

Modelado con la temperatura de diodo Schottky para conmutador de fase 90°

Enrique Villa, Beatriz Aja, Jaime Cagigas, Luisa de la Fuente, Eduardo Artal.

villae@unican.es, ajab@unican.es, cagigasj@unican.es, fuenterm@unican.es, artale@unican.es

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria.

Edificio Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García, Plaza de la Ciencia s/n, 39005 Santander.

Abstract- This work describes the modelling of a Schottky diode at room (300 K) and cryogenic (15 K) temperatures for its use in a 90° phase switch working in the Ka-band. The phase switch is based on the combination of filters as phase shifting branches and a single-pole double-throw (SPDT) switch with Schottky diodes as switching devices. The MA4E2037 Schottky diode is used as switching device and its small signal model is obtained over the temperature. The design of the phase switch is performed in a 254- μm thick alumina substrate, showing an average phase shift of $91.05^\circ \pm 5^\circ$ over the 26-36 GHz band with an amplitude imbalance of 0.3 dB at room temperature. At cryogenic temperatures, the phase switch shows an average phase shift of $88.5^\circ \pm 9^\circ$ over the 26-36 GHz band with an amplitude imbalance of around 0.1 dB.

I. INTRODUCCIÓN

Desde que Schiffman propuso como solución de desfase diferencial de 90° una línea acoplada frente a una línea de transmisión [1], diversas soluciones se han implementado para conseguir un mínimo error en la diferencia de fase relativa de 90° con diferentes anchos de banda de funcionamiento [2]-[6], y, generalmente, sin la integración de un elemento conmutador entre los elementos del desfaseador.

El diseño de este dispositivo de conmutación, tipo una entrada dos salidas (SPDT), es crítico para la respuesta final como conmutador de fase, ya que factores como las desadaptaciones entre subsistemas o el aislamiento del conmutador entre accesos afectan de manera significativa a la respuesta general del circuito desfaseador. Por lo tanto, el conocimiento de los elementos utilizados en la implementación del circuito adquiere importancia, más patente cuando se va a operar a temperaturas criogénicas ya que no suele haber datos a estas temperaturas físicas. En este trabajo se muestra un conmutador SPDT basado en diodos Schottky.

De esta manera, se ha desarrollado el modelado del diodo Schottky para ser usado como elemento de conmutación tanto a temperatura ambiente como criogénica, y así predecir la respuesta del diodo a ambas temperaturas de trabajo. Estos modelos eléctricos a 300 K y 15 K sirven como herramienta de diseño del circuito conmutador de fase, siendo capaces de predecir las pérdidas totales o su cambio de fase.

La utilización de un dispositivo de barrera Schottky viene definido por el deseo de operar en criogenia. Existe la posibilidad de utilizar otro tipo de diodos, como son los diodos PIN, ampliamente utilizados en soluciones que requieren conmutación por sus rápidos cambios de estado. Sin embargo, presentan el inconveniente de un consumo en

DC muy elevado en criogenia que provoca el calentamiento del criostato. Por lo tanto, la obtención de un modelo a temperaturas criogénicas para el diodo Schottky es importante para predecir su impedancia en función del punto de polarización, teniendo en cuenta la falta de información sobre su operación a estas temperaturas extremas.

Para validar el uso del diodo como elemento de conmutación en el circuito, se presenta un circuito conmutador fase de 90° [7] orientado a cubrir la banda de 26 a 36 GHz, desarrollado en tecnología híbrida que combina diversos tipos de líneas de transmisión y analizado a temperatura ambiente (300 K) y criogénica (15 K).

II. MODELADO PEQUEÑA SEÑAL DIODO SCHOTTKY

El dispositivo seleccionado para actuar como elemento de conmutación es un diodo Schottky modelo MA4E2037 de MACOM Technology Solutions [8]. Según la información proporcionada por el fabricante, este diodo presenta una resistencia equivalente serie de pequeño valor en polarización directa, mientras en polarización inversa muestra una pequeña capacidad equivalente a temperatura ambiente. Sin embargo, no hay datos de su comportamiento a temperaturas criogénicas. En la Fig. 1 se muestran dos vistas del diodo.



Fig. 1. Vistas frontal y posterior del diodo Schottky MA4E2037.

A. Procedimiento de Extracción del Modelo

Se ha extraído un modelo de la característica corriente-tensión y de medida de parámetros de Scattering pequeña señal. El procedimiento de extracción del modelo es el siguiente: se caracteriza el diodo en su respuesta en DC y parámetros de Scattering; se ajusta la respuesta corriente-tensión (I-V) a través del uso de una resistencia serie dependiente del punto de polarización y se obtienen el factor de idealidad (n) y la corriente de saturación (I_S) del diodo; se ajustan los parámetros de Scattering para obtener los parásitos presentes en el diodo.

El ajuste de la curva I-V, considerando la tensión en la unión del diodo, viene dado por

$$I = I_S \cdot \left(e^{\left(\frac{q(V_c - I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (1)$$

donde I_S es la corriente de saturación (A), V_C la tensión aplicada al diodo (V), n el factor de idealidad, R_S la resistencia serie (Ω), k la constante de Boltzmann, q la carga del electrón (C) y T la temperatura física (K). El modelo eléctrico utilizado para el diodo se muestra en la Fig. 2.

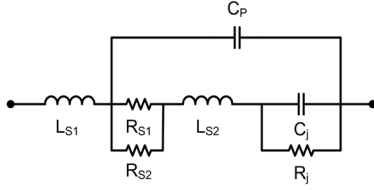


Fig. 2. Modelo pequeña señal para el diodo Schottky.

Como resistencia serie se ha considerado el paralelo R_{S1} [9] y R_{S2} para ajustar de manera precisa la curva I-V tanto en polarización directa como inversa. Ambas resistencias están definidas por

$$R_{S1} = \frac{0.001 \cdot V_{\min}}{I_{\text{bias}} + 10^{-30}} - \frac{1}{I_{\text{bias}} + 10^{-30}} \left[(V_d - V_{\min}) - \frac{n \cdot k \cdot T}{q} (\ln(I_{\text{bias}} + 10^{-30}) - \ln(I_{\min})) \right] \quad (2)$$

$$R_{S2} = R_{SC} \cdot (1 + 10^6 \cdot I_{\text{bias}}) \quad (3)$$

donde los valores de las tensiones están definidos en V y las corrientes en A; R_{SC} presenta un valor constante de la resistencia serie del diodo ajustado con la curva I-V. Los valores V_{\min} e I_{\min} presentan un punto de la curva I-V en su zona lineal lo más pequeño posible. El valor de la resistencia de la unión para el modelo [10] viene dado por

$$R_j = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \frac{1}{(I_{\text{bias}} + I_S)} \quad (4)$$

B. Modelos a $T=300$ K y $T=15$ K

Se han realizado medidas de la curva I-V y de parámetros de Scattering con una potencia de entrada $P_{\text{in}}=-30$ dBm en el rango de frecuencias de 1 a 40 GHz. Ambas medidas se han realizado a las temperaturas físicas de 300 K y 15 K en la estación de sondas coplanares, usando transiciones coplanar-microstrip y el segundo terminal del diodo conectado a masa. El efecto de las transiciones coplanar-microstrip ha sido descontado en el proceso de calibración.

Las medidas de la curva I-V del diodo están representadas en la Fig. 3, junto con la respuesta del modelo una vez ajustados sus parámetros, para ambas temperaturas. Los parámetros obtenidos para el modelo se presentan en la Tabla 1. Los valores V_{\min} and I_{\min} utilizados son (0.3 V, $1.82 \cdot 10^{-9}$ A) y (0.8 V, $1.45 \cdot 10^{-5}$ A) para 300 K y 15 K respectivamente.

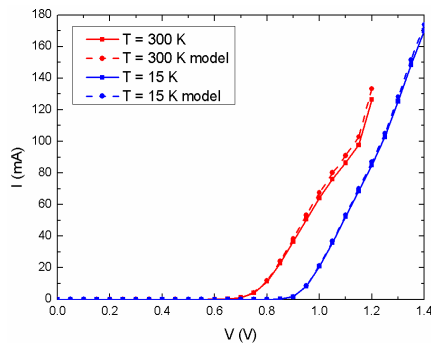


Fig. 3. Ajuste de las curvas corriente-tensión con la medida para ambas temperaturas (300 K y 15 K).

Parámetro	Temp. Ambiente (300 K)	Temp. Criogénica (15 K)
n	1.17	16.34
I_S	$9.55 \cdot 10^{-14}$	$5.35 \cdot 10^{-22}$
R_{SC}	2.7	2.5

Tabla 1. Parámetros del diodo extraídos del ajuste de la característica corriente-tensión.

Una vez ajustadas las curvas I-V, se ajustan los parámetros de Scattering. En estas medidas se ha hecho un barrido del punto de polarización del diodo, hasta un máximo de corriente a través del diodo $I_d=20$ mA para ambas temperaturas físicas. Los resultados obtenidos a 300 K se muestran en la Fig. 4, en la que en trazo negro discontinuo se presentan los ajustes que proporciona el modelo. Los resultados a 15 K se muestran en la Fig. 5, comparado con el ajuste del modelo. Para ambos ajustes se han utilizado los valores para los parásitos que se listan en la Tabla 2.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
L_{S1}	100 pH	C_P	0.02 pF
L_{S2}	230 pH	C_J	0.036 pF

Tabla 2. Parámetros del modelo pequeña señal para ambas temperaturas.

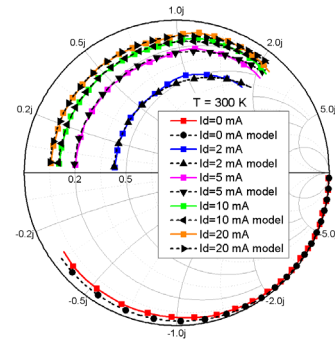


Fig. 4. Ajuste del modelo con las medidas a temperatura ambiente 300 K (rango de 1 a 40 GHz).

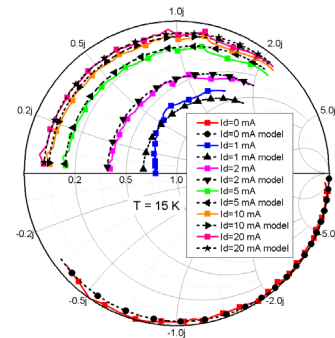


Fig. 5. Ajuste del modelo con las medidas a temperatura criogénica 15 K (rango de 1 a 40 GHz).

De acuerdo a los resultados mostrados, el modelo para el diodo Schottky MA4E2037, tanto a temperatura ambiente como a temperatura criogénica, ajusta de manera precisa el funcionamiento del dispositivo en términos de la curva I-V y los parámetros de Scattering, validando el funcionamiento del diodo a temperatura criogénica y consiguiendo similar comportamiento con la mitad de corriente en frío que en ambiente.

III. DISEÑO DEL CONMUTADOR DE FASE 90°

Con el diseño del conmutador de fase 90° se pretende validar el uso del diodo como elemento de conmutación a ambas temperaturas físicas. El diseño del conmutador de fase se divide en dos partes: las ramas desfasadoras y el conmutador. El sustrato utilizado es alúmina de grosor $h=254 \mu\text{m}$ y constante $\epsilon_r=9.9$. Las dimensiones finales de los circuitos se presentan en [7].

A. Filtros Paso Banda como ramas desfasadoras

Los elementos desfasadores se implementan con filtros paso banda basados en redes tipo π con stubs acabados en circuito abierto.

Los filtros utilizados se muestran en la Fig. 6 y deben cumplir condiciones para una diferencia de fase de 90° plana y un desequilibrio de amplitud mínimo con la frecuencia [7]. Si se calcula la fase de cada rama se obtiene la condición de diseño de diferencia de fase y con los parámetros de Scattering de transmisión ($|S_{21-B1}| - |S_{21-B2}|$) se fija la mínima diferencia de amplitud.

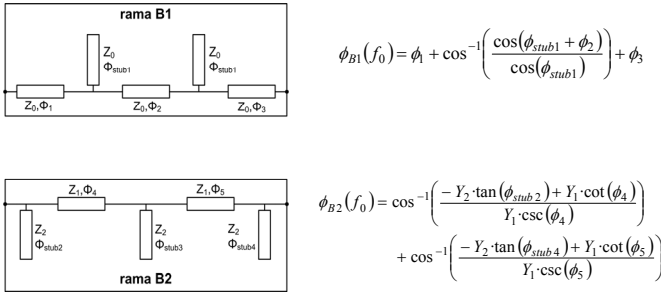


Fig. 6. Filtros en configuración π como ramas desfasadoras 90°.

B. Conmutador SPDT

Como conmutador se propone un diseño basado en tecnología planar [7], con una transición CPW-slot modificada implementada con diodos, situados a un cuarto de longitud de onda a la frecuencia central y simétricos en ambos caminos slot. Para mejorar el aislamiento se coloca un segundo diodo separado un cuarto de longitud de onda del primero. La línea slot se convierte a CPW con otra transición clásica y, por último, a línea microstrip. El esquema eléctrico equivalente del conmutador se muestra en la Fig. 7. La línea de 50 Ω de entrada en CPW presenta una anchura de línea central de 104 μm y una separación entre contactos laterales de 50 μm .

Para el conmutador, el diodo se tiene que comportar lo más próximo a un cortocircuito en directa y a un abierto en inversa. Para el funcionamiento del diodo a temperatura ambiente (300 K), se obtiene un buen comportamiento en directa para corrientes superiores a 5 mA, mientras que a 15 K con corrientes superiores a 2 mA.

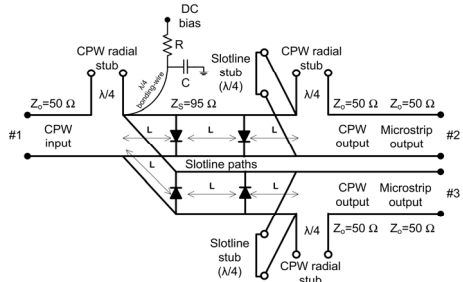


Fig. 7. Esquema eléctrico equivalente del conmutador CPW-slot-microstrip.

IV. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

El circuito conmutador de fase 90° ha sido fabricado en sustrato de alúmina y se ha realizado el montaje de los diodos Schottky (Fig. 8). El circuito contiene la red de polarización necesaria para polarizar los diodos, formada por un hilo de bonding de cuarto de longitud de onda, un condensador $C=0.5 \text{ pF}$ y una resistencia $R=10 \Omega$. Estos componentes se comportan correctamente a temperaturas criogénicas.

La caracterización del circuito a temperatura ambiente se ha realizado en la estación de sondas coplanares, mientras que la medida en criogenia se ha realizado a través de una caja en conector coaxial.

A. Temperatura Ambiente

La medida a temperatura ambiente se ha realizado directamente sobre los accesos del circuito. Una fotografía del circuito en alúmina con los diodos montados en los slots de entrada y salida se muestra en la Fig. 8. Debido a la ausencia de metalización inferior en los tramos CPW y slots, se ha realizado la medida en oblea utilizando un sustrato de constante $\epsilon_r=1.14$ y $h=1.29 \text{ mm}$ que sustentase el circuito, y que presenta únicamente capa conductora sobre su cara inferior.

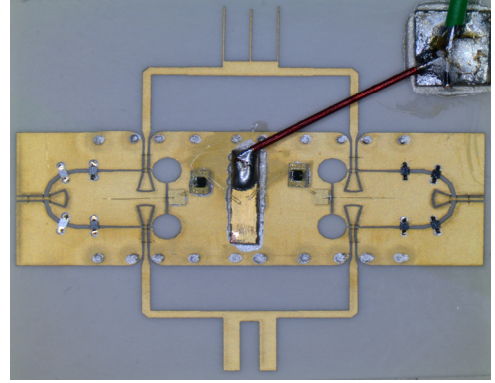


Fig. 8. Conmutador de fase 90° con diodos MA4E2037.

Los resultados de la caracterización a temperatura ambiente se muestran en la Fig. 9, donde se observa que en la banda de 26 a 36 GHz se mide un valor medio de la diferencia de fase de 91.05° con un error de $\pm 5^\circ$, unas pérdidas de inserción de 3.5 dB, un desequilibrio medio de amplitud entre estados de 0.31 dB y pérdidas de retorno mejor de 9 dB. El consumo total del circuito es de 80 mA, 20 mA por diodo en polarización directa.

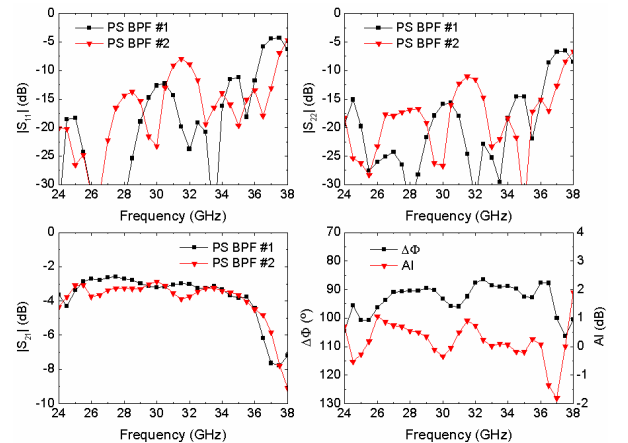


Fig. 9. Resultados de la medida con diodos a temperatura ambiente (300 K).

B. Temperatura Criogénica

Para la medida en criogenia se ha utilizado una caja específica de latón en la que se montará el circuito, dotada de accesos en conector coaxial debido a la interfaz que presenta el criostato con pasamuros en conector coaxial. La pieza presenta una cavidad inferior abierta que coincide con la parte slot del circuito para evitar la existencia de plano conductor inferior.

Para el montaje en conector coaxial se utilizan transiciones comerciales [11] con un diámetro del conductor central $d=300\ \mu\text{m}$. Debido a la dimensión para el conductor central de la línea CPW de entrada al conmutador de fase de 90° , se decide añadir una línea CPW intermedia de $50\ \Omega$ con pasos a masa en sustrato basado en teflón (CLTE-XT $h=127\ \mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.79$) para facilitar la transición y el montaje, y minimizar posibles fracturas de la soldadura en el enfriamiento del circuito. Una imagen del montaje del circuito en el interior del criostato se muestra en la Fig. 10.

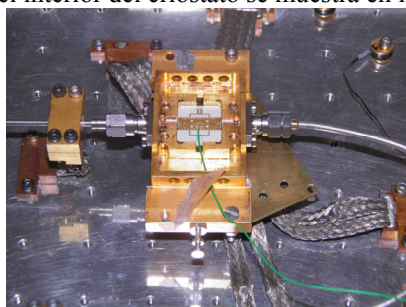


Fig. 10. Montaje de la caja en el interior del criostato.

Los resultados a temperatura criogénica para diferentes puntos de polarización de los diodos se muestran en la Fig. 11. En la banda de 26 a 36 GHz, para todos los puntos de polarización, con corrientes desde 2.5 mA por diodo, se obtiene un valor medio de la diferencia de fase de 88.5° con un error de $\pm 9^\circ$ y un desequilibrio de amplitud medio menor de 0.1 dB. En cuanto a las pérdidas de inserción, se observa que a medida que se aumenta el punto de polarización de los diodos se produce una reducción en las mismas (de 3.9 dB a 3.2 dB como valores medios). Comparando con el valor de la medida a temperatura ambiente en el chasis, se han reducido las pérdidas de 5.2 dB hasta ese mejor caso de 3.2 dB.

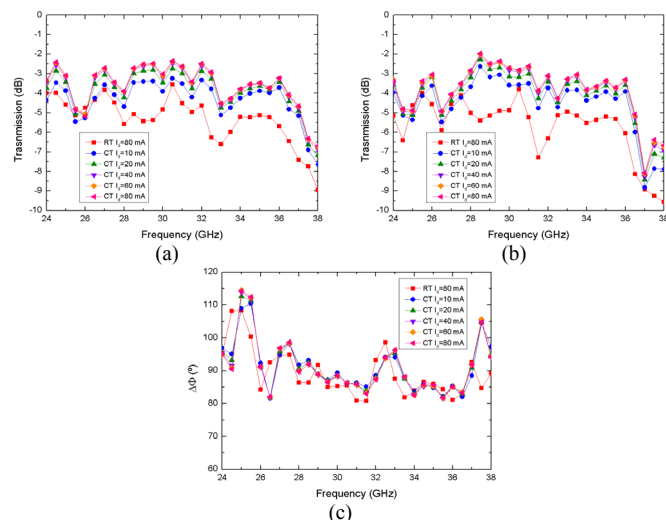


Fig. 11. Resultados de la medida con diodos a temperatura criogénica (15 K). (a) Estado #1. (b) Estado #2. (c) Diferencia de fase.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el modelado de un diodo Schottky, MA4E2037 de MACOM Technology Solutions, tanto a temperatura ambiente (300 K) como criogénica (15 K) para que opere como elemento de conmutación. El modelo ajusta y predice la respuesta del diodo para los parámetros de Scattering en distintos puntos de polarización y su característica corriente-tensión. El diodo presenta una resistencia serie en directa parecida a ambas temperaturas, pero con distintos puntos de polarización, doblando, aproximadamente, el valor de la corriente en ambiente respecto a criogenia. Su uso como conmutador se ha validado mediante el diseño, montaje y caracterización de un circuito conmutador de fase de 90° a ambas temperaturas físicas. La medida a temperatura ambiente del conmutador de fase 90° con los diodos presenta una respuesta en fase de $91.05^\circ \pm 5^\circ$ en la banda de 26 a 36 GHz, con un desequilibrio de amplitud de 0.3 dB para un consumo de 80 mA. En la caracterización a temperatura criogénica, el circuito presenta una diferencia de fase media de 88.5° con un desequilibrio de amplitud medio inferior a 0.1 dB para distintos puntos de polarización.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad bajo el programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 referencia CSD2010-00064. Agradecer a Ana R. Pérez y Eva Cuerno por su asistencia en la fabricación y el montaje del circuito y al Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (Friburgo, Alemania) por permitir realizar medidas en la estación de sondas criogénica.

REFERENCIAS

- [1] B. M. Schiffman, "A new class of broad-band microwave 90-Degree phase shifters," *IRE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 6, no 2, pp. 232-237, Apr. 1958.
- [2] S. Zheng, W. Chan, and K. Man, "Broadband phase shifter using loaded transmission line," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 20, no. 9, pp. 498-500, Sep. 2010.
- [3] Y. Wang, M. E. Bialkowski, and A. M. Abbosh, "Double microstrip-slot transitions for broadband $\pm 90^\circ$ microstrip phase shifters," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 22, no. 2, pp. 58-60, Feb. 2012.
- [4] A. Abbosh, "Broadband fixed phase shifters," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 22-24, Jan. 2011.
- [5] H. R. Fang, X. Tang, K. Mouthaan, and R. Guinvarc'h, "180° and 90° Reflection-type phase shifters using over-coupled Lange couplers," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 11, pp. 3440-3448, Nov. 2012.
- [6] X. Tang and K. Mouthaan, "Large Bandwidth Digital Phase Shifters With All-Pass, High-Pass, and Low-Pass Networks," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 6, pp. 2325-2331, Jun. 2013.
- [7] E. Villa, B. Aja, J. Cagigas, L. de la Fuente and E. Artal, "Design methodology and performance analysis of a wideband 90° phase switch for radiometer applications," *Review of Scientific Instruments*, vol. 84, 124704, Dec. 2013.
- [8] MA4E2037 Schottky Diode Technical Data Sheet, M/A-COM Technology Solutions. Available <https://www.macomtech.com/schottky-mixer-and-detector-diodes>
- [9] V. L. Borblik, Y. M. Shwarts and M. M. Shwarts, "A New Method of Extraction of a p-n Diode Series Resistance from I-V Characteristics and Its Application to Analysis of Low-Temperature Conduction of the Diode Base", *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, vol. 12, no. 4, pp. 339-342, Oct. 2009.
- [10] *The Zero Bias Schottky Diode Detector at Temperature Extremes – Problems and Solutions*, Application Note AN 1090, Avago Technologies, 2010.
- [11] *50 Ohm Seal Model 290-07G Technical Data Sheet*, Southwest Microwave. Available <http://mpd.southwestmicrowave.com/products/launchAccess.php?style=HermeticGlassSeal>