

# Caracterización de Diodos Schottky para Banda W

K. Zeljami<sup>(1)</sup>, J. Gutiérrez<sup>(1)</sup>, J. P. Pascual<sup>(1)</sup>, T. Fernández<sup>(1)</sup>, A. Tazón<sup>(1)</sup>, M. Boussouis<sup>(2)</sup>

[kaoutar.zeljami@unican.es](mailto:kaoutar.zeljami@unican.es), [jessica.gutierrez@unican.es](mailto:jessica.gutierrez@unican.es), [juanpablo.pascual@unican.es](mailto:juanpablo.pascual@unican.es), [tomas.fernandez@unican.es](mailto:tomas.fernandez@unican.es),  
[antonio.tazon@unican.es](mailto:antonio.tazon@unican.es), [boussouis@menara.ma](mailto:boussouis@menara.ma)

<sup>(1)</sup>Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria

<sup>(2)</sup>Dpto. de físicas Universidad Abdel Malek Essaadi, Tetuán, Marruecos

**Abstract-** In this paper, a comparison between two different techniques: low-frequency (1 MHz) and microwave frequency up to 10 GHz measurements, is presented in order to obtain the apparent capacitance of Single Anode Schottky Diodes fabricated by the University of Virginia. Moreover, W-band S-parameters measurements have been performed and presented in this work. All measurements are done to obtain a complete large signal equivalent circuit model suitable for the device under consideration.

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de aplicaciones en la banda de frecuencias de terahercios (THz) (0.1THz – 10THz) es uno de los temas que más interés están cobrando en los últimos años en la comunidad de microondas. Sin ninguna duda la aplicación más importante de esta tecnología es la detección de objetos por motivos de seguridad. Esto es debido a que la mayoría de la ropa y los envoltorios son razonablemente transparentes a estas frecuencias, mientras que al mismo tiempo se puede obtener una imagen con alta resolución. En la actualidad se está haciendo un gran esfuerzo en diseñar sistemas de formación de imágenes a la frecuencia de THz.

A tan altas frecuencias, el diodo Schottky de AsGa continúa siendo a día de hoy la tecnología dominante. En la literatura actual se pueden encontrar diversas propuestas para el desarrollo de mezcladores y multiplicadores de frecuencia de hasta varios THz [1-4].

Los receptores de bajo ruido en las bandas de microondas y ondas milimétricas desde 1 GHz hasta más de 100 GHz, se realizan actualmente con diodos Schottky de barrera baja, fabricados con Arseniuro de Galio (AsGa); una de las principales ventajas derivada de la utilización de este material, es el bajo ruido que introducen en las bandas de frecuencia antes mencionadas.

Este artículo plantea un procedimiento de caracterización de los diodos schottky W Band Single Anode de la Universidad de Virginia [5], basándonos en diferentes medidas: una comparación entre dos técnicas de medidas de la capacidad C-V del diodo, adecuadas para extracción de los parámetros de la capacidad no lineal: en baja frecuencia con LCR meter y a partir de medidas de los parámetros S y continuando con un trabajo anterior [6] en el que se presentó el modelado de estos diodos hasta 45 GHz. También presentamos las medidas de los parámetros de scattering en la banda W del mismo diodo, un paso imprescindible para la obtención del modelo circuital completo del diodo, por ser el elemento clave de los detectores, multiplicadores y mezcladores de alta frecuencia.

## II. MEDIDAS DE LA CAPACIDAD

El modelado de la unión en los diodos no es suficiente para el diseño de los dispositivos schottky, tales como mezcladores, detectores y multiplicadores de frecuencia, sin embargo la calidad de la unión fija el límite fundamental para el funcionamiento de dichos dispositivos. Con el objetivo de tener en cuenta tanto la parte lineal como la parte no lineal, se tiene que definir un modelo de tipo circuito equivalente. Dicho esto, el modelo equivalente depende del tipo del diodo y también de la forma cómo esta montado para medirlo. La Fig. 1 presenta un ejemplo de un circuito equivalente para un diodo schottky, la parte del modelo de la unión del diodo (se muestra como una caja) que contiene los elemento clave de la unión del diodo que son la capacidad de la unión  $C_{j0}$  y la resistencia  $r_j$ . El circuito RC creado por la capacidad y la resistencia es un elemento clave para el funcionamiento del diodo en más alta frecuencia El circuito contiene también los elementos extrínsecos que modelan el encapsulado del diodo, como la inductancia del dedo del Anodo y la capacidad “pad-to-pad”.

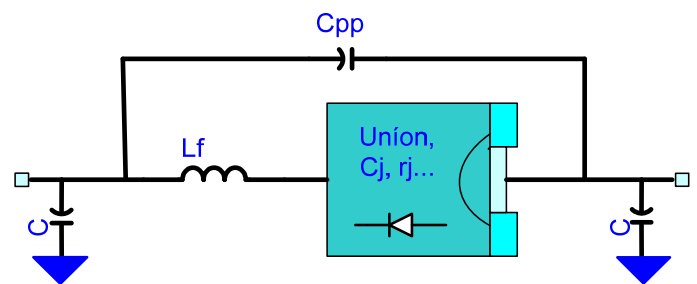


Fig. 1. Modelo Equivalente del Diodo Schottky

Hemos tomado la expresión habitual de la relación capacidad-tensión del diodo, que viene dada por la ecuación (1), donde  $C_{j0}$  es la capacidad de la región de deplexión para una polarización de cero,  $V_d$  la tensión de polarización del diodo y  $\phi_{bi}$  es el potencial de contacto de la unión Schottky. La capacidad total de un diodo Schottky se puede dividir en la capacidad de unión y la capacidad parasita.

Utilizando la capacidad de la unión, que predomina en polarización inversa [7], la capacidad total se puede expresar como [8] [9]:

$$C_j(V) = \frac{dQ}{dV} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V_d}{\phi_{bi}}\right)^\gamma} \quad (1)$$

$$C_{total} = \frac{C_{j0}}{\sqrt{\left(1 - \frac{V_d}{\phi_{bi}}\right)}} + C_{pp} \quad (2)$$

La capacidad total del diodo se midió utilizando un medidor LCR E4980A de Agilent. La frecuencia de medida se fija en 1 MHz, y el intervalo de polarización de -3 a 0V. La medida se realizó en un diodo montado en flip-chip en la estructura de prueba mostrada en la Fig. 2.

Aunque los diodos discretos son generalmente medidos mediante hilos, tratándose de un diodo de muy alta frecuencia se prefieren las soldaduras en flip-chip para disminuir los elementos parásitos.

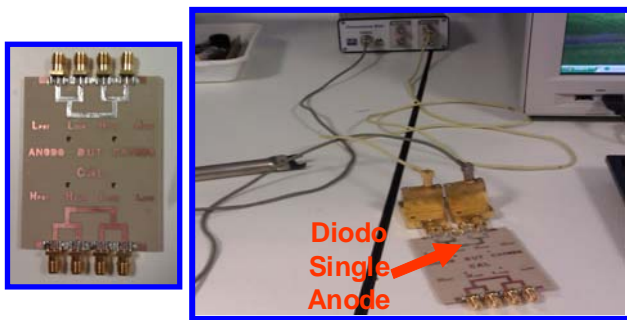


Fig. 2. Test fixture para Medir la capacidad total del Diodo

La calibración se realizó mediante la medida de la capacidad de la estructura de prueba sin colocar el diodo, esto representa la corrección de capacidad parásita para la medida. El resultado de la medida y el modelo de la capacidad total del diodo se muestra en la Fig. 3. La extracción de los parámetros del modelo  $C_{j0}$ ,  $\phi_{bi}$  y  $C_{pp}$  se realizó mediante el ajuste de la ecuación 2, partiendo de unos valores iniciales típicos para este tipo de diodos y definiendo la función de error como la diferencia entre la capacidad medida y la calculada según la ecuación de la capacidad total 2 característica del diodo.

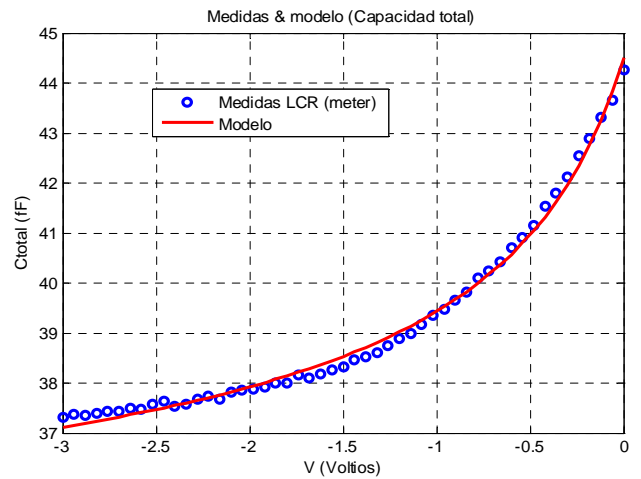


Fig. 3. Representación de la Capacidad total del Diodo C-V, Medidas y Modelado

Cuando la tensión de polarización inversa disminuye (en valor absoluto) acercándose a cero, la capacidad de la unión aumenta, sin embargo, esta capacidad continúa aumentando a medida que la tensión de polarización directa se aumenta por encima cero voltios hasta llegar al valor de su potencial barrera. El ajuste de los parámetros se ha realizado mediante un programa desarrollado en Matlab™, partiendo de unos valores iniciales típicos para los parámetros buscados, y definiendo una función de error como la diferencia entre las capacidades medidas y las calculadas según la ecuación de la capacidad característica del diodo 2.

A continuación, se presentará una comparativa entre la medidas de capacidad del diodo con el LCR meter y las medidas a partir de los parámetros de Scattering del diodo en baja frecuencia (3 GHz hasta 10 GHz), teniendo en cuenta el hecho de que en baja frecuencia, y cuando el diodo no está conduciendo, se representa mediante un circuito equivalente formado por una red en pi de capacidades [10]. La magnitud del coeficiente de transmisión sólo depende del valor de la capacidad total, de esta forma, con el ajuste del parámetro de transmisión en las medidas de los parámetros S del diodo tendremos una estimación real del valor de la capacidad total del diodo, que se muestra en la Fig. 4.

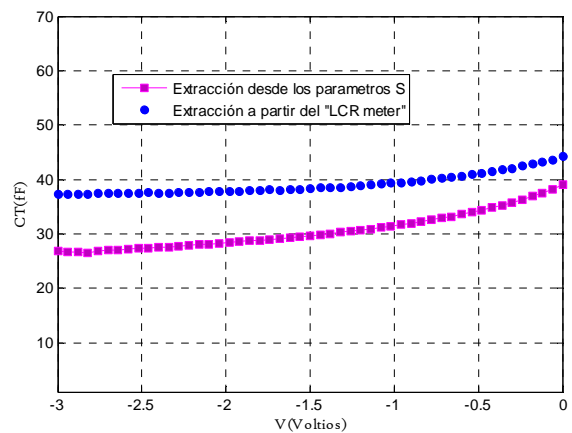


Fig. 4. Comparación de las medidas de la Capacidad total del Diodo C-V, del LCR meter y a partir de los parámetros de Scattering

### III. SISTEMA DE MEDIDA DE PARAMETROS S

El sistema de medida empleado se basa en dos módulos de alta frecuencia: un módulo T/R (transmisión/reflexión) y un módulo R (recepción) que trabajan de 75 a 110 GHz y están conectados a un Analizador de Redes PNA-X. Para medir conjuntamente los parámetros de transmisión y reflexión hemos empleado un equipo de medidas formado por las dos cabezas extensoras mencionadas antes, las transiciones guía de onda a coaxial y cables de 1 mm, que nos permiten medir en toda la banda W (75-110GHz) y finalmente, una sondas de prueba coplanares Modelo 110H de PicoProbe para medir en oblea (on-wafer), con un espaciamiento (“pitch”) de 125  $\mu\text{m}$ . Las puntas de medida sirven como adaptadores entre los cables y las superficies de contacto (“Pads”) de la estructura de medida. El equipo de medida se puede ver en la Fig. 5, donde se muestra la foto del diodo conectado con las dos transiciones de Jmicro mediante hilos de oro de diámetro 17  $\mu\text{m}$ , para medir en oblea los parámetros de scattering en la banda W (75-110) GHz.

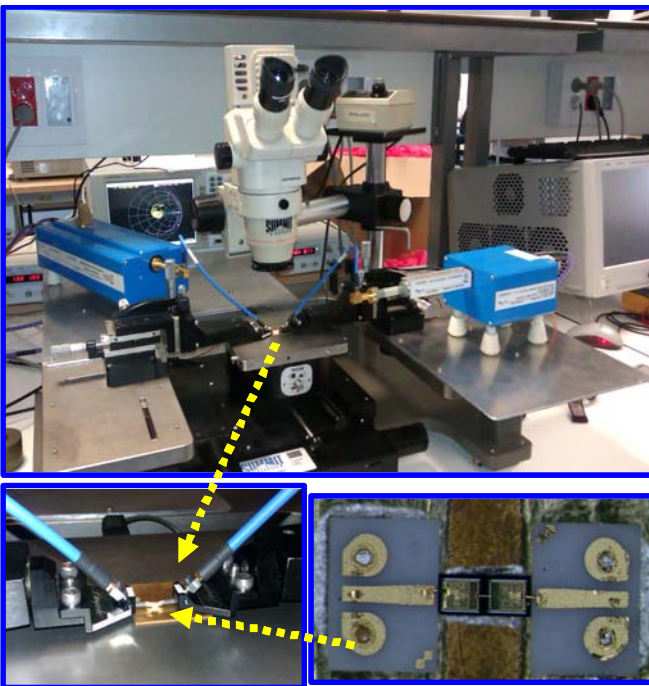


Fig. 5. Set Up de Medidas de los Parámetros de Scattering de los Diodos en la banda W

Para la calibración hemos empleado el procedimiento genérico (Cascade Probe LRM), que sitúa los planos de medida en el lugar de posicionamiento de las puntas. Posteriormente, el plano de referencia podrá ser cambiado de posición para poder medir el montaje teniendo en cuenta los efectos de las dos transiciones CPW-M y del hilo. Para calibrar el sistema en el plano de las sondas coplanares, hemos utilizado una calibración LRRM [11] y estándares coplanares (ISS 101-190 de Cascade 38286).

Se realizó una calibración llamada por el equipo “Enhance Response”, adecuada para el hecho de que tenemos dos cabezales diferentes para medir en la banda W. Se trata de

una calibración SOLT, para corregir la influencia de los cables y obtener los parámetros de Scattering de las dos transiciones con el hilo de oro de conexión.

### IV. RESULTADOS

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de los parámetros de de la capacidad del diodo utilizado mediante LCR meter.

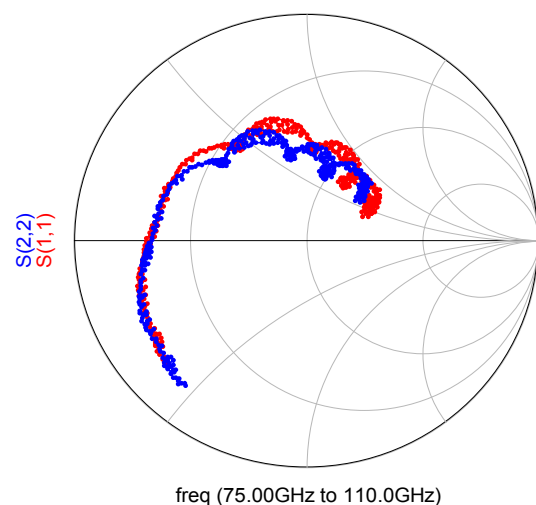
La capacidad parasita obtenida del LCR meter es mayor que la obtenida utilizando las medidas de los parámetros S. Esto puede ser debido al contacto del diodo con las líneas microstrip del test fixture utilizado [10], que puede provocar la aparición de una capacidad parasita grande y que influya y afecte a la propia medida de las capacidades del diodo.

Respecto al resto de los parámetros, parece que son más fiables las medidas de las capacidades del diodo utilizando los parámetros “S” dependientes del voltaje que las medidas realizadas empleando el LCR meter, puesto que con el primer método, las capacidades se miden a unas frecuencias que son mucho mas cercanas a las aplicaciones reales y tienen en cuenta otros fenómenos de alta frecuencia, siendo los resultados más cercanos a los valores dados por el fabricante (Datasheet): una capacidad total (33-38) fF y una parasita de 15 fF.

Parámetro	LCR meter	Parámetros S
$C_{total\_med}$ (fF)	44	39
$C_{j0\_med}$ (fF)	13.72	24
$C_p\_med$ (fF)	31.24	15
$\phi_{bi}$ (V)	0.67	0.9

Tabla. 1 Extracción de los parámetros de la capacidad total del diodo con LCR meter, y a partir de los parámetros de Scattering

Las medidas de los parámetros de Scattering, llevadas a cabo en la banda de frecuencias de 75-110 GHz, se muestran en la Fig. 6:



freq (75.00GHz to 110.00GHz)

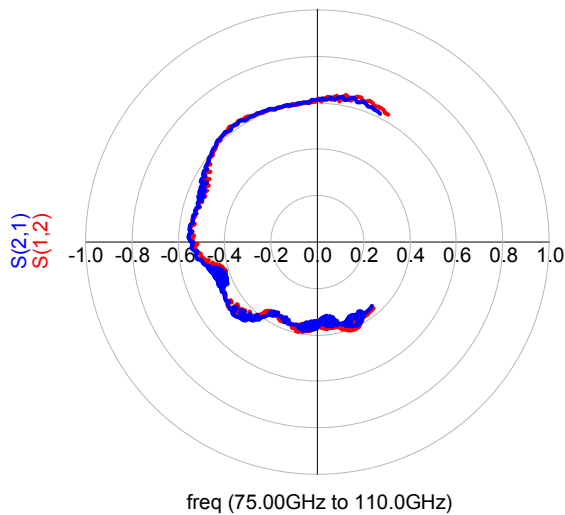


Fig. 6. Medidas de Los parámetros de Scattering del diodo en la banda W. Condiciones de polarización:  $V_d=0$  V.

## V. CONCLUSIONES

Este trabajo se ha realizado en dos fases. La primera fase ha consistido en la presentación y aplicación de dos técnicas de determinación de la capacidad del diodo Schottky a baja frecuencia (1 MHz, LCR meter) y a frecuencias de Microondas (3-10 GHz). Se considera que la extracción a partir de los parámetros S ofrece una estimación más precisa de la capacidad no lineal y la parásita del diodo, además de evitar también los problemas potenciales de medidas a baja frecuencia.

En la segunda fase, se han presentado las medidas en la banda W de los diodos Schottky, fabricados por la Universidad de Virginia, para operar hasta 110 GHz, lo cual era el objetivo principal de este trabajo. Estas medidas se emplearán como punto de partida para modelar la respuesta de este tipo de dispositivos hasta 110 GHz basándonos en el modelo del mismo diodo hasta 45 GHz [6].

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida del Ministerio de Ciencia y Economía así como de fondos FEDER a través de los proyectos CONSOLIDER CSD2008-00068, TEC2011-29126-C03-01 y TEC2011-29264-C03-01, y al Gobierno Regional de Cantabria por el proyecto "Detección Tumoral precoz en Tejidos Vesicales y Renales por medio de Sensores No Intrusivos a Frecuencias de Microondas y THz" dentro de los cuales se han obtenido y desarrollado todos los resultados que se presentan en este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] Manuel Rodríguez-Gironés Arbolí, "Monolithic Integration of non linear for Terahertz Applications". Tesis Doctoral 2003. Universidad de Darmstadt. Shaker Verlag.
- [2] J. L. Hesler, "Planar Schottky diodes in submillimeter-wavelength waveguide receivers," Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, University of Virginia, 1996, 173 p.

- [3] B. Thomas, "Etude et réalisation d'une tête de réception hétérodyne en ondes submillimétrique pour l'étude des atmosphères et surfaces de planètes", PhD dissertation, LERMA-Observatoire de Paris, France, December 2004
- [4] D.Porterfield. Millimeter-Wave Planar Varactor Frequency Doublers. PhD dissertation 1998.
- [5] www.virginiadiodes.com
- [6] K.Zeljami, T.Fernández, J.P Pascual, A Tazón, M.Boussouis, "Modelado de Los Diodos Schottky para Aplicaciones a Frecuencias de Terahercios" URSI 2010. Bilbao
- [7] A. Maestrini, " Modélisation et Conception de Multiplicateurs de fréquences utilisant des diodes planaires aux longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques ", Février 1991
- [8] S. M. Sze, Semiconductor Devices Physics and Technology, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [9] S. A. Maas, Microwave Mixers, 2nd ed., Artech House, Inc., 1993.
- [10] Tero Kiuru, Krista Dahlberg, Juha Mallat, and Antti V. Räsänen "Comparison of Low-Frequency and Microwave Frequency Capacitance Determination Techniques for Mm-Wave Schottky Diodes" A.V.; Narhi, T pp-53-56, 2011
- [11] F. Purroy, and L. Pradell "New theoretical analysis of the LRRM calibration technique for vector network analyzers," Transactions of instrumentation and Measurement, Vol.50, No.5, pp.1307-1314, Oct. 2001