

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

VII.1. INTRODUCCIÓN

La extensión del margen frecuencial del sistema de medida ruido, utilizado para extraer los parámetros de ruido de FETs a frecuencias de microondas ha implicado una serie de mejoras en dicho sistema y en la metodología utilizada para calibrarlo, así como la propuesta de fuentes de ruido alternativas. Respecto a la extracción de los parámetros de ruido de un FET aplicando la técnica F_{50} , se ha propuesto un modelo en pequeña señal y ruido que tiene en cuenta los efectos distribuidos de los electrodos de puerta, drenador y fuente.

Así, factores como el incremento de las pérdidas de los componentes del sistema de medida de ruido, menor nivel de la relación de ruido en exceso (ENR) de la fuente de ruido utilizada para calibrar dicho sistema, mayor sensibilidad a la precisión en la medida de potencias, dieron origen a una serie de tareas desarrolladas en el presente trabajo de Tesis. De la misma manera, se consideró el uso de un modelo en pequeña señal y ruido que tenga en cuenta los efectos distribuidos de los electrodos del un transistor de efecto de campo (FET). Todo esto con el objetivo de contar con un sistema de medida de ruido que en conjunto con la técnica F_{50} nos permita determinar los parámetros de ruido de una manera más fiable, consumiendo el menor tiempo posible al realizar la sesión medida, utilizando para ello un sistema que esté conformado con elementos habituales en laboratorios de universidades y centros de investigación, además que la técnica de extracción sea robusta frente a errores de medida.

VII.2. CONCLUSIONES GENERALES

Se han implementado y caracterizado los sistemas de medida de ruido en los márgenes de frecuencia de 2-40 GHz, de 33-50 GHz y de 50-75 GHz. Los sistemas de 2-40 GHz y en la banda Q, de 33-50 GHz, están montados para medidas de dispositivos en oblea. El sistema en la banda V, de 50-75 GHz, se ha montado en guía de onda, con la finalidad de implementarlo también para medidas en oblea. El factor de ruido de los receptores de dichos sistema está entre 4 y 7 dB para el sistema de 2-40 GHz, entre 8 y 12 dB en el de la banda Q y entre 3 y 6 dB en la banda V. En este último sistema de medida se prevé que dicho factor aumente

alrededor de 2 dB cuando se tenga la configuración de medida en oblea, debido a tramos de guías de onda y sondas de prueba que se incluirán para generar dicho sistema.

Para calibrar el receptor de los sistemas de medida de ruido se propone un procedimiento que utiliza lecturas de potencia de ruido de dos cargas con diferente temperatura de ruido y su correspondiente coeficiente de reflexión. De esta forma, a partir de expresiones aproximadas se calculan los cuatro parámetros de ruido del receptor, sin restricciones en el coeficiente de reflexión de las cargas utilizadas, mientras que la constante de ganancia se obtiene de la relación de las potencias de ruido medidas, ponderadas por el factor de desadaptación entre el receptor y la carga presentada a la entrada de éste.

Para reducir la incertidumbre en la medida de potencia se ha utilizado un detector externo a un analizador de espectros, empleado inicialmente para tomar las lecturas de potencia de ruido. En el caso del sistema de 50-75 GHz, se ha utilizado un sensor de potencia comercial, que tiene mayor dinámico (-70dBm a +20dBm), que en conjunto con el medidor de potencia la lectura de éstas es más rápida.

Para tener un nivel alto de potencia de ruido en el plano coplanar del receptor, se ha propuesto el uso de fuentes de ruido en oblea o tipo coplanares. En este sentido, se han propuesto dos fuentes de ruido de tipo coplanar: un *cold-FET* polarizado en inversa y un diodo en avalancha. Para caracterizar la relación de ruido en exceso, ENR, de dichas fuentes de ruido se utiliza la temperatura de ruido medida en conjunto con un modelo de ruido que permite reducir el rizado de medida superpuesto al ENR. Para extraer el modelo de ruido se ha obtenido previamente un modelo en pequeña señal de dispositivo en cuestión. De acuerdo a los resultados obtenidos en la estimación de los parámetros S se puede concluir que el modelo propuesto para cada uno de los dispositivos predice adecuadamente su comportamiento en pequeña señal. Por otra parte, respecto a los resultados del ENR estimado de los dispositivos caracterizados, se observa que con el diodo en avalancha se tienen niveles de ENR superiores a 20 dB, llegando a valores de hasta 33 dB, mientras que con el *cold-FET* se tienen valores entre 8 y 20 dB. La respuesta del ENR del *cold-FET* es monótonamente decreciente y la del ENR de diodo tiene un comportamiento paso-bajo.

Las fuentes de ruido coplanares se han utilizado para calibrar el receptor del sistema de medida de ruido. La fuente de ruido coplanar se considera como el estado en caliente y como estado en frío se utiliza una carga pasiva de referencia a temperatura ambiente. Los resultados de calibración se compararon con una calibración con fuente de ruido coaxial, observando coincidencia entre los resultados de los parámetros de ruido y la constante de ganancia, e incluso cierta reducción en el rizado de medida cuando se utiliza el diodo en avalancha. Con los resultados de calibración de segunda etapa se ha medido el factor de ruido de un transistor y se han extraído sus parámetros de ruido aplicando la técnica F_{50} . En este caso se observa que el rizado de medida del factor de ruido es menor para las fuentes de ruido coplanares o en oblea, lo cual se refleja en la extracción de los parámetros de ruido, mostrando ciertas diferencias respecto a los estimados utilizando medidas con la fuente de ruido coaxial. El que disminuya dicho rizado de medida se debe a que con las fuentes de ruido en oblea se genera un mayor nivel de potencia de ruido, teniendo así mayor diferencia entre los estados caliente y frío, generados por el *cold-FET* o el diodo en avalancha y carga de referencia, respectivamente. Además, la aplicación de las fuentes de ruido coplanares ha permitido ilustrar la calibración del receptor con expresiones aproximadas para coeficientes de reflexión que difieren entre el estado frío y caliente. De esta forma se muestra la viabilidad del uso de los dispositivos propuestos, *cold-FET* y diodo en avalancha, como fuentes de ruido coplanares, particularmente el diodo en avalancha.

También se ha presentado un modelo en pequeña señal y de ruido que tiene en cuenta los efectos distribuido de los electrodos del FET. Para ello se ha descrito el desarrollo de dichos modelos (en pequeña señal y de ruido), determinando las expresiones de los elementos del

circuito equivalente y de las densidades espectrales de las fuentes de ruido intrínsecas, las cuales son representadas mediante la matriz de correlación intrínseca. Se ha considerado un modelo híbrido para modelar el comportamiento de ruido de las fuentes intrínsecas. Para obtener la expresión de la matriz de correlación intrínseca en función de los elementos del circuito equivalente y del factor de ruido medido se ha utilizado un procedimiento basado en el análisis de matrices de correlación. Asimismo, se ha aplicado la técnica F_{50} para estimar los elementos de la matriz de correlación intrínseca, considerando que tienen una respuesta suave en frecuencia y que pueden ser interpolados mediante un polinomio en frecuencia, en este caso de orden 1. Se ha aplicado el modelo propuesto en pequeña señal a PHEMTs y HEMTs, comparando los parámetros S estimados con los parámetros S medidos, observando concordancia entre ellos. Asimismo, se han extraído los parámetros de ruido de dichos transistores, observando que estos tienen ciertas diferencias respecto a los resultados obtenidos al utilizar un modelo concentrado, particularmente a frecuencias altas (> 20 GHz). Lo anterior se atribuye a que los modelos de ruido que se están utilizando son diferentes, básicamente porque en el modelo distribuido se tiene en cuenta la contribución térmica de los electrodos del FET. No obstante, se observa que los efectos distribuidos de los electrodos empiezan a ser importantes a frecuencias superiores a 20 GHz en función del ancho de puerta del FET. Por otro lado, se ha propuesto un modelo simplificado de las fuentes de ruido intrínsecas (modelo de temperaturas), observando diferencias en los resultados de la extracción los parámetros de ruido respecto a los obtenidos con el modelo híbrido. Tales diferencias se atribuyen a las simplificaciones asumidas en el modelo de temperaturas, en donde T_g se considera igual a T_a , que de acuerdo a los resultados parece ser mayor. La otra suposición que se hace es que las fuentes de ruido intrínsecas no están correladas, pero al aplicar el modelo híbrido se observa que si existe cierta correlación entre estas fuentes, básicamente real. Así, de acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que al aplicar la técnica F_{50} a un modelo distribuido se pueden estimar los parámetros de ruido sin necesidad de utilizar un *tuner*, teniendo en cuenta los efectos distribuidos de los electrodos del FET. Para ello, basta con conocer el factor de ruido del transistor en diferentes puntos de frecuencia, para una impedancia de fuente determinada.

Se ha propuesto un procedimiento para calcular simultáneamente los elementos del circuito equivalente y los parámetros de ruido de un HBT, a partir de la minimización de las diferencias entre los parámetros S medidos y estimados y del factor de ruido medido y estimado. Además, se aplica la técnica F_{50} para obtener un término de error adicional, en cual se define en función de las diferencias de los parámetros de ruido estimados con dicha técnica y los obtenidos mediante las expresiones en función de los elementos del circuito equivalente. Esta optimización conjunta ayuda a resolver el problema de mínimos locales en optimización multivariable. Dicho procedimiento permite extraer los elementos del circuito equivalente en pequeña señal y los parámetros de ruido de un HBT, a partir de medidas de parámetros S y del factor de ruido.

Aunque la caracterización de una transición de guía de onda coplanar a microstrip se mencionó brevemente en el apartado de caracterización del ENR del diodo en avalancha, y el desarrollo en detalle se dejó en un Anexo, vale la pena hacer algunos comentarios al respecto. Para caracterizar dicha transición se ha propuesto un desarrollo matemático similar al de las técnicas TRL para calibrar el analizador de redes. Para ello se utilizan medidas de los parámetros S de dos líneas de transmisión tipo microstrip de diferente longitud, que incluyen dos transiciones, una en cada extremo. Dicho procedimiento permite extraer los elementos de la matriz de transmisión de la transición, transformándola posteriormente a parámetros S. Los resultados de los parámetros S estimados mediante el procedimiento propuesto coinciden con simulaciones electromagnéticas desarrolladas. Sin embargo, a baja frecuencia se observan ligeras diferencias en la adaptación de la transición, por el extremo coplanar. Esto se atribuye

a las pérdidas de la propia estructura, acentuadas por el *via-hole* que se utiliza para hacer el contacto de masas, a baja frecuencia, entre el plano coplanar y microstrip.

VII.3. CONTRIBUCIONES DE ESTA TESIS

En esta tesis se han implementado un sistema de medida de ruido en oblea, o tipo coplanar, en el margen de frecuencias de 2-50 GHz, y en guía de onda de 50-75 GHz.

Para disminuir la incertidumbre en la medida de potencia se ha implementado el uso de un detector externo a un analizador de espectros, utilizado inicialmente como medidor de potencia, con la posterior adopción de un sensor de potencia comercial para incrementar el rango dinámico.

Para incrementar el nivel de ENR se han propuesto fuentes de ruido tipo coplanar, las que se han caracterizado para determinar el ENR directamente en el plano de sondas coplanares.

Se ha presentado un método para calcular los parámetros de ruido del receptor utilizando expresiones aproximadas, que como datos requiere únicamente la medida de potencia de dos cargas a diferente temperatura, sin restricciones en su coeficiente de reflexión.

Se ha propuesto un modelo de pequeña señal y ruido de un FET en donde se tienen en cuenta los efectos distribuidos de los electrodos de puerta, drenador y fuente.

Como una aplicación de la técnica F_{50} , ésta se ha implementado, en conjunto con un modelo en pequeña señal y de ruido, para extraer simultáneamente los elementos del circuito equivalente y parámetros de ruido de un transistor bipolar de heterounión (HBT).

Además, se ha propuesto un método para caracterizar transiciones en guía de onda coplanar a microstrip, utilizando para ello medidas de los parámetros S de dos líneas de transmisión tipo microstrip de diferente longitud, que incluyen dos transiciones, una en cada extremo.

VII.4. LÍNEAS FUTURAS

Con base en los resultados obtenidos respecto a la caracterización de fuentes de ruido coplanares, al desarrollo de un modelo distribuido en pequeña señal y de ruido para FETs y el modelo en pequeña señal y ruido de HBTs. Así mismo, en vista de la implementación del sistema de medida de parámetros S y ruido en oblea, se pueden establecer algunas líneas de investigación para aprovechar en un futuro cercano las conclusiones y resultados alcanzados.

- Implementación de un sistema de medida de parámetros S y de ruido en la banda V para la caracterización de dispositivos en oblea.
- Desarrollo de técnicas alternativas para caracterizar el receptor de dicho sistema, por ejemplo, el uso de temperaturas variables en lugar de coeficientes de reflexión variables, o bien aplicar el principio de calibración de radiómetros de Dicke para calibrar el receptor y medir el dispositivo de forma aproximadamente simultánea, disminuyendo de esta manera derivas en el tiempo de la ganancia y temperatura del sistema de medida.
- Extensión de la aplicación de las fuentes coplanares a frecuencias de ondas milimétricas, como es el caso del sistema de medida en la banda V.
- Aplicación del modelo distribuido a transistores con diferente ancho de puerta y número de dedos, a frecuencias milimétricas, para poder hacer un estudio más detallado en función de la frecuencia y tamaño de los FETs.

- Desarrollar modelos de los FETs que, además de incluir los efectos distribuidos en los electrodos, incluyan efectos distribuidos bajo el canal, que de acuerdo a literatura presentada previamente, se aproximan más al comportamiento físico del dispositivo.
- Estudiar con mayor detalle la extracción en pequeña señal de los HBTs, de tal forma que su caracterización se pueda hacer siguiendo un procedimiento más metódico.