

Amplificador MHEMT Cascodo de Bajo Ruido a 100 GHz

Manuel Arias, Luisa de la Fuente, Juan Pablo Pascual. Antonio Tazón,

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones Universidad de Cantabria Avda. Los Castros S/N. 39005-Santander.

Abstract- We report the complete design of a Cascode Low Noise Amplifier (LNA) MMIC operating in a band between 94 and 100 GHz, based on microstrip technology using a process which employs 0.07 μm Metamorphic High Electron Mobility Transistors. A modified Cascode configuration combining resistive feedback and a lossy network to equalize gain and stabilize the circuit is used. Differences between electromagnetic simulation and circuitual equivalent models of passive parts in these frequencies are discussed. Expected performance features small signal gain over 11 dB, a minimum Noise Figure of 2.2 dB, being below 2.5 dB in the whole band, input and output matching better than -15 dB/-8 dB. MonteCarlo analysis was done to ensure a robust design obtaining yield figures above 80% for the main specs.

I. INTRODUCCIÓN

El creciente interés por aplicaciones como sensores, radiómetros, sistemas de imagen, etc. que explotan bandas de frecuencias milimétricas (30 GHz – 300 GHz) y submilimétricas (300 GHz- 3 THz), entrando ya en el rango de los THz, ha impulsado el desarrollo de tecnologías monolíticas que permitan implementar las funciones de procesado requeridas, como amplificación de bajo ruido, amplificación de potencia, mezcla y detección.

Ejemplos de estas aplicaciones son la detección remota mediante espectroscopía y más recientemente la detección de amenazas ocultas mediante captura de imágenes realizada a frecuencias milimétricas.

Las tecnologías de integración que pueden operar en la parte baja del espectro de THz deben incluir dispositivos con valores de frecuencia de transición (f_t) de, al menos, 200 GHz. Ello requiere semiconductores de alta movilidad y dimensiones críticas en el rango de nm. Si nos centramos en la amplificación de bajo ruido estaríamos restringidos a tecnologías que contengan In en transistores tipo HEMT (High Electron Mobility Transistor) con longitudes de puerta entre 60 y 120 nm. Dentro de estas tecnologías existen dos variantes en función del semiconductor básico empleado: InP ó AsGa. El InP presenta más alta movilidad y transconductancia, lo que permite obtener ganancias importantes con más bajo consumo de corriente y, por tanto, ruido más bajo. Como contrapartida es más caro, más frágil y hace los circuitos más vulnerables a descargas electrostáticas (ESD), siendo además el ruido de baja frecuencia ($1/f$) de los dispositivos más alto. Las tecnologías basadas en AsGa recogen el bagaje de los procesos de dispositivos HEMTs pseudo mórficos (pHEMTs) y consiguen, añadiendo un contenido variable de In, incrementar la movilidad, pero sobre un sustrato básico de AsGa, más robusto y barato que el InP. El resultado es el transistor Metamórfico (MHEMT).

El desarrollo de las técnicas de litografía permite disminuir la longitud de la puerta de los transistores, contribuyendo decisivamente a elevar la frecuencia f_t a los valores requeridos (ie.: 300 GHz OMMIC D007IH). Publicaciones recientes sobre implementaciones monolíticas con MHEMTs [1-2] muestran buenos resultados a frecuencias de 94 GHz y de 210 GHz. Sin embargo no está claro que en la actualidad la madurez de la tecnología y su fiabilidad haga viable su uso a escala industrial. Este trabajo se enmarca en el programa CONSOLIDER y tiene por objeto adquirir el conocimiento y la experiencia necesarios para poder poner estas tecnologías a disposición del sistema de I+D+I nacional y estar en situación de poder hacer aportaciones a su desarrollo. A continuación se describirá la aplicación que inspira este diseño, las características de la tecnología empleada y después se detallará el proceso de diseño con especial énfasis en la problemática de las simulaciones electromagnéticas y el rendimiento. Finalmente se resumirá el funcionamiento esperado del circuito diseñado y se presentarán las conclusiones.

II. APLICACIÓN

Una aplicación particularmente interesante para las frecuencias milimétricas es la detección de amenazas ocultas y contrabando. Los sistemas de imagen a estas frecuencias despiertan tanta expectación por su habilidad para ver a través de ropa con resolución espacial suficiente para detectar e identificar armas y explosivos.

Entre otras aplicaciones reseñables se encontraría también el diseño de radares milimétricos como sistemas de imagen para ayudar a los aviones a aterrizar en condiciones de baja visibilidad debido a la alta penetración de las ondas en la niebla. En ambas aplicaciones la amplificación de bajo ruido resulta una función imprescindible.

III. TECNOLOGÍA

El número de fundiciones que ofrecen estas tecnologías es muy limitado. Algunas tienen restringida su actividad a proyectos puramente de investigación sin ofertar productos comerciales, o bien plantean tal cúmulo de requisitos administrativos y unos costos que las hacen inviables. Para continuar con una línea de trabajo anterior se ha elegido la fundición OMMIC, y, en particular, su proceso D007IH. En este proceso se utilizan estructuras metamórficas para conseguir una transición gradual entre en sustrato de GaAs y la capa activa, que contiene In. Los componentes activos están basados en heteroestructuras de GaInAs-InAlAs-

GaInAs-InAlAs con un alto porcentaje de Indio en el canal (70%) lo que proporciona niveles de ruido muy bajos y alta movilidad en el canal, permitiendo una frecuencia máxima de trabajo entorno a 160 GHz.

IV. DISEÑO

Se ha diseñado un modulo de ganancia de bajo ruido, susceptible de ser encadenado con otros idénticos, para alcanzar unos determinados niveles de ganancia. El diseño se basa en dos transistores $4 \times 15 \mu\text{m}$ en configuración cascode. Esta configuración se ha escogido por su mayor ganancia y reducción de área de chip [2-3].

A. Etapa cascode realimentada

La realimentación de una etapa tiene por finalidad equalizar la ganancia en banda y proporcionar estabilidad. Debido a la alta ganancia de los dispositivos MHEMT en baja frecuencia fue necesario realizar una realimentación empleando una resistencia de NiCr entre la fuente y el drenador del transistor en puerta común de la etapa cascode. La inductancia de fuente del primer transistor se ajustó para optima adaptación de ruido, dentro de las restricciones de mínimo tamaño. Para asegurar una correcta polarización de los transistores se requería una capacidad de desacoplo de pequeño valor resuelta mediante un puente dieléctrico entre metales a dos niveles en el lazo de la realimentación. La realimentación junto a la red disipativa R-C sirve para estabilizar el amplificador. La Figura 1 muestra un esquema eléctrico del amplificador.

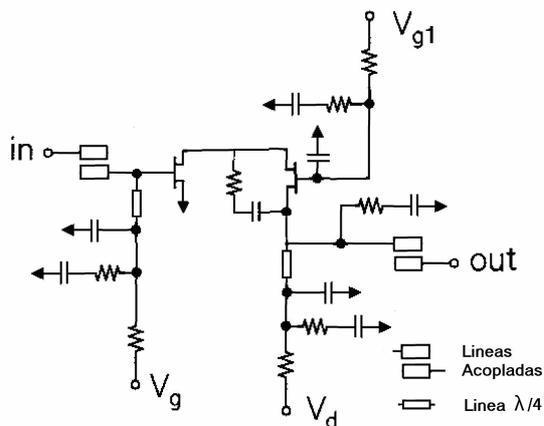


Figura 1: Diagrama esquemático del Amplificador de bajo ruido a 100 GHz

Para los desacoplos de continua de entrada y salida se ha utilizado una estructura de dos líneas acopladas de diferente anchura en sustitución de las redes de adaptación convencionales que hacen uso de stubs en circuito abierto y de condensadores MIM (Metal-Insulator-Metal) pero que son menos apropiados para trabajar a frecuencias milimétricas debido a su sensibilidad a las variaciones tras el proceso de fabricación [4]. El problema se encuentra sobre todo en los condensadores, ya que en la banda de 90 a 100 GHz se requieren valores muy pequeños de capacidad nominal, del mismo orden que las capacidades parásitas, lo que exige un modelado muy preciso para evitar que sean una fuente de incertidumbre en el diseño. La Figura 2 muestra el layout de un detalle de la etapa cascode y la realimentación.

El uso de líneas acopladas permite que la parte real de la impedancia de la red de adaptación pueda ser fácilmente controlada mediante la correcta elección de las anchuras de las líneas y su separación. La parte imaginaria de la impedancia se consigue variando la longitud de las líneas a las que se pueden añadir stubs en abierto en los extremos para conseguir mayor precisión. El ancho de banda que se consigue con esta técnica está típicamente entre el 10% y el 20 %, que resulta suficiente para las aplicaciones de frecuencias milimétricas, para las que este LNA es objeto de estudio.

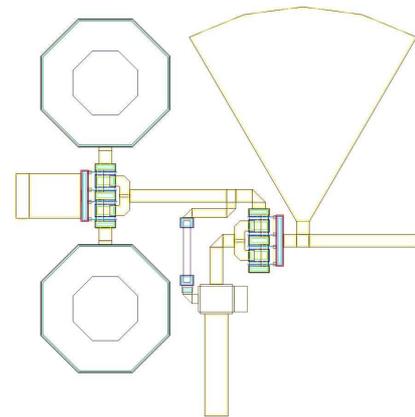


Figura 2: Detalle etapa cascode y realimentación

B. Simulación Electromagnética

Se realizaron simulaciones electromagnéticas de la red de entrada y de salida, así como de la realimentación de la etapa cascode, dado que el funcionamiento del amplificador es muy sensible a ligeras variaciones del comportamiento de estas redes. Por otro lado, también se considera los posibles acoplos entre estructuras que no pueden ser tenidas en cuenta utilizando los modelos esquemáticos. Las simulaciones se han llevado a cabo con Momentum 3D de Agilent integrado en el programa Advanced Design System (ADS). Se ha comprobado que al trabajar a frecuencias del orden de 100 GHz el comportamiento de las diversas redes es ligeramente distinto al simulado con los componentes esquemáticos por lo que el amplificador se ha diseñado en base a minimizar esas diferencias y que afecten lo menos posible.

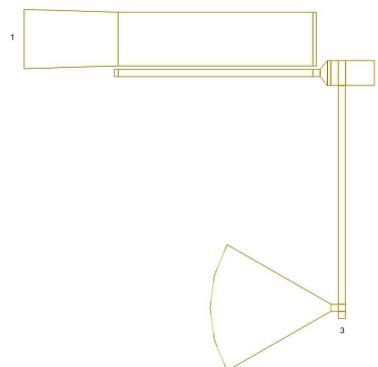


Figura 3: Red adaptación entrada con líneas acopladas y stub radial con línea $\lambda/4$ de la red de polarización

En la Figura 3 se muestra la red de entrada del LNA formada por líneas acopladas. A su derecha aparece la red de polarización, compuesto por un stub radial, que hace la

función de cortocircuito a la frecuencia de operación, junto a un segmento de línea de longitud $\lambda/4$. En la Figura 4 se muestran las diferencias encontradas entre los parámetros S de la red simulada en Momentum y los valores obtenidos con el simulador en esquemático.

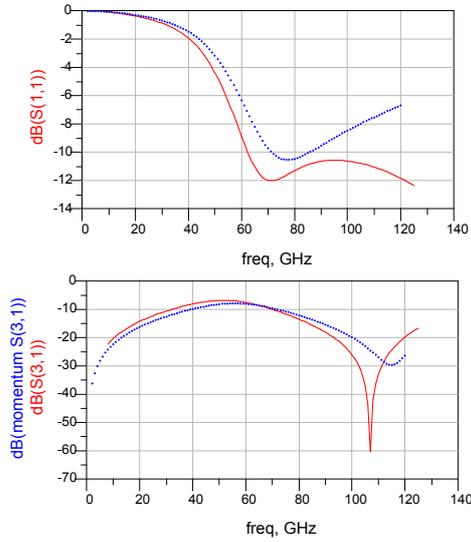


Figura 4: Parámetros S_{11} y S_{31} de la red de entrada con el modelo en esquemático (línea sólida) y usando el simulador electromagnético Momentum (línea de puntos).

C. Funcionamiento esperado

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la simulación basada en los modelos de los componentes y los obtenidos sustituyendo las diferentes redes por sus cajas de parámetros S equivalentes simuladas en Momentum. Las pruebas hacen esperar un resultado de ganancia mínima de 11 dB en la banda de operación con un ruido menor que 2.5 dB (Figura 5). Los parámetros S_{11} y S_{22} reflejan una adaptación a la entrada <-15 dB y a la salida <-8 dB en la banda 94-100 GHz (Figura 6). El análisis de estabilidad del parámetro Mu muestra un valor mayor que la unidad en toda la banda de frecuencias donde es válido el modelo, garantizando la estabilidad incondicional del amplificador (Figura 7). La Figura 8 muestra el layout del circuito.

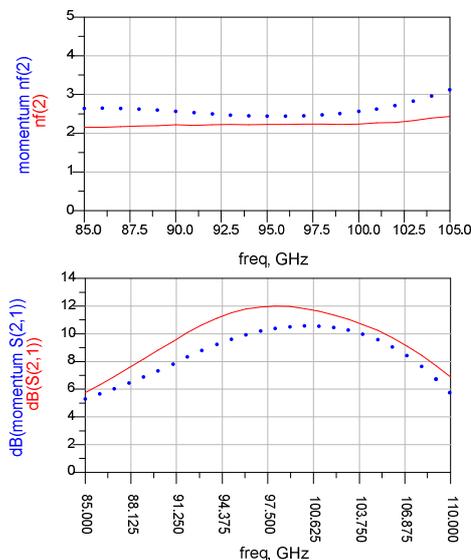


Figura 5: Resultados de ruido y ganancia S_{21} del diseño en esquemático (línea sólida) y Momentum (línea de puntos)

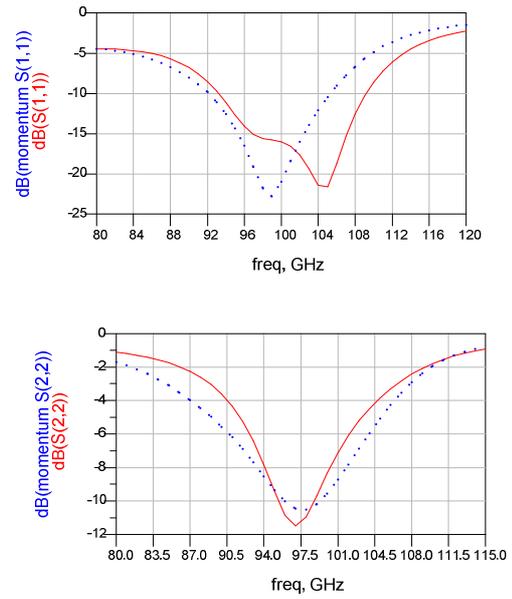


Figura 6: Adaptación a la salida y a la entrada del LNA simulados en esquemático (línea sólida) y Momentum (línea de puntos)

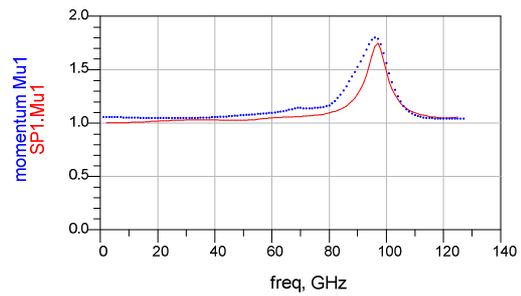


Figura 7: Parámetro de estabilidad $\mu > 1$: estabilidad incondicional a todas las frecuencias.

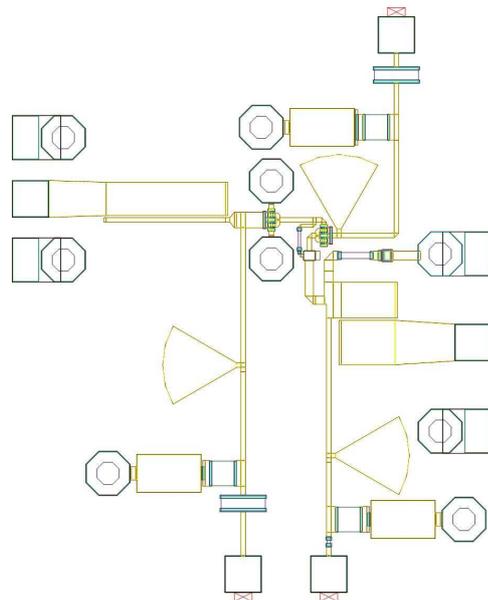


Figura 8: Layout del LNA completo. Tamaño: $1 \times 1.4 \text{ mm}^2$

D. Análisis de Tolerancia

Se han realizado diversos análisis de Montecarlo para prever las dispersiones del funcionamiento en una tirada de circuitos (*run*). Para hacer un análisis de peor caso, con respecto al propuesto por el fabricante, se han añadido las tolerancias de dimensiones de algunas líneas consideradas críticas, suponiéndoles una estadística gaussiana. Para incorporar la variación de la tensión de estrangulamiento ($V_{pinch-off}$) y la corriente de saturación (I_{ds}) se ha reemplazado el modelo lineal tabulado para puntos fijos de polarización por el modelo no lineal de la fundición, recientemente disponible. El cambio en el modelo de los transistores no ha ocasionado variación sustancial en las simulaciones, lo que es valorado como un indicador de la robustez del diseño. Las figuras 9-11 muestran los resultados de estos análisis.

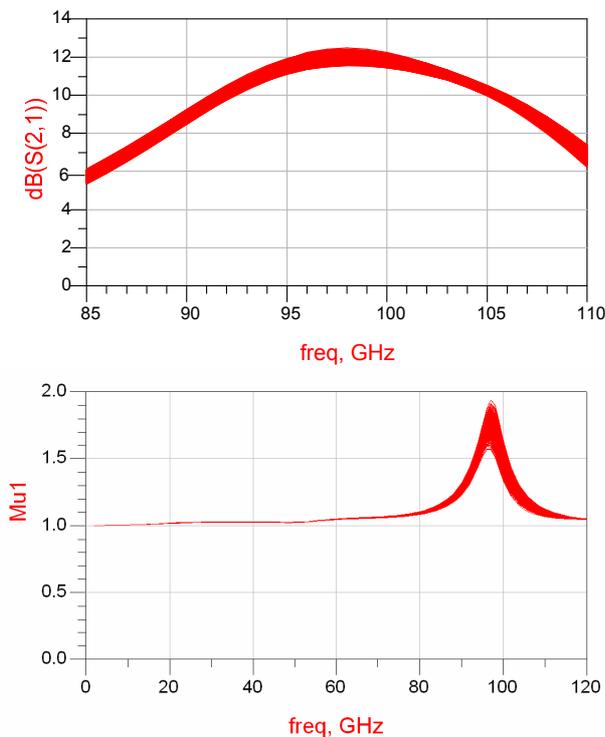


Figura 9: Análisis de Yield de los parámetros S_{21} y el parámetro de estabilidad μ_1

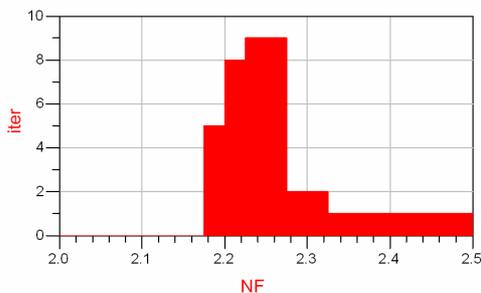


Figura 10: Histograma con los valores de ruido más probables tras el análisis de Yield en la banda desde 94 GHz a 100 GHz

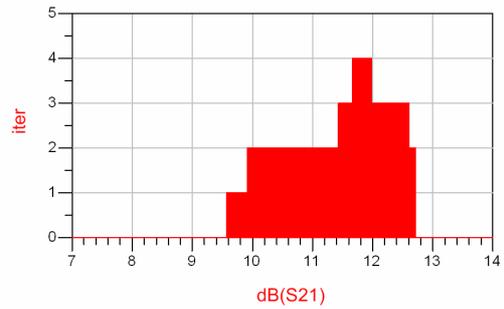


Figura 11: Histograma con los valores de ganancia más probables tras el análisis de Yield en la banda desde 94 GHz a 100 GHz

V. CONCLUSIONES

Se presenta el diseño de un LNA de 94 GHz a 100 GHz, formado por una etapa cascode y construido en una tecnología con transistores MHEMT de 70 nm de longitud de puerta. Los resultados de simulación indican una figura de ruido mínima de 2.2 dB con una ganancia mayor de 11 dB en la banda 94-100 GHz, siendo el punto más alto 12 dB a 97 GHz. Se han tomado todas las medidas posibles para intentar garantizar la mínima desviación del funcionamiento real con respecto a las simulaciones, aspecto mucho más crítico en la banda de frecuencias que nos ocupa, que en bandas más bajas de microondas. Para ello se ha buscado la mayor coincidencia entre simulaciones electromagnéticas y los correspondientes modelos equivalentes de elementos pasivos. También se han usado todos los modelos disponibles de los transistores (lineales y no lineales) y se han considerado sus tolerancias. Este diseño muestra las buenas expectativas de rendimiento de los transistores metamórficos sobre sustrato de GaAs para aplicaciones en frecuencias milimétricas y de THz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación proporcionada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) a través de los proyectos TEC2008-06684-C03-01, CONSOLIDER-INGENIO 2010 CSD2008-00068 y AYA2007-68058-C03-02.

REFERENCIAS

- [1] Gunnarsson, S.E.; Wadefalk, N.; Svedin, J.; Cherednichenko, S.; Angelov, I.; Zirath, H.; Kallfass, I.; Leuther, A.; A 220 GHz Single-Chip Receiver MMIC With Integrated Antenna, *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, Volume 18, Issue 4, April 2008 Page(s):284 - 286
- [2] Tessmann, A. Leuther, A. Schwoerer, C. Massler, H. Kudszus, S. Reinert, W. Schlechtweg, M.; "A coplanar 94 GHz low-noise amplifier MMIC using 0.07 μm metamorphic cascode HEMTs", *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International* pp.1581-1584 June 2003
- [3] M. Schlechtweg et al., "110 GHz Amplifiers Based on Compact Coplanar W-Band Receiver Technology", 1995 *IEEE GoAs IC Symposium Digest*, pp. 214-217, Oct. 1995.
- [4] Morteza Abbasi, Herbert Zirath, Ilcho Angelov., "Q-, V-, and W-band power amplifiers utilizing coupled lines for impedance matching", *Microwave Symposium Digest, 2008 IEEE MTT-S International* pp. 863-866 June 2008