

Modelado de Diodos Schottky Para Aplicaciones a Frecuencias de Terahercios

Kaoutar Zeljami⁽¹⁾, Tomás Fernández⁽¹⁾, Juan Pablo Pascual⁽¹⁾, Antonio Tazón⁽¹⁾, Mohamed Boussouis⁽²⁾

zeljamik@unican.es, tomas.fernandez@unican.es, pablo.pascual@unican.es, antonio.tazon@unican.es, boussouis@menara.ma

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria, Plaza de la Ciencia, 39005, Santander.

⁽²⁾ Dpt. de físicas Universidad Abdel Malek Essaadi, Tetuán, Marruecos

Abstract- Schottky diodes fabricated by the University of Virginia in USA have been subject of intense recent investigation and have emerged as attractive candidates at THz frequencies. Single Schottky diodes have junctions with extremely low junction capacitance, and low series resistance which makes them extremely well-suited for commutating mixer circuits in which ideal switching behaviour is highly desirable [1]. Schottky diodes also offer lower forward voltage compared to an otherwise equivalent p-n junction diode. This permits Schottky diodes to detect lower amplitude signals than a p-n junction. In this paper we describe a procedure to extract the parameters of a high performance THz Schottky diode. Model extraction is done using a combination of dc and small-signal RF measurements. The results show that the proposed method is suitable to determine parameters of diode model with the excellent fit between measured and calculated I-V DC and S-parameter.

I. INTRODUCCIÓN

Los diodos Schottky se han utilizado durante varias décadas como elementos clave en la mezcla de frecuencias y la detección de potencia en radiofrecuencia. En 1938 Walter Schottky, hijo del matemático alemán Friedrich Schottky [2], explicó la manera en la que un compuesto formado por metal y un semiconductor dopado puede rectificar. El diodo Schottky es el resultado de este trabajo.

Los diodos Schottky fabricados en Arseniuro de Galio (GaAs) tienen una barrera de potencial baja, lo que se traduce en una alta sensibilidad, característica muy importante para dispositivos que tienen que detectar señales muy débiles.

El modelo físico de un diodo está basado en las características físicas del dispositivo, lo que permite reproducir el comportamiento del mismo para cualquier tipo de señal de entrada. El modelo circuital de diodo está basado en la topología clásica que tiene en cuenta los mecanismos físicos observables en un diodo Schottky, como son la emisión termoiónica [3], mecanismo que explica la corriente que fluye a través de la unión.

Este artículo plantea un procedimiento de obtención del modelo circuital equivalente lineal y no lineal de un diodo Schottky, por ser el elemento clave de los detectores mezcladores, multiplicadores, etc. de altas frecuencias. La extracción del modelo se basa en dos tipos de medidas. Se

realizará el modelado en continua del diodo, también se obtendrá el comportamiento en AC del diodo, mediante el modelado de los parámetros de Scattering hasta 45 GHz.

II. MODELADO DEL DIODO SCHOTTKY EN CONTINUA (DC)

En este trabajo se mostrará la caracterización del diodo Schottky modelo W Bande Single Anode de la Universidad de Virginia. En la figura 1 se muestra una foto del diodo, [4].

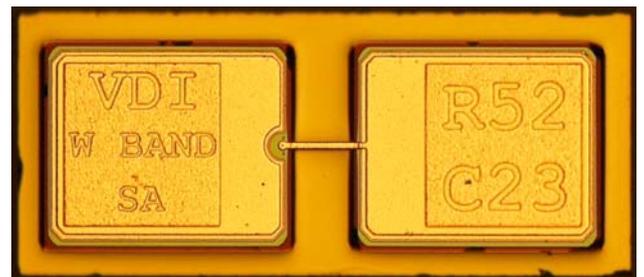


Fig. 1. Foto Del Diodo Schottky Single

El modelo total se conseguirá mediante la combinación de medidas en continua y alterna, que nos permiten obtener la caracterización corriente-tensión (I/V) específica del diodo y los parámetros [S].

El modelo de equivalente gran señal del diodo es el representado en la figura 2 [5]:

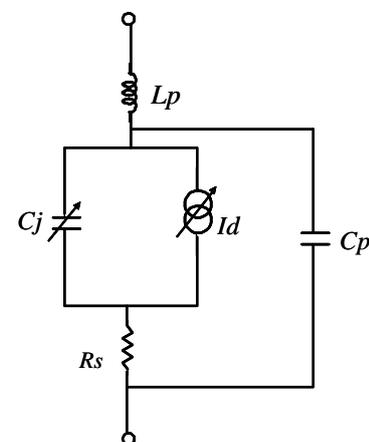


Fig. 2. Modelo Equivalente Gran Señal del Diodo

En este modelo se tiene que:

- La capacidad de la región de depleción viene modelada por la capacidad no lineal de la unión C_j .
- I_d , da cuenta de la corriente que circula a través de la unión en condiciones de polarización directa.
- La resistencia serie R_s representa las pérdidas del tanto de los contactos Schottky como ohmico.
- La capacidad paralela C_p y la inductancia serie L_p son los elementos extrínsecos que modelan el encapsulado del diodo.

A. Caracterización continua del diodo Schottky (unión)

A partir de un modelo clásico del diodo de unión [6] se sabe que la fuente de corriente viene dada por:

$$I_d = I_s \cdot (e^{\frac{q}{nKT}(V_d - I_d \cdot R_s)} - 1) \quad (1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

Siendo I_d la intensidad de corriente que atraviesa en el diodo, V_d la tensión del diodo. R_s la resistencia serie del diodo. T la temperatura de la unión. K la constante de Boltzmann. n el coeficiente de emisión dependiente del proceso de fabricación del diodo. q la carga del electrón ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Culombios) e I_s la corriente de saturación del diodo.

- La capacidad de la unión que predomina en polarización inversa [5]:

$$C_j(V) = \frac{C_{j0}}{\sqrt{\left(1 - \frac{V_d}{\phi_{bi}}\right)}} \quad (3)$$

C_{j0} : La capacidad de la región de depleción para una polarización de cero, V_d La tensión de polarización del diodo, y ϕ_{bi} es la potencial de contacto de la unión Schottky.

En esta parte vamos a realizar las medidas que nos van a llevar a la obtención de los parámetros que caracterizan una unión Schottky.

Partiendo de la ecuación del diodo Schottky utilizamos una fuente de corriente controlada por tensión e inyectamos unos valores de I_d y mediremos la tensión del diodo V_d [7] correspondiente. La tensión del diodo viene dada por la ecuación siguiente:

$$V_d = I_d \cdot R_s + \frac{1}{\alpha} \text{Ln} \left(\frac{I_d}{I_s} \right) \quad (4)$$

R_s es la resistencia parasita del diodo. Con un bajo nivel de polarización: cuando la caída de tensión en la resistencia serie R_s es insignificante comparada con la caída de tensión en el espacio de zona de carga, operando en la zona de la característica corriente-tensión I/V en la que I_d es lo suficientemente pequeña, el término $I_d \cdot R_s$ de la ecuación 4 podrá ser despreciado, con lo que la ecuación mencionada quedará como:

$$V_d = \frac{1}{\alpha} \text{Ln} \left(\frac{I_d}{I_s} \right) \quad (5)$$

Los valores de I_s y n serán determinados mediante el uso de la ecuación 5. Para que la curva I/V se corresponda con el del diodo se optimizarán los valores de I_s y n (o α) hasta que las medidas experimentales se correspondan con la característica I/V dada por la ecuación característica del diodo.

En la figura 3 que se muestra a continuación se puede ver la curva del ajuste conseguido de la ecuación del diodo obtenida de medidas directas sobre el diodo.

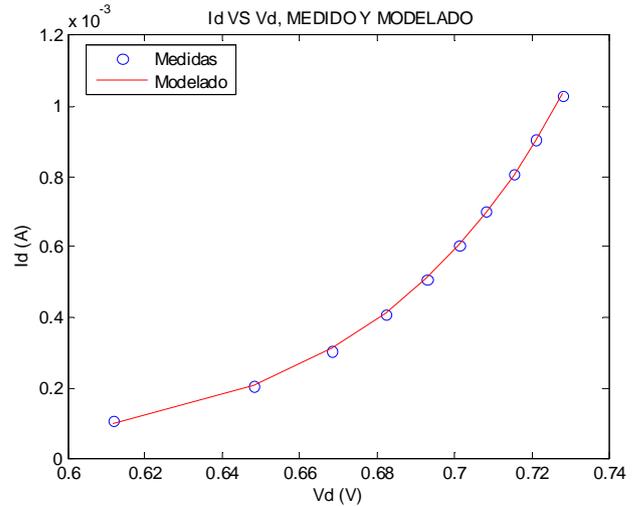


Fig. 3. Característica Corriente -Tensión I/V Medida y Modelada Para el Diodo Schottky

B. Calculo de la resistencia del diodo

En el caso de un diodo ideal la característica corriente tensión tiene la forma de una línea recta que se muestra en la gráfica semilogarítmica.

En un nivel de polarización alto no se puede despreciar la caída de tensión en la resistencia serie R_s , comparada con la caída de tensión en el espacio de zona de carga [6] lo que origina que la curva se desvíe de la línea recta, como se ve en la figura 4. La resistencia R_s del diodo se obtiene de la ecuación 4.

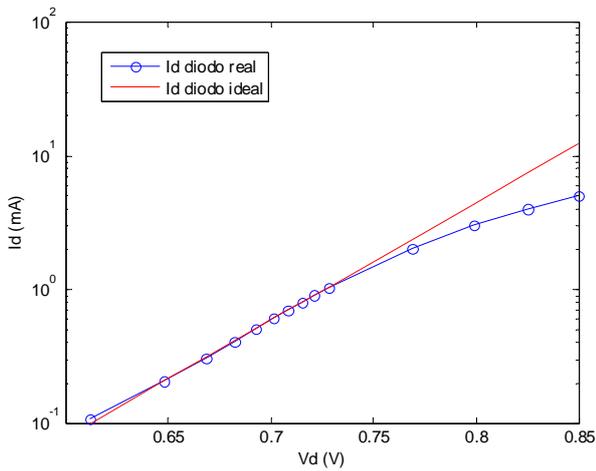


Fig. 4. Característica Corriente -Tensión I/V del Diodo Schottky en representación semilogarítmica para extraer R_s .

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de la medida de los parámetros de la unión Schottky para el diodo utilizado y también el valor de la resistencia serie.

Parámetro	Valor
I_s (A)	$4.316352 \cdot 10^{-10}$
n	1.9357
Alpha α (1/V)	20.183026
R_s (Ohm)	8.7534

Tabla 1. Valores de los Parámetros del la fuente de corriente del Diodo (ecuación 1).

III. MODELADO EL DIODO SCHOTTKY: SCATTERING

A. Método de medida de los parámetros de Scattering

Para la caracterización de los diodos se ha utilizado una estación de sondas coplanares [8] para evitar los efectos indeseados de los conectores a frecuencias milimétricas.

Las medidas de los parámetros de Scattering [S] propios del diodo, se realizaron utilizando el analizador de redes vectorial (PNA) y polarizando el diodo en inversa a través de las redes de polarización del mismo equipo, y accediendo al montaje mediante la estación de sondas coplanares [9]. El montaje del diodo se hizo con transiciones de línea coplanar a línea microstrip, modelo PROBE POINT™1003 de Jmicro™ Technology, que posibilitaran el acceso con las sondas.

Se realizó una calibración TRL (THROUGH, REFLECT, LINE), para corregir las transiciones y obtener los parámetros de Scattering del diodo con los hilos de oro a la entrada y salida. La potencia de entrada utilizada para realizar las medidas fue de -30 dBm, y se realizaron medidas para varios puntos de polarización. En la figura 5 se muestra una foto del diodo con transiciones coplanar microstrip.

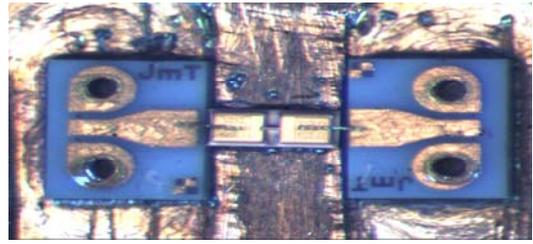


Fig. 5. Diodo _ Single Con Transiciones Coplanar Microstrip

B. Resultados(medidas y simulación)

Una vez realizada la simulación del modelo en continua, se llevan a cabo simulaciones para obtener el valor de los parámetros de Scattering. Para ello realizamos un análisis comparativo con los parámetros obtenidos a través de medidas hechas en el laboratorio, y se optimizan los valores de los elementos del modelo del diodo. Para determinar los parámetros del modelo en RF del diodo, en lugar de hacer ajustes parciales en bajas y altas frecuencias [3], se opta por tomar como punto de partida los valores estimados con simulaciones electromagnéticas de los diversos parásitos: la inductancia del diodo, los hilos de “bonding”, los “Pad” de acceso, la capacidad parasita entre ánodo y el cátodo, etc., que se emplearán como valores iniciales para una posterior optimización mas automatizada.

La comparación en la banda de frecuencias de 2GHz-45GHz entre los resultados de las medidas y las simulaciones con el modelo, de los parámetros de Scattering, se muestra en las figuras 6 y 7:

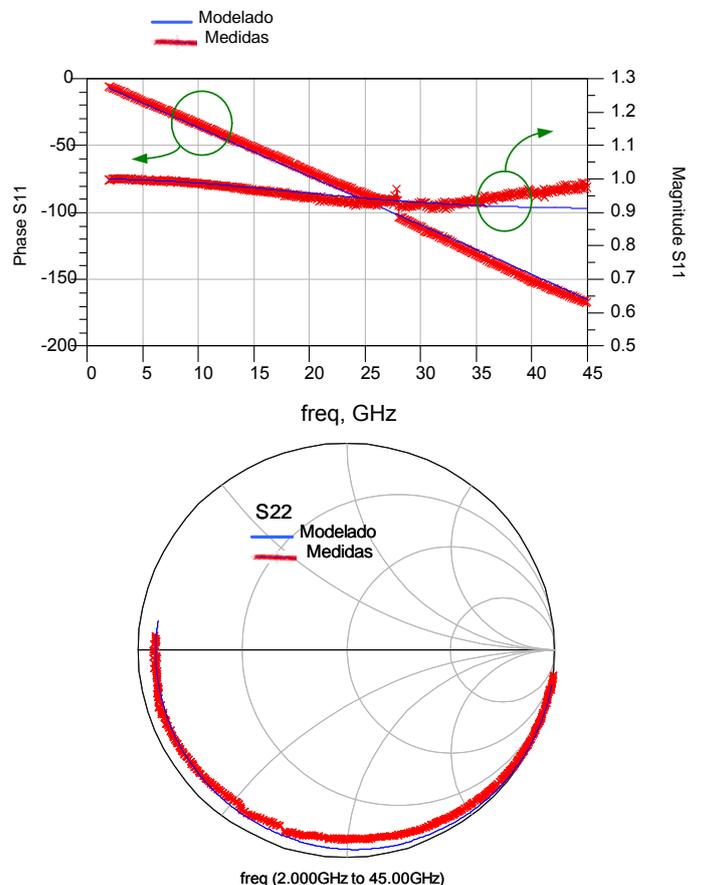


Fig. 6. Medida y Modelado de los Parámetros de Scattering S11 (Phase-Magnitude) y S22 (Cartas de Smith) del Diodo ($V_d = -3.5$ V)

IV. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la adecuación de los diodos Schottky fabricados por la universidad de Virginia, para operar en aplicaciones a frecuencias de Terahercios, lo cual era la meta principal de este trabajo.

Este trabajo se ha realizado en dos fases. La primera ha consistido en la realización de las medidas de continua de un diodo Schottky determinado, modelo W Band Single Anode de Virginia Diodes, para extraer los parámetros de la unión, obtenidos de la curva corriente tensión I/V del diodo con una precisión muy aceptable. También se ha presentando una técnica para la determinación de la resistencia serie del diodo, mediante las medidas en régimen de continua.

En la segunda fase del trabajo, que se centra en el estudio del comportamiento AC del diodo hasta 45 GHz, se han presentado las comparaciones entre simulaciones y medidas de los parámetros de Scattering correspondientes al diodo bajo test. Si bien los resultados de estas comparaciones son satisfactorios, se barajan modelos más complejos con objeto de mejorar la precisión que los mismos proporcionan.

Se ha conseguido un modelo del diodo hasta 45 GHz, que se tomará como punto de partida para modelar la respuesta de este tipo de dispositivos hasta 100GHz, ayudándonos de sistemas específicos de medida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren hacer constar su agradecimiento al proyecto TERASENSE (CONSOLIDER CSD2008-00068), dentro del cual se han obtenido y desarrollado todos los resultados que se presentan en este artículo.

REFERENCIAS

- [1] www.Skyworksinc.com.
- [2] B. Thomas, " Etude et Réalisation d'une tête de réception Hétérodyne en Ondes Submillimétriques pour l'Etude des Atmosphère et Surfaces de Planètes " Décembre 2004
- [3] P. de Paco, L. Pradell, A. Lázaro "Detectores a diodo para los Modelos de cualificación de los Radiómetros a 30 y 44 GHz del instrumento de baja Frecuencia de la Misión PLANK" symposium URSI, sesión española del IEEE, septiembre 2003, (pp 86-89).
- [4] www.virginiadiodes.com
- [5] A. Maestrini, " Modélisation et Conception de Multiplicateurs de fréquences utilisant des diodes planaires aux longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques ", Février 1991
- [6] J. Michael Golio. 1991 "Microwave MESFETs and HEMTs"
- [7] T. Fernández A. "Diseño de un Sistema Experimental Automático para la Caracterización DC Y Pulsada de Transistores de Alta Frecuencia" Cantabria, Octubre 1991.
- [8] Francisco Tresgallo Freire, "Detectores de Banda Ancha en Ondas Milimétricas", Universidad de Cantabria, Julio 2006
- [9] Beatriz Aja Abelán, "Amplificadores de Banda Ancha y Bajo Ruido Basados en Tecnología de GaAs para Aplicaciones de Radiometría" Universidad de Santander, Octubre 2006

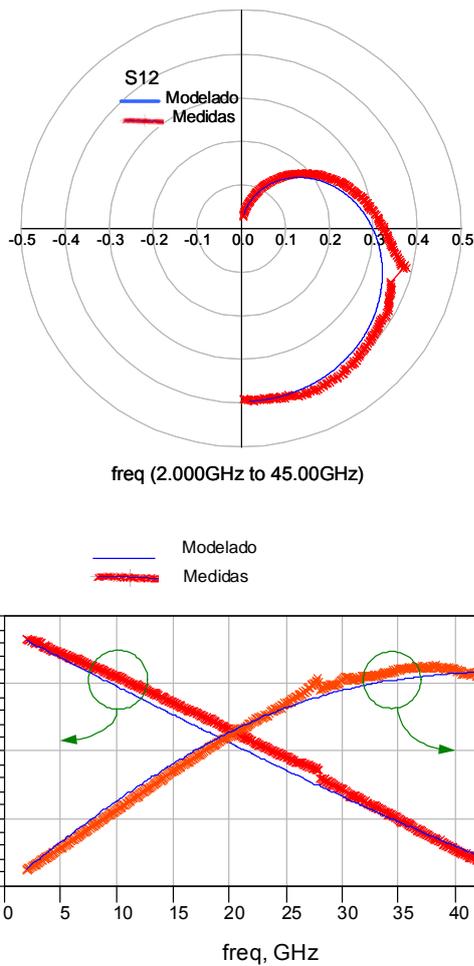


Fig. 7. Medida y Modelado de los Parámetros de Scattering S12 (Diagrama Polare) y S21 (Phase-Magnitude) del Diodo ($V_d = -3.5V$)

Se puede ver en las graficas 6 y 7 que las medidas experimentales realizadas son similares a la simulación hecha en ADS de los parámetros de Scattering. Por tanto se considera que el modelo se ajusta razonablemente al comportamiento de alterna, además de al de continua.

Los valores obtenidos para el resto de los parámetros del diodo son los que se muestran en la tabla 2.

Parámetro	Valor
C_{j0} (fF)	24
C_p (fF)	15
L_p (pH)	50
ϕ_{bi} (V)	0.9

Tabla 2. Valores de los Parámetros del Diodo.