

Amplificadores criogénicos de muy bajo ruido en microondas y ondas milimétricas

Eduardo Artal⁽¹⁾, Beatriz Aja⁽¹⁾, Juan Luis Cano⁽¹⁾, Luisa de la Fuente⁽¹⁾, José Vicente Terán⁽¹⁾, Enrique Villa⁽¹⁾

artale@unican.es, ajab@unican.es, juanluis.cano@unican.es, fuenterm@unican.es, teranjv@unican.es, villae@unican.es

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Edificio Ingeniería de Telecomunicación. Plaza de la Ciencia s/n, 39005 Santander.

Abstract- Cryogenic cooled very Low Noise Amplifiers are critical components in radio astronomy receivers and other applications. A general description of these devices and their role in receivers is presented. Several examples of microwave and millimeter wave amplifiers covering bands from 4 GHz to 36 GHz are described. Noise temperatures of about 5 K in 4-12 GHz and 15 K in 25-34 GHz bands have been achieved in mHEMT technology based amplifiers.

I. INTRODUCCIÓN

La recepción de señales muy débiles es el caso más común en los receptores de radioastronomía, llegando incluso a aplicaciones en que las señales útiles son de potencia mucho más baja que la potencia de ruido del propio receptor. En radioastronomía se requieren receptores muy sensibles que amplifiquen las señales recibidas añadiendo el menor ruido posible [1], [2]. Un componente clave en los receptores de radioastronomía es el amplificador de muy bajo ruido, utilizándose amplificadores enfriados a temperaturas criogénicas, del orden de 15 ó 20 K, para reducir al máximo el ruido añadido. Los amplificadores criogénicos se utilizan también en otras aplicaciones tales como en antenas del espacio profundo [3] y en física de partículas [4].

Los mejores amplificadores criogénicos de bajo ruido LNA (Low Noise Amplifier) para las bandas de microondas y ondas milimétricas están contruidos con transistores en tecnología HEMT (High Electron Mobility Transistor) de Fosfuro de Indio (InP) o HEMT metamórfico (mHEMT) de Arseniuro de Galio (GaAs) con un cierto porcentaje de contenido de InP en la estructura cristalina del semiconductor [5]. Para frecuencias bajas de microondas se utiliza también la tecnología de transistores HBT de SiGe [6]. En el mundo hay un reducido número de empresas, o de laboratorios en centros de investigación o en universidades, que fabriquen este tipo de dispositivos. Hay amplificadores criogénicos de montaje híbrido, con transistores y componentes discretos, o contruidos en tecnología monolítica, Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) dependiendo de cada aplicación concreta.

II. TECNOLOGÍAS PARA AMPLIFICADORES CRIOGÉNICOS

La tecnología HEMT de InP permite obtener los mejores amplificadores criogénicos en cuanto a temperatura de ruido. En los Estados Unidos de América (USA) la compañía Northrop Grumman Corporation [7] dispone de tecnología

InP HEMT de 35 nm y de 100 nm de longitud de puerta [8]. En Europa diseñan y desarrollan transistores y MMIC en tecnología InP HEMT el centro universitario ETH Zürich de Suiza [9], [10] y la Universidad Tecnológica de Chalmers en Gotemburgo, Suecia [11], [12]. Esta última tiene una empresa spin-off, Low Noise Factory [13] que comercializa amplificadores criogénicos de alta calidad.

La tecnología de transistores HEMT metamórficos (mHEMT) está disponible en un mayor número de empresas fabricantes de semiconductores (conocidas en inglés como “foundries”) o en centros de investigación. Es una tecnología que compite con la InP-HEMT y ha demostrado que alcanza los bajos niveles de temperatura de ruido comparables. En Europa el Instituto Fraunhofer de Física de Estado Sólido Aplicada de Friburgo en Alemania (IAF-Fraunhofer) [14], ha optimizado su tecnología de transistores mHEMT para aplicaciones criogénicas, con muy buenos resultados [15], [16]. En los centros de radioastronomía europeos hay un claro interés en potenciar las tecnologías disponibles en Europa para no depender de los dispositivos de USA [17], que son muy difíciles de conseguir por la estricta normativa ITAR de exportación. En Francia la empresa OMMIC [18], ubicada en las cercanías de París, tiene diversas tecnologías HEMT y amplificadores de bajo ruido LNA MMIC comerciales que han demostrado buenas prestaciones en operación criogénica.

III. EJEMPLOS DE AMPLIFICADORES CRIOGÉNICOS

En esta sección se describen dos amplificadores criogénicos desarrollados con tecnología mHEMT [16].

A. Amplificador de 4-12 GHz

La banda de 4 a 12 GHz se utiliza como banda de frecuencia intermedia (FI) en receptores de radioastronomía que operan en las bandas de ondas submilimétricas, como es el caso de la Banda 9 de ALMA (Atacama Large Millimeter Array), que cubre de 602 a 720 GHz. El LNA mostrado en la Fig. 1 está contruido con un MMIC de tres etapas, cada una con un transistor de 4 x 30 μm , de tecnología mHEMT de 100 nm de longitud de puerta, fabricado por el IAF-Fraunhofer. El tamaño del chip MMIC es de 2.5 mm x 1 mm. La red de adaptación de entrada es externa al chip, para minimizar las pérdidas y optimizar el ruido, contruida con líneas microstrip

sobre substrato dieléctrico CLTE-XT Arlon® de 0.254 mm de grosor y constante dieléctrica relativa de 2.94.

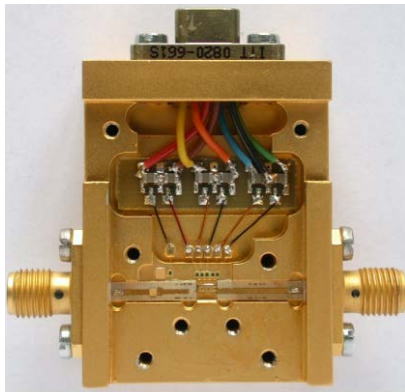


Fig. 1. Amplificador de 4-12 GHz. Chasis de 31.3 x 40 x 15 mm³

El diseño del circuito MMIC está realizado con líneas coplanares con plano de masa inferior, con otros componentes pasivos: inductancias, resistencias y condensadores, tal como muestra la Fig. 2.

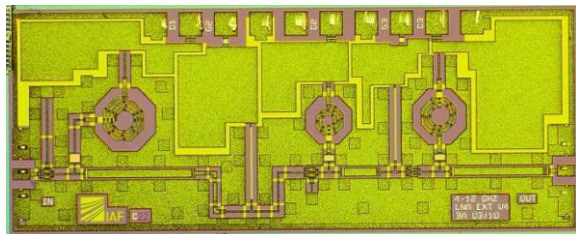


Fig. 2. Fotografía del MMIC LNA de 4-12 GHz. Tamaño 2.5 x 1 mm²

Las medidas y las simulaciones de la ganancia y la temperatura de ruido a la temperatura de 15 K, en la banda de 3 GHz a 13 GHz, se muestran en la Fig. 3. La simulación incluye la red de adaptación externa y los conectores coaxiales (de tipo SMA) del chasis. De 4 a 12 GHz, el amplificador da una ganancia de 31.5 dB con un rizado de ± 1.8 dB. La temperatura de ruido promedio en la banda de 4 a 12 GHz es de 5.3 K. La medida se hizo con una tensión de drenador de $V_D = 0.53$ V y una corriente total de drenador de 15 mA. La potencia disipada en el chip fue de 8 mW.

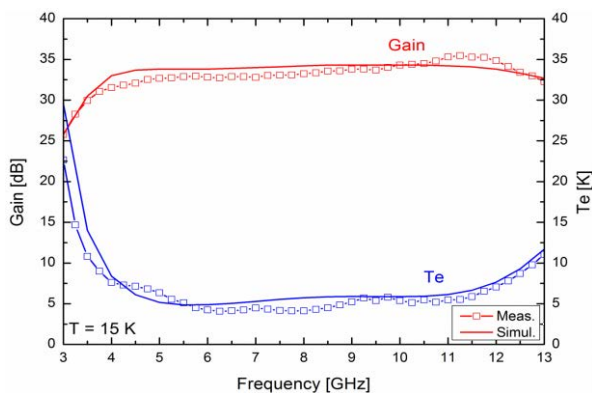


Fig. 3. Ganancia y temperatura de ruido medidas y simuladas a la temperatura de 15 K en el LNA de 4-12 GHz.

B. Amplificador de 25-34 GHz

El LNA criogénico para la banda de 25 a 34 GHz se muestra en la Fig. 4. El MMIC LNA tiene tres etapas, cada

una con un transistor de $4 \times 15 \mu\text{m}$ transistor, de tecnología mHEMT de 100 nm del IAF-Fraunhofer, igual que el anterior. El montaje se hizo en un chasis de aluminio dorado, con conectores coaxiales de 2.92 mm. El tamaño del chip fue de 2.5 mm x 1 mm.

Las líneas microstrip están realizadas en substrato dieléctrico CLTE-XT Arlon® de 0.127 mm de espesor.

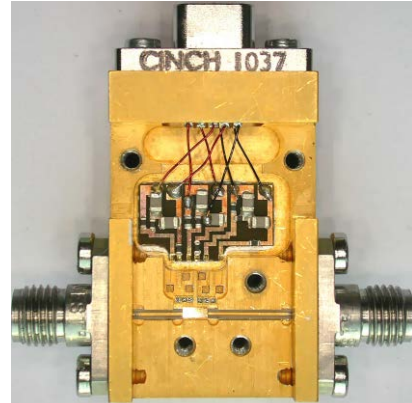


Fig. 4. Amplificador de 25-34 GHz. Chasis de 20.6 x 32.5 x 12 mm³.

El diseño del MMIC está realizado también con líneas coplanares con plano de masa inferior, combinado con resistencias y condensadores, según se muestra en la fotografía de la Fig. 5.

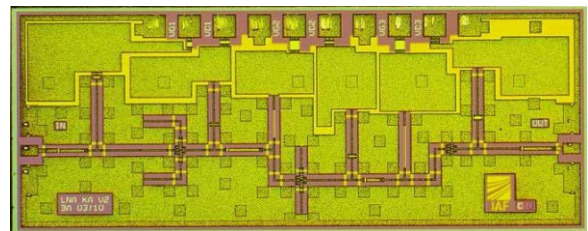


Fig. 5. Fotografía del MMIC LNA de 25-34 GHz. Tamaño 2.5 x 1 mm²

Las medidas y las simulaciones de la ganancia y la temperatura de ruido a la temperatura de 15 K, en la banda de 20 GHz a 40 GHz, se muestran en la Fig. 6.

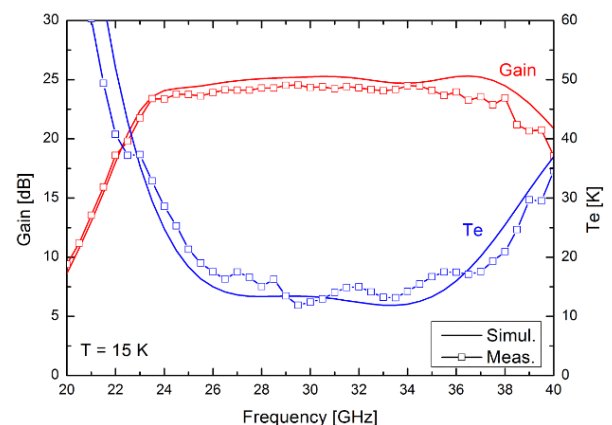


Fig. 6. Ganancia y temperatura de ruido medidas y simuladas a la temperatura de 15 K en el LNA de 25-34 GHz.

La simulación incluye las líneas microstrip y los conectores coaxiales. De 25 a 34 GHz, el amplificador da una ganancia de más de 24 dB. La temperatura de ruido promedio en la banda fue de 15.2 K. La medida se hizo con una tensión de

drenador de $V_D = 0.37$ V y una corriente total de drenador de 7.5 mA. La potencia disipada en el chip fue de 2.8 mW.

IV. AMPLIFICADORES CRIOGÉNICOS PARA EL INSTRUMENTO TGI DEL EXPERIMENTO QUIJOTE

El proyecto de radioastronomía QUIJOTE (Q-U-I Joint Tenerife Experiment) [19], tiene como objetivo caracterizar con detalle la polarización de las señales del Fondo Cósmico de Microondas. Los receptores del instrumento TGI (Third GHz Instrument) operan en la banda de 26 a 36 GHz. El instrumento tendrá en total 31 píxeles, situados en el plano focal del radiotelescopio, es decir 31 receptores de tipo radiómetro polarímetro. Cada píxel consta de un receptor que lleva dos amplificadores de bajo ruido criogénicos. Cada amplificador tiene dos amplificadores MMIC conectados en cascada, según se muestra en la Fig. 7.

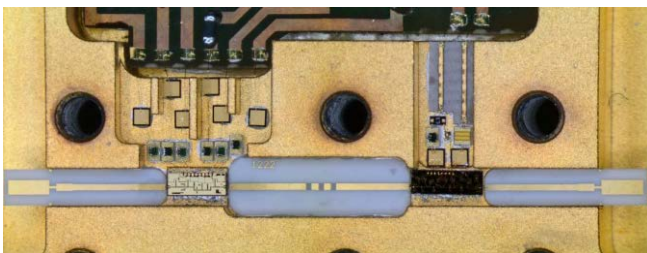


Fig. 7. Fotografía del interior del amplificador criogénico del instrumento TGI del experimento QUIJOTE.

El primer MMIC está fabricado en el IAF-Fraunhofer y es el que determina la temperatura de ruido de todo el conjunto. Es el mismo MMIC que el descrito en el apartado anterior, LNA de 25-34 GHz. El segundo MMIC está fabricado en OMMIC, con tecnología mHEMT de 130 nm, es de cuatro etapas con transistores idénticos de 4×15 μm y contribuye a conseguir una ganancia suficientemente alta de todo el conjunto. Entre los dos MMIC hay un atenuador de 5 dB que permite aislar los dos chips, mejorando la respuesta total y ajustando la ganancia al valor deseado.



Fig. 8. Fotografía del amplificador criogénico del instrumento TGI del experimento QUIJOTE con la tapa abierta.

Los accesos son en guía de onda WR-28, que se forma al cerrar las dos piezas mostradas en la Fig. 8. Se han fabricado un total de 62 unidades de este amplificador, para completar los 31 píxeles del instrumento. En la Fig. 9 se muestran las gráficas acumuladas de medidas de la ganancia de inserción y de la temperatura de ruido de las 62 unidades.

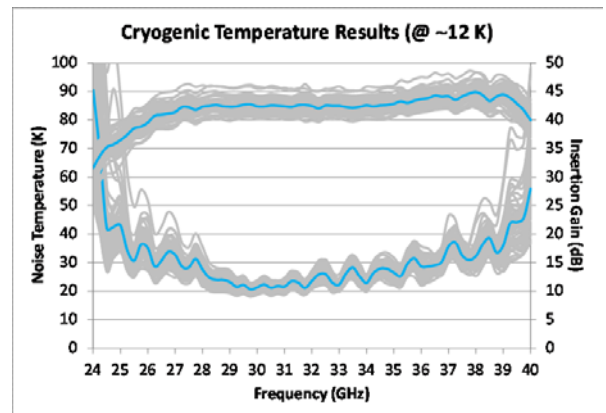


Fig. 9. Resultados acumulados de las medidas de la ganancia de inserción y de la temperatura de ruido de 62 unidades del amplificador criogénico del TGI – QUIJOTE. Las medidas se han realizado a una temperatura de 12 K.

En promedio estos amplificadores tienen una ganancia aproximada de 40 dB y una temperatura de ruido de 25 K, en la banda de 26 a 36 GHz. Se ha comprobado que hay una buena repetitividad en las 62 unidades construidas y medidas.

V. CONCLUSIONES

Los amplificadores criogénicos de bajo ruido en las bandas de microondas y ondas milimétricas son componentes clave en los receptores de radioastronomía. Hay tecnologías de semiconductores mHEMT disponibles en Europa, que permiten conseguir temperaturas de ruido muy bajas, comparables a las mejores obtenidas en los Estados Unidos de América. Estas tecnologías tienen suficiente madurez para la fabricación de pequeñas series de amplificadores, como las que se precisan en los experimentos de radioastronomía.

AGRADECIMIENTOS

Los desarrollos de amplificadores criogénicos llevados a cabo por los autores se han financiado con ayudas del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación, del Ministerio de Economía y Competitividad, cuyas referencias de los proyectos son: CONSOLIDER CSD2010-00064, AYA2010-21766-C03-03, AYA2012-39475-C02-02 y el programa de investigación FPI BES2011-046199. El diseño y desarrollo de los amplificadores MMIC ha sido posible gracias a dos proyectos de colaboración (2008-2012 y 2013-2015) con el Centro de Desarrollos Tecnológicos (Centro Astronómico de Yebes) del Instituto Geográfico Nacional y el Instituto IAF-Fraunhofer de Friburgo (Alemania).

Los autores agradecen a Ana R. Pérez y Eva M^a Cuerno la cuidadosa fabricación y montaje de los circuitos.

REFERENCIAS

- [1] J.C. Webber, "The ALMA Telescope", IEEE International Microwave Symposium, 2013
- [2] E. W. Bryerton, M. Morgan, M. W. Pospieszalski, "Ultra Low Noise Cryogenic Amplifiers for Radio Astronomy", RWS 2013

- [3] Stephane Halte, "ESA Deep Space Cryogenic LNAs, past, present and future", ISSSE 2012.
- [4] Y. Artzi, Y. Twig, A. Blank, "Induction-detection electron spin resonance with spin sensitivity of a few tens of spins", *Applied Physics Letters* 106, 084104 (2015).
- [5] M. W. Pospieszalski, "Extremely Low-Noise Amplification with Cryogenic FETs and HFETs: 1970-2004," *Microwave Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 62-75, Sept. 2005.
- [6] J.C. Bardin, S. Weinreb, "A 0.1–5 GHz Cryogenic SiGe MMIC LNA", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 19, NO. 6, pp. 407-409, June 2009.
- [7] Northrop Grumman Corporation, www.northropgrumman.com
- [8] L.A. Samoska, "An Overview of Solid-State Integrated Circuit Amplifiers in the Submillimeter-Wave and THz Regime", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Vol. 1, NO. 1, pp. 9-24, September 2011.
- [9] ETH Zürich, Suiza, Laboratory for Millimeter-Wave Electronics, www.mwe.ee.ethz.ch
- [10] Andreas R. Alt, Diego Marti, C. R. Bolognesi, "Robust Small-Signal Equivalent Circuit Extraction in Various HEMT Technologies", *IEEE Microwave Magazine for the Microwave and Wireless Engineer*, Vol. 14, Issue 4, pp.83-101, April 2013.
- [11] Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suecia. Dept. of Microtechnology and Nanoscience – MC2. www.chalmers.se/en/departments/mc2
- [12] P.A. Nilsson, J. Schlee, N. Wadefalk, J.P. Starski, H. Rodilla, G. Alestig, J. Halonen, B. Nilsson, H. Zirath, Grahn, J., "An InP MMIC Process Optimized for Low Noise at Cryo", *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICs)*, pp 1-4, 2014.
- [13] Low Noise Factory, Mölndal, Suecia, www.lownoisefactory.com
- [14] Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics, Freiburg, Alemania, www.iaf.fraunhofer.de
- [15] M. Kotiranta, D. Bruch, A. Leuther, H. Massler, M. Seelmann-Eggebert, M. Schlechtweg, O. Ambacher, S. Turk, J. Goliash, F. Schafer, "Cryogenic low noise amplifier development for 67–116 GHz" 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2014.
- [16] B. Aja, M. Seelmann-Eggebert, D. Bruch, A. Leuther, H. Massler, B. Baldischweiler, M. Schlechtweg, J.D. Gallego, I. Lopez, C. Diez, I. Malo, E. Villa, Artal, E., "4–12- and 25–34-GHz Cryogenic mHEMT MMIC Low-Noise Amplifiers", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 60, Issue 12, Part 2, pp. 4080–4088, December 2012.
- [17] L. Valenziano, M. Zannoni, S. Mariotti, A. Cremonini, A. de Rosa, S. Banfi, A. Baó, M. Gervasi, E. Limiti, A. Passerini, F. Schiavone, "Comparison of cryogenic W band low noise amplifier based on different III-V HEMT foundry process and technologies", *Proceedings of the SPIE*, Volume 9153, 10 pp., 2014.
- [18] OMMIC, Limeil-Brévannes, Francia, www.ommic.fr
- [19] Cano, J.L.; Villa, E.; Cagigas, J.; Aja, B.; Teran, J.V.; Perez, A.R.; de la Fuente, L.; Artal, E.; Mediavilla, A.; Hoyland, R., "Multi-pixel Ka-band radiometer for the QUIJOTE experiment (Phase II) "42nd European Microwave Conference (EuMC), pp. 37 – 40, 2012.