

# Detectores con Diodos Zero Bias (ZBD) para Banda W

Jéssica Gutiérrez Asueta<sup>(1)</sup>, Kaoutar Zeljami<sup>(2)</sup>, Juan Pablo Pascual Gutiérrez<sup>(2)</sup>,  
Tomás Fernández Ibáñez<sup>(2)</sup>, Antonio Tazón Puentes<sup>(2)</sup>

[jessica.gutierrez@erzia.com](mailto:jessica.gutierrez@erzia.com), [kaoutar\\_ele@hotmail.com](mailto:kaoutar_ele@hotmail.com), [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)

<sup>(1)</sup> ERZIA Technologies. Santander, Cantabria

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Plaza de la Ciencia, S/N Santander

**Abstract-** Increasing demand for applications in W band has pushed the development of technologies for generation, mixing and detection of RF signals in these bands. Particularly, high performance diodes specially developed to operate at zero bias are well suited for detection. Modeling of Zero Biased Diodes (ZBD) manufactured by Virginia Diodes is presented and then applied to the design of a detector. Different configurations have been used to mount the diodes (flip-chip, and wire-bonded) requiring a careful de-embedding. Several versions of the detector have been implemented, measured, and compared with simulations done with the previously obtained diode model, showing the most critical points of the detector development.

## I. INTRODUCCIÓN

La electrónica en frecuencias de milimétricas y de Terahercios se encuentra en un momento de auge con aplicaciones como radares, radiómetros y obtención de imágenes para control de calidad, seguridad, medicina, etc., vinculadas con las propiedades de penetración y mayor resolución de estas bandas del espectro de microondas. Sin embargo, para poder alcanzar una eclosión masiva de su uso, se requiere un abaratamiento de las tecnologías empleadas con un incremento de niveles de integración

Una de las funciones básicas que se requieren en estos sistemas es la detección, por ejemplo en radiometría, o para sistemas de control de ganancia. Los diodos que operan con polarización cero están especialmente concebidos para esa función. Sin embargo son pocos los fabricantes que ofertan diodos de este tipo capaces de operar en bandas de Terahercios. VDI, fabricante vinculado con la Universidad de Virginia, tiene en su catálogo un modelo adecuado para banda W, con las características de la tabla adjunta.

Tabla I. Características diodo ZBD de VDI

	Test Conditions	Minimum Value	Maximum Value	Units
$V_F$ Forward Turn-on Voltage	$I_F = 100 \mu A$	45	70	mV
$\Delta V$	1 mA – 100 $\mu A$	65	80	mV
$I_{SAT}$ Saturation Current		10	35	$\mu A$
$R_v$ Video Resistance		1000	3000	$\Omega$
$C_T$ Total Capacitance			25	fF
$C_{PP}$ Pad to Pad Capacitance	$V = 0V$		15	fF

El aspecto del diodo se muestra en la foto de la Fig. 1.

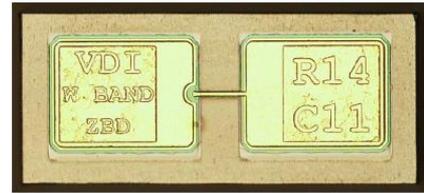


Fig. 1. Foto Diodo ZBD VDI

Para llevar a cabo este trabajo, se han adquirido varias unidades de este modelo de diodo y se ha procedido a su caracterización, realizando medidas en DC, parámetros de Scattering, curvas C-V y de respuesta en potencia. La elección del procedimiento de montaje es crítica para luego poder distinguir la contribución en la respuesta debida al diodo en sí mismo y la correspondiente a los elementos de acceso. En este sentido, se han hecho dos tipos de montajes: con hilos de bonding, manteniendo el carácter de línea microstrip en los accesos del diodo y montajes estilo Flip-Chip, para evitar el uso de hilos.

Las medidas obtenidas han servido para extraer los parámetros del modelo, que luego se ha empleado en el diseño de un detector en banda W. Se han contemplado versiones diferentes del detector, en función del montaje de la red de adaptación. Finalmente, se han medido las versiones disponibles hasta el momento del detector completo. A continuación, se mostrará la caracterización del diodo (sección II), seguida del ajuste a un modelo (sección III). Después se presentará el diseño de un detector con varias versiones (IV) y por último, las medidas de las mismas (sección V) obteniéndose unas conclusiones finales (sección VI).

## II. CARACTERIZACIÓN DEL DIODO ZBD

### A. Medidas en Régimen de DC

El punto de partida de la caracterización del diodo es la característica I/V en DC. La mayor parte de los parámetros habituales que caracterizan a los diodos Schottky se determinan a partir de sus características corriente tensión (I-V), en una representación semi-logarítmica. La grafica típica de la característica (I-V) se puede dividir en tres regiones distintas: la primera región no lineal es debida al comportamiento no-exponencial de los diodos aplicando tensiones pequeñas, la segunda región, es la región lineal y la última, es la región donde la corriente está limitada por la resistencia en serie del diodo. En la Figura 2, se presentan las

características (I-V) en escala semi-logarítmica para un diodo “Zero Bias” ZBD, en las que se ven las regiones 2 y 3, dado que no se hicieron medidas en la región 1.

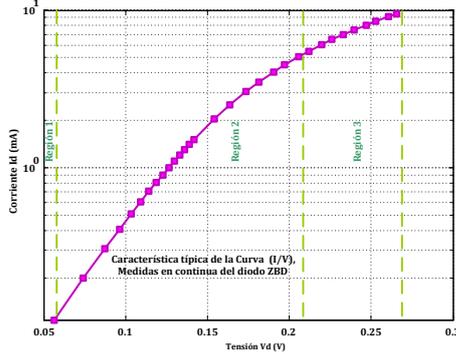


Fig. 2. Representación Semi-Logarítmica I-V para un Diodo Schottky ZBD

### B. Medidas de Parámetros de Scattering

La caracterización del diodo se completa con la obtención de medidas en alterna (AC) en diversos rangos de frecuencias, incluyendo el rango de las aplicaciones de interés. En particular, se han hecho medidas C-V en el rango de MHz, medidas de Scattering en el rango de 3 a 10 GHz para validar el modelo de capacidades totales y en los rangos hasta 50 GHz y de 75 a 110 GHz. No hay medidas entre 50 GHz y 75 GHz por no disponer de equipamiento en esa franja. El diodo se ha montado en serie para ser medido en transmisión y reflexión con conectores adaptados a la banda de frecuencias, y tanto en montaje microstrip (uniendo los puntos de contacto a líneas de acceso con hilos de bonding), como en flip-chip, para evitar los efectos parásitos de los hilos, aunque dando lugar a otras incertidumbres. Con todas estas medidas se tratan de evaluar los efectos parásitos de los elementos físicos de acceso a la unión Schottky, que van a ser especialmente cruciales en banda W. Las medidas, ya ajustadas al modelo, se mostrarán en el apartado de modelado.

### C. Medidas de Potencia

Para poner de manifiesto la no linealidad del diodo mediante la medida de los armónicos generados, se ha hecho un montaje en baja frecuencia de un diodo en serie, inyectándose un tono y midiéndose el nivel de los armónicos a la salida. Las medidas, ya ajustadas al modelo se mostrarán en el apartado de modelado.

## III. MODELADO

Se ha procurado integrar todas las características obtenidas de los diodos en un modelo global coherente, construido a partir del modelo DC al que se le han añadido componentes para modelar los diversos efectos parásitos puestos de manifiesto en baja frecuencia y en la banda hasta 50 GHz y de 75 a 110 GHz. Como ayuda para la estimación inicial de algunos parásitos, se ha recurrido a simulaciones electromagnéticas con HFSS de la estructura “pasiva”. También se ha hecho una caracterización de los hilos de bonding y de transiciones microstrip-coplanar usadas para poder descontar sus efectos. Con todo ello, se ha optimizado un modelo circuital global, implementado en el simulador ADS para generar las simulaciones a comparar con las medidas. En la Fig. 3, se muestra el aspecto del modelo global incluyendo hilos de bonding.

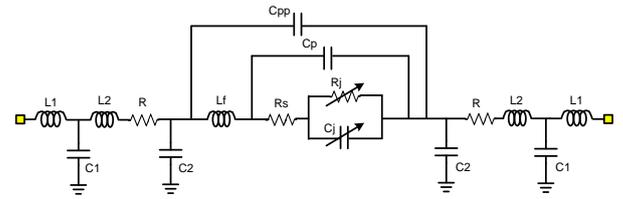


Fig. 3. Circuito Equivalente para el Diodo Schottky Simple con detalles de todos los Elementos Extrínsecos

### A. Modelo DC y Baja Frecuencia

A partir de la división en regiones mostrada en la Fig. 2, se aplicó un procedimiento de extracción [1],[2] asumiendo el modelo de emisión termoiónica (ecuación 1) obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla II.

$$I(V_d, T) = I_s \exp\left(\frac{q(V_d - I_d R_s)}{nkT}\right) \quad (1)$$

Tabla II. Resultados de la extracción de los parámetros de la unión de los diodos

Parámetro	Valor (ZBD)
$I_s$ (A)	$2.784738 \cdot 10^{-5}$
n	1.3669
$\alpha = nkT/q$ (1/V)	28.581909
$R_s$ ( $\Omega$ )	6.4760

Por otro lado, usando las medidas de Scattering en un rango hasta 10 GHz, se ha hecho un ajuste a un modelo básico de una ‘pi’ de condensadores, usándose luego como punto de partida para el modelo en alta frecuencia.

### B. Modelo en Alta Frecuencia

En la Fig. 4, se muestra la simulación desde 2 GHz a 110 GHz superpuesta con las medidas disponibles.

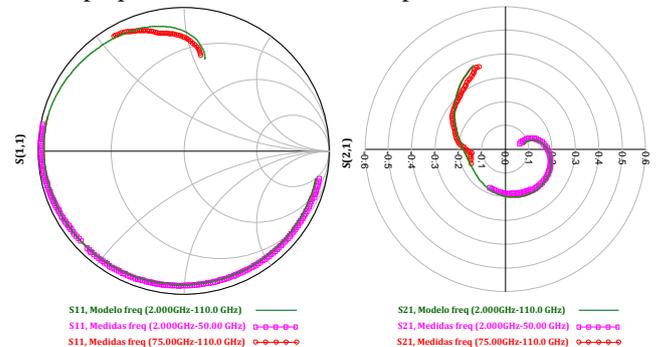


Fig. 4. Parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  del Diodo ZBD: Medidas hasta 50GHz y 75-110GHz vs. Simulación entre 2 y 110GHz

En la Fig. 5 se muestra la simulación y las medidas de potencia para tres armónicos para  $f_0=1$ GHz.

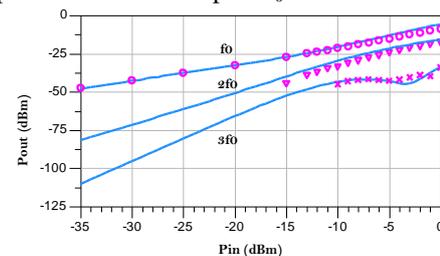


Fig. 5. Modelo y Simulaciones de la Generación de Armónicos hasta Orden 3

En la Tabla III se muestran los parámetros del modelo.

Tabla III. Valores de los parámetros para el diodo ZBD

Parámetros del diodo Zero Bias	Símbolo	Valor
Corriente de saturación (A)	$I_{s0}$	$27.84738 \cdot 10^{-6}$
Factor de idealidad	$\eta$	1.3669
$nkT/q$ (1/V)	$\alpha$	$28.581909$
Capacidad de unión ( $V_d=0V$ ) (fF)	$C_{j0}$	10
Resistencia serie ( $\Omega$ )	$R_s$	6.4760
Potencial de unión (V)	$\Phi_n$	0.9
Inductancia del dedo (pH)	$L_f$	50
Capacidad parasita (fF)	$C_p$	1
Capacidad (Pad-to-Pad) (fF)	$C_{pp}$	16
Inductancia "bonding" (pH)	$L_b$	72.84
Inductancia "bonding" (pH)	$L_e$	41.77
Capacidad "Pad" (fF)	$C_i$	87.99
Capacidad "Pad" (fF)	$C_z$	50.57
Resistencia "bonding" ( $\Omega$ )	$R$	0-3

#### IV. DISEÑO DE DETECTORES CON DIODOS ZERO BIAS

Se plantea el diseño de un detector con el diodo ZBD en banda W, estudiando las posibilidades de maximizar la sensibilidad, como alternativa de reserva a un detector MMIC comercial de HRL (V1A) de disponibilidad limitada. El diseño está marcado por las posibilidades tecnológicas para implementar una red de adaptación adecuada. Sobre el papel, la adaptación resistiva podría favorecer una adaptación en banda más ancha, no obstante el uso de la resistencia discreta disponible con mínimos parásitos impone un estrechamiento y desviación de dicha respuesta. Otra alternativa es emplear redes de adaptación con stubs. Otro aspecto crítico es la implementación de la puesta a masa virtual del diodo. Así, en el siguiente subapartado se presentan tres diseños de detector con diferentes redes de adaptación.

##### A. Diseño del Detector

El elemento clave para el diseño del detector es el diodo Schottky Zero Bias (ZBD), el cual no requiere polarización ya que presenta una barrera de potencial baja. Esta propiedad nos simplifica el diseño del propio detector.

La estructura básica del detector [3] consta de una red de adaptación de entrada del ZBD, un corto virtual de RF a la salida del detector para evitar que la señal de RF se escape por la salida de DC del detector y finalmente, un filtro RC tras este corto virtual para filtrar la señal de salida. Además, se ha considerado como la opción de conexión más flexible y con menor desadaptación en la entrada, un acceso Jmicro con hilos de bonding para poder medirlo en el laboratorio con la estación de puntas, ya que el diseño se ha realizado en microstrip con el sustrato RO5880 con un espesor de 5mils para evitar modos de propagación indeseados.

La diferencia entre el diseño de los tres detectores radica en la estructura de la red de adaptación. La primera versión, v1, basa su red de adaptación en el uso de una resistencia discreta para obtener una respuesta, a priori, más banda ancha (ver Fig. 6 (a)). La segunda versión, v2, utiliza un primer stub cerca de la entrada y dos stubs más en paralelo cerca del diodo (ver Fig. 6 (b)). Y finalmente, en la tercera opción, v3, la entrada se adapta mediante tramos de líneas microstrip de diferente anchura junto con el primer stub en la entrada.

La fabricación se ha realizado en el laboratorio de tecnología del propio departamento, para así poder controlar el proceso de fabricación y poder corregir más fácilmente cualquier posible modificación del diseño en función de los resultados obtenidos. El modelado de la resistencia discreta

requirió una dedicación especial dado su uso fuera de los rangos previstos.

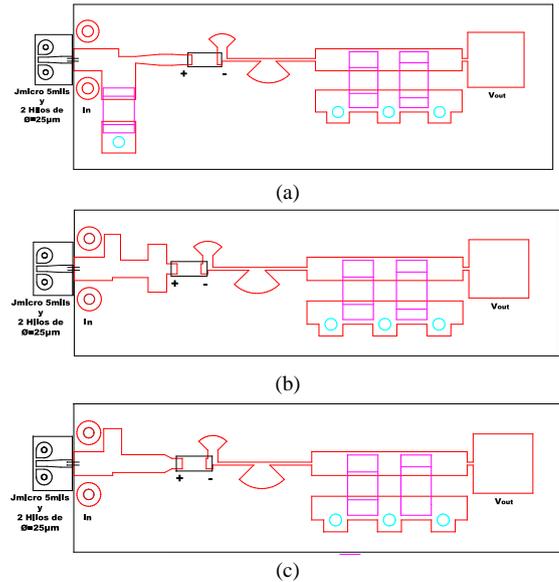


Fig. 6. Diferentes Versiones del Diseño del Detector con ZBD. Red de Adaptación con: (a) Resistencia a Masa, (b) Stubs y (c) Diferentes Secciones Microstrip

En la Fig. 7, se puede ver el montaje de la versión v1 con la resistencia a masa para adaptar la entrada del diodo.



Fig. 7. Montaje del Detector con Resistencia en la Red de Adaptación

#### V. MEDIDAS DEL DETECTOR

Para realizar las medidas experimentales de los tres detectores, se preparó un complejo set-up de medida incluyendo el PNA-X y la cabeza mezcladora en guía WR-10 para introducir al detector señal en banda W. Conectamos la salida del detector a un multímetro digital mediante un buffer. El set-up completo puede verse en la Fig. 8.



Fig. 8. Setup de Medida para banda W

A continuación, se muestra una comparativa de las simulaciones y medidas experimentales de las tres versiones del detector. La potencia nominal de entrada al set-up es de -20dBm. En las tres versiones (ver Fig. 9), tenemos una respuesta en banda estrecha por lo que tendremos una mayor

sensibilidad en torno a la frecuencia donde presenta una mejor adaptación.

Tal y como se observa en la primera gráfica, correspondiente a la versión v1, podemos apreciar un desplazamiento en frecuencia de la respuesta obtenida, el cual puede ser debido a la necesidad de un reajuste del modelo de la resistencia y del modelo del diodo. En principio, esta versión debería aportar una respuesta en banda ancha, pero los efectos parásitos de la resistencia, estrechan la propia respuesta. También existe un desplazamiento para la segunda versión y en cuanto a la tercera versión, obtenemos una mayor adaptación y además, un mejor ajuste en comparación con las versiones anteriores.

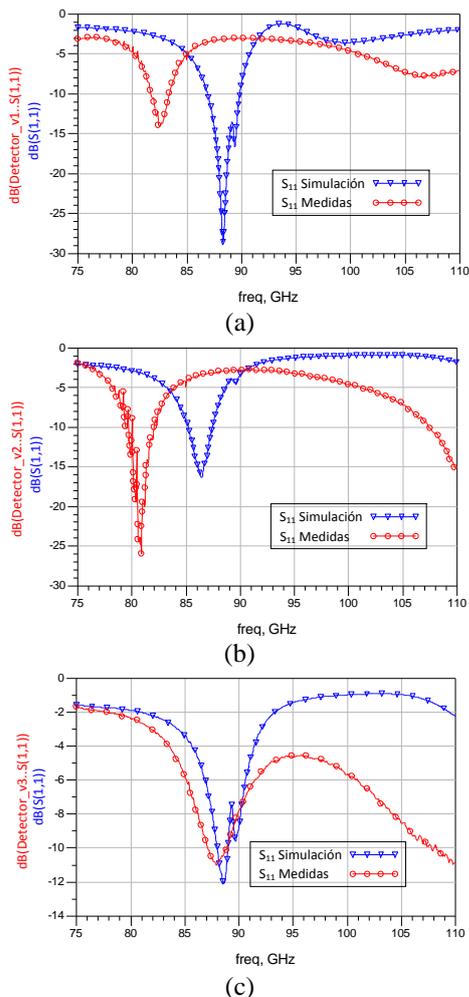


Fig. 9. Adaptación de Entrada. Simulaciones vs. Medidas de las Diferentes Versiones del Detector. Red de Adaptación con: (a) Resistencia a Masa, (b) Stubs y (c) Diferentes Secciones Microstrip

Por otra parte, hemos caracterizado los detectores realizando un barrido en frecuencia de la tensión detectada a la salida (ver Fig. 10). Si comparamos las gráficas anteriores con ésta, podemos apreciar cómo obtenemos para los tres diseños, una mayor tensión detectada para el punto de mayor adaptación de cada uno de ellos. Y comparando las tres medidas entre sí, hemos obtenido una mayor tensión de detección para el segundo detector, coincidiendo igualmente con el que presenta la mayor adaptación.

Por tanto, teniendo en cuenta los resultados mostrados y que los tres diseños emplean el mismo tipo de diodo, la mejor opción es la que presenta la red de adaptación con los stubs.

Para mejorar estos diseños, se plantea incluir en el diseño el modelo del diodo en flip-chip, el cual necesitará incluir

algún efecto parásito adicional. Así, nuestro modelo será más parecido a cómo se integra el diodo en el montaje del detector. Teniendo en cuenta la complejidad del uso de la resistencia SMD como parte de la red de adaptación debido a sus efectos parásitos, se plantea la opción de diseñar una nueva versión con un sustrato con capa resistiva. El nuevo sustrato para el rediseño será alúmina, que tiene una alta constante dieléctrica, con lo que se reduciría el tamaño y además, permitiría incluir más fácilmente la transición coplanar-microstrip como parte del diseño para evitar así, el uso del acceso Jmicro y los hilos de bonding.

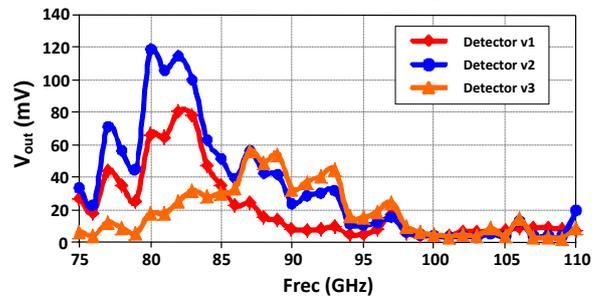


Fig. 10. Comparativa de los tres Detectores. Tensión de Salida Detectada vs. Frecuencia

## VI. CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo circuital global de un diodo de polarización nula (ZBD) de VDI basado en múltiples medidas. Dicho modelo se ha aplicado en el diseño de detectores para banda W. Las primeras implementaciones muestran una adaptación de unos -10 dB y una alta sensibilidad, pero los efectos parásitos tienden a limitar la frecuencia de operación. Se espera una mejora de prestaciones con una implementación resistiva distribuida integrada en un sustrato microstrip.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad por el Proyecto TEC2014-58341-C4-1-R y por la Red Excelencia CONSOLIDER- SPATEK. Y mención especial también a la Universidad de Cantabria por el proyecto de Doctorado Industrial 2014: “Estudio y Desarrollo de Tecnologías para Sistemas de Telecomunicación a Frecuencias Milimétricas y de Terahercios con Aplicación a Sistemas de Imaging en la Banda 90–100 GHz”, dentro del cual se han obtenido y desarrollado todos los resultados que se presentan en este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] Zeljami, K. 2013. *Caracterización y Modelado de Dispositivos Semiconductores Para Uso en Sistemas de Telecomunicaciones a Frecuencias de Terahercios* [en línea]. T. Fernández Ibáñez y J.P. Pascual Gutiérrez (dir.). Tesis Doctoral Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/120189/TesisKZ.pdf?sequence=1>
- [2] K. Zeljami, J. Gutiérrez, J.P. Pascual, T. Fernández, A. Tazón, M. Boussouis, “Characterization and Modeling of Schottky Diodes up to 110GHz for use in both Flip-Chip and Wire-Bonded assembled Environments”, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Vol. 131 (2012), 457-475
- [3] E. Villa, B. Aja, L. de la Fuente, E. Artal. “Detector basado en diodo Schottky en la banda de 35 a 47 GHz”. XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2012). Septiembre 2012. Elche