

# En profundidad

## El proyecto MUSTANG. Un paso más hacia la independencia europea del nitruro de galio

**Autores:** D. Alfonso Ferreras Estrada, D. Álvaro Prieto Poyatos, D. Eduardo Oreja Gígorro, D. Javier Montero Paz, INDRA.

Palabras clave: nitruro de galio, *Monolithic Microwave Integrated Circuits*, epitaxia, carburo de silicio, *foundry*, encapsulado.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.1.1.

### Introducción

El nitruro de galio (GaN) es considerado una de las tecnologías clave para la defensa europea, ya que permite sustituir los antiguos tubos de onda progresiva por componentes más compactos, más potentes y que alcanzan mayores frecuencias. Con el objetivo de profundizar en el desarrollo de esta tecnología, el proyecto MUSTANG (GaN *Technology with UMS GH15 Process*) busca dar un paso más en el empleo del nitruro de galio de fabricación europea. El fin último del desarrollo de este tipo de tecnología es obtener una variedad de componentes basados en nitruro de galio, denominados MMICs (*Monolithic Microwave Integrated Circuits*), para que puedan ser integrados en los sistemas europeos de diferentes sectores como la defensa o las comunicaciones.

Históricamente, la mayoría de los MMIC (también denominados monolíticos), han sido diseñados y fabricados utilizando tecnología no europea, lo que conlleva la necesidad de importarlos. Es por eso que, a lo largo de los últimos años, en Europa se han llevado a cabo diversos proyectos relacionados con el desarrollo del nitruro de galio para así poder cubrir la necesidad de tener una cadena de suministro europea independiente. Algunos de estos proyectos son, entre otros, KORRIGAN, MANGA, MAGNUS

o EUGANIC. Durante el desarrollo de todos estos proyectos, se ha logrado, entre otros objetivos, obtener una gran variedad de componentes de fabricación europea que pueden integrarse en los distintos sistemas de radiofrecuencia.

Dentro de la tecnología del nitruro de galio existen distintos procesos de fabricación en función de las especificaciones que se quieran cumplir, como son la banda de frecuencia o la potencia requerida. Cada proceso de fabricación tiene su desarrollo correspondiente y viene definido por los fabricantes (o *foundries* en terminología anglosajona).

### Proceso de fabricación

Independientemente del proceso de fabricación seleccionado los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se comienza con la definición del sustrato de fabricación. Si bien existen diferentes opciones, como puedan ser utilizar silicio, zafiro o diamante, a día de hoy lo más utilizado por la industria es el carburo de silicio (SiC). La razón por la que este material es el más empleado se debe a que tiene una mayor conductividad térmica que el silicio y un coste asequible en comparación con el diamante. Esto permite que el calor generado por los componentes se disipe de una forma más eficiente, lo cual es especialmente útil en monolíticos que deben disipar una gran cantidad de calor como pueden ser los amplificadores de alta potencia.
2. Durante una segunda fase, se deben unir el carburo de silicio y el nitruro de galio mediante un proceso de cristalización. A esto se le conoce como proceso de epitaxia. Generalmente, esto es llevado a cabo por empresas no europeas. No obstante, se plantean iniciativas que buscan desarrollar un proceso de epitaxia realizado dentro de la Unión Europea.
3. Una vez seleccionado el sustrato y definido el proceso de epitaxia, el siguiente paso es definir los propios elementos que formaran

parte de los circuitos (transistores, diodos, condensadores, inductancias, vías al plano de masa, etc.). Este proceso, normalmente, lo desarrollan los propios fabricantes. Los componentes se analizan, se modelan y, posteriormente, se integran dentro de una librería de simulación, denominada dentro de la industria como *process design kit* (PDK). Los transistores son los elementos más importantes utilizados en el diseño de monolíticos, por lo que, un buen modelado de estos es la base para obtener un proceso adecuadamente caracterizado.

4. Los diseños de los monolíticos se realizan empleando estas librerías de simulación y un *software* de simulación electromagnética. Una vez que se ha diseñado el circuito, la *foundry*, fabrica los monolíticos sobre unas superficies denominadas obleas, compuestas del material definido como sustrato.
5. En el último paso del proceso de fabricación, la *foundry*, comprueba que los componentes funcionan adecuadamente y se realiza una primera caracterización de los MMIC.

Cuanto más diseños se realicen utilizando un proceso de fabricación determinado, mejores modelados de los componentes y mayor fiabilidad se obtiene. Por ello, si bien es cierto que el modelado de componentes es tarea de los fabricantes, este tipo de proyectos facilita la mejora en la precisión del modelado y caracterización de los componentes. Además, se pueden llegar a añadir nuevos componentes a las librerías de simulación.

Para distinguir los distintos procesos de fabricación existentes, las *foundries* tienden a denominarlos en función de la longitud del terminal de puerta de los transistores. En el caso de la *foundry* europea UMS, existen distintos procesos de fabricación como pueden ser GH25, GH15 o GH10, que denotan longitudes de puerta de 250  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  respectivamente.

En las últimas décadas, se han llevado a cabo varias iniciativas

relacionadas con el nitruro de galio. Durante estos proyectos, uno de los objetivos centrales ha sido el desarrollo de los procesos de fabricación de la *foundry* UMS para así conseguir modelos más fiables y maduros. De esta forma, el proceso de diseño sobre *software* tiene un resultado mucho más preciso respecto a cuándo se fabrica. Por ejemplo, los proyectos MANGA y MAGNUS se desarrollaron bajo el proceso GH25 de UMS. El proyecto MANGA se centraba en el desarrollo del proceso de epitaxia y selección de sustrato mientras que el proyecto MAGNUS se enfocaba en la parte de diseño de monolíticos y la mejora del modelado de los componentes. El proceso GH25 está focalizado en el desarrollo de componentes desde banda S hasta banda Ku. Por otro lado, los proyectos EUGANIC y MUSTANG se han basado en el proceso GH15 de UMS. Siguiendo la misma pauta que en el caso anterior,

el proyecto EUGANIC se centró en el desarrollo del proceso de epitaxia y selección de sustrato mientras que MUSTANG ha tenido como objetivo el desarrollo de monolíticos. Para este proceso, las frecuencias óptimas van desde banda C hasta banda Ka.

### El proyecto MUSTANG

MUSTANG (GaN Technology with UMS GH15 process) es un proyecto de tipo cat. B de la Agencia Europea de Defensa (EDA) que nace dentro del grupo de trabajo de Tecnologías, Componentes y Materiales (*TCM CapTech*) y cuenta con el apoyo de los ministerios de defensa de los países participantes. El principal objetivo de MUSTANG es el desarrollo de circuitos integrados monolíticos bajo el proceso GH15 en la *foundry* UMS.

El consorcio MUSTANG está compuesto por 5 empresas europeas

de distintos países con el objetivo de asegurar el suministro de monolíticos, para aplicación en sistemas de defensa, a través de una cadena de suministro plenamente europea. El grupo está liderado por la compañía sueca Saab y cuenta con la participación de Hensoldt (Alemania), Indra (España), Thales SIX (Francia) y Thales TDMS (Francia).

Como se ha comentado anteriormente, el fabricante que se ha seleccionado, en coherencia con el proyecto que le precede (EUGANIC), es UMS y se ha realizado bajo la tecnología GH15, permitiendo así realizar diseños de monolíticos hasta banda Ka.

El proyecto ha tenido una duración de 36 meses, un presupuesto cercano a 12 millones de euros en total y ha constado de dos iteraciones de fabricación. En cada una de las iteraciones se ha seguido el mismo

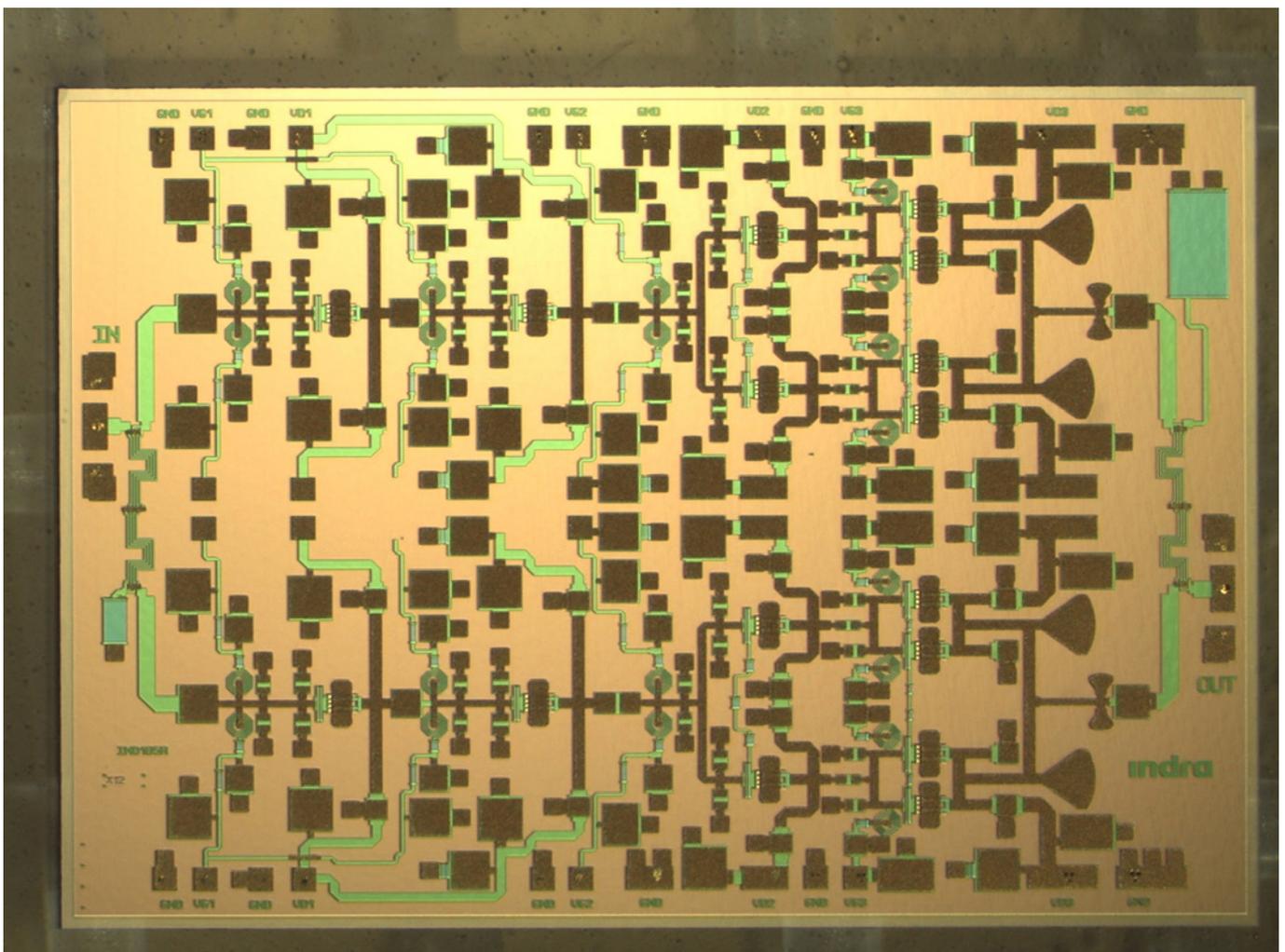


Fig. 1. Amplificador de alta potencia en banda Ka para sistemas ECM. (Fuente: INDRA).

## En profundidad

procedimiento: se comienza con una etapa de diseño, después, la *foundry* (UMS) fabrica las obleas donde se encuentran los MMIC y, finalmente, se analizan los resultados de las medidas realizadas. El hecho de realizar dos iteraciones ha permitido a los miembros del consorcio la posibilidad de mejorar los diseños tras la primera iteración, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la mejora del proceso de fabricación y un mejor modelado de los elementos del PDK que conforman la librería de simulación. Además, durante la segunda iteración también se han podido abordar nuevos diseños en distintas bandas de frecuencia y con diversas funcionalidades.

A nivel industrial, el objetivo fundamental del proyecto ha sido desarrollar una gran variedad de monolíticos con funcionalidades diferentes y de fabricación europea que se podrán integrar tanto en sistemas de radiofrecuencia actuales con MMIC no europeos, como de cara a futuros sistemas que se diseñen. Como objetivo añadido para esta acción, está aumentar la aceptación y el uso del proceso GH15 consiguiendo así una madurez superior del proceso y una mayor fiabilidad de los diseños. Para cumplir con estos objetivos se han desarrollado distintos tipos de componentes hasta la banda Ka como amplificadores de alta potencia (HPA), amplificadores de media potencia (MPA), amplificadores de bajo ruido (LNA), *chips* transmisor/receptor (TR) y conmutadores (*switches* en terminología anglosajona) en todas las bandas de frecuencia del

proceso GH15. Durante las dos iteraciones, entre todos los miembros del consorcio, se han realizado un total de 58 MMICs distintos.

### Indra dentro del proyecto MUSTANG

Por parte de España, Indra, en cooperación con la Universidad Politécnica de Madrid, ha desarrollado un total de 12 monolíticos (6 en cada

iteración) en distintas bandas de frecuencia y con diversas funcionalidades con el fin de cubrir ciertos objetivos estratégicos a nivel de los sistemas de defensa.

Además de MUSTANG, Indra también ha trabajado anteriormente en otros proyectos relacionados con la tecnología del nitruro de galio, como KORRIGAN o ApiGaN.

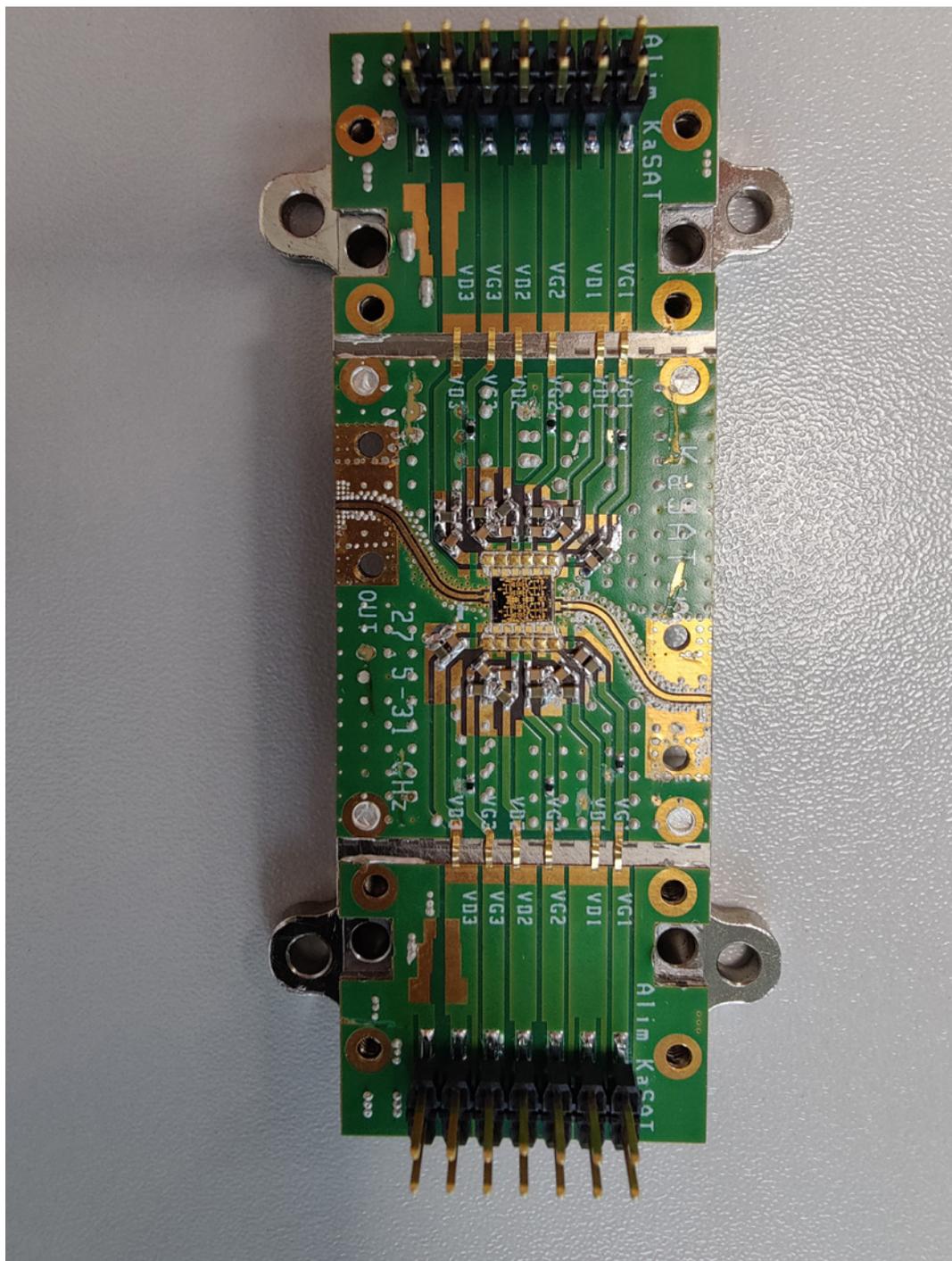


Fig. 2. Estructura de montaje realizada por INDRA para las medidas *on jig* de los monolíticos. (Fuente: INDRA)

Concretamente, ApiGaN, fue un proyecto realizado por Indra, con el apoyo del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, para diseñar amplificadores en banda EJ utilizando el proceso GH25 de UMS.

El objetivo fundamental de Indra dentro del proyecto MUSTANG ha sido el desarrollo de componentes a medida o personalizados (*ad-hoc*) para sus sistemas obteniendo soluciones más flexibles que se ajusten a las prestaciones y funcionalidades definidos. Un ejemplo de sistema en los que estos diseños *ad-hoc* pueden resultar especialmente útiles son los *phased arrays* (conjuntos de antenas de apuntamiento electrónico). Utilizando componentes de diseño propio, la industria española tiene la posibilidad de eliminar, en cierto grado, la dependencia de componentes no europeos, así como conseguir una mayor flexibilidad frente a las soluciones de otros fabricantes.

Para Indra, un objetivo subyacente de este proyecto ha consistido en poder desarrollar un proceso de montaje más eficiente y con mayor fiabilidad con el que poder integrar este tipo de componentes a gran escala. Al tratarse de elementos que pueden encontrarse múltiples veces dentro de los sistemas, esto ha permitido acelerar el proceso de integración de los monolíticos consiguiendo un coste menor de fabricación. Además, se ha podido capacitar a los equipos de trabajo implicados en la integración de componentes de pequeña escala dentro de sistemas más grandes y complejos. Esto permite tener una integración vertical completa que va desde el componente hasta el sistema completo.

### Primera iteración

Durante la primera fase del proyecto, Indra ha realizado un total de 6

diseños centrados en dos bandas de frecuencia principalmente: la banda X y la banda EJ.

Respecto a la banda EJ se han diseñado 3 circuitos. El primero es un amplificador de alta potencia con una potencia de 10 W a la salida y una eficiencia superior al 20 %. Su potencial uso es en módulos de contramedidas electrónicas (ECM) dentro de los sistemas de guerra electrónica (EW). El segundo componente diseñado en esta banda es un amplificador de media potencia capaz de entregar 5 W de potencia a la salida y una ganancia superior a 20 dB. Puede ser utilizado para sistemas de guerra electrónica que requieran una potencia menor o como driver de amplificadores de alta potencia. Por último, se ha realizado un *switch* con bajas pérdidas de inserción (menores a 1.5 dB) y un aislamiento superior a 35 dB. La principal aplicación es en los módu-

los TR de los *phased array* que se implementan dentro de los sistemas guerra electrónica.

Dentro de la banda X, se han diseñado un total de 3 monolíticos de las mismas características que los de banda EJ: un amplificador de alta potencia, un driver o MPA y un *switch*. En este caso, una característica especial dentro de los diseños realizados, es que tanto el MPA como el *switch* se encuentran integrados dentro de un mismo chip. No obstante, el funcionamiento de cada circuito es independiente y no interfieren entre ellos. Al estar ambos dentro del mismo chip, este monolítico es idóneo para aplicaciones en módulos TR de banda X aunque también se pueden utilizar por separado. El amplificador de media potencia es capaz de obtener una potencia superior a los 8 W con una eficiencia cercana al 45 %. Por su parte, el *switch* presenta unas pérdidas de inserción menores a 1 dB

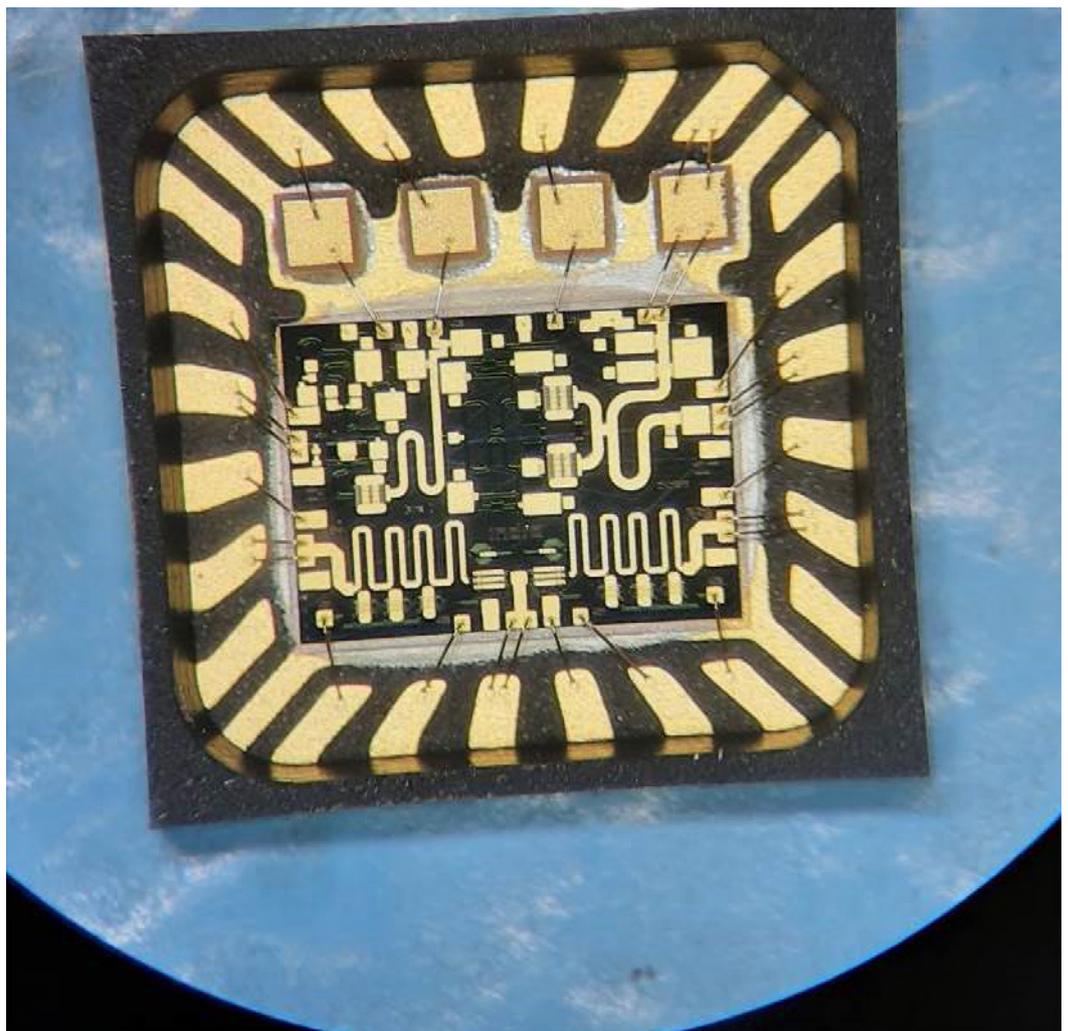


Fig. 3. Detalle del conexionado del MMIC a la base del encapsulado QFN. (Fuente: INDRA).

## En profundidad

con aislamientos superiores a 40 dB. Este amplificador de alta potencia es de aplicación en radares de banda X. La potencia capaz de entregar a la salida es superior a 20 W y su eficiencia media es superior al 42 %.

### Segunda iteración

Durante la segunda fase del proyecto, Indra ha realizado un total de cinco nuevos diseños, enfocándose a estructuras más complejas y llegando a bandas de frecuencia más altas (hasta 40 GHz). Además, se ha rediseñado el amplificador de alta potencia de banda EJ de la primera iteración con el objetivo de conseguir mejores prestaciones como una mayor eficiencia y un consumo de corriente menor. Por tanto, sumando este rediseño a los monolíticos realizados durante la segunda iteración, el total de circuitos diseñados han sido seis.

Los nuevos diseños abordados se pueden dividir en amplificadores y módulos transmisor/receptor. Estos módulos, se han diseñado en tres

bandas de operación distintas: banda X, banda EJ y banda Ka. Los módulos TR tienen un potencial uso dentro de sistemas *phased arrays* para guerra electrónica. Las bandas de frecuencia han sido estratégicamente seleccionadas ya que con ellas se puede cubrir gran parte del espectro utilizado en los sistemas de guerra electrónica actuales, así como los futuros sistemas que se utilizarán. Por otro lado, se han realizado dos nuevos amplificadores dentro de la banda Ka. Uno de ellos está enfocado para aplicaciones en comunicaciones satelitales y el otro para aplicación en sistemas ECM (figura 1). Otro de los posibles usos de este último diseño podría ser la combinación de varios MMIC para utilizarlo como alternativa a los amplificadores de tubo de onda progresiva (TWTA). Esto permite tener un sistema amplificador mucho más compacto y eficiente que el empleado en los TWTA.

### Medidas & Resultados

Para caracterizar los monolíticos desarrollados durante el proyecto

se han realizado dos procesos de medida distintos: medidas *on wafer* y medidas *on jig*.

En las medidas *on wafer* se caracteriza el MMIC directamente sobre la oblea en la que se fabrica. Estas medidas son realizadas por la *foundry* y dan los resultados más similares a los simulados en la fase de diseño. Esto se debe a que el modelado de los elementos de la librería de simulación se realiza de acuerdo a medidas de este tipo, directamente sobre los chips, que el fabricante realiza de dichos elementos. Este tipo de medidas contienen una menor cantidad de efectos parásitos por lo que son más precisos.

Por otro lado, las medidas *on jig* permiten caracterizar el MMIC dentro de una estructura o montaje mucho más parecido al que se tendría dentro de un sistema completo. En estas estructuras, el monolítico se encuentra pegado o soldado sobre el montaje y este, a su vez, se interconecta con el resto de componentes a través de una

MMIC	Descripción	Banda de frecuencia	Parámetros principales
WHPA V1	HPA	EJ	Potencia de salida > 10 W   Eficiencia > 20 %
WMPA	MPA	EJ	Potencia de salida > 5 W   Ganancia > 20 dB
WSW	SWITCH	EJ	Pérdidas de inserción < 1.5 dB   Aislamiento > 35 dB
XHPA	HPA	X	Potencia de salida > 20 W   Eficiencia > 40 %
XMPA	MPA	X	Potencia de salida > 8 W   Ganancia > 24 dB
XSW	SWITCH	X	Pérdidas de inserción < 1 dB   Aislamiento > 35 dB
WHPA V2	HPA	EJ	Potencia de salida > 10 W   Eficiencia > 25 %
WTR	T/R	EJ	Potencia de salida > 2 W   Eficiencia > 20 % Figura de ruido < 3.5 dB
XTR	T/R	X	Potencia de salida > 15 W   Eficiencia > 35 % Figura de ruido < 2.5 dB
KaHPA	HPA	Ka	Potencia de salida > 5 W   Eficiencia > 15 %
KaSAT	HPA	Ka	Potencia de salida > 8 W   Eficiencia > 25 %
KaTR	T/R	Ka	Potencia de salida > 1 W   Eficiencia > 15 % Figura de ruido < 5 dB

Tabla 1. Tabla resumen de los monolíticos diseñados por INDRA durante el proyecto MUSTANG. (Fuente: INDRA).

placa de circuito impreso (PCB). Estas estructuras han sido diseñadas y fabricadas por cada empresa independientemente. Esto se debe a que cada empresa diseña y realiza sus sistemas de forma distinta y, por tanto, la mejor forma de integrar estos chips dentro de los sistemas también es distinta. En la figura 2 se muestra la estructura de montaje realizada por Indra para los monolíticos diseñados durante el proyecto. Con este tipo de montajes, hay que tener en cuenta los efectos provocados por la propia estructura y conexionado de las distintas etapas. Todos estos efectos deben ser medidos y caracterizados. Además, debe tenerse en cuenta cuando los monolíticos se integren dentro de los sistemas.

Como resumen, tras haber realizado todas las medidas pertinentes de cada monolítico y haber analizado su comportamiento, se presenta la siguiente tabla 1 que contiene los resultados de los monolíticos diseñados y sus principales características.

### Encapsulado

Se ha comentado, que uno de los objetivos adicionales de este proyecto ha sido el desarrollo de técnicas que permitan poder integrar, de una forma más eficiente y fiable, los monolíticos dentro de los sistemas diseñados por Indra. En este sentido, uno de los métodos desarrollados es el encapsulado. Encapsular consiste en integrar el MMIC dentro de una pequeña estructura cerrada de un material determinado (como plástico o cerámica), normalmente siguiendo unos estándares, de forma automatizada. Esto permite que la integración posterior en los sistemas sea mucho más rápida. En este proyecto, se ha decidido encapsular el MMIC que contiene tanto el amplificador de media potencia como el *switch* de banda X. Con esto se puede evaluar el efecto generado por el encapsulado en dos circuitos independientes y de características diferentes. Para llevar a cabo este proceso, Indra ha utilizado los servicios de la empresa

Synergie-CAD, una empresa afinada en Francia dedicada a realizar encapsulados de monolíticos. La cooperación con Synergie-CAD da lugar a que el proceso sea realizado íntegramente por empresas europeas, consiguiendo así mantener el objetivo de obtener una cadena de suministro plenamente europea.

La elección del tipo de encapsulado y la configuración interna del mismo ha necesitado de un análisis de los efectos eléctricos y térmicos que implica el hecho de encapsular. Tras este análisis, y en coordinación con Synergie-CAD, se ha optado por utilizar un encapsulado tipo QFN (*Quad-Flat No-leads*) plástico, de 5 x 5 mm. El resultado de este trabajo se encuentra en la figura 3 donde se muestra el MMIC y sus conexiones con la base del encapsulado.

### Conclusiones

Todas las acciones llevadas a cabo durante el proyecto MUSTANG permiten concluir que la industria europea está en condiciones de desarrollar componentes con prestaciones a la altura de la oferta comercial no europea existente, reduciendo el gap tecnológico en la tecnología de nitruro de galio. Además, este proyecto supone un paso más en la colaboración entre las empresas europeas líderes en defensa como parte del *roadmap* europeo de desarrollo de GaN.

Por su parte, UMS ha podido perfeccionar el proceso GH15 a lo largo del proyecto, dotándolo de mejores capacidades y ajustando sus modelos acordes con los resultados obtenidos durante las dos iteraciones del proyecto. Además, todos los monolíticos diseñados durante el proyecto han servido para poder evaluar el proceso de fabricación y verificar la concordancia entre los modelos simulados y las medidas realizadas. Por todo ello, se puede concluir que el GH15 es, a día de hoy, un proceso maduro sobre el que poder diseñar y fabricar monolíticos con garantías.

Para Indra, el proyecto ha permitido, en primer lugar, continuar la línea de diseño de monolíticos iniciada con el proyecto KORRIGAN y seguida con ApiGaN, capacitando a los equipos de diseño. En segundo lugar, se ha podido dotar a la empresa de la posibilidad del uso de monolíticos de diseño propio para el desarrollo de sus sistemas. MUSTANG también ha facilitado el desarrollo de nuevas estructuras de ensamblaje y pegado de monolíticos que permiten que sus características eléctricas se vean alteradas en un menor grado. Esto genera una gran ventaja a la hora de ensamblar los componentes dentro de los sistemas diseñados por la compañía, reduciendo así la pérdida de prestaciones derivada del montaje. Además, el desarrollo de un proceso de montaje más eficiente a la hora de integrar los monolíticos en los sistemas, ha permitido reducir el tiempo necesario para implementar los *chips* dentro de los módulos y sistemas.

### Referencias

Delgado-Pascual E. (2018), *et al.*, «Non-Linear Distortion in Ultra Wideband GaN Power Amplifiers», 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp. 293-296.

Duème P. (2016) *et al.*, «Overview of the MAGNUS project», 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp. 301-304.

Gauthier G., Mancuso Y. and Murgadella F., (2005). KORRIGAN - a comprehensive initiative for GaN HEMT technology in Europe, European Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium, GAAS 2005, pp. 361-363.

Mikulla M. (2011) *et al.*, «Manga: Manufacturable GaN» 2011 6th European Microwave Integrated Circuit Conference, pp. 336-339.

Oreja-Gigorro E. (2018) *et al.*, «A 6–18 GHz GaN on SiC High Power Amplifier MMIC for Electronic Warfare», 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC).

Powell A. R. and Rowland L. B., (2002) «SiC materials-progress, status, and potential roadblocks» in *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, n.º 6, pp. 942-955, June 2002.