



Gemma Nagore Panizo nació en Pamplona (Navarra) el 13 de mayo de 1975.

Obtuvo el título de Ingeniero de Telecomunicación con la calificación de Matrícula de Honor por la Universidad Pública de Navarra (UPNA) en Marzo de 2001.

El título del proyecto por el cual se ha obtenido el premio “RYMSA al Mejor proyecto Fin de carrera en Nuevas Tecnologías Aplicadas a Antenas y Sistemas Radiantes” es “Análisis, diseño y medida de antenas parche sobre substratos PBG”. Para la obtención de algunos resultados del proyecto se realizó una corta estancia en el centro de investigación internacional de la Agencia Espacial Europea (ESA-ESTEC, Holanda) y dicho proyecto dio lugar a la publicación de dos artículos en revistas internacionales, en un “Special Issue” de antenas sobre substratos PBG (PIER Special Issue on Electromagnetic Applications of PBG Materials), y en la revista “IEE Antennas and Propagation”, así como dos ponencias en congresos internacionales y otras dos en congresos nacionales (URSI-2000 y URSI-2001). Así mismo, los resultados obtenidos también se encuadran dentro de dos proyectos de investigación, uno financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y otro por la Agencia Espacial Europea, desarrollados en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Área de Microondas y Milimétricas.

# ***“ANÁLISIS, DISEÑO Y MEDIDA DE ANTENAS PARCHE SOBRE SUBSTRATOS PBG”***

Resumen del Proyecto Fin de Carrera realizado por Gemma Nagore Panizo  
y dirigido por Dr. Ramón Gonzalo García.

La concesión por el Ministerio de Fomento de licencias de redes inalámbricas en las bandas de 25 y 28GHz, así como las futuras previsiones de la Conferencia Europea de Radio (ECR) en sus recomendaciones ERC Rec T/R 13-02, ERC Rec T/R 12-01, ERC T/R 22-03, que incluyen futuras bandas de redes inalámbricas en las bandas de los 40, 50 y 60GHz, ha sacado a la luz pública una nueva generación de sistemas radio capaces de suministrar a las empresas anchos de banda similares o incluso mayores a los del cable sin necesidad de realizar las cuantiosas inversiones que el despliegue de las infraestructuras del cable requieren.

Estos sistemas se pueden dividir básicamente en dos: LMDS (Local Multipoint Distribution System) y MMDS (Multichannel Multipoint Distribution System). LMDS y MMDS son sistemas de acceso inalámbrico cuyo propósito es dar lugar a comunicaciones de banda ancha a múltiples abonados (empresas) en la misma área geográfica. Como aplicaciones más evidentes están, entre otros, prestar servicios de datos y telefonía de alta velocidad, conexión a Internet de alta velocidad de equipos móviles de empresas, proporcionar redes privadas y servicios multimedia a grandes instituciones y empresas, etc.

Estos sistemas utilizan accesos de microondas como medio de transporte, y aunque no suponen un cambio tecnológico, sí que suponen una adaptación de la tecnología existente a estos nuevos servicios a altas frecuencias. Una de las partes que debe adaptarse a ese cambio tecnológico es el sistema de antenas.

---

El sistema de antenas para cualquier plataforma de comunicación vía radio constituye una de las partes más críticas ya que debe adaptar de la mejor forma posible el sistema de radio con el entorno externo para enviar la información. La elección de la antena repercutirá directamente en las características de la estación base, los terminales remotos y en toda la red de forma global.

Existen dos tipos de antenas que a priori pueden utilizarse como elemento radiante en estos sistemas LMDS o MMDS; antenas de bocina y arrays de antenas planas. Las antenas de bocina presentan varios inconvenientes como son el precio, el tamaño y la imposibilidad de utilizarse en sistemas móviles. Las antenas planas, por el contrario, se utilizan en un amplio rango de aplicaciones ya que es una estructura plana (pequeño tamaño y volumen), fácil de construir e integrar y de bajo coste.

Como antena plana se suelen utilizar parches diseñados en tecnología microstrip. No obstante, el diseño de antenas parche tiene algunas limitaciones como una banda de operación restringida y una reducción de la eficiencia de radiación debido a las pérdidas por ondas de superficie (modos de substrato), que es más o menos importante en función de los parámetros de diseño.

El aumento de la frecuencia de operación en estos sistemas LMDS y MMDS supone para este tipo de antenas una mayor excitación de los modos de substrato que las hace inicialmente poco apropiadas para su uso en estos rangos frecuenciales.

Esta energía no contribuye a la radiación principal de la antena, considerándose un mecanismo de pérdidas. Además, esta energía, dependiendo de la constante dieléctrica del substrato y de su grosor puede suponer más del 70% de la potencia total. Incluso, algunas veces, esta energía contribuye de forma negativa a la radiación principal, deteriorando en gran medida el diagrama de radiación de la antena.

Si existiera alguna forma de disminuir los modos de substrato manteniendo las propiedades de la antena inalteradas o incluso mejorarlas, la utilización de estas antenas facilitaría el desarrollo de los sistemas LMDS y MMDS en el mercado español y europeo.

Por otro lado, el electrón ha sido el eje principal de la revolución tecnológica durante el siglo XX. Desde la aparición de los láseres, el fotón (la partícula de luz) le disputa la hegemonía. En el plano teórico, las similitudes de comportamiento electrón-fotón son conocidas desde el nacimiento de la física cuántica en los años 1920. Además, existe una gran semejanza matemática entre las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento ondulatorio de los fotones, y la ecuación de Schrödinger, que describe el de los electrones.

Gran parte de los descubrimientos en física en el pasado siglo se han debido al estudio de las ondas en estructuras periódicas, como por ejemplo los rayos-X, la difracción de los electrones en los cristales, la estructura de bandas de los electrones, etc. Estos avances han repercutido de forma espectacular en la sociedad, aumentando en gran medida la calidad de vida.

Debido a esta similitud de comportamiento entre electrón y fotón, en las últimas décadas se ha abierto una nueva frontera en las investigaciones con el objetivo de controlar las propiedades ópticas de los materiales. Si se pudiera diseñar y fabricar materiales que prohibieran la propagación de la luz, o la permitieran, en unas direcciones determinadas para cierto rango de frecuencias, la tecnología actual daría un paso de gigante hacia una nueva revolución, aunque ahora óptica en lugar de electrónica.

Se conoce que los semiconductores son estructuras cristalinas formadas por la disposición periódica de átomos o células. Esta geometría de la estructura fija mucha de las propiedades. En particular, la energía de los electrones no puede tomar valores cualesquiera, sólo valores pertenecientes a determinados intervalos de energía separados por “bandas de energía prohibidas” o “band gap”, se produce un “band gap” completo entre las bandas de valencia y de conducción.

La analogía óptica/electromagnética son los denominados “Photonic BandGap” (PBG), “Photonic Crystals” (PC) o “Electromagnetic Crystals” (EC). Estos son estructuras periódicas en una, dos o tres dimensiones (ver figura 1), donde la propagación electromagnética no está permitida para algunas direcciones del espacio en un cierto rango de frecuencias. Estas estructuras periódicas están formadas por combinaciones de diferentes dieléctricos, cuyo contraste debe ser mayor que dos. Si, en

determinado rango de frecuencias, un PBG refleja la onda electromagnética incidente con cualquier ángulo, se dice que el cristal tiene un “band gap completo”.

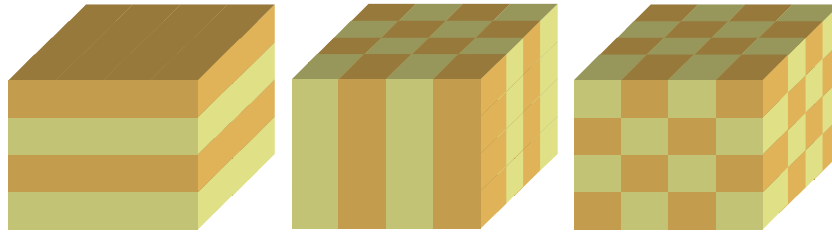


Figura 1. Ejemplos genéricos de cristales fotónicos en una, dos y tres dimensiones. Los diferentes colores muestran diferentes materiales.

La idea fundamental de este proyecto ha sido la de utilizar estructuras “Photonic BandGap” como substratos de antenas planas. Sintonizando la frecuencia de operación de la antena con la frecuencia prohibida dentro de la estructura PBG, no se excitarán modos de substrato (ondas electromagnéticas) y toda la potencia será radiada por la antena (ver figura 2). Esto se traducirá en un incremento de la eficiencia y de la directividad de la antena, en la obtención de diagramas de radiación más simétricos y en la reducción de la radiación trasera.

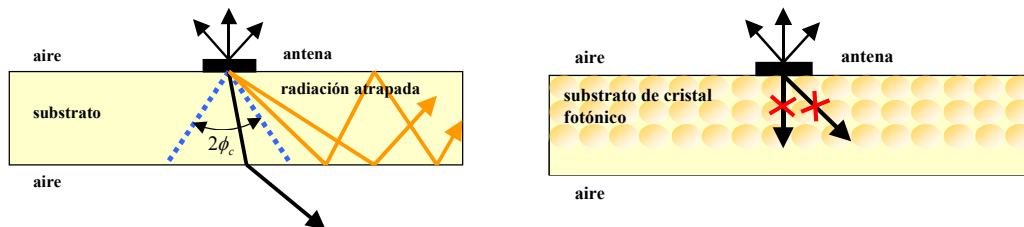
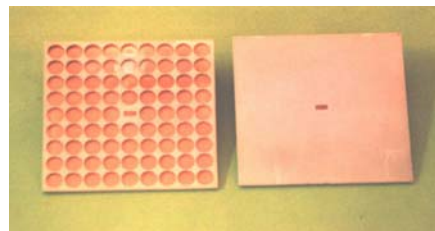


Figura 2. Sección transversal de una antena plana genérica (a) sobre un substrato dieléctrico (b) sobre un substrato Photonic BandGap donde se evita la propagación de las ondas de substrato dentro de las frecuencias del “band gap”.

El objetivo fundamental de este proyecto fin de carrera ha sido diseñar, fabricar y medir un PBG como substrato de antenas parche y de arrays de antenas parche, en el rango de las microondas, para mejorar los principales parámetros de radiación debido a la reducción de estos modos de substratos. Debido a las mejoras tecnológicas que exhiben estas estructuras, las hace altamente atractivas y válidas para la integración en los sistemas LMDS y MMDS como elementos radiantes suponiendo un paso muy

importante para la introducción masiva de los sistemas LMDS y MMDS en la empresa española y europea.

Centrándose en la estructura del proyecto, éste se ha dividido en cinco capítulos. En el primero se hace una breve introducción sobre los cristales fotónicos. En el segundo, se explican algunos ejemplos de estructuras cristalinas de dos dimensiones. Se utilizaran este tipo de estructuras bi-dimensiones, porque aunque una antena radia en todas las direcciones del espacio, por lo que parecería lógico usar un PBG tri-dimensional como substrato, debido al tipo de tecnología empleado en esta antena (microstrip), el plano de masa intrínseco de la misma garantiza la reflexión en la tercera dimensión. En este capítulo se han definido los conceptos principales de este tipo de estructura y se ha realizado un estudio de la estructura PBG que se va a utilizar como substrato: una malla cuadrada de columnas de aire en dieléctrico (ver figura 3). Se ha utilizado esta configuración por las ventajas que presenta su fabricación así como por la maximización del número de columnas por longitud de onda, importante para los diseños de arrays de antenas parche, ya que el aumento del número de periodos del PBG lleva a una mayor reducción de las ondas de superficie. El objetivo del tercer capítulo es comprobar las mejoras obtenidas al utilizar la estructura PBG como substrato de una antena parche en lugar de un substrato convencional (ver figura 3).



*Figura 3. Fotografía de las antenas fabricadas sobre un substrato PBG (izquierda) y sobre un substrato convencional (derecha).*

Mediante simulación se comprobó que cuando se utiliza un substrato PBG en lugar de un substrato convencional el efecto de las ondas de superficie queda casi eliminado, lo que lleva a obtener un diagrama de radiación más suave. Al mismo tiempo, el valor de la directividad aumenta, mientras que la radiación trasera y lateral disminuye considerablemente (ver figura 4). Además se consigue otro efecto muy

importante, el diagrama de radiación es muy estable con la frecuencia. Cuando se utiliza un substrato convencional, los diagramas de radiación presentan una variación muy fuerte con el cambio de frecuencia debido a los modos de substrato. La constante de propagación de éstos depende de la frecuencia y por tanto al llegar al final del substrato llegarán con diferente fase y contribuirán al diagrama de radiación de manera distinta. En cambio, para el caso de la antena sobre un substrato PBG, esta dependencia de la frecuencia se ve reducida porque al mitigarse los modos de superficie, su contribución al diagrama de radiación es muy pequeña y éste viene determinado exclusivamente por el campo proveniente de la antena (ver figura 5).

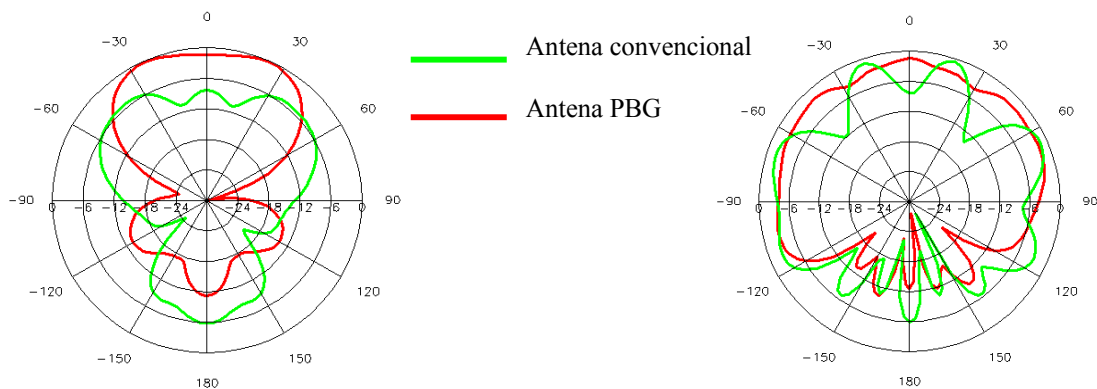


Figura 4. Comparación del diagrama de radiación simulados a una frecuencia de 15.2GHz para una antena sobre substrato convencional y sobre substrato PBG. Plano H (izquierda) plano E (derecha).

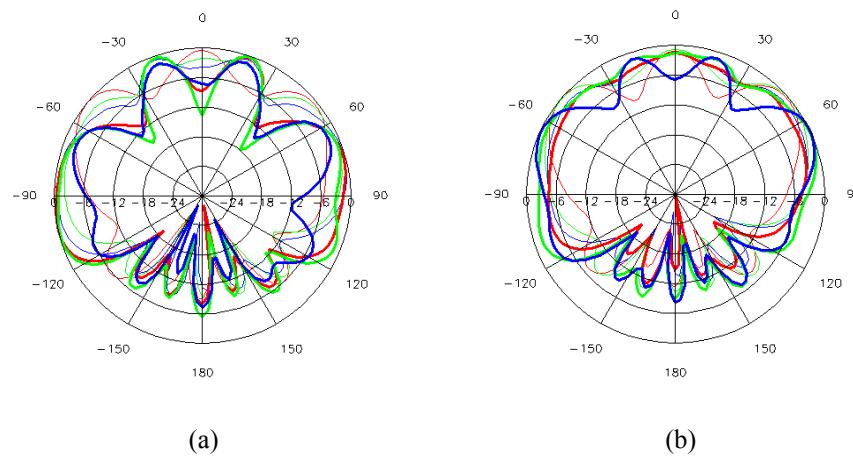


Figura 5. Diagramas de radiación del plano E para una antena convencional (a) y para una antena PBG (b) trabajando a diferentes frecuencias (de 13.5GHz a 16GHz con pasos de 0.5GHz). Cada color representa una frecuencia distinta.

Para confirmar estos resultados teóricos, se fabricaron dos antenas (ver figura 3), en el Laboratorio de Antenas y Microondas de la Universidad Pública de Navarra, una

sobre substrato convencional y otra sobre substrato PBG, y se midieron los diagramas de radiación en el CATR de ESA-ESTEC (Space Research and Technology Center de la Agencia Espacial Europea en Holanda). El rango de frecuencias de trabajo es de 14 a 16GHz (justo la mitad de las nuevas licencias) debido a las limitaciones de fabricación disponibles en la Universidad. De todas formas, se escaló todo para que el comportamiento de un futuro prototipo a frecuencias de 30GHz sea lo más parecido a los resultados obtenido en este proyecto fin de carrera.

Se ha comprobado que los resultados de las medidas ratifican los resultados teóricos. El aumento de la directividad es considerable, se reduce la radiación trasera y lateral y la dependencia con la frecuencia de los diagramas de radiación desaparece cuando se utiliza un PBG (ver figuras 6 y 7). Por todo ello, se mejora la ganancia, la eficiencia y el ancho de banda de la antena y su uso puede ser una solución para los sistemas LMDS y MMDS.

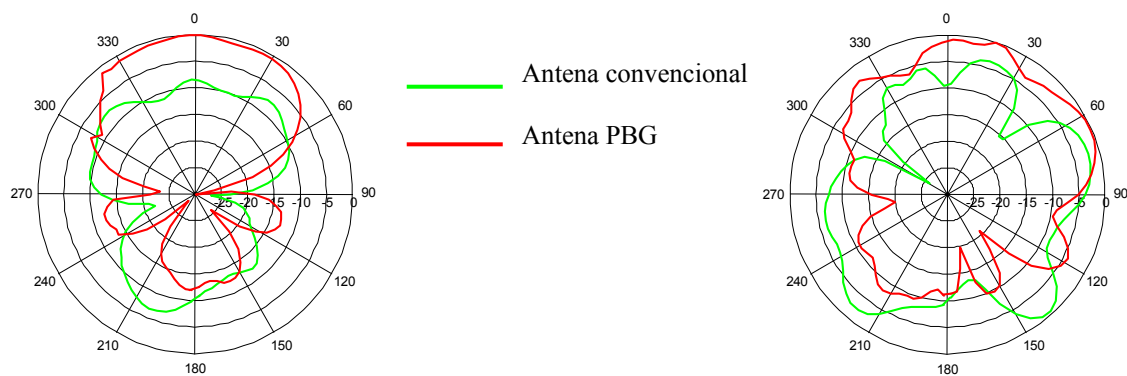
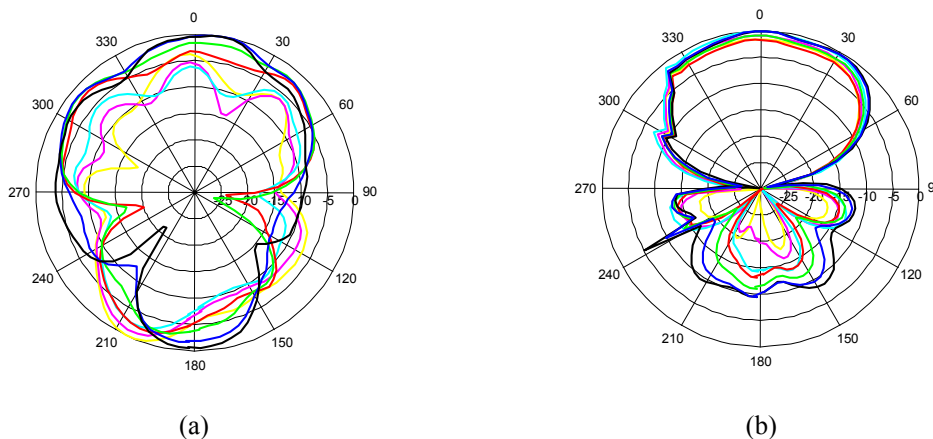


Figura 6. Comparación de los diagramas de radiación a 15.2GHz. Plano H (izquierda) y plano E (derecha).





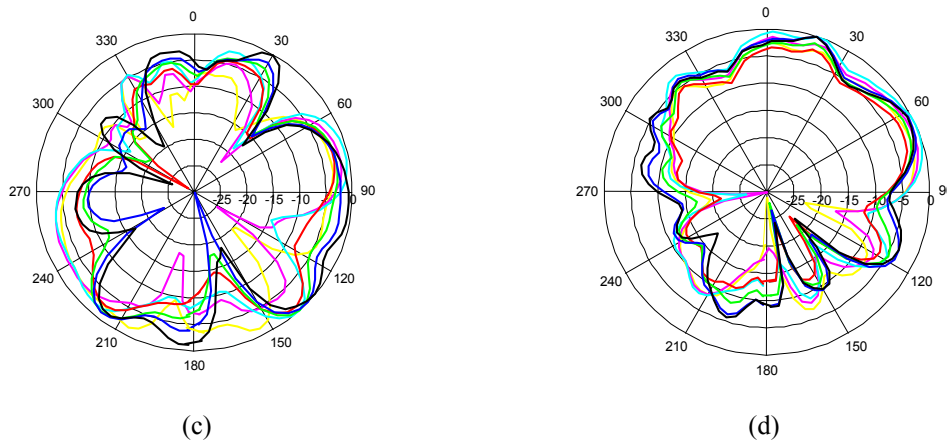
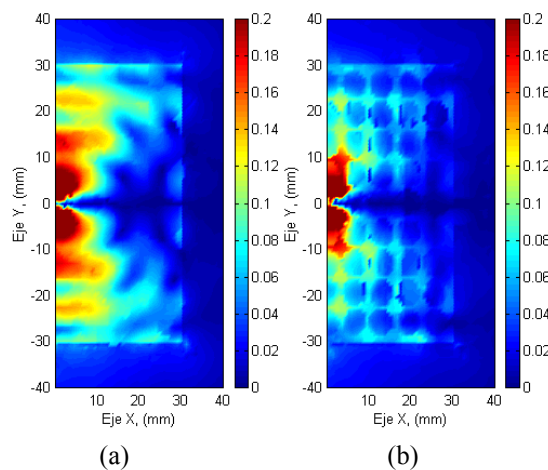


Figura 7. Diagramas de radiación medidos de 14.5GHz a 16.5GHz con pasos de 0.25GHz. Plano H y E para la antena con substrato convencional (a) y (c) y con substrato PBG (b) y (d). Cada color representa una frecuencia diferente.

Como se ha mencionado, los modos atrapados en el substrato radian la llegar al final del mismo y contribuyen al diagrama de radiación empeorándolo. Se ha comprobado mediante simulación y medida la distribución de campo eléctrico cercano sobre la superficie de la antena. Al utilizar un substrato PBG, esta componente queda reducida y el diagrama sólo dependerá de la radiación de la antena. Esto fue corroborado mediante la medida del campo cercano realizada en el Instituto de Semiconductores Electrónicos de Aachen, Alemania (ver figura 8).



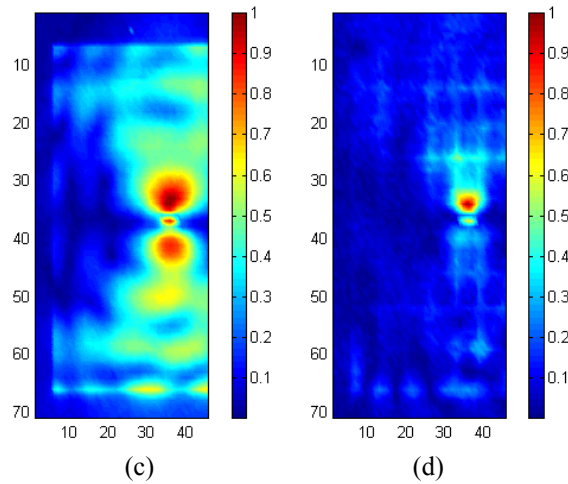


Figura 8. Simulación y medida del campo cercano a 14.5GHz para el módulo de la parte real del campo eléctrico: componente z (a) y (c) substrato convencional y (b) y (d) substrato PBG.

Comprobadas las mejoras que presenta la utilización de un substrato PBG en lugar de un substrato convencional para un único elemento, en el capítulo cuatro, se confirmó mediante medidas (ver figura 8), realizadas en el Instituto de Semiconductores Electrónicos en Aachen, y simulación, que el uso de substratos PBG en arrays de antenas parche reduce el acoplo mutuo debido a la energía acoplada de una antena a otra a través de estos modos de substrato (ver figura 9), evitando el fenómeno de “scan blindness”, mejorando la directividad y disminuyendo la radiación trasera y lateral. Para ello se procedió a la fabricación y medida de dos antenas enfrentadas, que constituirían un array de dos elementos. En concreto se quería ver la diferencia existente entre un substrato convencional y uno PBG en el acoplo, mediante modos de substrato, entre las antenas. Se diseñaron diversas configuraciones PBG para ver como se reduce el acoplo al aumentar el número de periodos de la estructura.

Los dispositivos fueron fabricados y medidos en la Universidad Pública de Navarra y en el Instituto de Semiconductores Electrónicos de Aachen, Alemania. Se puede ver como el  $S_{21}$  (acoplo) se reduce en 25dB a 17GHz (ver figura 9) cuando se utiliza una estructura PBG de 5 periodos como substrato frente a un substrato convencional.

Esto queda completamente ratificado en las medidas de campo cercano que se llevaron a cabo (ver figura 9) donde se ve como el campo se ve atenuado al usar un substrato PBG.

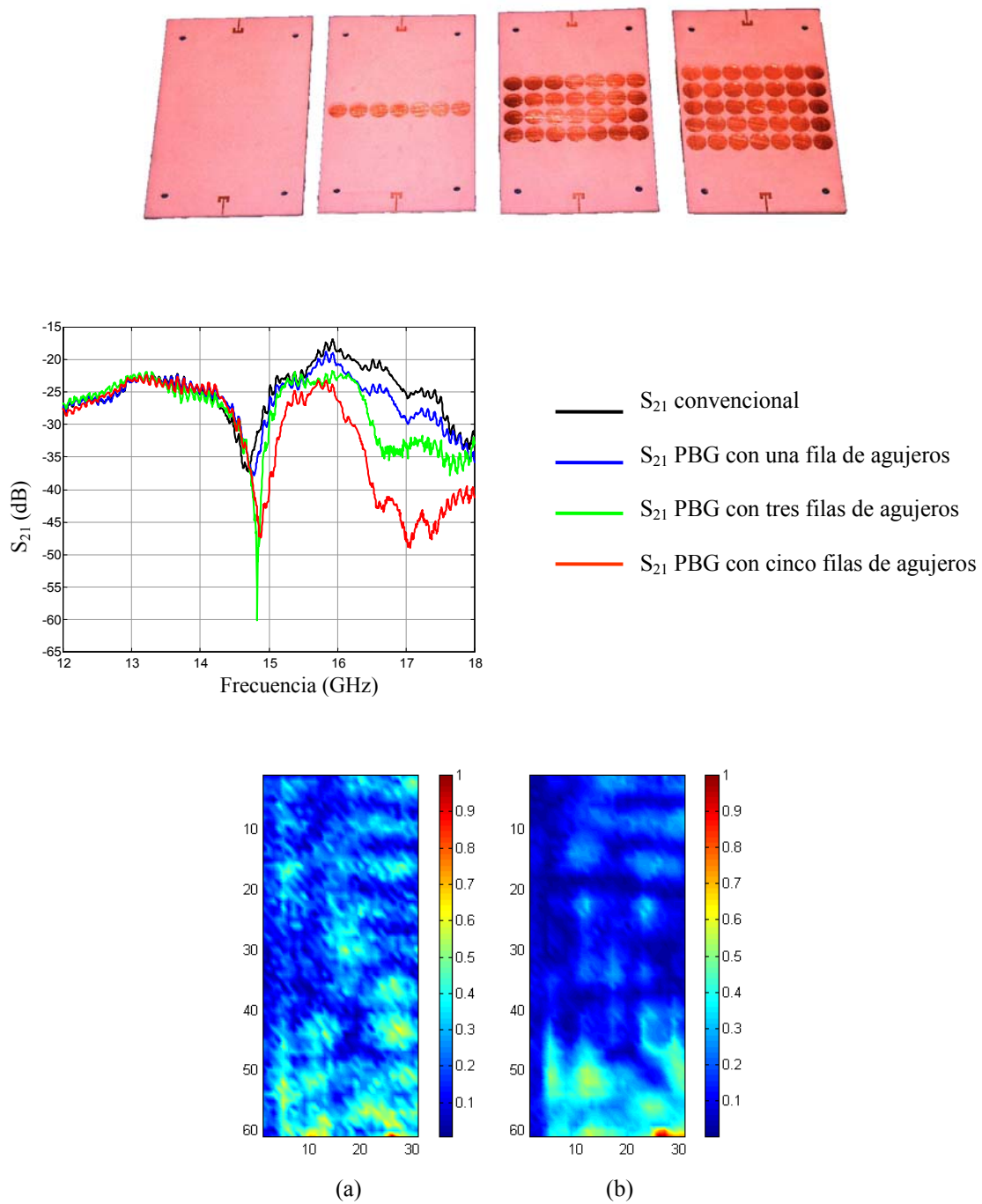


Figura 8. Fotografía de los circuitos fabricados. Parámetro  $S_{21}$  medido de los circuitos enfrentados según la configuración plano E para un substrato convencional, PBG con una, tres y cinco filas de agujeros. Medidas del campo cercano a 17GHz para el módulo del campo eléctrico: componente z (a) substrato convencional y (b) substrato PBG.

Como conclusión final, se puede decir que la utilización de un PBG como substrato tanto de antenas parche como de arrays mejora la eficiencia, la directividad, la

---

ganancia y reduce la radiación trasera y lateral y el acoplo mutuo entre antenas ya que el PBG reduce los modos de substrato. Esto abre un nuevo horizonte en el diseño de substratos de mayor grosor y con valores de permitividad más altos ya que las pérdidas por la excitación de modos de substrato son mínimas. Además se sientan las bases de una nueva tecnología de Antenas para facilitar la implantación de los sistemas LMDS y MMDS en el mundo empresarial con un precio más asequible.

Por último comentar que el trabajo desarrollado en este proyecto fin de carrera se encuadra dentro de dos proyectos de investigación, uno financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (“Aplicación de Tecnología Photonic BandGap en el desarrollo de Antenas y Circuitos de Microondas para comunicaciones” TIC99-0292) y otro por la Agencia Espacial Europea (“Submm-wave Heterodyne Receiver and Integrated Antenna Technology Developments”).

---

### Otros méritos del Proyecto

En cuanto a otros méritos que presenta el proyecto para ser premiado, cabe destacar que el proyecto abarca las facetas que un ingeniero de antenas debe dominar, diseños, simulaciones con herramientas comerciales, fabricación de prototipos y medidas de los mismos.

Profesionalmente, el proyecto me ha ofrecido la oportunidad de realizar una estancia de dos semanas en un centro de investigación internacional de reconocido prestigio (Agencia Espacial Europea, ESA-ESTEC, Holanda) donde colaboré en la realización de las medidas que se presentan en el proyecto.

Como muestra del trabajo científico desarrollado en el proyecto, cabe destacar que se ha publicado un artículo en un “Special Issue” sobre aplicaciones de estructuras PBG en microondas, lo que da idea de la importancia del trabajo desarrollado en este proyecto. Además se ha aceptado para su publicación otro artículo en la revista “IEE Antennas and Propagation”. Por otro lado, se han presentado dos ponencias en dos congresos internacionales y otras dos en dos en el congreso nacional URSI. Cabe destacar que a nivel personal me ha supuesto la posibilidad de presentar la ponencia en el congreso nacional que se celebró en Zaragoza y la de asistir al congreso internacional que se celebró en el centro de la Agencia Espacial Europea de Holanda (ESA-ESTEC).

Además, la importancia del tema se evidencia en el hecho de que dicho proyecto se encuadra dentro de dos proyectos de investigación, uno financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (“Aplicación de Tecnología Photonica BandGap en el desarrollo de Antenas y Circuitos de Microondas para comunicaciones” TIC99-0292) y otro por la Agencias Espacial Europea (“Submm-wave Heterodyne Receiver and Integrated Antenna Technology Developments”) donde he colaborado muy activamente en su desarrollo.

---

**PUBLICACIONES**

Gonzalo, R., Nagore, G. y De Maagt, P. J. I., “*Simulated and Measured Performance of a Patch Antenna on a 2-dimensional Photonic Crystals Substrate*”, aceptado para su publicación en PIERS (Progress in Electromagnetic Research) Special Issue on Electromagnetic Applications of PBG Materials.

Gonzalo, R., Nagore, G, Ederra, I., De Maagt, P. J. I., “*Near Field patterns and mutual coupling of photonic crystal patch antennas*”, aceptado para publicación en IEE Proceeding Microwave, Antenna and Propagation.

**CONGRESOS INTERNACIONALES**

Gonzalo, R.; Nagore, G.; Ederra, I.; Martinez, B.; De Maagt, P., “*Coupling between Patch Antennas on Photonic Crystals*”, 24th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Structures, 30 May - 1 June 2001, Noordwijk, The Netherlands.

Gonzalo, R.; Nagore, G.; Ederra, I.; Martinez, B.; De Maagt, P., “*Improvements in patch antennas by using Photonic Crystals*”, PECS, Workshop 2001 Periodic Electromagnetic Crystal structures, 11-16 Junio, 2001, St Andrews, Scotland.

**CONGRESOS NACIONALES**

Nagore, G., Gonzalo, R., and de Maagt, P., “*Mejoras en Antenas Parche usando substratos Photonic BandGap*”, XV Symposium Nacional URSI 00, pp. 251-253. Zaragoza, Septiembre 2000.

Nagore, G., Ederra, I., Martínez, B., Teniente, J., Gonzalo, R., “*Medidas de una antena parche sobre un substrato PBG 2-D*”, XVI Symposium Nacional URSI 01. pp. 297-298, Madrid, Septiembre 2001.