.

5.1.3.1. Tecnologías actuales

La mayoría de las fuentes de radiación UV utilizadas hasta la fecha son lámparas de distintos materiales y láseres.

Lámparas UV: existen multitud de tipos de lámparas que emiten en el UV. Desde las de incandescencia que producen un espectro continuo hasta lámparas de descarga de gases (Xenon, Hg, etc.) que emiten en líneas y grupos de líneas característicos. También se pueden encontrar lámparas UV fluorescentes. En general este tipo de dispositivos, por su alto consumo, volumen y peso, presentan aplicaciones muy limitadas en lo que respecta a defensa.

Láseres UV: los láseres de UV actuales tienen una utilización limitada en el ámbito de defensa. Su eficiencia, volumen, coste y complejidad deben mejorar si se quiere extender su uso. Los hay que emiten luz en diferentes rangos del espectro UV. Caben destacar los láseres de gas tales como el de ión argón (con líneas hasta 350 nm), el de nitrógeno-TEA (Transverse Electrical Discharge, con líneas en 340 nm), láseres de metalión tales como el de Helio-Plata (224 nm) y Neon-Cobre (248 nm). Otro tipo de láseres UV con interés tecnológico son los láseres de excímero tales como el de flúor (157 nm), ArF (193 nm), KrCl (222 nm) etc. En lo que a láseres de estado sólido respecta, hay que destacar los láseres de semiconductor o láseres diodo, algunos de los cuáles pueden funcionar en longitudes de onda de hasta 350 nm.

5.1.3.2. Materiales WBG

Los nitruros son los materiales más adecuados para la fabricación de láseres y fuentes de luz de UV. Los logros alcanzados en esta área han sido muy importantes en la última década. Sin embargo, debido a las limitaciones presentadas por la tecnología en el crecimiento del material, todavía no se han logrado láseres que emitan en longitudes de onda menores de 340 nm. Los mayores progresos se están realizando con compuestos ternarios de InGaN.

La mayoría de las bio-moléculas presentan una absorción muy fuerte en el UV (entre los 280 y los 340 nm). Las fuentes de luz en este rango son de mucho interés para su utilización en los sistemas futuros de detección e identificación de agentes biológicos. Será necesario continuar con el desarrollo tecnológico de este tipo de dispositivos para seguir reduciendo la longitud de onda de los dispositivos emisores de luz y, de esta forma, continuar incrementando el rango de bio-moléculas detectables con este tipo de técnicas.

5.1.4 Optoelectrónica: Emisión y detección en las longitudes de onda del azul y el verde

Además de las aplicaciones optoelectrónicas relacionadas con el UV, los materiales WBG también jugarán un importante papel en las aplicaciones de defensa relacionadas con emisión y detección en otras longitudes de onda, en especial en el azul y el verde. Entre estas aplicaciones destacan las siguientes:

– **Comunicaciones ópticas submarinas**: los láseres emisores en el verde y azul basados en nitruros podrían utilizarse para mitigar el problema de las comunicaciones submarinas, utilizando las ventanas ópticas que presentan las aguas oceánicas y litorales en esas longitudes de onda (azul para las aguas oceánicas, verde para las aguas litorales). Estos sistemas podrían permitir tanto la comunicación entre naves sumergidas, como la comunicación entre submarinos y aeronaves a cotas medias y altas, proporcionando elevados anchos de banda y facilitando la operación encubierta de los submarinos (véase la Figura 5.11).

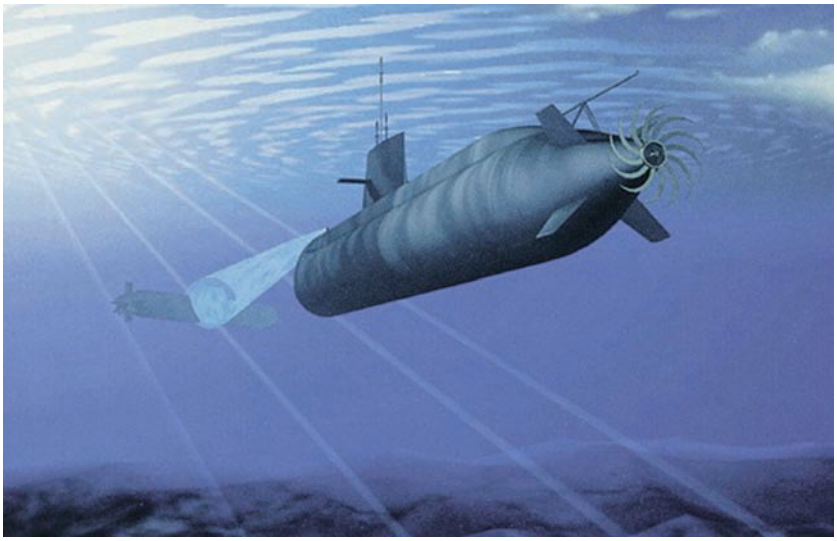


Figura 5.11. Los láseres emisores en la ventana óptica del verde-azul basados en nitruros podrían utilizarse para comunicaciones subacuáticas entre naves sumergidas (Fuente: Nautronix)

– **LIDAR para detección de minas y guerra antisubmarina**: la emisión láser en el verde-azul también puede utilizarse en sistemas LIDAR de batimetría para la detección de minas en aguas litorales y en aplicaciones de guerra antisubmarina. En la Figura 5.12 se muestra uno de estos sistemas comerciales, en la que el láser infrarrojo determina la altura de la superficie del mar (no penetra en el agua) y el láser verde determina la profundidad del suelo marino.

– **Mira láser:** debido a que el verde es uno de los colores de mejor percepción para el ojo humano, la utilización de miras láser emitiendo en

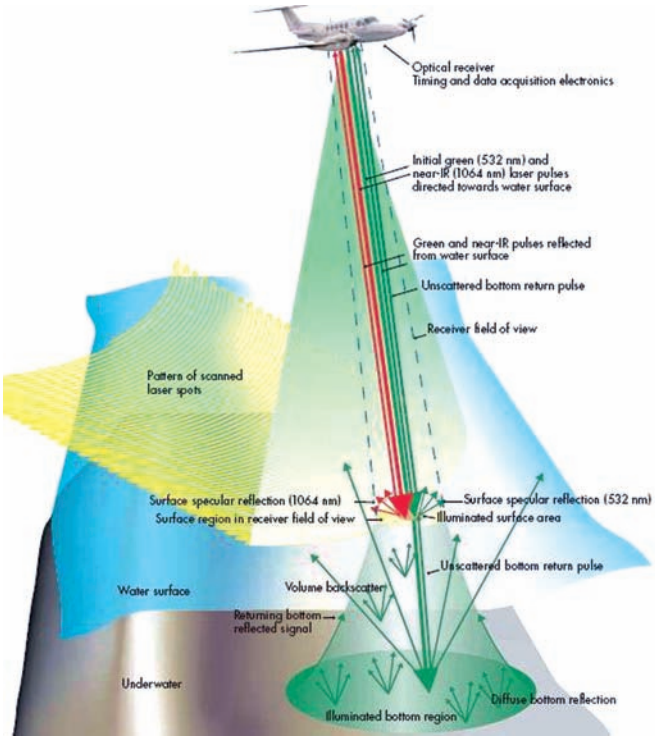


Figura 5.12. Esquema de funcionamiento del sistema de LIDAR batimétrico SHOALS-Hawk Eye de la empresa canadiense Optech. (Fuente: Optech).

el verde permite obtener mayores alcances de visión, tanto de noche como en pleno día. En la actualidad, ya existen sistemas comerciales basados en diodos láser emitiendo en el verde (a 532 nm), generando haces hasta 20 veces más brillantes que las miras láser convencionales que emiten en rojo.

– **Armas no letales**: la gran sensibilidad del ojo humano a las longitudes de onda del verde también se aprovecha en sistemas no letales para cegar temporalmente la visión de potenciales adversarios. Los diodos láser verdes basados en nitruros podrían emplearse para implementar este tipo de sistemas (véase la Figura 5.13).

A pesar de que los LED y diodos láser en azul basados en nitruros llevan disponibles desde hace varios años, la implementación de estos dispositivos en las longitudes de onda del verde sigue siendo en la actualidad un importante reto tecnológico. En el año 2009 se consiguió un gran avance

Figura 5.13. Imagen del sistema GLEF (Green Laser Escalation Force), desplegado en Afganistán por el ejército estadounidense para su evaluación operativa. (Fuente: U.S. Army).

con la obtención de los primeros diodos de emisión directa en estas longitudes de onda por parte de las empresas Sumitomo (Japón) y Osram (Alemania), aunque la eficiencia de estos dispositivos sigue siendo baja.

5.1.5. Electrónica de potencia

La electrónica de potencia tiene asociadas importantes aplicaciones en el ámbito de defensa (véase la Figura 5.14). Debido a las limitaciones intrínsecas relacionadas con el silicio, el desarrollo de materiales de gap ancho es importante para su utilización en sistemas que hacen uso de altas corrientes y altos voltajes. Sin lugar a dudas, el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan mejorar los módulos de potencia se encuentra hoy entre las prioridades de la mayoría de los Ministerios de Defensa de los países más avanzados del mundo. **El desarrollo de plataformas y vehículos híbridos y eléctricos, aviónica, componentes críticos en satélites, etc.** pasan por la creación de componentes, sistemas y subsistemas de menor volumen y peso capaces de soportar y gestionar mayor densidad de potencia en un ancho rango de temperaturas.

A diferencia de lo que ocurre con las aplicaciones de radar y guerra electrónica, donde el GaN presenta ventajas potenciales sobre el SiC debido

a su mejor comportamiento a altas frecuencias, en el caso de la electrónica de potencia es el SiC el que presenta ventajas sobre el GaN, debido a sus mejores propiedades térmicas que le permiten gestionar mayores niveles de potencia. En este sentido, el SiC es un semiconductor muy adecuado porque podría llegar a trabajar a muy altas temperaturas (superiores a los 600 ºC) y a altas frecuencias (decenas de GHz).

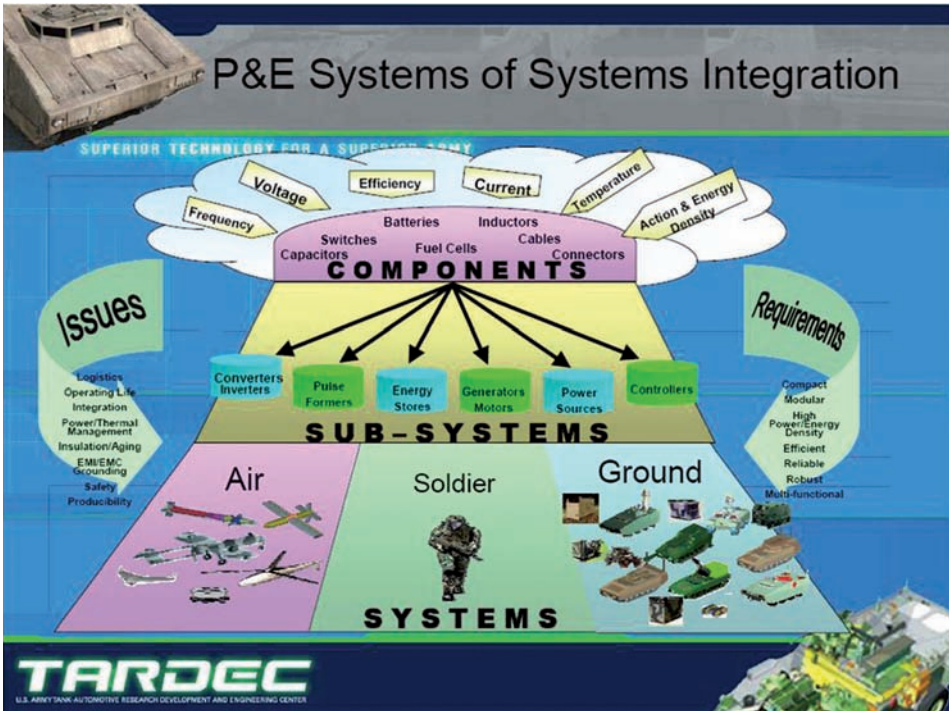


Figura 5.14. Aplicaciones de la electrónica de potencia a sistemas militares. (Fuente: TARDEC, US Army).

Las ventajas potenciales que presentan los sistemas y subsistemas basados en materiales WBG como el SiC son:

- Reducción de peso: el uso de materiales WBG permitirá la sustitución de los núcleos de hierro en los transformadores, con la consiguiente reducción de peso. Este requisito es especialmente exigente e importante para los sistemas embarcados en plataformas espaciales y aéreas (UAV, satélites, etc.)
- Mejora de las prestaciones de los sistemas de distribución eléctrica: permitirán mejorar la modulación de la anchura de pulso en los convertidores,

lo que se traduce en una mejora en el sistema de distribución (reducción de armónicos reflejados, factores de corrección de potencia, etc.)
– Permiten los sistemas de distribución de potencia nodales: la utilización de estos materiales hará posible la reducción de componentes y la mejora en la fiabilidad de los sistemas de distribución de potencia en grandes plataformas.
– Reduce la carga de los dispositivos de potencia: al permitir utilizar voltajes más altos en los convertidores de potencia, se reduce la carga de trabajo en los conmutadores de estado sólido, lo que se traduce en sistemas más fiables y robustos.

Entre las aplicaciones militares más destacadas que hacen uso de circuitos y dispositivos de potencia podemos destacar las siguientes:

– **Electrónica de potencia para motores híbridos y eléctricos:** es un campo de gran futuro y de interés compartido con el ámbito civil. Sin embargo, el ámbito de defensa tiene unos requisitos de potencia específicos que hacen que la tecnología asociada constituya un nicho muy importante y bien diferenciado.

La mayoría de los Ejércitos tienen en sus planes futuros la introducción de plataformas con propulsión eléctrica parcial o total. Ya existen los primeros prototipos de vehículos de combate híbridos (véase la Figura 5.15) y la tendencia apunta hacia plataformas con propulsión totalmente eléctrica. Los beneficios de este tipo de propulsión son evidentes en términos de movilidad, supervivencia, logística, limpieza y medio ambiente. Se espera que con este tipo de tecnologías híbridas/eléctricas los costes logísticos de las plataformas se vean reducidos y los ciclos de vida de las mismas aumentados.

Figura 5.15. Prototipo de vehículo híbrido «Quantum Aggressor», desarrollado conjuntamente por la empresa Quantum Fuel Systems Technologies, el National Automotive Center (NAC) y el TARDEC (US Army). (Fuente: NAC/TARDEC).

El desarrollo de propulsores eléctricos eficientes y potentes para todo tipo de plataformas militares, UXV, navales, aéreas y terrestres, pasa por disponer de tecnologías que permitan generar, distribuir y gestionar potencias eléctricas muy elevadas, de una forma eficiente y bajo severas restricciones de volumen, peso y consumo. Sin duda, esto convierte a los materiales WBG en estratégicos para este tipo de aplicaciones. En este aspecto concreto, los dispositivos más interesantes serían posiblemente los convertidores de potencia que utilizan diodos y conmutadores.

A modo de ejemplo, en la Figura 5.16, se puede ver la comparación en tamaño de dos módulos de potencia, con características similares pero basados en dos tecnologías diferentes, Si y SiC. La refrigeración necesaria para el módulo de Si es notablemente más voluminosa y costosa que para su equivalente en SiC.

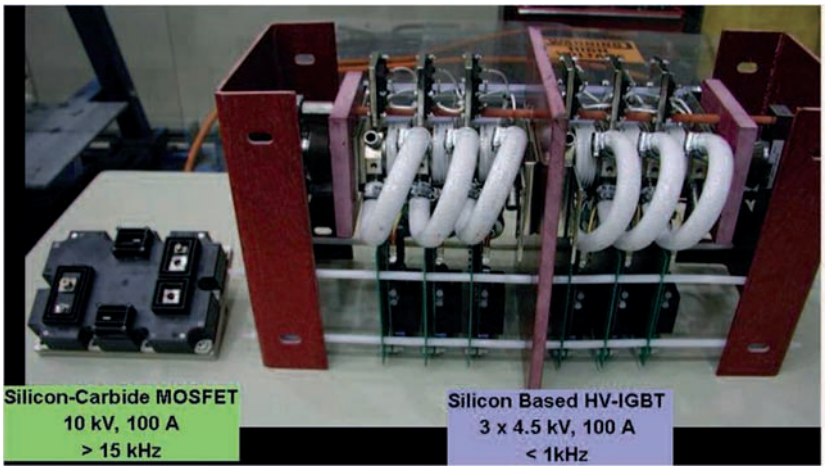


Figura 5.16. Comparación de tamaño de convertidores de potencia basados en dispositivos de Si y de SiC. (Fuente: General Electrics – Global Research Center (GE-GRC)) (Fuente: GE-GRC)

– **Cañones electromagnéticos:** este tipo de armas presentan grandes ventajas con respecto a las convencionales, en aspectos tales como la velocidad del proyectil, la baja detectabilidad, el alcance, la precisión, etc. Presentan el inconveniente de que todavía necesitan componentes grandes y pesados, lo que las convierte, a día de hoy, en armas todavía experimentales. Sin embargo, y gracias a los últimos avances tecnológicos, hoy se pueden encontrar desarrollos muy cercanos a los requisitos operativos, aunque aún resulta necesario conseguir grandes

reducciones en el peso y el volumen del cañón. Para ello será necesario avanzar hacia una nueva generación de componentes que sean capaces de generar y distribuir grandes pulsos de potencia y tengan un tamaño y peso razonables. Los semiconductores como el SiC y el GaN son la gran alternativa a la tecnología actual. Supercondensadores, diodos y conmutadores de potencia serán los componentes críticos que harán posible la generalización de este tipo de armas (véase la Figura 5.17).

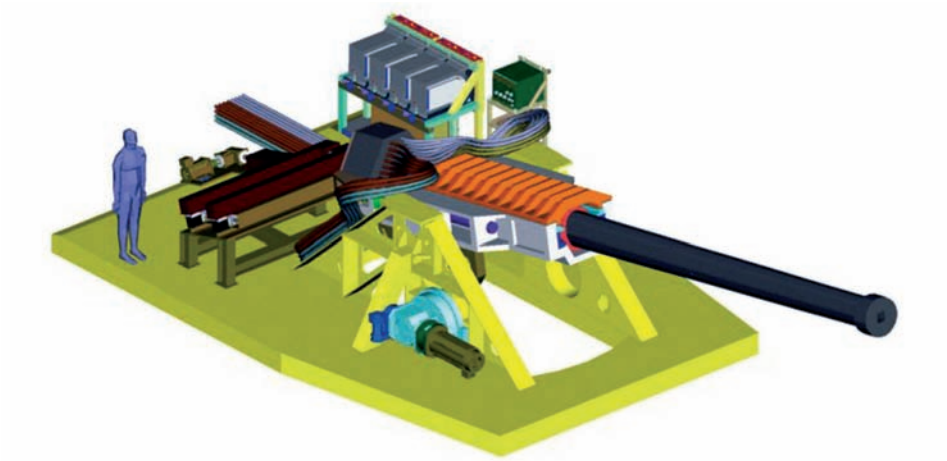


Figura 5.17. Diseño de cañón electromagnético (rail gun) de BAE Systems. (Fuente: BAE Systems).

– **Distribución de Energía en plataformas:** aunque ya se han mencionado anteriormente las aplicaciones de estos materiales en la electrónica de potencia relacionada con la propulsión de plataformas (motores eléctricos e híbridos), en esta aplicación se hace referencia a la distribución de la potencia en toda la plataforma. Los ingenieros de las principales empresas fabricantes de aviones ya están trabajando en el diseño de nuevas plataformas aéreas con arquitecturas preparadas para el concepto «*hybrid electric drive*». Del mismo modo, se está trabajando también en plataformas navales y terrestres totalmente eléctricas, de lo que se deduce que los sistemas de distribución de energía eléctrica y potencia serán una parte esencial de las futuras plataformas militares. En dichas plataformas, los dispositivos basados en materiales de gap ancho serán una pieza clave a la hora de gestionar y distribuir la potencia necesaria a las distintas partes de la plataforma.

5.1.5.1. Tecnologías actuales

A pesar de que la tecnología del SiC va a proporcionar una mejora sustancial en las prestaciones de los sistemas y dispositivos de alta potencia, la gran mayoría de los dispositivos que actualmente están en uso están basados Silicio.

En la Figura 5.18. se muestra una clasificación de los dispositivos de potencia de estado sólido. En la práctica, los que presentan mayor interés tecnológico son los transistores MOSFET (*Metal Oxide Silicon Field Effect Transistors*), IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) y conmutadores de estado sólido GTO (*Gate Turn Off Thyristor*). Otros dispositivos tales como los rectificadores SCR (*Silicon Controlled Rectifiers*) y circuitos integrados de potencia PIC (*Power Integrated Circuits*) son cada vez más utilizados.

THYRISTORS	TRANSISTORS
- GTO (*Gate Turn Off Thyristor*) - MCT (*MOS-Controlled Thyristor)* - FCTh (*Field-Controlled Thyristor*) - SITh (*Static Induction Thyristor*) - MTO (*MOS Turn-Off Thyristor*) - EST (*Emitter-Switched Thyristor*) - IGTT (*Insulated Gate Turn-off Thyristor*) - IGT (*Insulated Gate Thystor*) - IGCT (*Insulated Gate Commutated Thystor*)	- BIPOLAR TRANSISTOR - DARLINGTON TRANSISTOR - MOSFET - FCT (Field Controlled Transistor) - SIT (Static Induction Transistor - IEGT (Injection Enhanced (insulated) Gate Transistor) - IGTB (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Figura 5.18. Dispositivos semiconductores de conmutación actuales. (Fuente: Power Electronics For Very High Power Applications, E.I. Carroll, ABB Semiconductors AG)

Si MOSFET

Este tipo de dispositivo es muy utilizado en aplicaciones de alta frecuencia (hasta 10 MHz), pero con voltajes de operación moderados y potencias por debajo de los 10 KW.

Si IGBT

Son dispositivos más pequeños y baratos que los MOSFET. Excepto para aplicaciones por encima de los 60KHz, donde los MOSFET todavía presentan mejores prestaciones, los IGBTs se están imponiendo. De

acuerdo con su estructura son clasificados en PT (*punch-through*) y NPT (*non punch-through*). En los primeros se pueden encontrar dispositivos de hasta 1,5 KV, mientras que en los segundos se pueden encontrar hasta 4 KV.

GTO

Son conmutadores de potencia que pueden ser activados por un pulso corto en puerta y desactivados por un pulso invertido. No necesitan un circuito de conmutación externo y presentan tiempos de conmutación muy cortos, lo que les permite frecuencias de operación mucho más altas que los tiristores convencionales. Presentan mayores tolerancias a sobre-corrientes y sobre-voltajes que los transistores de potencia. En la actualidad se pueden encontrar GTO que pueden soportar hasta 5 KAmps y 8 KV.

En la Figura 5.19 se muestran los voltajes de operación estándar que actualmente alcanzan los dispositivos de potencia basados en Si.

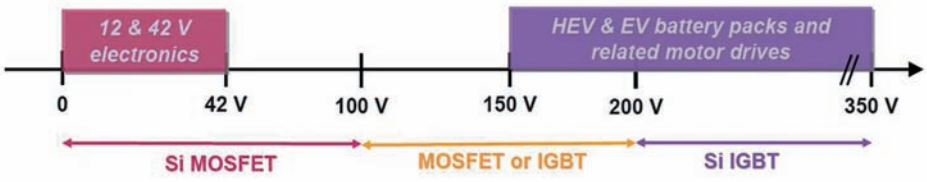


Figura 5.19. Voltaje de operación de los dispositivos basados en Si. (Fuente: YOLE DÉVELOPPEMENT).

5.1.5.2. Materiales WBG

Los desarrollos recientes han llevado a la tecnología de Si hacia sus límites fundamentales. La máxima temperatura de unión que puede soportar un dispositivo de Si es 150 ºC, lo que exige el uso de sistemas de refrigeración que consumen recursos y son costosos. Del mismo modo, en los dispositivos de Si las frecuencias de conmutación están limitadas por las pérdidas y el calor generado en dichos dispositivos. Las futuras aplicaciones están demandando mayores tensiones de bloqueo, mayores frecuencias de conmutación, alta fiabilidad y altas eficiencias, que con la tecnología de Si no va a ser posible conseguir.

Como ya se ha comentado anteriormente, para aplicaciones de electrónica de potencia el SiC presenta claras ventajas respecto al GaN. El

diamante es otro material muy prometedor, pero su tecnología está todavía muy poco madura. En este apartado nos vamos a centrar en la tecnología de SiC, material que presenta grandes ventajas debido a las siguientes razones:

- Los dispositivos unipolares de SiC son más delgados y presentan resistencias de conducción más bajas, lo que se traduce en menores pérdidas y mayores eficiencias.
- El SiC presenta voltajes de ruptura mayores. A modo de ejemplo, el primer diodo Schottky de SiC que se comercializó aguantaba más del doble de tensión (más de 600 V) que la mejor tecnología de Si, cuyo límite máximo de tensión era inferior a los 300 V.
- El SiC presenta una conductividad térmica alta: 4,9 W/cm-K, tres veces mayor que la del Si. Esto se traduce en una refrigeración mucho más eficiente de los dispositivos.
- La dependencia de las prestaciones de los dispositivos de SiC con la temperatura es mucho menor que para el Si.
- Los dispositivos de SiC pueden operar a altas temperaturas, por encima de los 600º C.
- Los dispositivos bipolares de SiC tienen una excelente recuperación en inversa. Ello se traduce en menores pérdidas de conmutación y mayor robustez a las interferencias electromagnéticas.
- Debido a sus menores pérdidas de conmutación, pueden operar a muy altas frecuencias de conmutación (mayores de 40 KHz) para niveles de potencia de decenas de KW.

A modo de comparación con el Si (Figura 5.19) en la Figura 5.20. se muestran la evolución de los voltajes de operación típicos de los diodos Schottky de SiC, donde se observan claramente los mayores valores de tensión a los que pueden operar estos dispositivos.

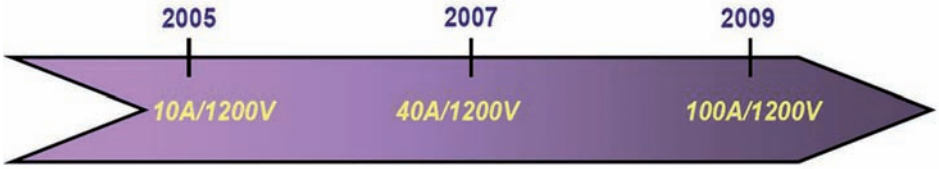


Figura 5.20. Evolución de las prestaciones de operación de los diodos Schottky de SiC en los últimos 5 años. (Fuente: YOLE DÉVELOPPEMENT)

A día de hoy las tendencias futuras pasan por desarrollar MOSFET de SiC que operen a 10 KV, IGBTs que operen a 12 kV y al desarrollo de módulos de potencia integrados. A modo de conclusión, en la Figura 5.21. se muestra la evolución pasada y las estimaciones futuras en el ámbito de la electrónica de potencia.

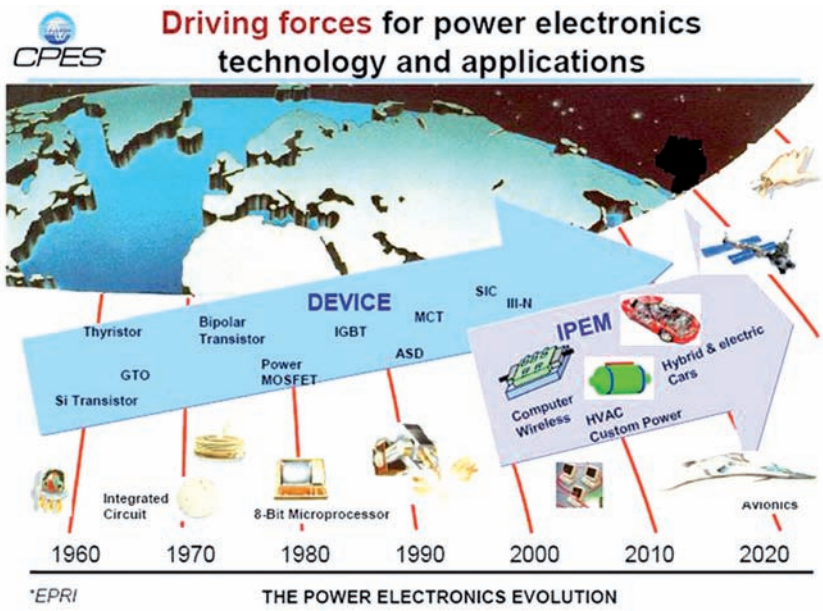


Figura 5.21. Evolución del desarrollo de la electrónica de potencia en los últimos 50 años y estimaciones futuras (Fuente: Center of Power Electronics Systems (CPES)).

5.2. Sector civil

Las aplicaciones militares de las tecnologías de GaN y SiC tienen en la mayor parte de las ocasiones su contrapartida dual en el ámbito civil. La aportación del sector de defensa ha sido más relevante en las áreas de electrónica de radiofrecuencia de alta potencia y sensores fundamentalmente optoelectrónicos. Por otra parte, la investigación en optoelectrónica ha recibido un fuerte impulso del sector civil en las áreas de iluminación y de tecnologías de la información medios de almacenamiento de datos, tecnologías de visualización, etc.

5.2.1. Electrónica de radiofrecuencia

Los requisitos impuestos por las infraestructuras de telecomunicaciones actuales se traducen en un incremento de la frecuencia de trabajo, potencia de salida y voltaje de operación para los sistemas de amplificación. Los dispositivos basados en semiconductores WBG, HEMT de AlGaN/GaN y MESFET de SiC, ofrecen ventajas explotables desde el punto de vista de eficiencia, linealidad, ancho de banda, voltaje de operación y temperatura de funcionamiento, como se ha indicado en capítulos anteriores, ajustándose bien a la tendencia anterior. Las comunicaciones inalámbricas son la principal aplicación de ambas tecnologías en el ámbito civil, siendo la familia de semiconductores del GaN la más prometedora. Los niveles de potencia perseguidos comprenden desde valores inferiores a 1 W para pequeños terminales personales a valores superiores al kilovatio para comunicaciones por satélite y redes de radiodifusión, pasando por las decenas a cientos de vatios que se usan en estaciones base de telefonía móvil y comunicaciones inalámbricas fijas. Las bandas de frecuencia de interés cubren la banda L para comunicaciones móviles, las bandas de 4 – 11 GHz para comunicaciones a larga distancia, las bandas 22/26/38 GHz usadas en sistemas de distribución local multipunto (*Local Multipoint Distribution System* o LMDS) y las bandas de 2,4 y 5,2 GHz empleadas en redes de área local, así como otras más específicas como las asignadas a radares de carácter civil.

Los segmentos en los que ha suscitado mayor interés el uso de los semiconductores WBG son los siguientes:

- Estaciones base para telefonía celular (sistemas 3G y 3G+).
- Estaciones base para WiMAX.
- Radiodifusión y comunicaciones por satélite (véase Figura 5.22.).
- Sistemas de transporte inteligente como la recaudación de tasas electrónica (*Electronic Toll Collection* o ETC) y los sistemas de transmisión de información de vehículos (*Vehicle Information Communication System* o VICS).
- Sistemas radar embarcados en automóviles para medir distancias, evitar colisiones y para facilitar el aparcamiento: en estos casos se ha planteado el uso de frecuencias en la banda de milimétricas y en la región de 5,8 GHz.

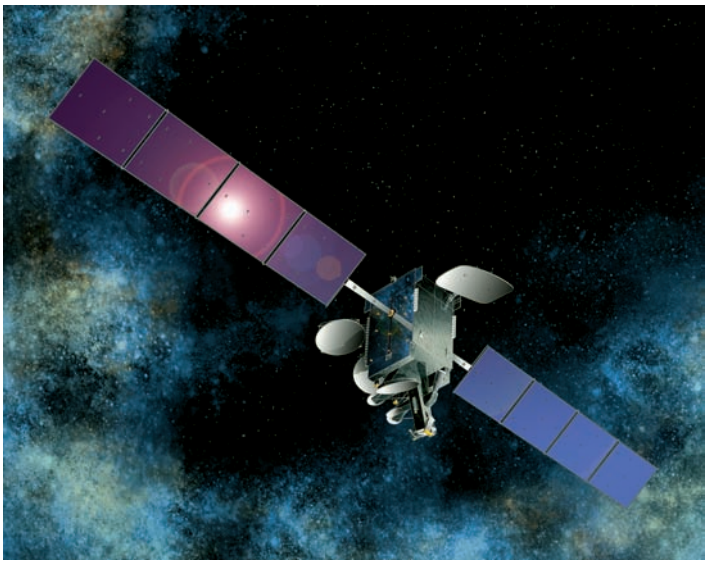


Figura 5.22. Se espera que los dispositivos basados en semiconductores WBG formen parte de los equipos de los futuros satélites de comunicaciones (Fuente: Space Systems Loral)

5.2.2. Electrónica de potencia

Los circuitos de conversión de energía eléctrica mediante conmutación forman parte de uno de los sistemas más importantes dentro del dominio de la electrónica de potencia. La reducción de pérdidas de conversión, la mejora en la fiabilidad, el abaratamiento de los equipos y su reducción de tamaño son algunas características deseadas en este tipo de sistemas. Teniendo en cuenta que más del 40% del consumo de energía se produce en forma de electricidad en los países avanzados, éste es uno de los campos más atractivos para el desarrollo de aplicaciones que demanden semiconductores WBG (véase la Figura 5.23).

Figura 5.23. El sector de generación y distribución de energía eléctrica será uno de los ámbitos donde los semiconductores WBG aportarán mayores beneficios (Fuente: Isdefe).

Las aplicaciones concretas varían en función del rango de potencias, aunque bá-

sicamente tienen como objetivo adaptar las necesidades energéticas a dos tipos de sistemas, motores y fuentes de alimentación:

– Potencias altas (>1 MW): típicas de sistemas de transmisión y distribución de la energía eléctrica, motores industriales y sistemas ferroviarios. La frecuencia de operación de estos sistemas suele situarse por debajo de 10 kHz.
– Potencias medias (1 MW – 1 kW): algunas aplicaciones representativas son sistemas de distribución locales para edificios, vehículos eléctricos híbridos y puramente eléctricos (Figura 5.24), sistemas de climatización o motores de propósito general. Las frecuencias de operación rondan desde las decenas de kilohercios a varios cientos de kilohercios.
– Potencias bajas (<1 kW): forman parte de este rango los sistemas de tecnologías de la información y de alumbrado. Los valores de frecuencia de operación son normalmente superiores a los 100 kHz.

Como se comentó en el capítulo 4, los dispositivos de SiC son más apropiados para operación a voltajes extremos y potencias más elevadas.

Figura 5.24. En los próximos años, se espera que los dispositivos WBG experimenten una gran demanda por parte del sector de vehículos híbridos y eléctricos. (Fuente: Toyota).

5.2.3. Emisores de luz

La generación de luz en parte del espectro visible y ultravioleta se ha convertido en una de las aplicaciones más importantes de la tecnología de GaN. Las propiedades de los nitruros ya señaladas en capítulos anteriores hacen que este tipo de materiales sea actualmente el más idóneo para implementar una solución de estado sólido en esta parte del espectro.

Los emisores de luz basados en nitruros se pueden emplear en distintas aplicaciones incluyendo entre otras las siguientes:

- Alumbrado público e iluminación de bajo consumo y altas prestaciones desde el punto de vista cromático (véase la Figura 5.25).
- Señalización de tráfico.
- Impresión de altas prestaciones.
- Sistemas de visualización y proyección (por ejemplo, pantallas de televisión).
- Almacenamiento de datos por medios ópticos de alta densidad (lectura y escritura) usando láseres de alta potencia (escritura) operando a la longitud de onda más corta posible.
- Comunicaciones ópticas fuera de la línea de visión (NLOS): una solución alternativa a la transmisión via radio es la utilización de comunicaciones ópticas que aprovechan la retrodispersión atmosférica para guiar la luz del emisor al receptor sin necesidad de que estos estén en línea de visión directa. Se ha demostrado que la eficiencia de estos sistemas para emisión y recepción en el UV puede ser mejor que la de los sistemas de radiofrecuencia.

Figura 5.25. Calle iluminada por lámparas de LED en Taichung (Taiwan) (Fuente: ATD/OSRAM).

– Purificación de agua de bajo coste mediante luz ultravioleta.
– Biomedicina para tratamientos mediante láser a diferentes longitudes de onda y con diferentes requisitos de potencia.

5.2.4. Detectores de luz

Análogamente a lo que sucede con los emisores de luz, las propiedades de los nitruros presentan muchas ventajas para la detección de luz. Sin embargo, en este caso, existen otras tecnologías alternativas, como la de Si o incluso el propio SiC, que reducen su mercado potencial, principalmente en defensa y espacio, en tanto la tecnología no sea efectiva en coste y posea suficiente fiabilidad. Las aplicaciones más destacadas se resumen a continuación:

– Comunicaciones ópticas fuera de la línea de visión (NLOS): los fotodetectores de GaN podrían reemplazar a los fotomultiplicadores reduciendo el peso, el coste y los requisitos de alimentación del sistema.
– Comunicaciones tierra-espacio: interesan fotodetectores que aprovechen la ventana óptica atmosférica siendo sensibles al ultravioleta e insensibles a la luz visible e infrarroja. La selectividad y la detectividad son las principales figuras de mérito para esta aplicación.
– Tecnologías de almacenamiento de datos: se pueden utilizar fotodetectores sensibles a la polarización de la luz en sistemas de almacenamiento que emplean el efecto Kerr magneto-óptico para grabar y leer datos. Este efecto consiste en que la polarización de la luz reflejada varía con el estado magnético de la superficie donde están almacenados los datos. Si se utilizan láseres en el ultravioleta, será necesario tener fotodetectores sintonizados también en el mismo rango.
– Fotolitografía de alta resolución: la fotolitografía óptica con luz ultravioleta se presenta como una tecnología interesante para la fabricación masiva de dispositivos y componentes. Esta aplicación no es previsiblemente tan crítica como las anteriores, siendo criterios importantes el coste y la fiabilidad.
– Sistemas de detección ultravioleta de propósito general: existen muchos sistemas artificiales que generan luz ultravioleta en determinadas situaciones. Ejemplos de aplicaciones son la detección de llama o el control de la combustión. Las aplicaciones «ciegas a la luz solar» son las más específicas de la tecnología de GaN.
– Detectores de ultravioleta para aplicaciones espaciales en sistemas embarcados: las condiciones de operación en espacio (temperatura, irradiación, etc.) son extremas, por lo que las tecnologías de GaN y SiC

pueden resultar más convenientes que otras por su alta resistencia a la radiación.
– Biomedicina y salud: por ejemplo, para control de la exposición solar o fluorescencia.

5.2.5. Otras aplicaciones

El número de aplicaciones en los que las tecnologías de GaN y SiC pueden ofrecer ventajas comparativas con respecto a otras soluciones va creciendo al avanzar la tecnología. Algunos ejemplos son:

– Células solares: la fabricación de células solares multiunión de alta eficiencia requiere de un material que se ajusta a las características espectrales del (In,Ga)N.
– Termoeléctricos basados en (In,Ga)N: estos dispositivos convierten calor en energía eléctrica y se usan para refrigeración (por ejemplo, en fotodetectores). Los resultados indican que la figura de mérito termoeléctrica ZT puede incrementarse mediante mejoras en el material e ingeniería de nanoestructuras para alcanzar valores competitivos, con el valor añadido de facilitar la integración de sistemas y reducir el coste.
– Detectores de terahercios para aplicaciones de seguridad: Panasonic ha anunciado recientemente una tecnología comercial basada en GaN que permite detectar en la banda de frecuencias de terahercios con la sensibilidad más alta obtenida hasta el momento a temperatura ambiente.
– Microelectromecanismos (MEMS) basados en tecnologías de GaN y SiC para operar en ambientes agresivos como sensores o actuadores (véase Figura 5.26.).
– Hornos microondas: los dispositivos basados en tecnología de GaN podrían llegar a sustituir a los tubos magnetrón, se trata de una aplicación de consumo de la electrónica de potencia.

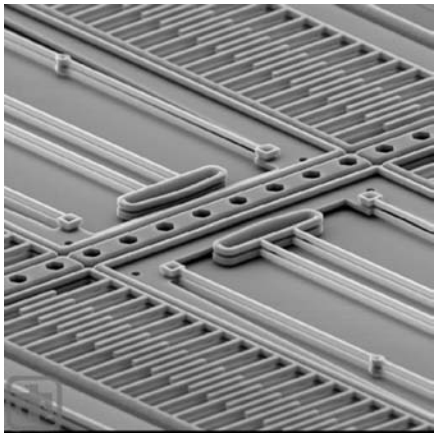


Figura 5.26. Detalle de un micromotor de polisilicio de 3 capas. Las propiedades físicas del GaN y el SiC les convierten en materiales especialmente adecuados para dispositivos MEMS en ambientes agresivos (Fuente: Sandia National Laboratories, SUMMiT(TM) Technologies, www.mems.sandia.gov).

5.3. Perspectivas de mercado

Los hitos tecnológicos comentados en el apartado anterior indican sólo una parte del interés que suscitan el GaN y sus materiales relacionados. En realidad, existe un gran número de aplicaciones, tanto militares como civiles, en los que esta tecnología puede resultar un hecho en los próximos años.

Para valorar el mercado y las perspectivas que ofrecen estos materiales se puede recurrir a diversas fuentes, como el análisis de la demanda potencial que es posiblemente el mejor indicador del volumen y cifra de negocios. Pero antes de aportar más información al respecto, conviene definir las aplicaciones donde llevar a cabo un estudio más detallado. Concretamente, se han seleccionado por su importancia los mercados de LED, láseres, electrónica de radiofrecuencia (RF) y alta potencia, fotodetectores y aplicaciones de alta temperatura.

5.3.1. Diodos electroluminiscentes (LED)

La iluminación es uno de los mercados con mayor demanda. Algunas cifras que pueden servir de orientación de la importancia de este sector son:

- El mercado global de la iluminación en 2004 se valoró en una cifra entre 40.000 M$ y 100.000 M$. Un tercio del total estaba referido a lámparas.
- El 22% de la energía eléctrica de Estados Unidos se consume en iluminación. Dado que los LED actuales tienen una eficiencia diez veces superior, se podría reducir esta cifra al 10%. El ahorro que podría suponer un cambio de este tipo sería astronómico (por ejemplo, 115.000 M$ hasta el 2025 sólo en Estados Unidos).

El mercado de LED ha sufrido una transformación con la llegada de la tecnología de GaN. Los incrementos producidos en su cifra de negocios han sido continuos desde ese momento a tasas superiores al 10% anual. Así, en 1998 se estimaba que el mercado de LED era de 2,500 millones de dólares, de los cuales un tercio se correspondían a diodos en infrarrojo y rojo fabricados con tecnologías de GaAs/(Al,Ga)As o (In,Ga)P, mientras que el tercio restante estaba formado por diodos en ámbar, azul y verde (estos dos últimos colores dominados por la tecnología de GaN). En 2004, sólo los LED de nitruros representaban un mercado de casi 3.200 M$. Y en 2008, se requería un número de diodos blancos

basados en GaN de 4.500 millones de unidades, que se espera que se duplique en años venideros, con un mercado de 6.000 M$. Las aplicaciones actuales de estos LED incluyen la telefonía móvil (en torno al 50% de la cuota total), automoción, televisión LCD y ordenadores personales, cámaras digitales, iluminación general y otro tipo de componentes de consumo.

El mayor productor de LED es Japón, seguido de Taiwán. Por empresas, en el 2005 aparecía Nichia en primera posición, seguida de Citizen, OSRAM y Toyoda Gosei, aunque dado que es un mercado en expansión, los actores podrían variar ligeramente. El precio por dispositivo debería rondar 0,1 a 0,5$ en función de la gama y prestaciones para una perfecta integración en el mercado.

La tecnología de LED también será utilizada en diversas aplicaciones de interés militar (ahorro de energía, sistemas de visión, esterilización, apuntamiento, comunicaciones ópticas fuera de la línea de visión, etc.). En cualquier caso, conviene señalar que la fabricación de diodos ultravioleta puede dar lugar a aplicaciones más específicas para defensa. Este es un ejemplo donde la dualidad militar-civil se produce siguiendo el proceso inverso (uso de componentes comerciales para aplicaciones militares).

Por último merece la pena mencionar la ley empírica enunciada por Roland Haitz deducida de las estadísticas de los últimos más de 30 años que indica que «la emisión de luz de los LED se duplica cada 18-24 meses, de forma que para el 2025, los LED dominarán el mercado de la iluminación».

5.3.2. Diodos láser

Las previsiones de mercado para los diodos láser también son muy favorables. Sin embargo, el dominio de los nitruros con respecto a otras tecnologías no está tan claro dado que muchas aplicaciones trabajan de forma natural en las regiones del infrarrojo.

En 1998, se cifró el mercado global de los diodos láser en 2.000 M$. Por aplicaciones, las comunicaciones a través de fibra óptica de altas prestaciones trabajan en las ventanas de 1,3 y 1,55 μm. En este caso, los materiales más adecuados para fabricar láseres están basados en InP y GaAs. La necesidad de láseres de potencia para otras aplicaciones, como medicina, sí puede requerir del uso de la tecnología de GaN (en visible y ultravioleta), aunque la demanda es mucho más pequeña. Otra parte de mercado la completan la

impresión láser y el almacenamiento óptico, que es un nicho de los láseres que emiten a longitudes de onda corta, como el GaN y sus materiales relacionados (por ejemplo, para reproductores de DVD usando láseres de azul o violeta). La razón es que la densidad de almacenamiento aumenta a medida que disminuye la longitud de onda. En cuanto a la impresión y xerigrafía, los láseres de nitruros también se benefician de proporcionar una mayor capacidad de reducción del tamaño de punto (por ejemplo, de 35 μm a 17 μm para conseguir 1200 dpi) sin necesidad de mejorar la óptica del sistema por la menor longitud de onda de emisión. Aunque este mercado presenta un gran tamaño, sólo una pequeña fracción se corresponde a los láseres, existiendo otras tecnologías alternativas.

La cifra de negocio, aunque menor que en el caso de los LED, también es considerable. En 2007, el mercado de los láseres basados en GaN había alcanzado los 400 M$ y las predicciones indicaban que el resultado para 2009 sería cercano a los 900 M$, es decir, sólo cinco años después. Los factores que han contribuido a frenar la expansión de esta tecnología han sido las prestaciones y fiabilidad de los láseres, que mejora continuamente.

Consideraciones análogas al caso de los LED aplican a los láseres en lo que se refiere al mercado militar.

5.3.3. Fotodetectores

Este tipo de dispositivos no comporta un mercado global tan grande como en los casos anteriores. Potencialmente, podría rondar cerca de 100 M$, siendo el valor real mucho más pequeño. Sin embargo, su interés militar es quizá relativamente más elevado. A diferencia del caso de los LED o láseres emitiendo en azul, donde la tecnología de GaN posee prácticamente la exclusividad del mercado, los fotodetectores tienen que lidiar con una competencia más fuerte. Las principales características que hacen de los fotodetectores basados en GaN superiores a los de otras tecnologías son su selectividad espectral, bajo ruido y capacidad de sintonización espectral. En tanto el coste o el tamaño no sean un problema, se tenderá a recurrir a tecnologías más maduras, por lo que el mercado se mantendrá a niveles bajos.

El desarrollo de un dispositivo fiable con mayor sensibilidad (por ejemplo, un diodo de avalancha) podría hacer que los fotodetectores basados en GaN compitieran por una mayor porción del mercado. También es posible que si se desarrollan otros fotodetectores con funcionalidades

añadidas (sensibles a la polarización, de pozos cuánticos operando con transiciones intrabanda en distintos márgenes espectrales de infrarrojo cercano, medio y lejano, etc.) mejoren las perspectivas de mercado.

5.3.4. Electrónica de RF

La electrónica de alta frecuencia ofrece un mercado potencial muy sustancial para los transistores fabricados usando nitruros. El mercado de la tecnología de semiconductores para aplicaciones en radiofrecuencia tenía ya un tamaño cercano a los 4.500 M$ en 1999 con previsiones de crecimiento cercanas al 30% en algunos casos. El destino de los sistemas de radiofrecuencia es principalmente para comunicaciones, ya sean móviles, terrestres o por satélite. Gran parte del mercado de consumo está dominado por las tecnologías de silicio y GaAs hasta 2 GHz. Sin embargo, las comunicaciones terrestres o por satélite (1,6, 2,5, 5,2, 23 y 28 GHz) a más altas frecuencias o potencias, así como las correspondientes a bandas puramente militares (banda X entre 8 y 12 GHz), son idóneas para la utilización de la tecnología de GaN. Los avances en las prestaciones de los dispositivos y en la calidad del material también hacen presagiar que la tecnología de GaN será útil a frecuencias mucho más altas, por ejemplo, para sistemas de radar.

En aplicaciones de alta frecuencia y alta potencia se utilizan en la actualidad diversos materiales semiconductores. Teniendo en cuenta las características y tendencias de cada una de estas tecnologías, se puede realizar la siguiente clasificación orientativa en función de la aplicación específica:

– Para bajas potencias (<10 W):

  - Rango hasta 1 GHz: Si.
  - Rango desde 1 GHz hasta 10 GHz: SiGe.
  - Rango desde 10 GHz hasta 100 GHz: GaAs.
  - Rango desde 100 GHz: InP.
  - ¿Grafeno? Se ha demostrado la fabricación de transistores de muy alta frecuencia usando este material. Su potencial es elevado pero no existen datos suficientes para asegurar cuál será su mercado.

– Para altas potencias (>10 W):

  - Rango hasta 5 GHz: SiC.
  - Rango hasta 100 GHz: GaN.
  - ¿Grafeno?

Las estimaciones económicas realizadas han variado como consecuencia del retraso encontrado en el desarrollo de los transistores basados en nitruros. A medidos de la década del 2000 se hicieron previsiones optimistas dando como valor de mercado unos 300 millones de dólares. Este resultado se corrigió posteriormente a 100 M$. En 2008, la cifra de negocio alcanzó valores cercanos a 20 M$. Si se compara este tamaño con el potencial, todavía queda mucho camino y oportunidades de negocio por recorrer.

Sectorialmente, el mercado militar ha crecido en importancia como demuestran las inversiones realizadas en I+D en Europa y Estados Unidos, así como las tendencias observadas en el ámbito industrial. Otras aplicaciones relevantes son las estaciones base de telefonía móvil, las estaciones base WiMAX, y los sistemas de radiodifusión y comunicaciones por satélite (véase la Figura 5.27).

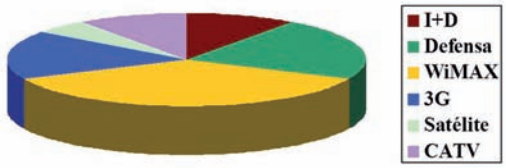


Figura 5.27. Distribución del porcentaje de negocio de la tecnología de GaN para electrónica de radiofrecuencia en función de las aplicaciones. La previsión de mercado global es de 100 M$.

	Obleas	Dispositivos, MMIC, HPA	Sistemas
EEUU	• Nitronex • RFMD • Oxford Instruments / TDI • Cree • Kyma • Kopin • TQE	• Nitronex • Raytheon • Northrop Grumman • RFMD • TriQuint • Cree • Freescale	• Lockheed Martin • L3Com • Lucent • Motorola • Flarion Technologies • Celerica • Arrraycom
Asia	• Samsung • Sumitomo • Powdec • Tocera • NTT • Hitachi Cable • ITRI • Toyoda Gosei	• Eudyna / Fujitsu • OKI • NEC • Furukawa • RFHIC • Mitsubishi	• NTT • Mitsubishi • Samsung

Europa	• QinetiQ • Picogiga • Azzurro • Saint-Gobain / Lumilog • IMEC • Alcatel / Thales III-V Lab • CRHEA • IAF	• QinetiQ • MicroGaN • UMS • Thales III-V Lab • RFMD / Filtronic • NXP • FBH • Selex	• BAE Systems • MBDA • EADS • Ericsson • SAAB Microwave • Alcatel-Lucent • Thales • Nokia-Siemens

Tabla 5.2. Algunos actores relacionados con el desarrollo de la tecnología de GaN ordenados en función de la localización de su sede corporativa (u organizativa) y del papel que cumplen dentro de la cadena de suministro.

5.3.5. Electrónica operando a alta temperatura

El mercado potencial de las aplicaciones a alta temperatura es muy significativo (del orden de 10-100.000 M$). Aunque este aspecto no ha sido todavía explotado de forma adecuada, los vehículos y sistemas aeroespaciales son algunos ejemplos en los que tendría sentido emplear esta tecnología.

5.3.6. Datos específicos del SiC

Con respecto al SiC, sólo cabe citar que está llamado a sustituir a los componentes tradicionales en el mercado de conmutación de muy alta potencia (sistemas correctores del factor de potencia). Este mercado de por sí es muy lucrativo, ya que supone una cifra potencial de negocio que en 2006 alcanzó los 1.300 M$. Sin embargo, a pesar de que las perspectivas son muy alentadoras, el reemplazo de los componentes antiguos resulta muy costoso, lo que se traduce por el momento en un mercado real mucho más reducido (alguna decena de M$). En cualquier caso, las previsiones que se estiman actualmente indican que el tamaño del mercado global para este tipo de componentes podría rondar los 800 M$ para el 2015. Otro posible nicho del SiC es la fabricación de sustratos usados para otros semiconductores. El tamaño de mercado en este caso es de unos 100-1000M$.

En vista de los datos presentados, las perspectivas tanto para el GaN como para el SiC son buenas a corto y medio plazo. En la actualidad, se trabaja con nitruros en unos 400 centros de I+D y univesidades y en más de 200 empresas.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

6. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN NITRURO DE GALIO Y CARBURO DE SILICIO

6. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN NITRURO DE GALIO Y CARBURO DE SILICIO

En este capítulo se han descrito algunos de los proyectos más relevantes, tanto a nivel nacional como a nivel internacional, basados en las tecnologías de GaN y SiC.

El proyecto KORRIGAN se ha tratado en un apartado independiente, dado que ha constituido hasta la fecha la iniciativa más importante llevada a cabo en Europa en la tecnología de GaN en el ámbito de defensa. KORRIGAN ha permitido un avance sin precedentes para conseguir una futura soberanía tecnológica en el suministro a las industrias de defensa europeas de circuitos MMIC y dispositivos discretos de GaN.

6.1. Proyecto KORRIGAN

El proyecto de la Agencia de Defensa Europea (EDA) KORRIGAN, acrónimo de *Key Organization for Research in Integrated Circuits in GaN Technology*, comenzó en 2005 con el objetivo último de acelerar el desarrollo de la tecnología de GaN en Europa y asegurar la independencia de suministro a las industrias de defensa europeas de circuitos MMIC y dispositivos discretos de GaN para futuras aplicaciones militares en el campo de la electrónica de potencia y de las altas frecuencias.

El proyecto, que finalizó en 2009, contó con un presupuesto de más de 40 M€, cofinanciados por los Ministerios de Defensa de Alemania, España, Francia, Holanda, Italia, Reino Unido y Suecia y por las empresas participantes pertenecientes a estos países. El consorcio KORRIGAN lo constituyeron 27 empresas y laboratorios de los 7 países anteriormente mencionados. Hasta la fecha, KORRIGAN es la mayor organización jamás establecida en Europa para la investigación en el campo de la

microelectrónica. La empresa francesa Thales Airbone Systems lideró el proyecto en el que se abordó el desarrollo tecnológico del GaN desde sus fundamentos cubriendo un amplio espectro de áreas tecnológicas tales como el procesado del semiconductor, crecimiento de sustratos de SiC, procesado de dispositivos, diseño y modelado de circuitos, empaquetado y ensamblado de circuitos y fiabilidad.

6.1.1. Trabajos realizados

Los pasos más importantes del desarrollo y sus hitos se detallaron en los más de 85 documentos generados a lo largo del tiempo que duró el proyecto. Este fue organizado en 6 subproyectos (SP) cada uno de los cuales estaba dedicado a un área de investigación. Los resultados más relevantes obtenidos para cada uno de los subproyectos se detallan a continuación:

– SP1 dedicado a los aspectos del sistema con las especificaciones de los demostradores, el impacto sobre los sistemas y modelos de coste.
  - Se realizó un modelo de costes de las tecnologías HEMT y MMIC de GaN y se las comparó con otras alternativas (GaAs y Si). Los resultados del modelo mostraron que el GaN sería ventajoso en un corto espacio de tiempo. En lo que respecta a costes se identificaron como puntos clave el tamaño de los sustratos de SiC, la eficiencia de procesado y la fiabilidad de los dispositivos.
  - Se realizó un estudio muy detallado del impacto de la tecnología de GaN en los futuros sistemas de defensa. El resultado del estudio fue de gran interés, destacando el papel fundamental que jugará el GaN en el desarrollo de los futuros sistemas RF multifunción.

– **SP2 dedicado a los materiales, al suministro de sustratos de SiC y al suministro de estructuras epitaxiales predominantemente sobre sustratos de SiC, pero también usando silicio y zafiro**.
  - Es destacable el gran esfuerzo que la empresa Norstel hizo en este subproyecto en el suministro de sustratos de SiC. En el marco del mismo, optimizó su tecnología de crecimiento de sustratos de SiC de 2" de diámetro y puso en marcha su tecnología de 3". En total, a lo largo de todo el proyecto se suministraron al consorcio más de 270 obleas de SiC de 2", decenas de obleas de SiC de 3" y de otros materiales tales como zafiro y silicio.

- En lo que respecta a crecimientos epitaxiales, hay que destacar que se definió un modo común de trabajar con el objeto de poder comparar datos. Se definió una estructura epitaxial común, una especificación común y una monitorización de procesos común (PCM). En el proyecto participaron 5 laboratorios «crecedores» de epitaxias: QinetiQ, Picogiga, Universidad de Lecce, Universidad de Linkoping y III-V Labs. Se utilizaron diferentes técnicas de crecimiento epitaxial: MOCVD y MBE.
- Se creó un grupo de laboratorios (CIDA-ITM, ISOM-UPM, QinetiQ, III-V Labs, etc.) que caracterizaban de forma independiente y en paralelo las muestras crecidas (sustratos y epitaxias). Este modo de trabajar permitió obtener y comparar una gran cantidad de datos con el objeto de conocer el impacto de la calidad del material en el resultado final.

– **SP3 dedicado al procesado de dispositivos, incluyendo actividades de modelización. En este apartado se realizaron dos series de fabricación en diversas *foundries*.**

- 4 *foundries* trabajaron en tecnología microstrip y coplanar (III-V Labs, QinetiQ, Selex SI y Universidad de Chalmers).
- Se hiceron 2 series completas con dispositivos discretos y con MMIC.
- Se optimizaron procesos y se estudiaron nuevas alternativas.
- Todas las *foundries* llegaron a procesar dispositivos con las prestaciones mínimas exigidas en la propuesta inicial e incluso se llegaron a obtener dispositivos con prestaciones muy superiores.

– **SP4 dedicado a la evaluación de la tecnología poniendo especial énfasis en los aspectos más importantes de fiabilidad.**

- La fiabilidad ha sido uno de los aspectos más importantes tratados a lo largo del proyecto debido a la inmadurez de la tecnología al comienzo del proyecto en el 2005. Se puso mucho énfasis en entender algunos fenómenos que limitaban las prestaciones de los dispositivos: efecto *Kink*, pasivación, colapso de corriente, etc.
- En el proyecto se creó un grupo especialmente dedicado al estudio de la fiabilidad de los dispositivos fabricados. «*Reliabilty task force*». La Universidad de Padova, el CIDA-ITM, ISOM-UPM, III-V Labs, QinetiQ, Selex SI, UMS, etc, trabajaron en el estudio de diversos aspectos relacionados con las causas de las limitaciones/fallos que presentaron algunos dispositivos.

– **SP5 dedicado a la gestión térmica y empaquetado de los dispositivos**.

- Las actividades incluyeron todos los aspectos relacionados con la gestión térmica de los dispositivos, como el diseño de dispositivos disipadores de calor, las tecnologías avanzadas de empaquetado y los simulaciones térmicas.
- Se definió una base de datos común para su utilización por todos los socios del proyecto, se simuló en diferentes grupos una celda común trabajando en modo pulsado y continuo. Se pusieron en común todos los resultados y se compararon las diferentes herramientas de simulación existentes. Como resultado de dicho ejercicio se obtuvo un acuerdo muy bueno entre las diferentes herramientas y procedimientos de simulación.
- Se definió una «guía estratégica para la gestión de calor» en la que se daban recomendaciones e información sobre las propiedades térmicas de los materiales y los dispositivos. Entre otras cosas, en la guía se describe el efecto de los huecos en los materiales de soldado, el impacto de diferentes materiales en la disipación del calor, el efecto del grosor del chip en la temperatura del canal, comparaciones de la resistencia térmica entre sustratos diferentes, el efecto térmico en ensamblados tipo *flip chip*, el comportamiento térmico de HEMT en MMIC (Indra), etc.

– **SP6 está dedicada al diseño de circuitos (29 en total).**

En este subproyecto se han desarrollado 9 demostradores diferentes, lo que no tiene precedentes en ningún proyecto europeo conocido y da una idea de las dimensiones del mismo. Los demostradores desarrollados presentan un amplio rango de funcionalidades. Se han diseñado y procesado un ámplio número de dispositivos y circuitos: conmutadores, LNA, HPA en banda X y S, y MMIC de banda ancha que trabajan hasta 18 GHz. En total 29 circuitos diferentes sin incluir algunas variaciones adicionales a los mismos.

Por sus prestaciones, se pueden destacar los siguientes circuitos procesados en el proyecto:

- Amplificador de alta potencia en banda S con potencias de salida por encima de los 12 W y PAE del 50 % (diseño de SAAB y hecho con dispositivos de Selex SI y III-V Labs con densidades de potencia por encima de los 6 W/mm).

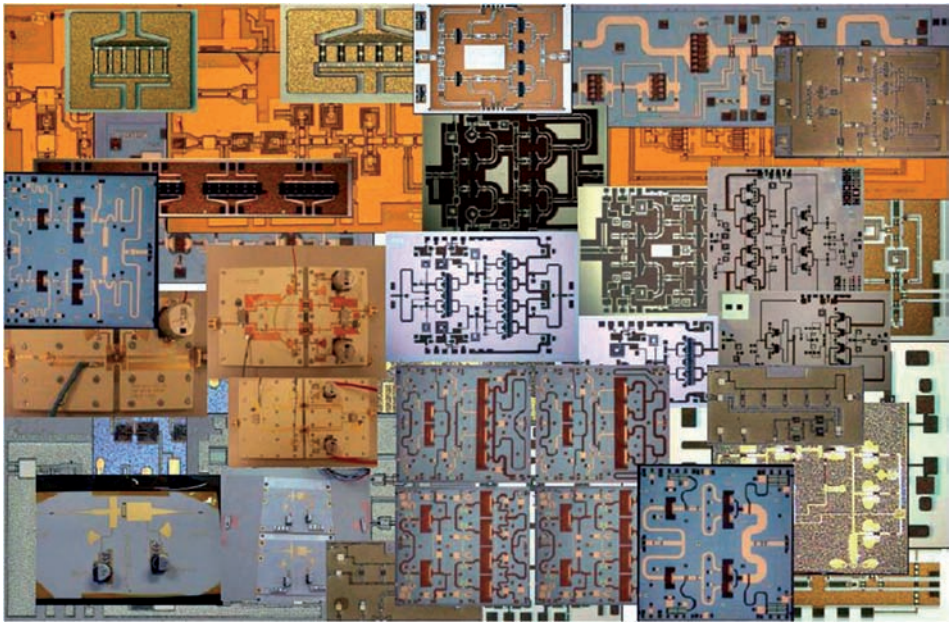


Figura 6.1. Mosaico realizado con todos los circuitos MMIC procesados en el proyecto KORRIGAN. (Fuente: Ministerio de Defensa).

- MMIC de banda ancha (2-18 GHz) que gestiona potencias por encima de los 38 dB diseñado por Elettronica y con dispositivos de QinetiQ, III-V Labs y Selex SI.
- MMIC en banda X (8,5-10 GHz) con potencias por encima de los 40 W y PAE del 30 % diseñado por UMS, III-V Labs y Selex SI y realizado en III-V Labs y Selex SI en tecnología microstrip.
- MMIC de alta potencia y banda ancha (2-6 GHz) con potencia por encima de los 15 W en operación CW diseñado por Indra y hecho con tecnología microstrip de Selex SI.
- Se empaquetaron varios HPA así como dos módulos completos T/R de banda ancha hechos con componentes procesados en KORRIGAN.

6.1.2. Participación nacional

La participación nacional en KORRIGAN contó con la industria de defensa a través de INDRA Sistemas, con la Universidad a través del Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnologías (ISOM) de la Universidad Politécnica de Madrid y con los laboratorios de defensa a través de la participación del Centro de Investigación y Desarrollo de la Arma-

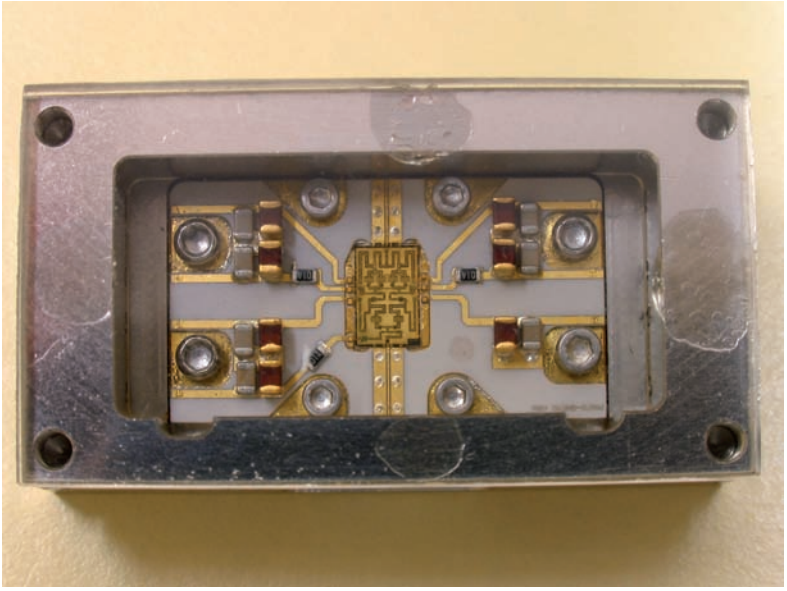


Figura 6.2. MMIC de banda ancha de GaN diseñado por INDRA dentro del proyecto KORRIGAN. (Fuente: Ministerio de Defensa).

da (CIDA-ITM) perteneciente a la Subdirección General de Tecnología y Centros (SDG TECEN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). Estas tres instituciones tenían encomendadas múltiples actividades dentro del proyecto, liderando algunos paquetes de trabajo relevantes tales como la simulación térmica de los circuitos y dispositivos, y teniendo una participación muy importante en otros tales como la caracterización de epitaxias, los estudios de mecanismos de fallo y fiabilidad de los dispositivos. Cabe destacar que además de la contribución de INDRA, ISOM y CIDA-ITM, otras instituciones y grupos de investigación nacionales han participado en el proyecto KORRIGAN de una forma indirecta en calidad de Asistencias Técnicas (Universidad de Salamanca, Universidad de Cantabria, INMM-CSIC etc.).

6.1.3. Conclusiones

A modo de resumen cabe decir que KORRIGAN ha sido la iniciativa más importante lanzada en Europa en el ámbito de la microelectrónica. Se citan algunos de sus datos:

– Coordinado por Ministerios de Defensa de 7 países (ES, FR, DE, IT, NE, SE, UK)

– Participación de un consorcio de 27 empresas e instituciones (consorcio), además de otros organismos subcontratados.
– Presupuesto en torno a 45 M€ y una duración de 54 meses.
– Con la realización de 10 Sesiones Plenarias y más de 60 reuniones parciales y 200 teleconferencias.
– Han trabajado más de 120 científicos, dando lugar a 30 tesis doctorales y 60 artículos internacionales.
– Se han generado 86 documentos y más de 5.000 páginas.
– Se han desarrollado para la industria y centros de investigación 314 obleas de GaN/SiC, 45 de GaN/zafiro y 10 de GaN/Si.
– Se han creado *epi-houses*, 4 *foundries* y un «*Task Force*» especial para mejora de la fiabilidad.
– Se han obtenido como resultados 2 series, 29 circuitos y 9 módulos completos.

KORRIGAN es un proyecto del que se puede decir sin temor a equivocarse que ha existido un antes y un después. Se alcanzaron la práctica totalidad de los objetivos que se propusieron al comienzo del proyecto, y algunos demostradores incluso se obtuvieron resultados sensiblemente superiores a los propuestos inicialmente. Los beneficios aportados por el proyecto se pueden resumir en los siguientes puntos:

– Se ha creado una red europea de laboratorios y empresas que trabajarán en GaN y SiC.
– Se ha asegurado una cadena se suministro europea y soberana de dispositivos basados en GaN.
– Se ha generado una gran cantidad de material y formas comunes de hacer que servirán para continuar trabajando en los próximos años.
– Se ha avanzado en la gestión térmica de dispositivos de potencia.
– Se ha creado una acción coordinada a nivel europeo para el estudio de la fiabilidad en estos circuitos.

La participación española en el proyecto KORRIGAN ha sido, además de destacada, beneficiosa. Desde el punto de vista de la industria, la empresa INDRA se ha involucrado con la tecnología y con los dispositivos derivados de la misma. Los circuitos MMIC de banda ancha diseñados por dicha empresa han tenido excelentes resultados finales en lo que a prestaciones respecta, lo que le va a servir para abordar desarrollos posteriores más cercanos a su aplicación en sistemas. KORRIGAN también ha servido para que varios laboratorios (ISOM e ITM) y varias universidades tengan grupos de investigación dedicados al desarrollo de la tec-

nología integrados dentro de la red europea que se ha creado alrededor del proyecto.

Como iniciativas que continúan con el avance del desarrollo de la tecnología de GaN en Europa destacan los Programas MANGA (*MANufacturable GaN*) y MAGNUS (KORRIGAN 2), véase capítulo 6.3.

6.2. España

6.2.1. Proyecto RUE (Dispositivos Semiconductores Avanzados de Gap Ancho para el Uso Racional de la Energía)

La electrónica de potencia tiene un papel relevante en el ciclo de generación, almacenamiento y distribución de la energía eléctrica, siendo un factor clave en el ahorro energético. Tradicionalmente, la mayor parte de los dispositivos de potencia se basan en Si, material que presenta unas limitaciones importantes en funcionamiento a altas temperaturas y altas frecuencias.

Los materiales GaN y SiC presentan unas prestaciones muy atractivas para convertidores de potencia, siendo capaces de ofrecer nuevas aplicaciones que no serían posibles con los convertidores basados en silicio.

El proyecto RUE (*Rational Use of Energy*), enmarcado en el Programa CONSOLIDER-INGENIO 2010, está enfocado hacia estos semiconductores WBG, siendo su principal objetivo el desarrollo de nuevos dispositivos que permitan una mejora importante en las prestaciones de los convertidores existentes, haciendo posible de esta manera un uso más racional de la energía eléctrica.

El proyecto RUE tiene una duración estimada de 5 años. En el proyecto participan las siguientes entidades: IMB-CNM (CSIC), ISOM (UPM), Universidad de Oviedo, Universidad de Valencia, CEI (UPM), Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Zaragoza, Universitat Rovira I Virgili (Universidad pública de Tarragona) y Unidad de Energía de la Fundación ROBOTIKER-TECNALIA.

El proyecto se divide en tres grandes áreas de trabajo:

– Una primera área dedicada a los nuevos procesos y materiales para los semiconductores WBG, así como al diseño y fabricación de conmutadores de SiC y dispositivos de GaN.

– Una segunda área dedicada a las interfaces tecnológicas para el uso de estos dispositivos en los sistemas. Se contemplarán las diferentes estrategias de caracterización enfocadas a la integración de los sistemas, incluyendo empaquetamiento, gestión térmica, caracterización electro-térmica, estática y dinámica, fiabilidad y mecanismos de fallo, modelado y nuevos controladores de interfaz.
– Una tercera área dedicada a la realización de pruebas de concepto, referidas a nuevas aplicaciones aún no exploradas y a las mejoras energéticas en los actuales sistemas de potencia, en las que se pongan de manifiesto las prestaciones en cuanto a la operación en alta temperatura, alta tensión y alta velocidad de conmutación que presentan estos semiconductores.

Algunas de las posibles aplicaciones contempladas para estos semiconductores son: turbinas eólicas, células solares, coches eléctricos/híbridos, comunicaciones y calor por inducción.

6.3. Europa

6.3.1. Proyecto BOLD (Blind to the Optical Light Detectors)

Los fotodetectores en el rango ultravioleta presentan limitaciones importantes derivadas de la tecnología de silicio en la que están basados. Los semiconductores WBG (nitruros, diamante) son una alternativa que permite mejorar potencialmente las prestaciones de estos dispositivos, además de reducir su peso y volumen.

La iniciativa BOLD tiene por objetivo el desarrollo de fotodetectores UV ciegos a la luz solar. En el proyecto hay tres áreas de desarrollo diferenciadas que incluyen distintos subproyectos:

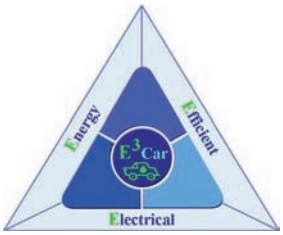
– Fotodetectores UV basados en diamante: El diamante es un semiconductor WBG que hace a los sensores «insensibles» a la luz solar, presentando una buena respuesta en el rango de frecuencias del UV. El uso de detectores «ciegos» a la luz solar permitirá reducir en los sistemas el número de filtros de bloqueo de la radiación en el rango visible. El diamante presenta mejores características en comparación con el silicio, como son la alta movilidad de electrones a temperatura ambiente, el alto valor del campo eléctrico de ruptura, la baja densidad de portadores intrínseca, etc.

– Detectores de imagen basados en AlGaN (detectores UV/EUV). semiconductores compuestos de nitruros del tipo $Al_xGa_{1-x}N$, (*gaps* entre 3,4 y 6,2 eV), son candidatos prometedores como materiales base para realizar detectores de UV «ciegos» a la luz solar. La ESA considera de interés la aplicación de estos detectores en el EUV para sus próximas misiones solares.
– Fotodetectores basados en nitruro de aluminio (AlN) y nitruro de boro cúbico (c-BN).

En BOLD participan los siguientes entidades, en su mayoría institutos de investigación: PMOD/WRC (Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center, Suiza), CSL (Centre Spatial de Liège-Bélgica), IMO (Institute for Materials Research, Bélgica), IEMN (Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, Francia), NIMS (National Institute for Materials Science, Japón), IMEC (Bélgica), CRHEA (Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications, Francia), ESA (European Space Agency), PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Alemania), BIRA (Belgian Institute for Space Aeronomy, Bélgica) y MPS (Max Planck Institute for Solar System Research, Alemania).

6.3.2. Proyecto E3CAR (Energy Efficient Electrical Car)

En actualidad, está tomando cada vez más relevancia el futuro uso de los semiconductores de banda ancha (SiC y GaN) como parte de los componentes involucrados en los vehículos híbridos (HEV) y eléctricos (EV). Así, estos semiconductores se empiezan a posicionar como firmes sustitutos del silicio (Si) en aplicaciones de alta potencia y alta temperatura para dichos vehículos.



El proyecto E3CAR (Energy Efficient Electrical Car) es un proyecto Europeo bajo el paraguas del *Joint Undertaking* (JU) del ENIAC. La mitad de la financiación del proyecto procede de los socios científicos e industriales participantes y el resto lo aportan la UE, ENIAC y otros organismos financiadores de los países involucrados en el proyecto.

E3CAR tiene como objetivo el desarrollo de tecnologías nano-electrónicas orientadas a vehículos eléctricos e híbridos. E3CAR aumentará la eficiencia energética de los coches eléctricos gracias al empleo de com-

ponentes semiconductores avanzados. El consorcio E3CAR está liderado por la empresa alemana Infineon Technologies AG y se compone de 33 socios industriales y científicos de 12 países europeos. Por parte de España, en el proyecto participan la fundación CIDITEC y CNM-CSIC.

Las áreas de investigación propuestas en el proyecto, relacionadas con los semiconductores WBG son las siguientes:

- Tecnologías de alta potencia para vehículos eléctricos e híbridos basados en tecnologías heterogéneas (Si, SOI, SiC, GaN).
- Aumentar la capacidad actual y mejorar el rendimiento y fiabilidad de los conmutadores de SiC.
- Crecimiento de HEMT de GaN utilizando el método de MOCVD sobre sustrato de silicio en alta tensión (>750 V) para aplicaciones de alta temperatura.

El proyecto comenzó en febrero de 2009, y tiene una duración prevista de 36 meses.

6.3.3. Proyecto GREAT² (GaN Reliability Enhancement and Technology Transfer Initiative)

La tecnología de GaN se considera estratégica para el sector espacial, debido a las prestaciones superiores que estos semiconductores presentan en temperatura, voltaje y resistencia frente a la radiación en comparación con la tecnología basada en silicio o GaAs.

Para que la industria espacial europea pueda mantenerse competitiva, es necesario garantizar su acceso a la tecnología de GaN. Por esta razón la ESA ha puesto en marcha la iniciativa GREAT², cuyo principal objetivo es establecer una cadena de suministro europea independiente de transistores de potencia y MMICs de GaN para aplicaciones espaciales.

Los aspectos de fiabilidad de los HEMT de GaN serán objeto de especial atención en el proyecto, ya que dichos aspectos se consideran claves en aplicaciones espaciales.

El proyecto GREAT² comenzó en junio de 2008 y está financiado por el *Basic Technology Research Programme* (TRP) de la ESA y el *General Support Technology Programme* (GSTP) de Alemania y Bélgica. En el

proyecto participan siete socios académicos e industriales de los cuatro países europeos: TESAT Spacecom (Alemania), IMEC (Bélgica), FBH (Alemania), Fraunhofer-IAF (Alemania), UMS (Alemania), Universidad de Bristol (Inglaterra) y Universidad de Roma Tor Vergata (Italia).

El proyecto se centra en las siguientes cuestiones:

– Establecimiento de una cadena europea de suministro de transistores de potencia y MMICs de GaN para aplicaciones espaciales.
– Evaluación de la fiabilidad y mejora de la tecnología en HEMT y MMIC basados en GaN, incluyendo la evaluación de la tecnología para temas específicos de espacio (entorno de radiación, etc).
– Establecimiento de un proceso de fabricación para HEMT y MMIC de GaN, compatible con las aplicaciones espaciales. El objetivo es que este proceso de fabricación esté disponible en 2011-2012.

6.3.4. Proyecto «High Temperature Protection Diodes for Solar Cell Panels»

Proyecto actualmente en curso financiado por la ESA cuyos resultados se utilizarán en la misión espacial BepiColombo a Mercurio, que partirá en 2013 en un viaje que durará 6 años.

En el proyecto participan el CNM-IMB (CSIC), D+T Microelectrónica A.I.E. y los laboratorios Alter por parte de España, el laboratorio Amper (Francia) y Semelab (UK). Parte de los objetivos de este proyecto consisten en la fabricación de diodos de bloqueo de SiC para protección del panel solar. Estos dispositivos han de ser capaces de trabajar en un ciclo de temperatura comprendido entre los -170ºC y los +300º C y en un entorno ambiental agresivo (radiaciones cósmicas, etc.) Por lo tanto, resultan de suma importancia aspectos como la fiabilidad del dispositivo y la estabilidad de sus características eléctricas bajo las diferentes condiciones ambientales.

6.3.5. Proyecto MANGA (MANufacturable GaN)

El proyecto MANGA es una iniciativa Europea dentro del marco de cooperación de la EDA, en el que participan los ministerios de Defensa de cinco países: Francia, Alemania, Inglaterra, Suecia e Italia. El proyecto comenzó a finales de abril de 2010 y tiene una duración prevista de 42 meses.

El objetivo principal del proyecto es establecer una cadena de suministro europea para sustratos de SiC y obleas HEMT de GaN, de modo que se consiga independencia de suministro de estos materiales para la industria de defensa europea. Algunas de las actividades más destacadas que se llevarán a cabo durante el proyecto son las siguientes:

- Desarrollo de sustratos de SiC semi-aislantes de alta calidad.
- Aumento del diámetro de las obleas de SiC hasta 100 mm (4»).
- Modificación del diseño de la capa epitaxial basándose en los resultados obtenidos desde estructuras estándares definidas en el KORRIGAN así como su validación por parte de las *foundries* que participan en la fabricación de HEMT y MMIC.
- Control de los efectos del material como trampas, los cuales pueden conducir a efectos como el «*kink*».
- Desarrollo de estructuras avanzadas como, por ejemplo, utilizando InAlN como material de barrera.
- Mejorar la reproducibilidad de las epitaxias para satisfacer los requisitos de los procesos industriales.
- Procesado de 256 obleas.

Entre los socios principales participantes en el proyecto figuran:

- SiCrystal (Alemania) y Norstel (Suecia) en el desarrollo de sustratos.
- QinetiQ (Inglaterra), Fraunhofer IAF (Alemania), Alcatel Thales III-V Lab (Francia) en epitaxias, transistores de potencia (HEMT basados en GaN) y desarrollo de MMIC.
- UMS (Alemania) y SELEX (Italia) *foundries* de validación de la cadena de suministro del material.
- Universidades de Chalmers y Linköping (Suecia), Universidad de Bristol (UK), Universidades de Padova y Modena (Italia) y CNRS/XLIM (Francia) en caracterización de materiales y tecnología.

Por lo tanto, y como resultado de este proyecto, se espera conseguir la independencia tecnológica para la industria de defensa europea en estos materiales semiconductores, evitando los riesgos de restricciones a la exportación por parte de otros países y reforzando la competitividad en la fabricación de dispositivos y MMIC basados en GaN y en el suministro de sustratos SiC y obleas HEMT.

6.3.6. Proyecto MAGNUS (KORRIGAN 2)

El proyecto MAGNUS es una iniciativa bajo el marco de la EDA que aún se encuentra en proceso de definición. Tiene previsto su comienzo en 2012, con una duración estimada de tres años Como posibles países participantes se encuentran Alemania, España, Francia, Italia, Noruega, Suecia e Inglaterra.

MAGNUS surge como continuación de los esfuerzos realizados en KORRIGAN en los temas de mejora de la fiabilidad y optimización de los procesos de fabricación de los dispositivos basados en GaN.

Entre los objetivos del proyecto se incluyen el diseño, desarrollo, fabricación y prueba de demostradores de MMIC y subsistemas específicos, el refinamiento y validación de los procesos de fabricación de las *foundries* y la evaluación de la fiabilidad de los dispositivos.

6.3.7. Proyecto MANSiC

El proyecto MANSiC, financiado bajo el VI Programa Marco de la Comisión Europea, se inició a principios del 2007 y tiene prevista su finalización en diciembre de 2010. El principal objetivo del MANSIC es promover y estructurar una red multidisciplinar de carácter académico-industrial para formar a jóvenes investigadores en el campo de la tecnología del SiC cúbico (3C-SiC). Este politipo del SiC se puede crecer sobre sustratos de silicio pero con una densidad de defectos tan alta que no permite la fabricación de dispositivos con altas tensiones de bloqueo. Sin embargo, MANSiC contempla el crecimiento de capas de 3C-SiC sobre sustratos de SiC hexagonal, lo que solucionaría el problema. Además, MANSiC tiene también como parte de sus objetivos la fabricación de dispositivos MOSFET y MESFET de potencia con este nuevo material (3C-SiC sobre sustratos 6H-SiC). De este modo, el proyecto se ha estructurado en diferentes áreas de actividad que se especifican a continuación:

- Estudio del crecimiento del material: crecimiento de alta calidad de 3C-SiC sobre sustratos 6H-SiC o 4H-SiC.
- Caracterización del material: caracterización de las propiedades eléctricas y físicas del material crecido de 3C-SiC y desarrollo de nuevas técnicas de evaluación no destructivas.

– Dispositivos y demostradores: diseño y desarrollo de nuevos dispositivos basados en heteroestructuras 3C-SiC/ α -SiC y 3C-SiC en volumen.

En el proyecto participan 8 entidades de Unión Europea, entre las que se encuentra representada España por parte del IMB-CNM del CSIC.

6.4. Estados Unidos

DARPA

Desde hace varias décadas, la agencia DARPA del Departamento de Defensa de EEUU se encuentra apoyando la vanguardia de la investigación en tecnologías de microelectrónica para sistemas de defensa. En el caso del desarrollo de tecnologías de semiconductores para electrónica de radiofrecuencia (RF), la agencia DARPA representó un papel protagonista al ser la principal responsable, en las décadas de 1980 y de 1990, del desarrollo de las tecnologías MMIC de arseniuro de galio (GaAs) y de fosfuro de indio (InP), que constituyen en la actualidad una parte esencial de los modernos sistemas e infraestructuras de telecomunicaciones.

En el ámbito de semiconductores WBG, la agencia DARPA está desarrollando en la actualidad las siguientes iniciativas:

6.4.1. WBGS-RF (Wide Bandgap Semiconductor technology – Radio Frequency)

Desde el año 2001, la agencia DARPA ha canalizado parte de su esfuerzo en soportar el desarrollo de las tecnologías de semiconductores WBG para aplicaciones de radiofrecuencia bajo el paraguas de la iniciativa WBGS-RF. El objetivo de este ambicioso programa consiste en desarrollar las capacidades tecnológicas necesarias para la fabricación de transistores y MMIC basados en nitruro de galio sobre carburo de silicio que proporcionen altas prestaciones y alta fiabilidad para sistemas militares de RF (principalmente radar, guerra electrónica y comunicaciones).

El programa WBGS-RF es un programa plurianual de varias fases. Hasta el momento, se han completado las dos primeras fases del proyecto, y se encuentra en marcha la tercera fase:

- Fase I (Materiales semiconductores WBG): desarrollada entre 2002 y 2004, tenía como objetivo la mejora de la calidad de los materiales semiconductores de banda prohibida ancha con los que se fabricarán los futuros dispositivos de radiofrecuencia. Los resultados obtenidos fueron la mejora de la epitaxia de AlGaN/GaN y la mejora de la calidad del SiC, obteniendo sustratos con una baja densidad de defectos y crecimientos epitaxiales uniformes.
- Fase II (Tecnologías de dispositivos de semiconductores WBG): desarrollada entre 2005 y 2008, estaba enfocada en aumentar el tiempo de vida y la reproducibilidad de transistores GaN sobre SiC de altas prestaciones. En esta fase, todos los objetivos se cumplieron de manera satisfactoria, produciendo avances significativos en el estado del arte de los HEMT de GaN sobre SiC (por ej., se ha conseguido aumentar el ciclo de vida de los HEMT de GaN en un factor de 10^5).
- Fase III (Tecnologías MMIC de semiconductores WBG): tiene como objetivo conseguir MMICs de GaN sobre SiC de altas prestaciones y largo ciclo de vida. Uno de los resultados de esta fase será el primer demostrador de sub-array radar que se fabrique utilizando semiconductores WBG. Se espera que esta fase concluya a finales de 2010.

En el programa participan tres consorcios distintos cada uno con objetivos específicos:

- El consorcio liderado por las empresas Raytheon y Cree tiene como objetivos desarrollar transistores HEMT, MMIC, módulos T/R y un demostrador de sub-array en **banda X**.
- El consorcio liderado por la empresa Triquint también ha desarrollado elementos en banda X, pero con características específicas para cumplir el objetivo final de disponer de MMIC de **banda muy ancha** (superior a una octava de frecuencias).
- El consorcio liderado por Northrop Grumman se ha centrado en el desarrollo de transistores de más alta frecuencia (**banda Q** a ~40 GHz).

El programa continuará previsiblemente con una cuarta fase en la que se trabajará hacia la integración de los MMIC en los subsistemas y sistemas de RF de defensa y en la que se desarrollará la capacidad necesaria para la fabricación comercial de estos elementos.

6.4.2. WBGS-HPE (Wide Bandgap Semiconductor technology – High Power Electronics)

El objetivo de este programa es investigar tecnologías de semiconductores WBG (en concreto, SiC en su politipo 4H) para aplicaciones de electrónica de estado sólido de alta potencia, sistemas de distribución de potencia, convertidores de alta potencia, fuentes de alta potencia de RF para radar y guerra electrónica, sistemas de propulsión de plataformas de combate híbridas o completamente eléctricas e incluso armas electromagnéticas.

El programa se está desarrollando en varias fases:

- Fase I: tenía como principal objetivo el desarrollo de sustratos 4H-SiC con una baja densidad de defectos. Los resultados finales obtenidos demostraron la viabilidad de fabricar obleas comerciales de alta calidad de 4H-SiC, con un tamaño de 3 pulgadas. Asimismo, se demostró la posibilidad de crecer capas epitaxiales gruesas de alta calidad.
- Fase II: el objetivo de esta fase, actualmente en marcha, es fabricar dispositivos de potencia (diodos p-i-n, transistores MOSFET e IGBT) con un voltaje de bloqueo de 10-20 kV y con una densidad de corriente de 100 A/cm^2, utilizando los materiales semiconductores 4H-SiC desarrollados en la Fase I. Por otro lado, en esta fase se estudiarán las tecnologías de empaquetado y de montaje necesarias para dichos dispositivos.
- Fase III: el objetivo último de esta fase es construir una transformador de estado sólido de 2.7 MVA de potencia, capaz de reducir de 13.8 kV a 4160 Vac a 20 kHz, aplicable al desarrollo de una sub-estación de potencia de estado sólido (SSPS) que será posteriormente optimizada por la U.S. Navy para su integración en un portaaviones. Además de sus prestaciones superiores con respecto a los transformadores convencionales, el peso y volumen de las SSPS basadas en SiC serán hasta un 50% menor que los de los transformadores convencionales.

6.4.3. Proyecto NEXT (Nitride Electronic NeXt generation Technology)

Las actividades de investigación realizadas bajo el marco de la iniciativa WBGS-RF tienen como principal objetivo el desarrollo de transistores HEMT basados en GaN de alta po-

tencia y ancho de banda amplio. Sin embargo, aún no se ha explotado el enorme potencial que tiene el GaN para el desarrollo a gran escala de transistores pequeños de muy alta velocidad y alto rango de variación de voltaje que permitan superar el limitado margen dinámico de los transistores de silicio convencionales de pequeño tamaño.

El objetivo del proyecto NEXT es desarrollar tecnologías revolucionarias de transistores basados en nitruros, principalmente, transistores de GaN, que permitan disponer de dispositivos de muy alta velocidad y alto margen de voltaje (JFOM>5 THz-V), puedan ser integrados en dispositivos lógicos de 1000 o más transistores.

Se espera que las tecnologías de nitruros desarrolladas en NEXT produzcan un profundo impacto en los futuros sistemas electrónicos de defensa, ya que permitirán introducir mejoras sustanciales en las prestaciones de los circuitos electrónicos de radiofrecuencia y otros (mezcladores, conversores DAC, sintetizadores DDS, etc.).

La agencia DARPA emitió la solicitud de propuestas para el proyecto NEXT a finales de 2008. Entre las empresas participantes se encuentran HRL Laboratories, Northrop Grumman y TriQuint Semiconductor.

6.5. Japón

6.5.1. ERATO (Exploratory Research for Advanced Technology). Nakamura Inhomogenous Crystal Project

Aunque el proyecto *Nakamura Inhomogenous Crystal* finalizó en el año 2006, se considera de interés realizar un breve resumen de dicho proyecto, dada la gran relevancia que tuvieron aportaciones del Dr. Shuji Nakamura en el desarrollo de las tecnologías de LED y láseres basados en GaN

Los LED de azul basados en GaN y en otros nitruros del grupo III, en especial los que contienen los pozos cuánticos de InGaN, muestran una alta eficiencia de emisión pese a la presencia de altas densidades de dislocaciones ascendentes (*threading dislocations* o TDs). Conocer la explicación física a esta «insensibilidad de la emisión a los defectos» podría permitir la realización de dispositivos optoelectrónicos avanzados como los LED de ultravioleta o los diodos láser (*Laser Diode* o LD).

El proyecto de Nakamura «*Inhomogenous Crystal*» se inició en el 2001 con el objetivo de establecer una tecnología fundamental para la rea-

lización de dispositivos ópticos y dispositivos multifuncionales de alto brillo y alto rendimiento a través de la correcta comprensión y el control de la falta de homogeneidad en los semiconductores de nitruro (falta de homogeneidad en la composición, defectos macroscópicos (TDs y faltas de apilamiento), defectos microscópicos (defectos puntuales e impurezas), y campos internos locales procedentes de polarizaciones espontáneas y piezoeléctricas.)

El proyecto de investigación dirigido por Nakamura fue llevado a cabo por la Universidad de Tsukuba, la Universidad de Ciencias de Tokio y por la Universidad de California en Santa Bárbara.

La investigación se centró en las siguientes áreas:

– Desarrollo de un reactor de alta temperatura y alta presión para la fabricación de los materiales que se utilizan en los dispositivos. El principal objetivo era crecer en volumen capas de nitruro de galio que pudieran utilizarse como sustratos para depositar nitruro de galio por MOCVD y MBE con muy pocas o ninguna dislocación, en lugar de los sustratos de silicio, carburo de silicio o zafiro.
– Investigación en el crecimiento de capas de película fina para controlar la falta de homogeneidad.
– Evaluación de los materiales fabricados.

Con este proyecto se han conseguido importantes logros y las perspectivas son prometedoras. Además de obtener una explicación plausible a la alta eficiencia de emisión en presencia de defectos, se consiguieron importantes avances en el diseño, crecimiento epitaxial y fabricación de dispositivos de GaN crecidos a lo largo de orientaciones no polares o semipolares .

6.6. Otros proyectos

Se citan a continuación otros proyectos finalizados con anterioridad a 2008 que se consideran de interés:

Proyecto ESCAPEE (*Establish Silicon Carbide Applications for Power Electronics in Europe*).

El proyecto ESCAPEE fue la primera acción conjunta a nivel Europeo en el ámbito de electrónica de potencia basada en la tecnología de SiC.

ESCAPEE fue un proyecto que se extendió de 2002-2005, financiado con fondos europeos, en el que participaron cuatro centros académicos y cinco entidades industriales de Francia, España, Suecia e Inglaterra. El proyecto, que tenía como objetivo el obtener dispositivos más compactos y eficientes para aplicaciones que van desde el transporte ferroviario hasta la producción de energía eólica, se centró en el desarrollo de transistores MOSFET y diodos SBD basados en carburo de silicio con tensiones de ruptura de 3,5 kV.

Proyecto GANANO (*New Generation of GaN- Based Sensor Arrays for NANO- and Pico- Fluidic Systems for Fast and Reliable Biomedical Testing*).

El proyecto fue de tres años de duración, realizado bajo el VI Programa Marco durante 2004-2006, cuyo objetivo consistía en el desarrollo e integración de *arrays* de sensores electrónicos, componentes optoelectrónicos (emisores de luz y fotodetectores en el espectro visible y UV) y un dispositivo de dosificación de nano-fluidos para formar un sistema multifuncional basado en micro y nano-estructuras de GaN.

Proyecto «High-Power, High Frequency Gallium Nitride Device»

Fue un proyecto nacional japonés financiado a través de NEDO (*New Energy and Industrial Science Development Organization*) y desarrollado en el «Advanced High Frequency Device Research and Development Center». El proyecto, que transcurrió entre 2002 y 2007, tuvo como objetivo promover el desarrollo de HFET basados en AlGaN/GaN, dadas las excelentes prestaciones de funcionamiento que pueden presentar en alta frecuencia y alta tensión.

Como resultado, se consiguieron obtener, a partir de HFET con *Field Plate,* amplificadores de potencia de salida de 230 W en onda continua (CW) a 2 GHz y de 156 W en onda pulsada a 4 GHz. Otros aspectos relevantes fueron las investigaciones llevadas a cabo sobre la influencia de los defectos/imperfecciones de los sustratos de SiC con respecto a las prestaciones de los FET y sobre los aspectos de campo eléctrico y distribución térmica en los dispositivos en condiciones de operación normales.

Proyecto MURI «High Power, Broadband, Linear, Solid state Amplifier»

El proyecto MURI tuvo una duración de 4 años (1997-2001), y fue financiado por la Oficina Naval de Investigación (ONR) a través del programa MURI, y tuvo como objetivos el desarrollo de un amplificador lineal capaz

de proporcionar una potencia de salida de 100 W con eficiencia del 60% sobre varias octavas en la banda X de frecuencia, la mejora de la tecnología de transistores de AlGaN/GaN y la realización de estudios sobre defectos/imperfecciones y ruido.

Proyecto «Solar Blind Detector»

El proyecto fue financiado por la agencia DARPA (1999-2002) que tuvo como principales objetivos el desarrollo de fotodetectores de AlGaN en aplicaciones de auto-protección de vehículos, la fabricación de matrices de plano focal en UV capaces de contar fotones y el estudio los fotodetectores de avalancha de bajo ruido. El resultado más destacado del proyecto fue la consecución de matrices de plano focal de altas prestaciones de AlGaN de 128x128 píxeles.

Proyecto SUVOS *(Semiconductor UltraViolet Optical Sources)*

El proyecto fue financiado por la agencia DARPA (2002-2006) y se centró en el desarrollo de LED y diodos láser UV en la región espectral de 280-340nm. Estas fuentes de luz se basan en aleaciones de semiconductores III-V de nitruro de galio (GaN), nitruro de aluminio (AlN) y nitruro de indio (InN). Los principales aspectos objeto de investigación en el proyecto fueron la potencia de salida, la intensidad óptica, la vida útil del dispositivo y el coste del mismo.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

7. TENDENCIAS FUTURAS

7. TENDENCIAS FUTURAS

Las tecnologías de GaN y SiC han demostrado poseer un alto potencial para desarrollar aplicaciones de electrónica de altas prestaciones dentro de los nichos de alta potencia, alta frecuencia y alta temperatura. Casi todas las previsiones indican que la implantación de estas tecnologías a gran escala se irá produciendo de forma paulatina en los próximos años. La demanda en este campo incluirá tanto aplicaciones militares como civiles (véase Capítulo 5), principalmente:

- **Sistemas de radar**: el parámetro clave en estos sistemas es la eficiencia de los amplificadores para reducir los requisitos de potencia en DC y mejorar la fiabilidad como consecuencia de la menor disipación de potencia. El uso de este tipo de amplificadores conllevará importantes ventajas desde el punto de vista de reducción de tamaño, coste y peso. Los amplificadores basados en la tecnología de GaN cumplen con las expectativas anteriormente señaladas y la tendencia será incluir este tipo de componentes dentro de la parte activa de la electrónica.
- **Guerra electrónica**: el control del espectro electromagnético demanda la utilización de tecnologías cada vez más eficientes. Algunas aplicaciones en las que se prevé la utilización de dispositivos basados en semiconductores de la familia del GaN son, por ejemplo, contramedidas y sistemas de guiado de misiles. En este ámbito de aplicación, sin duda, los amplificadores de banda ancha basados en componentes GaN serán ampliamente utilizados en los sistemas de guerra electrónica.
- **Comunicaciones inalámbricas y difusión (*broadcast*) de datos**: este campo continúa en plena expansión en sus diferentes modalidades. La eficiencia de los amplificadores basados en dispositivos de GaN junto al mayor ancho de banda hacen que estos semiconductores adquieran un papel relevante en este tipo de aplicaciones. Sin duda, en el medio plazo se extenderá el uso de este tipo de dispositivos.

- **Electrónica de potencia**: el sector industrial y, en general, el de la energía también se beneficiarán de la implantación de los dispositivos primero de SiC y después de GaN. La tecnología de SiC es considerada la más adecuada para conmutación de alta potencia en la que se requiere una capacidad de operación a voltajes extremos. Los dispositivos de GaN, por otra parte, son más prometedores en un segmento de potencia inferior y, a frecuencias más altas.
- **Iluminación y fuentes de luz**: los LED y láseres basados en nitruros son ya una realidad comercial. La tendencia en este campo será la consolidación de la tecnología y la introducción de mejoras en la eficiencia de los dispositivos. Este último aspecto es especialmente crítico en los rangos del verde y ultravioleta. La utilización de materiales crecidos a lo largo de orientaciones no polares podría ser una novedad tecnológica en los dispositivos comerciales. Aunque la tendencia apunta a que estos materiales constituirán el bloque básico de los emisores de alta eficiencia fundamentalmente en el ultravioleta y el verde, existen también motivos para pensar que el cambio no se producirá a corto plazo. El abaratamiento de la tecnología permitirá aplicar los emisores de luz en otras aplicaciones.

Otros campos en los que la investigación está demostrando resultados prometedores y se prevé una actividad creciente en los próximos años son los siguientes:

- **Emisores de un solo fotón:** para realización de sistemas basados en tecnologías de la información cuántica.
- **Detectores de ultravioleta de altas prestaciones:** algunos resultados destacados incluyen la fabricación de fotodetectores de avalancha basados en materiales crecidos a lo largo de orientaciones no polares o fotocátodos de GaN de alta eficiencia. Estos fotodetectores son de aplicación inmediata en el ámbito militar y de espacio, incluyendo astronomía.
- **Sensores electromecánicos y acústicos:** se está trabajando en la modificación de las propiedades eléctricas, ópticas y mecánicas de los materiales explotando la elevada piezoelectricidad intrínseca de los nitruros del grupo III. Esto favorecerá la mejora en las prestaciones futuras de este tipo de dispositivos. Un proyecto reciente desarrollado por uno de los laboratorios de defensa en Estados Unidos hace uso de los efectos intrínsecos de polarización de los nitruros para fabricar un generador de radiación de terahercios eficiente que permita la detección de explosivos.

- **Fabricación de nanohilos para aplicaciones optoelectrónicas y sensores**
- **Biosensores** basados en semiconductores de la familia del GaN.
- Utilización de dispositivos de GaN en **aplicaciones de alta temperatura y, en general, en ambientes agresivos** como el entorno espacial.

Como tendencia futura general, se prevé la paulatina implantación de sustratos de GaN de alta calidad estructural y sustratos de SiC de mayor diámetro. Las mejoras en el coste y las prestaciones de los sustratos pueden dar lugar a nuevas aplicaciones que hasta ahora han sido consideradas inviables.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

α: coeficiente de absorción

ε_r: constante dieléctrica relativa

$\hbar\omega_{LO}$: energía del fonón óptico

μ_e: movilidad electrónica

2DEG: *2-Dimensional Electron Gas*

AESA: *Active Electronically Scanned Array*

AlAs: arseniuro de aluminio

AlGaN: nitruro de galio aluminio

AlN: nitruro de aluminio

APD: *Avalanche Photodiode*

ASW*: Antisubmarine Warfare*

BFoM: *Baliga's Figure of Merit*

BiCMOS: *Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor*

CCD: *Charge-Coupled Device*

CEI: centro de electrónica industrial

CFA: *Cross Field Amplifier*

CMOS: *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

CSIC: Centro Superior de Investigaciones Científicas

C-V: capacidad-voltaje

CW: *Continuous Wave*

DAC: *Digital-to-Analog Converter*

DARPA: *Defense Advanced Research Projects Agency*

DC: *Direct Current* (Corriente continua)

DDS: *Direct Digital Synthesizer*

DMOSFET: *Depletion Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors*

DUV-APD: *Deep Ultra Violet Avalanche Photodiode*

DVD: *Digital Versatile Disc*

$\mathbf{E_{break}}$: campo eléctrico de ruptura

ECM: *Electronic CounterMeasures*

ELOG: *Epitaxial Lateral Over-Growth*

ENIAC: *European Nanoelectronics Initiative Advisory Council*

ESA: *Electronically Scanned Array*

ESA: *European Space Agency*

ESM: *Electronic Support Measures*

ETC: *Electronic Toll Collection*

ETO: *Emitter Turn-Off*

EUV: *Extreme Ultra Violet*

EV: *Electric Vehicle*

FCR: *Fire Control Radar*

FET: *Field Effect Transistor*

FPA: *Focal Plane Array*

GaAs: arseniuro de galio

GaN: aitruro de galio

GaP: fosfuro de galio

G-f: conductancia-frecuencia

GM-APD: *Geiger Mode Avalanche PhotoDiode*

GMTI: *Ground Moving Target Indicator*

GTO: *Gate Turn-Off*

HB-LED: *High Brightness Light Emitting Diode*

HBT: *Heterojunction Bipolar Transistor*

HEMT: *High Electron Mobility Transistor*

HEV: *Hybrid Electric Vehicle*

HFET: *Heterostructure Field Effect Transistor*

HPA: *High Power Amplifier*

HV: *High Voltage*

HVPE: *Hydride Vapor Phase Epitaxy*

IBM: *Ion Beam Milling*

ICP-CVD: *Inductively Coupled Plasma-Chemical Vapour Deposition*

IGBT: *Insulated-Gate Bipolar Transistor*

IMB-CNM: Instituto de Microelectrónica de Barcelona – Centro Nacional de Microelectrónica

InGaN: nitruro de galio indio

InN: nitruro de indio

InP: fosfuro de indio

ISOM: Instituto de Sistemas Ópticos y Microtecnología

JFOM: *Johnson Figure of Merit*

JTE*: Junction Termination Extension*

LADAR: *Laser Detection and Ranging*

LD: *Laser Diode*

LDCMOS: *Laterally Diffused Complementary Metal Oxide Semiconductor*

LED: *Light Emitting Diode*

LIDAR: *Laser Identification Detection And Ranging*

LNA: *Low Noise Amplifier*

LMDS: *Local Multipoint Distribution System*

LTCC: *Low Temperature Co-fired Ceramic*

MANPADS: *MAN-Portable Air Defense System*

MBE: *Molecular Beam Epitaxy*

MCM: *Mine CounterMeasures*

MEMS: *Micro Electro Mechanical Systems*

MESFET: *Metal Semiconductor Field Effect Transistor*

MIM: *Metal-Insulator-Metal*

MIS: *Metal-Insulator-Semiconductor*

MMIC: *Monolithic Microwave Integrated Circuit*

MMW: *Millimeter Wave*

MOCVD: *Metalorganic Chemical Vapour Deposition*

MOSFET: *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors*

MOSHEMT: *Metal-Oxide-Semiconductor High Electron Mobility Transistor*

MPW: *Man Portable Weapons*

MURI: *Multidisciplinary University Research Initiative*

MWS: *Missile Warning System*

$\mathbf{N_{2DEG}}$: concentración de electrones en el gas bidimensional

NEDO: *New Energy and Industrial Science Development Organization*

NEMS: *Nano Electro Mechanical Systems*

NLOS: *Non-Line of Sight*

$\mathbf{n_r}$: Indice de refracción

ONR: *Office of Naval Research*

PAE: *Power Added Efficiency*

PCM: *Process Control Module*

PECVD: *Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition*

PESA: *Passive Electronically Scanned Array*

PHEMT: *Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor*

PIC: *Power Integrated Circuit*

PMT: *PhotoMultiplier Tube*

PTM: *PhotoMultiplier*

PVD: *Physical Vapour Deposition*

RC-IED: *Remote Controlled Improvised Explosive Device*

RF: radiofrecuencia

RIE: *Reactive Ion Etching*

RPE-LICVD: *Remote Plasma Enhanced-Laser-Induced Chemical Vapor Deposition*

RPG: *Rocket Propelled Grenade*

RTA: *Rapid Thermal Annealing*

RTE*: Resistive Termination Extension*

SAR: *Synthetic Aperture Radar*

SAW: *Surface Acoustic Wave*

SBD: *Schottky Barrier Diodes*

SBD: *Solar Blind Detector*

SCR: *Silicon Controlled Rectifiers*

SiC: carburo de silicio

SOI: *Silicon On Insulator*

SSPS: *Solid State Power Substation*

TARDEC: *Tank Automotive Research Development and Engineering Center*

$\mathbf{T_C}$: conductividad térmica

TD: *Threading Dislocation*

TEA: *Transverse Electrical Discharge*

TEC: *Thermal Expansion Coefficients*

TLM: *Transmission Line Method*

T/R: transmisión/recepción

TWT: *Travelling Wave Tube*

UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*

UE: Unión Europea

UPM: Universidad Politécnica de Madrid

UV: ultravioleta

UXV: *Unmanned Vehicle* - (denominación genérica para cualquier tipo de vehículo no tripulado: aéreo, naval, etc.)

VICS: *Vehicle Information Communication System*

$\mathbf{V}_{peak}$: velocidad de pico de los electrones

$\mathbf{V}_{sat}$: velocidad de saturación de los electrones

WBG: *Wide Band-Gap*

WBGS-RF: *Wide Band-Gap Semiconductor technology initiative – Radio Frequency*

WFoV: *Wide Field of View*

ZnO: óxido de zinc

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

ANEXO A: ENTIDADES

ANEXO A: ENTIDADES

En este anexo se ha realizado una breve ficha de algunas entidades (empresas, centros e institutos de investigación, universidades, etc) que se han considerado relevantes en el desarrollo de las tecnologías de GaN y SiC.

Las categorías tecnológicas que se han establecido, para clasificar las actividades que estas entidades realizan en el área de tecnologías de GaN y SiC son: Sustratos, Dispositivos Optoelectrónicos, Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia y Circuitos.

A.1. España

CNM-IMB (CSIC) (Centro Nacional de Microelectrónica - Instituto de Microelectrónica de Barcelona)	España
Organismo Público de Investigación Dispositivos de potencia	
El CNM pertenece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). El IMB es uno de los tres institutos que configuran el CNM, cuya actividad principal es la investigación y desarrollo en micro y nano-electrónica basada en tecnología de silicio. Las actividades de I+D están guiadas principalmente por proyectos de investigación competitivos financiados por la Unión Europea, (Programas Marco de investigación y desarrollo tecnológico) o por instituciones nacionales (Ministerio de Ciencia e Innovación, etc). En el área de dispositivos y sistemas de potencia tienen abierta una línea de investigación en semiconductores WBG (SiC, GaN, Diamante, Grafeno sobre SiC), entre sus actividades incluyen modelado, optimización, procesado, diseño e implementación de nuevos dispositivos de potencia. Además, mantienen una intensa actividad en el desarrollo de dispositivos de potencia basados en SiC con varios proyectos de I+D en curso.	

INDRA	España
Empresa Dispositivos de RF, Circuitos	
Indra es una compañía global de tecnología, e innovación que ofrece sus soluciones y servicios a los sectores de transporte y tráfico, energía e industria, Administración Pública y sanidad, servicios financieros, seguridad y defensa y telecom y media. En el sector de defensa y seguridad es proveedor de soluciones globales integradas y suministra sistemas basados en tecnología propia a los Ministerios de Defensa e Interior de diferentes países. Desde 2001 Indra ha participado en diferentes programas (PROFIT, COINCIDENTE,..) orientados al desarrollo, fabricación y evaluación de diposistivos de GaN. En el proyecto KORRIGAN ha contribuido en las actividades de simulación del área de gestión térmica y ha diseñado un MMIC de banda ancha (2-6 GHz) y alta potencia.	

ISOM-UPM (Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología – Universidad Politécnica de Madrid)	España
Instituto Universitario de Investigación Dispositivos de RF, Dispositivos Optoelectrónicos	
El ISOM es un instituto de investigación de la Universidad Politécnica de Madrid asociado a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Las tareas en las que se ha enmarcado su actividad investigadora han incluido diversos aspectos (crecimiento por técnicas epitaxiales y *sputtering*, procesado de dispositivos, simulación de materiales no metálicos y fabricación de microsistemas ópticos integrados) relacionados con el desarrollo de materiales, fundamentalmente semiconductores, y dispositivos basados en tecnología electrónica. Gran parte de la actividad de investigación desarrollada a lo largo de los últimos 15 años se ha centrado en el desarrollo de dispositivos y materiales basados en la familia de semiconductores del GaN. En los últimos tres años se ha dirigido la investigación fundamentalmente a tareas de crecimiento epitaxial y caracterización de propiedades de materiales WBG.	

ITM (Instituto Tecnológico la Marañosa) Área de Optrónica y Acústica/ Unidad de sensores, micro y nano tecnología	España
Instituto Tecnológico de Defensa Dispositivos de RF	
Las actividades fundamentales de la Unidad de Sensores, Micro y Nanotecnología pertenciente al Área de Optrónica y Acústica del ITM han estado vinculadas en los últimos años a la investigación y el desarrollo tecnológico para el procesado de detectores de infrarrojo avanzados de seleniuro de plomo no refrigerados sensibles en la zona del espectro infrarrojo correspondiente a la ventana atmosférica existente entre las 3 y las 5 micras. También se ha desarrollado procesado de matriz bidimensional o de plano focal (FPA, *Focal Plane Array*), así como fotodetectores de pozos cuánticos sensibles simultáneamente a tres longitudes de onda para aplicaciones en sistemas de defensa. Cuenta con una sala limpia clase 10.000, con zonas clase 100 para llevar a cabo el procesado de dispositivos. Ha participado en el proyecto KORRIGAN investigando y desarrollando, dentro de tecnología de semiconductores de banda prohibida ancha de GaN, los procesos de fabricación: contactos óhmicos avanzados, con la incorporación de materiales refractarios utilizando la técnica de pulverización catódica. Aislamiento de dispositivos mediante IBM. Pasivado de dispositivos mediante el depósito de capas de SiN_x por ICP-CVD, en la fabricación de los transistores HEMT de GaN. Realiza estudios de degradación de los dispositivos sometidos a test de envejecimiento acelerados y la identificación de los fallos mediante ingeniería inversa, eliminación selectiva de capas, y la observación directa de la zona de la puerta.	

A.2. Europa

ACREO AB	Suecia
Instituto de Investigación Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia	
Acreo es uno de los institutos Europeos de Investigación más avanzados en el desarrollo de componentes. Sus principales ámbitos de actuación son la microelectrónica, la óptica y las comunicaciones de banda ancha. Desde 2005 forma parte del grupo ICT Research AB que reúne a todos los institutos de investigación en el ámbito de las TIC. Acreo posee una gran experiencia en diseño de circuitos integrados, tecnologías de microelectrónica y de procesos, componentes y sistemas ópticos, tecnologías de sensores y empaquetado. En el área de microelectrónica y tecnología de procesos basada en materiales, trabaja principalmente con Si, SiC, GaAs/InP y compuestos relacionados, vidrio, cuarzo y polímeros desarrollando una amplia variedad de componentes tales como diodos laser, detectores IR, etc. Acreo ha participado activamente en el campo del SiC desde 1993 cubriendo todos los aspectos de la tecnología desde la epitaxia, hasta el diseño del dispositivo, y fabricación del mismo.	

Alcatel Thales III-V Lab	Francia

Empresa
Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia, Circuitos

La principal misión de Alcatel Thales III-V Lab es la investigación y desarrollo de componentes basados en semiconductores III-V, desde la investigación básica hasta el desarrollo, aprovechando las similitudes entre las tecnologías desarrolladas por Thales y Alcatel-Lucent para los mercados de telecomunicaciones, espacio, seguridad y defensa. Además cuenta con capacidad para producción (foundry) de componentes desde el diseño de dispositivo hasta obleas totalmente procesadas (2" a 4"), basadas en GaAs e InP para pequeños y medianos volúmenes.

Sus principales áreas de competencia son:

- Epitaxia avanzada de heteroestructuras III-V: Crecimiento epitaxial por los métodos MOVPE, MBE, HVPE sobre GaAs, InP and GaSb para dispositivos opto y micro electrónicos y sobre SiC and Si para dispositivos de microondas basados en GaN.
- Integración de dispositivos III-V/Si.
- Procesado de dispositivos: disponen de salas limpias de clase 10000 y superior.
- Diseño y caracterización.
- Empaquetado.

Sus principales líneas de I+D se centran en diodos láser y amplificadores opto-electrónicos, fotodiodos basados en InGaAs, sensores IR, HBT basados en InP y dispositivos de potencia de microondas basados en GaN.

AMMONO	Polonia

Empresa
Sustratos

La principal línea de negocio de la compañía son los materiales semiconductores. El primer paso en esta dirección fue la producción en 2004 de obleas de zafiro de 3". A partir se esa fecha, comenzó la investigación en la producción de GaN.

La principal área de especialización de Ammono dentro del área de materiales semiconductores es la obtención de GaN de alta calidad. La empresa tiene establecido su propio método de crecimiento de cristales de GaN denominado «Ammonothermal», para producción de obleas (de GaN) con objeto de ser utilizadas como sustratos para la investigación y la producción de diodos láser azul y verde, detectores y HEMTs. El método Ammonothermal fue inventado y desarrolldo por los fundadores de Ammono. El método, los materiales y una amplia gama de dispositivos están protegidos por las 20 solicitudes de patente realizadas por la empresa.

La estrategia de mercado de AMMONO es entregar sustratos de GaN estándar o a realizados a medida del cliente.

CRHEA (Centre National de la Reserche Scientifique)	Francia
Centro de Investigación Dispositivos de RF, Dispositivos Optoelectrónicos, Sustratos	
La actividad principal de los laboratorios del CRHEA es el crecimiento epitaxial. Los materiales son principalmente semiconductores WBG: GaN y aleaciones relacionadas AlGaInN, ZnO y SiC. El cuarto material crecido en el CRHEA es un semiconductor de banda prohibida «pequeña» (InGaAsN). En el ámbito de la electrónica, se estudia el transporte electrónico en el gas bidimensional en la interfaz de GaN / AlGaN y se desarrollan transistores HEMT AlGaN/GaN para aplicaciones de potencia de muy altas frecuencias. También colaboran con STMicroelectronic en el crecimiento de GaN sobre Si (100). En el ámbito de la optoelectrónica, junto con Thales Research and Technology, han desarrollado detectores UV de AlGaN de microcavidades. Otra línea fundamental de desarrollo son los puntos y pozos cuánticos de InGaN/AlGaN para transición intrabanda y fuentes de puntos cuánticos. En cuanto a SiC han desarrollado y patentado un nuevo método para obtener 3C-SiC en volumen.	

Fraunhofer IAF (Institute for Applied Solid State Physics)	Alemania
Centro de Investigación Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia, Circuitos	

Fraunhofer IAP es un instituto de investigación global que ha abarcado todo el espectro de semiconductores III-V al más alto nivel internacional. Esto incluye un exhaustivo conocimiento de las propiedades físicas de los materiales, la capacidad de diseñar dispositivos innovadores y circuitos, la posibilidad de reproducir las estructuras de capas necesarias con precisión atómica, el posterior procesamiento y construcción de módulos y sistemas, y por último, la tecnología de medición para caracterizar y optimizar los componentes.

La unidad de negocio «*GaN RF Power Electronics*» ha desarrollado transistores HEMTde alta potencia basados en GaN y MMICs, en el rango de frecuencias de varios MHz hasta 100 GHz.

Una nueva área de investigación sobre la que están trabajando es el desarrollo de transistores conmutadores (switches) de alta tensión para convertidores de potencia para aplicaciones fotovoltaicas, para los coches híbridos, o para plantas de energía eólica.

Cuentan con un reactor multi-oblea de producción MOCVD diseñado para un alto rendimiento, que posee una calidad de capa superior a los anteriores y de excelente uniformidad. El sistema está dedicado al crecimiento de AlGaN/ estructuras GaN sobre sustratos de SiC para el desarrollo de HPA y MMIC.

LASPE / EPFL (Laboratory of Advanced Semiconductors for Photonics and Electronics / École Polytechnique Fédérale de Lausanne)	Suiza
Universidad Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia, Dispositivos Optoelectrónicos	
El laboratorio LASPE está desarrollando una intensa actividad investigadora en los semiconductores de gap ancho basados en nitruros del grupo III (GaN, AlN, InN). Las principales líneas de investigación son microcavidades, puntos cuánticos y nanoestructuras, transiciones Inter-subbanda para aplicaciones en el infrarrojo cercano, optoelectrónica de corta longitud de onda y electrónica de alta potencia. Se considera interesante señalar que las tecnologías innovadoras desarrolladas por LASPE son la base sobre la que se fundamenta las actividades de la empresa NOVAGAN, empresa *spin-off* de la EFPL. NOVAGAN, que comenzó sus actividades en 2009, está orientada a la fabricación de obleas con epitaxia de nitruros del grupo III para su utilización en la fabricación de diodos láser azules y ultravioletas y dispositivos de electrónica de alta frecuencia y alta potencia.	

Norstel AB	Suecia
Empresa Sustratos	
Fabricante y suministrador de obleas de SiC tanto conductoras como semi-aislantes. También crece epitaxialmente capas 4H-SiC por CVD. El principal aspecto de la tecnología de Norstel es la técnica de crecimiento de cristales HTCVD (*High Temperature Chemical Vapor Deposition*) concepto concebido en 1995 y, posteriormente, patentado. Sus principales áreas de acción son las epitaxias y sustratos de SiC, de este modo, Norstel ofrece crecimiento epitaxial de SiC a partir de sustratos proporcionados por el cliente, y fabrica sustratos conductores de 4H-SiC de 3» y de sustratos SiC semi-aislantes de 2".	

OSRAM	Alemania
Empresa Dispositivos Optoelectrónicos	
OSRAM es una de las compañías más grandes a nivel mundial dedicadas al sector de la iluminación. Con sede en Alemania, tiene presencia en cerca de 150 países y cuenta con una tradición superior a 100 años en este mercado. La división OSRAM Opto Semiconductors dirige la producción e investigación en diferentes campos relacionados con LED, láseres de semiconductor, diodos de infrarrojo, detectores y LED orgánicos, para iluminación, visualización y sistemas de sensores. La actividad de OSRAM Opto Semiconductors en dispositivos basados en la familia de semiconductores del GaN se remonta a la década de 1990. Fue la primera empresa europea en producir láseres de azul pulsados de calidad razonable usando esta tecnología en 1999. Recientemente, ha desarrollado láseres verdes a 516 nm con una potencia de salida de 50 mW y una corriente umbral rondando los 9 kA/cm^2. Además de láseres, OSRAM Opto Semiconductors también fabrica y comercializa LED de nitruros de alta eficiencia.	

Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik	Alemania
Instituto de Investigación Dispositivos Optoelectrónicos	

El Instituto de Electrónica para Física del Estado Sólido Paul Drude (PDI), fue establecido en 1992 como centro de investigación de materiales y física de estado sólido con especial énfasis en sistemas de baja dimensionalidad que emplean semiconductores nanoestructurados. Concretamente, la actividad del PDI está dividida en tres departamentos (Epitaxia, Espectroscopía de Semiconductores y Microestructuras) que realizan trabajos sobre crecimiento y tecnología de materiales, física de semiconductores (espintrónica, optoelectrónica, nanoestructuras, etc.) y caracterización. El PDI es un centro nacional de referencia para el crecimiento y la física de nanoestructuras basadas en semiconductores III-V.

Una de las principales líneas de investigación son los nitruros del grupo III para dispositivos optoelectrónicos. Dentro de las actividades desarrolladas cabe destacar la investigación de material GaN crecido a lo largo de orientaciones no polares, especialmente plano M, el desarrollo de nanoestructuras para la realización de emisores de luz y otro tipo de dispositivos y el crecimiento de material mediante MBE usando N_2 y NH_3.

QinetiQ	Reino Unido
Empresa Dispositivos de RF	
Compañía pública en el área de seguridad y defensa que ofrece servicios y productos tecnológicos a clientes gubernamentales y no gubernamentales. QinetiQ tiene una importante reputación a nivel internacional en el crecimiento de estructuras basadas en GaN (hasta 6" de diámetro) para trasmisores de microondas. Ha participado en el KORRIGAN en la mejora de la calidad de los sustratos de SiC, proporcionando datos de caracterización a través del crecimiento de material epitaxial de GaN.	

UMS (United Monolithic Semiconductors)	Francia/Alemania
Empresa Dispositivos de RF, Circuitos	
UMS fue creada en 1996 como una «joint venture» de Thales (Francia) y EADS GmbH (Alemania) con el objeto de disponer de una base europea de tecnologías de semiconductores III-V y de suministro de componentes. UMS diseña, fabrica y distribuye componentes MMIC de RF y ondas milimétricas (hasta 100 GHz) basados en GaAs para los sectores de defensa, automoción, espacio y telecomunicaciones empleando dispositivos MESFET, HBT y p-HEMT. Tiene establecida un línea de I+D en el área de dispositivos de GaN. Dentro de este campo, han participado en el KORRIGAN, centrándose principalmente en los aspectos de fiabilidad de los dispositivos. Recientemente UMS ha fabricado su primer MMIC de tecnología GaN de 0,25 µm.	

UNIPRESS	Polonia

Instituto Universitario
Dispositivos Optoelectrónicos, Sustratos

El Instituto de Física de Alta Presión (IHPP), también conocido como «Unipress», fue fundado en 1972 por la Academia de Ciencias Polaca. Aunque, originariamente estaba enfocado en los estudios de alta presión de semiconductores, en la actualidad cubren las líneas de investigación en de cerámicas, materiales biológicos superconductores HTc y plasticidad de metales. El nexo común de todos estos estudios es el uso de alta presión, tanto como herramienta de investigación como un método tecnológico.

Unipress tiene una intensa activad en tecnología de semiconductores GaN y afines. Esta investigación ha dado lugar a la creación de una tecnología única de crecimiento de cristales de alta presión de GaN con una densidad de dislocaciones mucho más baja que los cristales crecidos bajo presión atmosférica. Esta tecnología abrió el camino a la construcción diodos láser azul/violeta mediante el uso de estos cristales como sustratos para el crecimiento epitaxial de estructuras de (AlGaIn)N con una excepcional calidad estructural y óptica. Unipress ha empleado tanto la tecnología de crecimiento MBE como la MOCVD para desarrollar láseres de nitruros.

De entre las múltiples empresas surgidas como spin-off de Unipress es relevante resaltar a TopGaN, fundada en 2001, y dedicada principalmente a fabricación de diodos láser azul/violeta.

A.3. Estados Unidos

AFRL (Air Force Research Laboratory) **ARL (Army Research Laboratory)** **NRL (Naval Research Laboratory)**	Estados Unidos
Centros de Investigación de Defensa Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia, Dispositivos Optoelectrónicos, Sustratos, Circuitos	
Los laboratorios de investigación de defensa de Estados Unidos *Naval Research Laboratory, Army Research Laboratory y Air Force Research Laboratory* representan un papel esencial en la I+D a nivel internacional. En el caso de los semiconductores de gap ancho, además de contribuir con resultados punteros en investigación básica, estos laboratorios son promotores de la incorporación de la tecnología de estos materiales a los sistemas de defensa. **AFRL/RXPS - Electronic & Optical Materials Branch** Realiza y gestiona programas de I+D en el área de materiales y procesado para aplicaciones de potencia, de microondas y ópticas. Los programas incluyen el desarrollo de crecimiento y procesado de materiales en volumen, películas finas epitaxiales y materiales estructurados artificialmente. El AFRL/RXPS proporciona apoyo en las tecnologías de crecimiento y caracterización de materiales y física de dispositivos a la Dirección de Sensores del AFRL y a otras organizaciones militares e industriales. **ARL** La dirección de *Sensor and Electronics Devices (SEDD)* está involucrada en desarrollo de semiconductores y dispositivos WBG debido a su interés en los sistemas multifunción (radar, comunicaciones,..). Realizan estudios para crecimiento de alta calidad de estructuras de dispositivos de GaN/AlGaN y caracterización de obleas de SiC y de estructuras crecidas sobre las mismas. **NRL** La investigación sobre semiconductores de gap ancho se realiza principalmente desde la *Electronics Material Branch,* perteneciente a la *Electronics Science and Technology Division*. Los estudios se llevan a cabo junto con las instalaciones para el crecimiento de material con las que cuenta el propio NRL, además de contar con la participación de entidades externas (instituciones académicas, empresas, etc.).	

CREE	Estados Unidos
Empresa Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia, Dispositivos Optoelectrónicos, Sustratos	
Cree es una empresa ampliamente conocida en el mercado de los LED para iluminación así como en el mercado de semiconductores para dispositivos de conmutación de potencia y dispositivos de RF en aplicaciones inalámbricas Cree tiene distintas familias de LED de alta intensidad realizados a partir de su tecnología en la que combinan la alta eficiencia de los materiales InGaN como parte activa de los emisores con la calidad cristalina de las epitaxias basadas en sustratos de SiC. También desarrolla dispositivos RF de aplicación en comunicaciones: MESFET de SiC, HEMT de AlGaN/GaN (de propósito general y para aplicaciones 3G), HEMT de AlGaN/GaN en las bandas de frecuencia C y S, y MMIC HEMT de AlGaN/GaN, además de proporcionar sustratos y epitaxias (4H-SiC y 6H-SiC) para fabricantes e investigadores. En cuanto a conmutadores de potencia, Cree fabrica diodos basados en SiC para control y gestión de potencia.	

Nitronex Corp.	Estados Unidos
Empresa Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia	
Empresa especializada en el desarrollo y fabricación de dispositivos de potencia de RF basados en GaN sobre Si (GaN-on-Si) basándose en su proceso patentado SIGANTIC®. Las principales competencias de Nitronex abarcan desde el crecimiento del material, procesado de las obleas, y el diseño hasta la fabricación de dispositivos. Entre sus productos cabe destacar los transistores (HEMT de AlGaN/GaN) de potencia de 2,5 GHz, 3,5 GHz y de banda ancha, con potencias de 5-100 W.	

RF Micro Devices	Estados Unidos
Empresa Dispositivos de RF, Circuitos	
Compañía líder en diseño y fabricación de componentes de RF de altas prestaciones y de tecnologías de semiconductores compuestos. La compañía cuenta con servicios de fabricación especializados en el proceso de GaN sobre SiC de 0,5 µm. RF Micro Devices es considerado uno de los mayores fabricantes mundiales de semiconductores III-V a gran escala. Tiene en marcha 2 líneas de proceso de HEMT basadas en GaN: GaN1 (calificada en junio de 2009) y GaN2 (calificada en mayo de 2010) con la que se han alcanzado mejores prestaciones en ganancia (1-2 dB) y en linealidad (6 dB) con respecto a la línea de proceso GaN1. Otra futura línea de proceso de desarrollo son los módulos MMIC.	

TriQuint Semiconductor	Estados Unidos
Empresa Dispositivos de RF, Circuitos	
TriQuint Semiconductor diseña, desarrolla y fabrica soluciones avanzadas de RF de altas prestaciones con tecnologías de GaAs, GaN, SAW (Surface Acoustic Wave) y BAW (Bulk Acoustic Wave) a nivel mundial. TriQuint Semiconductor comenzó a explorar el potencial de la tecnología de GaN en 1999. La extensión a nivel comercial se produjo en 2008 con la aparición de los primeros productos estándar y los servicios de *foundry* en MMIC de GaN. Triquint ofrecemos circuitos de GaN sobre SiC de 25 µm para su uso desde DC a 18 GHz. Triquint dispone de productos estándar tales como dispositivos FET sin empaquetar a nivel de chip de DC-18 GHz para aplicación en comunicaciones inalámbricas así como en sistemas aeroespaciales y de defensa. También tiene previsto disponer en breve de dispositivos de GaN empaquetados (encapsulados).	

University of California Santa Bárbara	Estados Unidos
Universidad Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia, Dispositivos Optoelectrónicos, Sustratos, Circuitos	

La Universidad de California en Santa Bárbara es uno de los centros de referencia mundiales en la tecnología de GaN. Tiene una larga historia en el desarrollo de GaN, además de contar con la valiosa colaboración de Shuji Nakamura, profesor del Departamento de Materiales. La investigación abarca una amplia gama de actividades en crecimiento de materiales semiconductores y dispositivos electrónicos y optoelectrónicos.

Las capacidades tecnológicas que poseen cubren todos los aspectos, desde el crecimiento de epitaxias por MOCVD y MBE o material en volumen por HVPE, hasta la fabricación de dispositivos tanto electrónicos (HEMT) como optoelectrónicos (LED y láser). Por otra parte, las instalaciones también están preparadas para caracterizar materiales y dispositivos por diversas técnicas.

Algunos campos donde ha destacado la actividad desarrollada por esta institución incluyen los LED blanco, verde, azul, UV de alta luminosidad, diodos laser (azul y verde), cristales fotónicos y transistores de alta frecuencia y alta potencia.

A.4. Japón

Hitachi Cable	Japón
Empresa Sustratos	
Hitachi Cable ha participado activamente en el uso comercial de semiconductores compuestos usando como material principal el GaAs. Comercializan sustratos de GaAs de alta calidad y obleas con epitaxias para dispositivos ópticos tales como LED y diodos láser, así como para dispositivos electrónicos como los amplificadores de potencia utilizados en los teléfonos móviles redes LAN. También están trabajando en el desarrollo de sustrato de GaN como un material para sistemas de discos ópticos de próxima generación. Para obtener una mayor fiabilidad y rendimiento de la tecnología láser para los discos ópticos de próxima generación, es esencial disponer de sustratos de GaN monocristalino con baja densidad de defectos típicamente liberados de sustratos. Hitachi Cable ha desarrollado el nuevo método «Void Assistance Separation (VAS)» en el que se inserta una estructura de película fina de nitruro de titanio con patrón mallado entre el sustrato de zafiro y la capa de crecimiento de GaN durante el crecimiento del cristal, que permite la fácil separación de un gran cristal de GaN sin dañar el sustrato de GaN. Hitachi dispone de sustratos de GaN de alta calidad a partir de este nuevo método.	

Mitsubitshi Electric	Japón

Empresa
Dispositivos de RF, Circuitos

Mitsubishi Electric Corporation es un reconocido líder mundial en la fabricación, comercialización y venta de dispositivos eléctricos y electrónicos utilizados en el procesamiento de la información y de las comunicaciones, desarrollo espacial y comunicaciones por satélite, electrónica de consumo, etc.. La compañía desarrolla y fabrica dispositivos de potencia de alta estabilidad y eficiencia, una nueva generación de dispositivos ópticos que ayudaran a una rápida evolución de las redes ópticas de telecomunicaciones y dispositivos de alta frecuencia para múltiples aplicaciones.

En febrero de 2010 la compañía anunció el desarrollo de cuatro modelos HEMT de 4 GHz para aplicaciones satélites, con una potencia de salida de producción desde los 2 hasta los 100 W. Basándose en estos productos, Mitsubishi Electric también ha desarrollado amplificadores HEMT de GaN con potencias de salida de 40 W, 20 W y 2 W adecuados para etapas de amplificación iniciales e intermedias.

Nichia	Japón
Empresa Dispositivos Optoelectrónicos, Sustratos	
Compañía japonesa de ingeniería química especializada en la fabricación y distribución de compuestos químicos, particularmente materiales luminiscentes inorgánicos (fósforos). En 1993 desarrollaron y comercializaron el *Super High Brightness Blue* LED. Han trabajado en el desarrollo de LED basados en nitruros cuyas emisiones van del rango del UV al amarillo, contribuyendo a la diversificación de los campos de aplicación de los LED. Además, Nichia está dedicando gran parte de los recursos de I+D para la fabricación de diodos láser púrpura azulado, lo que sin duda jugará un papel clave para la expansión de la industria de las tecnologías de la información.	

Ritsumeikan University RITS Ritsumeikan University School of Science and Enginering	Japón
Universidad Dispositivos de RF, Dispositivos de potencia, Dispositivos Optoelectrónicos	
Fundada en 1938, la Facultad de Ciencias e Ingeniería goza de una de las más largas tradiciones de las universidades privadas en Japón. El Departamento de Fotónica perteneciente a la sección de Sistemas Electrónicos, cuenta con los laboratorios Nanishi (liderado por el profesor Yasushi Nanishi) cuyo objetivo fundamental es el estudio y desarrollo de dispositivos fotónicos y de alta frecuencia basados en nitruros del grupo III-V	

Sumitomo Electric Device Innovations SUMITOMO ELECTRIC DEVICE INNOVATIONS, INC.	Japón
Empresa Dispositivos de RF, Sustratos	
Sumitomo Electric Device Innovations, Inc. (SEDI), es una subsidiaria de Sumitomo Electric, que fue lanzada como una nueva empresa en agosto de 2009 mediante la integración de Eudyna Inc. y Sumitomo Electric Industries, Ltd. SEDI diseña y fabrica componentes ópticos e inalámbricos y enlaces de datos ópticos. SEDI es una de las empresas líderes mundiales en el mercado de componentes de comunicación óptica mientras que también proporciona varias soluciones en otras áreas, tales como las comunicaciones móviles, aplicaciones de consumo y el mercado del automóvil. Dentro del área de de comunicaciones inalámbricas desarrollan transistores HEMT basados en GaN tanto de propósito general como para estaciones base en el rango de frecuencias de 0,9 a 3,5 GHz.	

Toyoda Gosey	Japón
Empresa Dispositivos Optoelectrónicos	
Toyoda Gosei se ha convertido en un referente a través de continua innovación realizada en componentes del sector de automoción y en optoelectrónica para aplicaciones de *displays* en telefonía celular y en un sin número de otras aplicaciones. La empresa ha promovido la investigación y el desarrollo de los LED y diodos láser de GaN, utilizando su propia tecnología. Ha desarrollado con éxito LED de color azul, verde, púrpura y el LED blanco llamado «TG White Hi», consiguiendo uno de los mayores niveles mundiales de intensidad luminosa y en la actualidad, producción en masa.	

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

General

[1] F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt, «Spontaneous Polarization and Piezoelectric Constants of III-V Nitrides», Phys. Rev. B 56, 10024 (1997).

[2] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, «Band parameters for nitrogen-containing semiconductors», J. Appl. Phys. 94, 3675 (2003).

[3] J.-Y. Duboz, «GaN as seen by the industry», C. R. Acad. Sci. Paris, t. 1, Série IV, pp. 71–80, (2000).

[4] C. Rivera, «Estudio de estructuras de baja dimensionalidad y avanzadas para la detección de radiación visible y ultravioleta basadas en nitruros del grupo III», Tesis Doctoral, ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid Madrid, (2007).

[5] J. A. Majewski, P. Vogl, «Polarization and Band Offsets of Stacking Faults in AlN and GaN», MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 3, 21 (1998).

[6] A. Ionascut-Nedelcescu, C. Carlone, A. Houdayer, and H.J. von Bardeleben, J.-L. Cantin, S. Raymond, «Radiation Hardness of Gallium Nitride», IEEE Trans. Nucl. Sci. 49, 2733 (2002).

[7] O. Ambacher, J. Majewski, C. Miskys, A. Link, M. Hermann, M. Eickhoff, M. Stutzmann, F. Bernardini, V. Fiorentini, V. Tilak, B. Schaff, L. F. Eastman, Pyroelectric properties of Al(In)GaN\–GaN hetero and quantum well structures», J. Phys.: Condens. Matter 14, 3399 (2002).

Electrónica de RF y de Potencia

[8] U.K. Mishra, L. Shen, T.E. Kazior, Y-F. Wu, «GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers», Proc. IEEE 96, 287 (2008).

[9] H. Okumura, «Present Status and Future Prospect of Widegap Semiconductor High-Power Devices», Jpn. J. Appl. Phys. 45, 7565 (2006).

[10] Z. D. Schwartz, G. E. Ponchak, «1 GHz, 200 ºC, SiC MESFET Clapp Oscillator», IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett. 15, 730 (2005).

[11] «Wide-bandgap RF devices: a $100m market by 2010», Market focus: Wide-bandgap RF, Semiconductor Today Compounds & Advanced Silicon 3, 56 (2008).

[12] «Wide-bandgap RF devices: a $100m market by 2010», Technology focus: Nitride transistors, Semiconductor Today Compounds & Advanced Silicon 5, 90 (2010).

[13] G. Gauthier, F. Reptin, «KORRIGAN: Development of GaN HEMT Technology in Europe», CS MANTECH Conference, April 24-27, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 49-51 (2006).

[14] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, Y.-F. Wu «GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers», Proc. IEEE 96, 287 (2008).

[15] U. K. Mishra, P. Parikh, Y.-F. Wu, «AlGaN/GaN HEMTsVAn overview of device operations and applications», Proc. IEEE 90, 1022 (2002).

[16] M. Asif Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai, D. T. Olson, «Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN», Appl. Phys. Lett. 62, 1786 (1993).

[17] U. K. Mishra, Y.-F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, S. P. Denbaars, «GaN Microwave Electronics», IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 46, 756 (1998).

[18] Y. Sui, X. Wang, J. A. Cooper, «High-Voltage Self-Aligned p-Channel DMOS-IGBTs in 4H-SiC», IEEE Electron Device Lett. 28, 728, (2007).

[19] A. Agarwal, S.-H. Ryu, «Status of SiC Power Devices and Manufacturing Issues», CS MANTECH Technical Digest, April. Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 215 – 218, (2006).

[20] A. Saha, J. A. Cooper, «A 1-kV 4H-SiC Power DMOSFET Optimized for Low ON-Resistance», IEEE Trans. Electron Devices 54, 2786 (2007).

[21] J. Wang, G. Wang, J. Li, A. Q. Huang, J. Melcher, S. Atcitty, «Silicon Carbide Emitter Turn-Off Thyristor», International Journal of Power Management Electronics, vol. 2008, pp. 1-5 (2008).

[22] T. Hiyoshi, T. Hori, J. Suda, T. Kimoto, «Simulation and Experimental Study on the Junction Termination Structure for High-Voltage 4H-SiC PiN Diodes», IEEE Trans. Electron Devices 55, 1841 (2008).

[23] R. Singh, «Reliability and performance limitations in SiC power devices», Microelectronics Reliability 46, 713 (2006).

[24] Z. D. Schwartz, G. E. Ponchak, «1 GHz, 200 ºC, SiC MESFET Clapp Oscillator», IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett. 15, 730 (2005).

[25] «SiC driving interest for power semiconductors», Conference Report, Semiconductor Today Compounds & Advanced Silicon 1, 36 (2006).

[26] «SiC power devices: if only we had a switch…», Market focus: SiC, Semiconductor Today Compounds & Advanced Silicon 2, 40 (2007).

Optoelectrónica

[27] S. Nakamura and G. Fasol, «The Blue Laser Diode», Berlin, Springer, 1997.

[28] H. P. Maruska, W.C. Rhines, D.A. Stevenson, «Preparation of Mg-doped GaN diodes exhibiting violet electroluminescence», Mat. Res. Bull. 7, 777 (1972).

[29] S. Nakamura, «Current Status of GaN-Based Solid-State Lighting», MRS Bulletin 34, 101 (2009).

[30] P. Waltereit, O. Brandt, A. Trampert, H. T. Grahn, J. Menniger, M. Ramsteiner, M. Reiche, K. H. Ploog, «Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes», Nature 406, 865 (2000).

[31] F.A. Ponce, D.P. Bour, «Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices», Nature 386, 351 (1997).

[32] C. Wetzel, M. Zhu, J. Senawiratne, T. Detchprohm, P.D. Persans, L. Liu, E.A. Preble, D. Hanser, «Light-emitting diode development on polar and non-polar GaN substrates», J. Crystal Growth 310, 3987 (2008).

[33] C. Rivera, J. Pereiro, A. Navarro, E. Muñoz, O. Brandt, H.T. Grahn, «Advances in Group-III-Nitride Photodetectors», Open Electr. Electron. Eng. J. 4, 1 (2010).

[34] C. Rivera, J.L. Pau, E. Muñoz, P. Misra, O. Brandt, H.T. Grahn, K.H. Ploog, «Polarization-sensitive ultraviolet photodetectors based on M-plane GaN grown on LiAlO2 substrates», Appl. Phys. Lett. 88, 213507 (2006).

[35] S. Han, W. Jin, D. Zhang, T. Tang, C. Li, X. Liu, Z. Liu, B. Lei, C. Zhou, «Photoconduction studies on GaN nanowire transistors under UV and polarized UV illumination», Chem. Phys. Lett. 389, 176 (2004).

[36] M. Razeghi, A. Rogalski, «Semiconductor ultraviolet detectors», J. Appl. Phys. 79, 7433 (1996).

[37] D. Walker, V. Kumar, K. Mi, P. Sandvik, P. Kung, X.H. Zhang, M. Razeghi, «Solar-blind AlGaN photodiodes with very low cutoff wavelength», Appl. Phys. Lett. 76, 403 (2000).

[38] J.L. Pau, J. Anduaga, C. Rivera, A. Navarro, I. Álava, M. Redondo, E. Muñoz, «Optical sensors based on III-nitride photodetectors for flame sensing and combustion monitoring», Appl. Opt. 45, 7498 (2006).

[39] G.A. Shaw, A.M. Siegel, J. Model, «Ultraviolet comm link for distributed sensor systems», IEEE LEOS Newsletter 19, 26 (2005).

[40] J. Schalwig, G. Müller, O. Ambacher, M. Stutzmann, «Group III-nitride-based sensors for combustion monitoring», Mater. Sci. Eng. B 93, 207 (2002).

[41] A. Rogalski, M. Razeghi, «Semiconductor ultraviolet photodetectors», Opto-Electron. Rev. 4, 13 (1996).

[42] J. Wu, W. Walukiewicz, K.M. Yu, W. Shan, J.M. Ager III, E.E. Haller, H. Lu, W.J. Schaff, W.K. Metzger, S. Kurtz, «Superior radiation resistance of In1-xGaxN alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system», J. Appl. Phys. 94, 6477 (2003).

[43] O. Jani, I. Ferguson, C. Honsberg, S. Kurtz, «Design and characterization of GaN/InGaN solar cells», Appl. Phys. Lett. 91, 132117 (2007).

[44] S. Ghosh, C. Rivera, J.L. Pau, E. Muñoz, O. Brandt, H.T. Grahn, «Very narrow-band ultraviolet photodetection based on strained M-plane GaN films», Appl. Phys. Lett. 90, 091110 (2007).

[45] N. Biyikli, O. Aytur, I. Kimukin, T. Tut, E. Ozbay, «Solar-blind AlGaN-based Schottky photodiodes with low noise and high detectivity», Appl. Phys. Lett. 81, 3272 (2002).

Otras aplicaciones y dispositivos

[46] J. Barber, D. E. Hooks, D. J. Funk, R. D. Averitt, A. J. Taylor, D. Babikov, «Temperature-Dependent Far-Infrared Spectra of Single Crystals of High Explosives Using Terahertz Time-Domain Spectroscopy», J. Phys. Chem. A109, 3501 (2005).

[47] G. D. Chern, E. D. Readinger, H. Shen, M. Wraback, C. S. Gallinat, G. Koblmüller, J. S. Speck, «Excitation Wavelength Dependence of Terahertz Emission from InN and InAs», Appl. Phys. Lett. 89, 141115 (2006).

[48] M. Wraback, G.A. Garrett, G.D. Metcalfe, H. Shen, M. C. Schmidt, A. Hirai, J.S. Speck, S.P. DenBaars, S. Nakamura, «Nonpolar Nitride Semiconductor Optoelectronic Devices: A Disruptive Technology For Next Generation Army Applications», Technical Reports, U.S. Army Research Laboratory, Sensors and Electron Devices Directorate, ADA505854 (2008).

[49] M. Mehregany, C. A. Zorman, N. Rajan, C. Hung Wu, «Silicon Carbide MEMS for Harsh Environments», Proc. IEEE 86, 1594 (1998).

[50] S. J. Pearton, C. R. Abernathy, G. T. Thaler, R. M. Frazier, D. P. Norton, F. Ren, Y. D. Park, J. M. Zavada, I. A. Buyanova, W. M. Chen, A. F. Hebard, «Wide bandgap GaN-based semiconductors for spintronics», J. Phys.: Condens. Matter 16, R209 (2004).

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

CONGRESOS Y CONFERENCIAS

CONGRESOS Y CONFERENCIAS

A continuación se citan algunos de los congresos y conferencias más relevantes sobre WBG y algunos más específicos de GaN y SiC, que se celebran periódicamente.

Específicos de GaN y SiC:

- International Conference on Nitride Semicoductors (ICNS)
- International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN)
- International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes (ISBLLED)
- Materials Research Society (MRS)
- European Materials Research Society (EMRS)
- International Symposium on Growth of III-Nitrides
- International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM)
- International Symposium on Compound Semiconductors

Otros más generales que han incluido algunas conferencias sobre nitruros:

- Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE)
- European Molecular Beam Epitaxy Workshop (Euro-MBE)
- Europan Workshop on Heterostructure Technology (HETECH)
- Device Research Conference (DRC)
- International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS)
- International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)