

Análisis de desempeño de conmutadores de microondas serie - paralelo diseñados con diodos *p-i-n* de diferentes materiales semiconductores

Performance analysis of serial and shunt microwave switches designed with *p-i-n* diodes of different semiconductor materials

Gabriela Leija Hernández, José Luis López Bonilla, Luis Alejandro Iturri Hinojosa*

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Col. La Escalera, C.P. 07738, México D.F.

(Recibido el 23 de junio de 2010. Aceptado el 11 de noviembre de 2010)

Resumen

Se presenta un análisis del desempeño de conmutadores de señales microondas tipos serie y paralelo con base en diodos *p-i-n* de diferentes materiales semiconductores. Los materiales analizados son Si, GaAs, SiC, GaN, InP y GaSb. El conmutador tipo serie diseñado con diodos *p-i-n* de GaSb, GaAs, Si y GaN-ZB alcanza menores valores de pérdidas de inserción con respecto a diodos de otros materiales. Se percibe una diferencia de 0,2dB aproximadamente entre las respuestas de pérdida de inserción utilizando diodos de GaSb y SiC6H. Las respuestas más óptimas de aislamiento para frecuencias menores a 10 GHz se logra con conmutadores diseñados con diodos *p-i-n* de SiC y GaN. El conmutador de tipo paralelo diseñado con diodos *p-i-n* en base a GaN alcanza menores valores de pérdida de inserción respecto a diodos de otros materiales. Se perciben 0,2 dB aproximadamente de diferencia de pérdida de inserción entre las respuestas con diodos *p-i-n* de GaN y Si, en la frecuencia de 40 GHz, y una diferencia de 0,4 dB en la frecuencia de 60 GHz. Diodos *p-i-n* diseñados con GaN son los recomendados para el diseño de dispositivos conmutadores tipo paralelo.

----- *Palabras clave:* Diodos *p-i-n*, materiales semiconductores, conmutadores de señales microondas

Abstract

A performance analysis of serial and shunt microwave switches based on *p-i-n* diodes of different semiconductor materials is presented. The materials

* Autor de correspondencia: teléfono + 52 + 551 + 165 88 13, correo electrónico: joseluis.lopezbonilla@gmail.com (J. L. López)

analyzed are Si, GaAs, SiC, GaN, InP and GaSb. The serial type microwave switch designed with GaSb, GaAs, Si and GaN-ZB *p-i-n* diodes reach the lowest values of insertion losses compared to other materials. A 0.2dB insertion loss difference is perceived between GaSb and SiC6H *p-i-n* diodes. The optimal results of isolation for frequencies less than 10GHz is obtained with switches designed with SiC and GaN *p-i-n* diodes. The shunt type switches designed with GaN *p-i-n* diodes reach the lowest values of insertion losses compared to other materials. Approximately 0.2 dB insertion loss differences between the responses of GaN and Si pin diodes in the frequency of 40 GHz and a difference of 0.4 dB at 60 GHz frequency were identified. GaN *p-i-n* diodes are most recommendable for the design of shunt switch devices.

----- **Keywords:** *p-i-n* diodes, semiconductor materials, microwave switches

Introducción

Los circuitos conmutadores de señales microondas tipos serie y paralelo proporcionan el mejor desempeño en banda ancha para los conmutadores de un puerto de entrada-dos puertos de salida (SPDT) [1]. Aplicaciones de gran ancho de banda y elevada potencia como Wi-Fi y WiMAX pueden beneficiarse de conmutadores SPDT con base a diodos *p-i-n* [2]. También existen propuestas de conmutadores con base en diodo *p-i-n* para módulos transmisor – receptor (MTR), para la banda ISM sin licencia, donde opera el estándar Bluetooth. Los conmutadores SPDT basados en diodos *p-i-n*, por su elevado desempeño son ampliamente utilizados en diseños de circuitos de microondas y de RF. Estos conmutadores para ondas milimétricas son muy importantes en el desarrollo de MTRs en los sistemas de comunicaciones [3].

Las aplicaciones más importantes de los diodos *p-i-n* diseñados con los semiconductores de GaAs, SiC, GaN-WZ (red cristalina Wurtzite), GaN-ZB (red cristalina Zinc Blende), InP y GaSb, son los conmutadores y desplazadores de fase presentes en los arreglos de antenas en fase. Estos dispositivos permiten que los arreglos de antenas cuenten con la característica del control electrónico del haz, y son muy utilizados actualmente en los siguientes sistemas de comunicaciones: radares militares, plataformas de rastreo, aplicaciones comerciales, comunicaciones satelitales de orbita LEO,

sistemas receptores satelitales directos (DSS), teléfonos celulares digitales, modems satelitales y de redes inalámbricas LAN [4].

Los circuitos integrados MMIC en base a Arseniuro de Galio (GaAs), hacen posible construir arreglos activos con escaneo electrónico de haz (ESA) de peso ligero, volumen pequeño, elevada confiabilidad y bajo costo. De la misma manera, investigaciones muestran que dispositivos MMIC fabricados con materiales semiconductores de mayor banda prohibida como son: Nitruro de Galio (GaN) y Carburo de Silicio (SiC) permiten aumentar la potencia de los módulos transmisor – receptor (MTR) al doble. Reemplazando los MTR de GaAs por MTR de GaN o SiC, es decir, actualizando el arreglo de antena, se incrementa hasta 10 veces la potencia de trabajo. De igual manera, proporcionará un aumento de hasta 10 veces en el volumen de rastreo o el incremento del 78 por ciento en el alcance [3,5].

Por ejemplo, en [5] se presentan las respuestas de desempeño de diodos *p-i-n* de InGaAs para conmutadores integrados monolíticos para la banda W. El conmutador SPST monolítico diseñado con los diodos *p-i-n* demuestra una pérdida de inserción de 1,3 dB y un aislamiento de 25 dB en la frecuencia de 83 GHz. Por otro lado, conmutadores monolíticos de ondas milimétricas con base en diodos *p-i-n* de GaAs han logrado pérdidas de inserción de 1 dB y aislamiento de 30 dB en la frecuencia de 94 GHz [6].

El presente trabajo realiza un análisis de algunos materiales semiconductores para diodos $p-i-n$, base del diseño de conmutadores de microondas. En un principio se presentan los circuitos de los conmutadores tipos serie y paralelo de un polo-un tiro. Se presentan las ecuaciones de pérdidas de inserción y aislamiento que ayudan a estimar el desempeño para cada conmutador. Se presentan las expresiones matemáticas propuestas por investigadores para el cálculo de los parámetros de diodos $p-i-n$ presentes en las ecuaciones de desempeño. Estos parámetros, resistencia serie y capacitancia de unión, son obtenidos a partir de las características físicas y eléctricas de los

materiales semiconductores estudiados. Se analizan los resultados obtenidos y se proponen los semiconductores adecuados para diodos $p-i-n$ a utilizarse en cada tipo de conmutador.

Metodología

En la figura 1 se muestran los conmutadores tipos serie y paralelo de un polo-un tiro (SPST) y un polo-dos tiros (SPDT) [2].

Para evaluar el desempeño de los conmutadores de señales microondas utilizamos expresiones analíticas de pérdidas de inserción y aislamiento, presentados en la tabla 1 [7]:

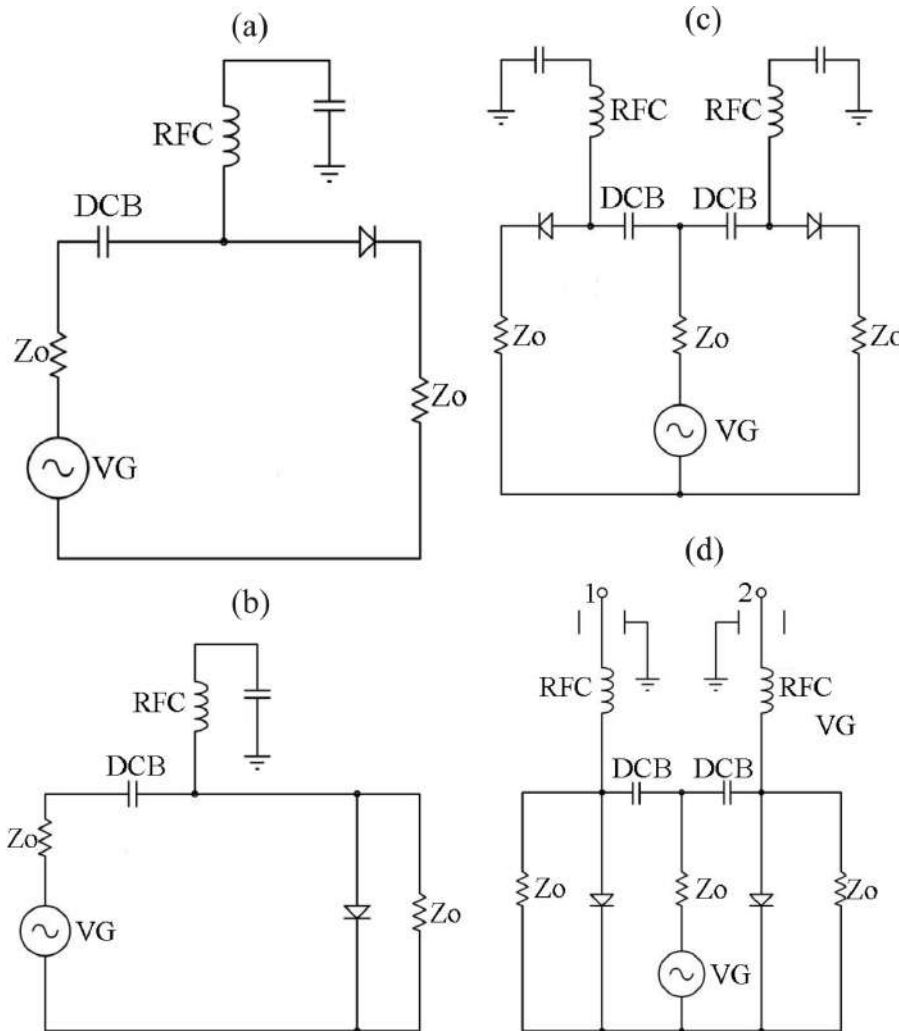


Figura 1 Conmutadores en base a diodos $p-i-n$ (a) SPST serie, (b) SPST paralelo, (c) SPDT serie y (d) SPDT paralelo [2]

Tabla 1 Parámetros de desempeño de los conmutadores tipos serie y paralelo

Tipo	Aislamiento	Pérdidas de inserción (dB)
Serie	$10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{X_C}{2Z_0} \right)^2 \right]$	$20 \log_{10} \left[1 + \frac{R_S}{2Z_0} \right]$
Paralelo	$20 \log_{10} \left[1 + \frac{Z_0}{2R_S} \right]$	$10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{Z_0}{2X_C} \right)^2 \right]$

Los valores de resistencia serie (R_s) y capacitancia de unión (C_j) que caracterizan a los diodos *p-i-n* en situaciones de polarización directa e inversa, respectivamente, fueron calculados de acuerdo a las propiedades físicas y eléctricas de cada material semiconductor base para el diseño de los diodos *p-i-n*. Se asumió que la resistencia en paralelo con la capacitancia C_j en el circuito equivalente del diodo bajo polarización inversa, es infinita.

La capacitancia formada en la región intrínseca se calculó con la ecuación (1):

$$C_j \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_R \pi A^2}{4W} \quad (1)$$

donde ϵ_0 es la permeabilidad en espacio libre ($8,85 \times 10^{-14} \frac{F}{cm}$), A es el diámetro de la unión y W es la anchura de la región I del diodo [8].

La resistencia total del diodo en situación de polarización directa tiene que considerar la resistencia serie correspondiente a la región intrínseca, $R_I (=R_s)$, y la resistencia de las dos uniones entre las capas que conforman el diodo *p-i-n*, $R_J(f)$. Se aproxima con la siguiente ecuación (2):

$$R_T(f) = R_I + 2R_J(f) \quad (2)$$

donde [9]:

$$R_I = \frac{kT}{qI_0} \frac{W}{L} \tanh\left(\frac{W}{2L}\right) \quad (3)$$

$$R_J(f) = \frac{kT}{qI_0} \beta \tanh\left(\frac{W}{2L}\right) \cos\left(\Phi - \frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

Con parámetros dados por:

$$\beta = \frac{\sqrt{[\coth a(1+\cot^2 b)]^2 + [\cot^2 b(1-\coth^2 a)]}}{(1+4\pi^2 f^2 \tau^2)^{\frac{1}{4}} (\coth^2 a + \cot^2 b)}$$

$$a = \frac{W}{2L} (1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{\frac{1}{4}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

$$b = a \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \Phi = \tan^{-1} \left[\frac{\cot b \cdot (1 - \coth^2 a)}{\coth a \cdot (1 + \cot^2 b)} \right],$$

$$\theta = \tan^{-1}(\omega\tau).$$

Los materiales analizados son Si, GaAs, SiC, GaN, InP y GaSb y sus propiedades físicas y eléctricas se presentan en las tablas 2 y 3.

El material escogido, tendrá una variación de densidad de portadores minoritarios en la región intrínseca del diodo, posible de ser estimada, con la longitud de difusión ambipolar L_{AP} dado por:

$$L_{AP} = \sqrt{D_{AP}\tau} \quad (5)$$

donde $D_{AP} \left(= \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} \right)$ es la constante de difusión ambipolar del dispositivo, función de las constantes de difusión de electrones y huecos.

Tabla 2 Propiedades físicas de los materiales semiconductores estudiados [10]

<i>Material</i>	<i>Masa efectiva del electrón m_n/m_0</i>	<i>Masa efectiva del hueco m_p/m_0</i>	<i>Constante dieléctrica</i>	<i>Banda prohibida eV</i>
Si	0,260	0,810	11,70	1,12
GaAs	0,063	0,510	10,89	1,42
SiC-3C	0,680	0,600	6,52	2,36
SiC-4H	0,290	1,000	6,52	3,26
SiC-6H	0,200	1,000	6,52	2,86
GaN-WZ	0,200	0,800	5,35	3,39
GaN-ZB	0,130	0,190	5,30	3,20
InP	0,080	0,600	9,61	1,34
GaSb	0,400	0,050	14,40	0,73

Tabla 3 Propiedades eléctricas de los materiales semiconductores estudiados [10]

<i>Material</i>	<i>Movilidad del electrón $cm^2/V/seg$</i>	<i>Movilidad del hueco $cm^2/V/seg$</i>	<i>Constante de difusión de huecos cm^2/seg</i>	<i>Constante de difusión de electrones cm^2/seg</i>	<i>Campo de ruptura V/cm</i>	<i>Velocidad térmica del electrón m/seg</i>	<i>Velocidad térmica del hueco m/seg</i>
Si	1400	450	12	36	3e5	2,3e5	1,3e5
GaAs	8500	400	10	200	4e5	4,6e5	1,6e5
SiC-3C	800	320	8	20	1e6	1,4e5	1,5e5
SiC-4H	900	120	3	22	(3a5)e6	2,1e5	1,2e5
SiC-6H	400	90	2	90	(3a5)e6	2,6e5	1,2e5
GaN-WZ	1000	200	5	25	5e6	2,6e5	1,3e5
GaN-ZB	1000	350	9	25	5e6	3,2e5	2,7e5
InP	5400	200	5	130	5e5	4,1e5	1,5e5
GaSb	3000	1000	25	75	5e4	1,8e5	5,2e5

Para efectos de análisis, iniciamos considerando un valor determinado de tiempo de vida de portadores, característica propia de la recombinación de portadores en la región I del diodo. El tiempo de vida de portadores es interpretado como el

tiempo que demoran los portadores (electrones y huecos) en recombinarse en la región intrínseca del dispositivo. Un valor alto del tiempo de vida no necesariamente implica una velocidad de conmutación baja del dispositivo [8].

Por otro lado, el material utilizado en la región I del diodo es de tipo n (mayormente elegido) y tiene una densidad de electrones en la banda de conducción N_D . La resistividad de la región I dependerá de este valor de densidad de electrones, así como de la movilidad de electrones.

El ancho de la región intrínseca (W) para cada material semiconductor estudiado en los diodos $p-i-n$ se encuentra con la ecuación (6):

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi}+V_r)}{qN_D}} \quad (6)$$

donde ε_s ($= \varepsilon_r \varepsilon_0$) es la constante de permitividad y V_{bi} el potencial electrostático del semiconductor utilizado. V_r es el voltaje de polarización inversa aplicado al dispositivo. El potencial electrostático V_{bi} se calcula con la concentración de portadores intrínseca del semiconductor, de acuerdo con la ecuación:

$$V_{bi} = kTq \ln \frac{N_A N_D}{ni^2} \quad (7)$$

donde N_A y N_D son las concentraciones de impurezas donoras yceptoras utilizadas en el diseño del dispositivo. La banda prohibida de cada material semiconductor ayudó a encontrar las concentraciones de portadores intrínseca según la ecuación:

$$ni = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (8)$$

donde N_C y N_V son las densidades efectivas de estados en las bandas de conducción y valencia de cada semiconductor [11].

Con la longitud de difusión L calculada, se encuentra la relación W/L , resultado del cociente de las ecuaciones (6) y (5), para el diodo $p-i-n$. Posteriormente, utilizando la ecuación (2) encontramos la resistencia del diodo $p-i-n$, diseñado con algún material semiconductor de la tabla 1, en función de la frecuencia de operación.

Resultados y discusión

Desempeño de conmutadores diseñados con diodos $p-i-n$ de distintos materiales

Como se puede apreciar en la tabla 1, el nivel de pérdida de inserción de un conmutador, depende del valor de resistencia serie y la capacitancia de unión del modelo de circuito equivalente del diodo $p-i-n$. La resistencia serie depende del tiempo de vida de portadores y del ancho de la región intrínseca. Un ancho W pequeño en un diodo $p-i-n$ conlleva a obtener una resistencia serie baja, aunque no permite alcanzar buenas respuestas de distorsión de señal. Un valor elevado de tiempo de vida de portadores, definitivamente asegura un valor bajo de resistencia serie del diodo bajo situación de polarización directa.

Los diodos $p-i-n$ con valores altos de ancho de región intrínseca (W), tendrán buenas características de distorsión de señal, lo cual se consigue con diodos $p-i-n$ de baja capacitancia de unión, C_j .

Para el análisis de desempeño, consideramos los siguientes parámetros físicos para los diodos $p-i-n$ diseñados con distintos semiconductores:

Tiempo de vida de portadores, $\tau = 45ns$.

Corriente de polarización directa típica,
 $I_0 = 10mA$

Concentración de impurezasceptoras,
 $N_A = 1 \times 10^{19} cm^{-3}$.

Concentración de impurezas donoras,
 $N_D = 8 \times 10^{14} cm^{-3}$.

Diámetro del diodo,
 $D = 71\mu m$.

Voltaje de polarización inversa,
 $V_r = 45$ voltios.

El valor considerado de tiempo de vida de portadores asegura que el dispositivo se comportará como una resistencia lineal pura sin introducir distorsión en las señales de microondas.

Esto debido a que la frecuencia de las señales de operación será muy superior al límite inferior de frecuencia ($1/2\pi\tau=4\text{MHz}$) para no distorsión de señal, definido en el diseño para el diodo *p-i-n*.

Resultados de desempeño de conmutadores tipo serie

Para el circuito conmutador tipo serie, las respuestas de pérdida de inserción y aislamiento para los diodos *p-i-n* de los materiales semiconductores mencionados se muestra en la figura 2.

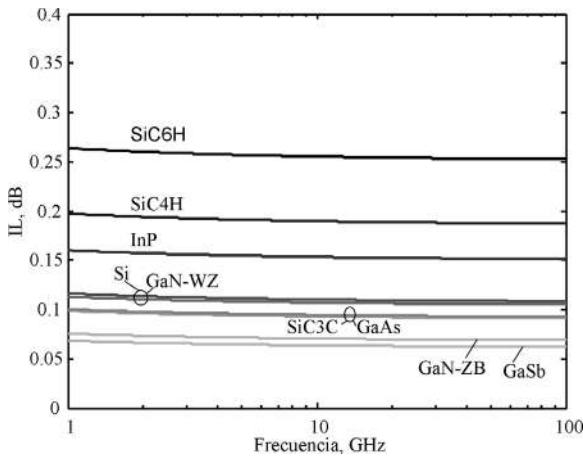


Figura 2 Resultados de pérdida de inserción de conmutadores tipo serie

La respuesta de pérdida de inserción se mantiene ligeramente constante, disminuyendo conforme la frecuencia de la señal de operación aumenta. Se puede apreciar una diferencia de pérdida de inserción de 0,2 dB aproximadamente entre conmutadores serie con base en semiconductores GaSb y SiC6H.

La figura 3 muestra los resultados de aislamiento del conmutador.

El diodo *p-i-n* diseñado con GaSb alcanza valores de aislamiento inferiores con respecto a los otros semiconductores, lo cual indica que este diodo *p-i-n* no es el adecuado para utilizarse en este tipo de conmutador. Buen aislamiento se consigue con los semiconductores de SiC, GaN e InP para frecuencias menores a 10 GHz.

Superando los 10 GHz, todos los materiales estudiados no contribuyen a un buen aislamiento en conmutadores tipo serie.

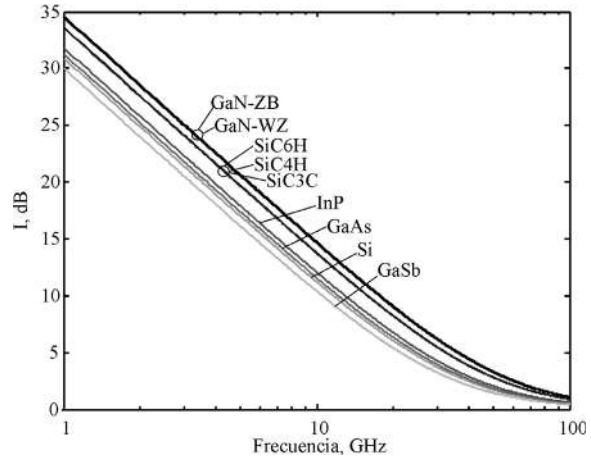


Figura 3 Resultados de aislamiento de conmutadores tipo serie

Con los resultados obtenidos de pérdidas de inserción y aislamiento, se puede concluir, que los diodos *p-i-n* diseñados con GaN-ZB presentan buen desempeño en conmutadores serie operando con señales microondas por debajo de 10 GHz.

Resultados de desempeño de conmutadores tipo paralelo

La respuesta de pérdida de inserción para este conmutador se muestra en la figura 4.

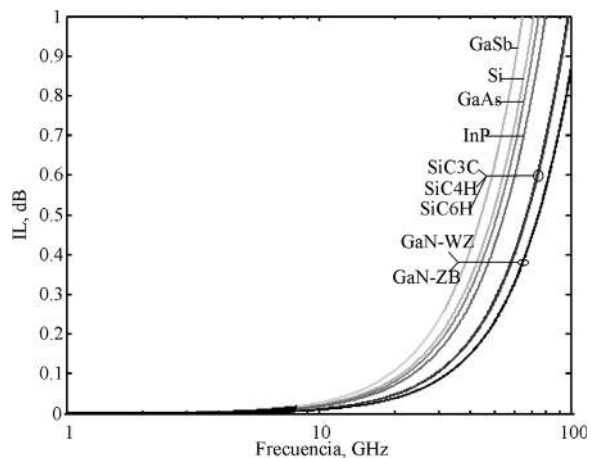


Figura 4 Resultados de pérdida de inserción del conmutador tipo paralelo

Se puede observar que a partir de 10 GHz la pérdida de inserción aumenta para todos los materiales semiconductores. Conmutadores con diodos *p-i-n* de GaN permiten alcanzar la mejor respuesta de pérdida de inserción. GaN logra aproximadamente unos 0,2 dB de pérdida de inserción por debajo de Si en la frecuencia de 40 GHz.

La figura 5 muestra las respuestas de aislamiento.

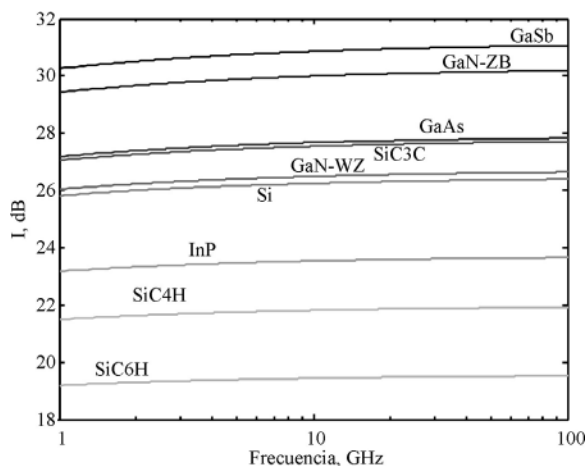


Figura 5 Resultados de aislamiento del conmutador tipo paralelo

El conmutador tipo paralelo con diodo *p-i-n* con base en GaSb produce mayor aislamiento respecto a los otros materiales. Con diodos *p-i-n* de GaSb se alcanzan valores de aislamiento superiores en 5dB aproximadamente respecto a los diodos de Si.

Con los resultados obtenidos de pérdidas de inserción y aislamiento, se puede concluir, que utilizando los diodos *p-i-n* diseñados con GaN se logra buen desempeño en conmutadores paralelo operando con señales microondas por debajo de 60 GHz.

Conclusiones

Los materiales semiconductores SiC y GaN son los recomendados para el diseño de diodos *p-i-n* a utilizarse en los dispositivos conmutadores de ondas milimétricas, tipos serie y paralelo. Así mismo, se presenta una comparación del

desempeño de los semiconductores analizados, en función de la frecuencia de operación que se ocupe en determinada aplicación.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido a través del proyecto de investigación SIP20100593.

Referencias

1. A. Iturri Hinojosa, L. M. Resendiz, T. V. Torchynska. "Numerical Analysis of the Performance of PIN Diode Microwave Switches Based on Different Materials". *Materials Characterization Symposium at the XVIII International Materials Research Congress*. Agosto 16-20. Cancun (Mexico). 2009.
2. PIN Diode Switch suits Wimax and Wi-Fi applications, M/A-COM Technology Solutions, Inc. <http://news.thomasnet.com>. Consultada el 25 de noviembre de 2009.
3. PHILIPS Electronics N.V. Application Note AN10173. 2000. pp. 1-2.
4. L. A. Iturri Hinojosa. *Comparación de parámetros de dispositivos-diodos p-i-n de diferentes materiales para aplicaciones en antenas de arreglos de fase y sistemas radares*. Tesis. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. UPIITA. Instituto Politécnico Nacional. México. D. F. 2010. pp. 85-100.
5. J. Putnam, M. Fukuda, P. Staecker, Y-H.Yun. "A 94 GHz monolithic switch with a vertical PIN diode structure". *IEEE GaAs IC Symposium*. Octubre 16-19. 1994. pp. 333-336.
6. E. Alekseev, D. Pavlidis, J. Dickmann, T. Hackbarth. "W-Band InGaAs/InP Diode Monolithic Integrated Switches". *IEEE. GaAs IC Symposium*. Noviembre 3-6. 1996.
7. Gerald Hiller. *Design with PIN Diodes*. App Note 1002. Alpha Industries Inc. pp. 1-14.
8. J. White. *Microwave Semiconductor Engineering*. Ed. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1982. pp. 1-105.
9. R. Caverly, Hiller G. "Microwave Resistance of Gallium Arsenide and Silicon *p-i-n* Diodes". *IEEE MTT-S Digest*. Vol. 2. 1987. 99. 591-594.
10. National Semiconductor Corporation (NSM). <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>. 2009. Consultada el 25 de noviembre de 2009.
11. S. M. Sze. *Semiconductor Devices*. 2ª. ed. Ed. John Wiley & Sons. New York. 2002. pp. 17-44.