

## Foto-transceptor para sistemas RoF y RoFSO usando un mezclador optoelectrónico basado en PHEMT

A. Arvizu<sup>a</sup>, J.A. Reynoso-Hernández<sup>a</sup>, M.A. Chávez<sup>a</sup>, y J. de D. Sánchez<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Carret. Ens.-Tij.3918, Zona Playitas, Ensenada, B.C., 22860, México,

e-mail: arvizu@cicese.mx

<sup>b</sup>Universidad Autónoma de Baja California,

KM 103 Carr. Tij.-Ens., B.C. 22860, México,

e-mail: jddios@uabc.edu.mx

Recibido el 25 de noviembre de 2011; aceptado el 16 de mayo de 2012

Se describe la aplicación de mezcladores optoelectrónicos auto-oscilantes basados en el uso de transistores pseudomórficos de alta movilidad electrónica (PHEMT's) en sistemas de radio-sobre-fibra óptica (RoF) y radio sobre espacio libre óptico (RoFSO). En particular, reportamos el desarrollo de etapas de fotorrecepción (conversión de bajada) y conversión de subida para dichos sistemas a dos diferentes longitudes de onda: a 1550 nm empleando un mezclador basado en un PHEMT en tecnología de InP como dispositivo activo para detección y otro con un PHEMT en tecnología de GaAs a 850 nm. Se reportan los resultados de la caracterización electro-óptica del transistor tanto en oscuridad como para diferentes niveles de iluminación. Se muestran también resultados obtenidos en una aplicación típica de GSM sobre fibra óptica.

*Descriptor:* RoF; RoFSO; PHEMT; GSM.

This paper deals with the application of self-oscillating optoelectronic mixers based on the use of a pseudomorphic high electron mobility transistor (PHEMT's) in radio over optical fiber (RoF) and radio over free space optics (RoFSO) systems. We describe the development of photoreception stages (down conversion) and up-conversion stages for such systems for two different wavelengths: 1550 nm using a mixer based on a PHEMT on InP substrate as active device for detection and another one with a PHEMT on GaAs substrate at 850 nm. We report the characterization results both for not illumination and illumination conditions. We also describe the results obtained on a typical application of GSM over optical fibers.

*Keywords:* RoF; RoFSO; PHEMT; GSM.

PACS: 07.57.-c; 85.60.Bt; 85.60.Dw

### 1. Introducción

En la actualidad existe una actividad importante de investigación y desarrollo de los denominados sistemas de radio sobre fibra óptica y radio sobre espacio libre óptico (RoF y RoFSO: por sus siglas en inglés, radio-over-fiber y radio-over-free-space-optics respectivamente) ver por ejemplo [12-13]. Este tipo de sistemas encuentra su aplicación en los esquemas tradicionales de distribución de señales de radiofrecuencia (RF) y también en aplicaciones de redes de acceso de banda amplia, en redes de sensores, generación y distribución de ondas milimétricas, así como en aplicaciones de división por longitud de onda (WDM por sus siglas en inglés, wavelength division multiplexing) sobre espacio libre óptico [1].

Para la implementación de sistemas de radio sobre fibra óptica existen diversas arquitecturas [2], por ejemplo en la figura 1 se muestra un sistema RoF formado por una estación central (EC) (donde son realizadas todas las funciones de conmutación, enrutamiento, control de acceso al medio y administración de frecuencias), una red de fibra óptica y una estación remota (ER). Esta configuración centralizada permite colocar el equipo sensible en un ambiente seguro. Además, los componentes de costo elevado son compartidos entre varias estaciones remotas (simplificando la arquitectura total de la red).

Cuando se emplean los sistemas RoF y RoFSO se requieren etapas de conversión eléctrica a óptica (E/O) para la transmisión de la señal de RF vía fibra óptica (o espacio libre) y de conversión óptica a eléctrica (O/E) en la etapa de recepción. Para la conversión a señal eléctrica de la portadora óptica modulada se emplea normalmente un foto-receptor compuesto de un fotodiodo p.i.n ó fotodiodo de avalancha (APD) con su electrónica correspondiente. La señal fotodetectada generalmente debe ser retransmitida en el dominio de la radiofrecuencia requiriendo el uso de dispositivos electrónicos para el mezclado (conversión de subida) y acondicionamiento de la señal previos a la etapa de modulación de radiofrecuencia [3].

El proceso de fotodetección, en aplicaciones de RoF, RoFSO, puede realizarse alternativamente empleando mezcladores optoelectrónicos auto-oscilantes a base de transistores pseudomórficos de alta movilidad electrónica (PHEMT's) [4]. Esta técnica presenta ventajas sobre el fotoreceptor convencional tales como el hecho de permitir combinar funciones de oscilación local, fotodetección (conversión de bajada), y conversión de frecuencia ascendente además de proporcionar un aislamiento de microondas que no es posible de obtener en el mezclador de microondas convencional y conservando la compatibilidad con los procesos de diseño de circuitos integrados monolíticos de microondas (MMIC). Además, mediante el batimiento de dos señales

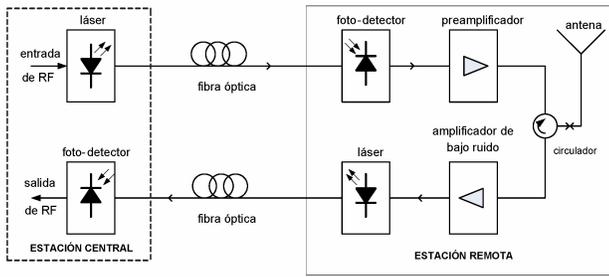


FIGURE 1. Sistema básico de radio sobre fibra óptica (RoF).

ópticas, es posible obtener una señal de alta frecuencia (RF, microondas) de alta estabilidad [4,5]. En el presente escrito se investiga: a) la aplicación de mezcladores opto-electrónicos auto-oscilantes basados en el uso de transistores pseudomórficos de alta movilidad electrónica (PHEMT's) en sistemas de radio-sobre-fibra óptica (RoF) y radio sobre espacio libre óptico (RoFSO), b) resultados experimentales del PHEMT cuando es empleado en esta modalidad describiendo su caracterización en corriente directa para seleccionar la zona óptima de operación como oscilador opto-electrónico.

## 2. Tipos de enlaces RoF y RoFSO

Un enlace de radio-sobre-fibra puede ser clasificado (ver Fig. 2) de acuerdo a la banda de frecuencias a ser transmitida como BB: banda base, IF: frecuencia intermedia, RF: radiofrecuencia (u ondas milimétricas). En el caso de radio sobre espacio libre óptico puede agregarse la clasificación WDM-RoFSO. En la transmisión de datos de la estación central (EC) a la estación remota (ER), se alimenta la señal de información dentro del módem (de la EC) proveniente de una red de conmutación telefónica pública (PSTN), de una red de conmutación móvil (MSN), de Internet, o de cualquier otro tipo de red. La señal de información (RF, IF o BB) modula la intensidad de una portadora óptica que es transmitida a la estación remota por medio de una fibra óptica donde la señal de información debe ser recuperada. Esta señal se acondiciona y retransmite a las estaciones móviles (EM) por medio de la antena inalámbrica de la ER [2].

Cuando la señal que modula la potencia de la portadora óptica es generada en la banda de RF dentro de la EC para ser transmitida a la ER (Fig. 2(a)) se denomina RF-sobre-fibra (RFoF). En este caso, en cada ER, la señal modulada es recuperada mediante un foto-detector y retransmitida a la EM. Esta configuración tiene la ventaja de una ER simple pero es susceptible a la dispersión cromática de la fibra limitando severamente la distancia de transmisión [2].

Cuando la señal es generada en la banda IF dentro de la EC y es transmitida a la ER modulando la potencia de la portadora óptica (Fig. 2(b)) se denomina IF-sobre-fibra (IFoF). En esta configuración, la señal es recuperada en cada ER mediante un foto-detector, trasladada a la banda RF, y transmitida a la EM. En este esquema, el efecto de la dispersión cromática sobre la distribución de las señales IF es más redu-

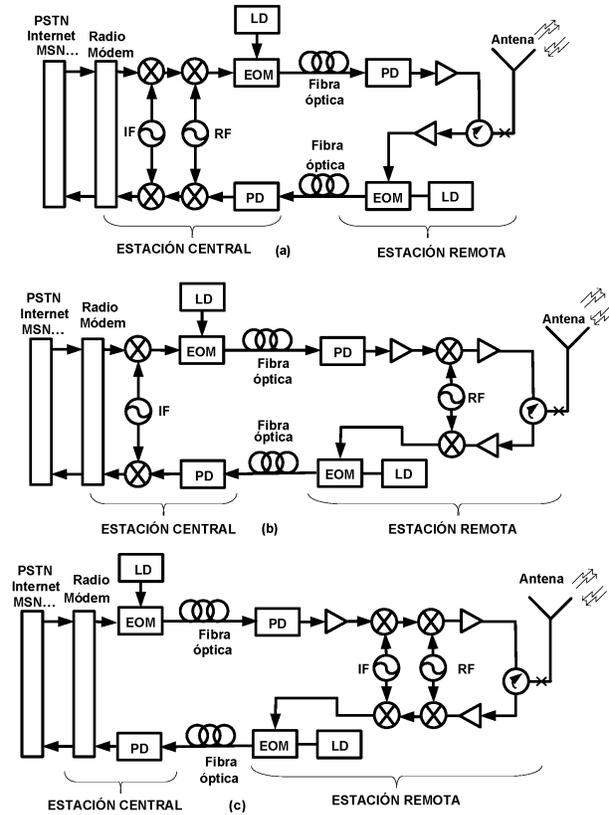


FIGURE 2. Configuraciones de un enlace RoF. A) RF-sobre-fibra, b) IF-sobre-fibra, c) BB-sobre-fibra. Donde, PSTN:red de conmutación telefónica pública, MSN:red de conmutación móvil, LD: diodo láser, PD: fotodetector, EOM: modulador óptico externo.

cido, pero la antena de la ER implementada para sistemas RoF requiere de hardware adicional como osciladores locales (LO) de frecuencias microondas/milimétricas para el traslado de frecuencias (y antenas ópticas para WDM-RoFSO) [1].

Si la señal en banda base de la EC modula a la potencia de la portadora óptica (Fig. 2(c)) y la información es transmitida a la ER se denomina *banda base-sobre-fibra* (BBof). En cada ER, la señal es recuperada mediante un foto-detector, trasladada a la banda RF, y transmitida a la EM. En la transmisión en banda base, la influencia de la dispersión de la fibra es insignificante, pero la configuración de la ER es mucho más compleja.

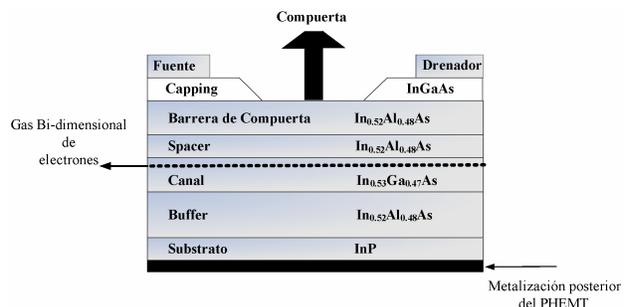


FIGURE 3. Estructura física del PHEMT en sustrato de InP.

### 3. Transistor pseudomórfico de alta movilidad electrónica (PHEMT)

El PHEMT es un transistor de efecto de campo (ver Fig. 3) fabricado a base de semiconductores de diferentes anchos de banda prohibida que forman una heteroestructura y puede ser utilizado como fototransistor proporcionando una alta ganancia interna y también como mezclador optoelectrónico, desempeñando simultáneamente la foto-detección y conversión ascendente de frecuencia de hasta varias decenas de GHz [4].

#### 3.1. Características de fotodetección del PHEMT

Al aplicar una señal óptica a un transistor de efecto de campo no encapsulado (ver Fig. 3), las aberturas entre las tres terminales del transistor permiten la penetración y absorción de la luz dentro de las capas internas, generando portadores libres en dicho dispositivo. Esto es posible siempre y cuando la energía del fotón  $E_{ph}$  incidente (con longitud de onda  $(\lambda)$ ) sea mayor o igual que la energía de banda prohibida  $E_g$  del semiconductor o semiconductores que constituyen al transistor.

Bajo la incidencia de una señal láser el PHEMT presenta ganancia óptica, con una componente de baja frecuencia (efecto fotovoltaico) y una componente rápida producida por la colección directa de los electrones foto-generados (efecto fotoconductor). La corriente foto-generada ( $I_{PH}$ ) es una relación entre la corriente del drenador ( $I_{DS}$ ) sin iluminación y con iluminación expresada como:

$$I_{PH} = I_{DS\text{CON LUZ}} - I_{DS\text{SIN LUZ}} \quad (1)$$

La señal láser en el PHEMT provoca asimismo un desplazamiento en los voltajes de umbral y un incremento en la corriente  $I_{DS}$  conforme la potencia óptica que incide sobre el dispositivo aumenta. Debido a que el voltaje de compuerta ( $V_{GS}$ ) es modulado por el efecto fotovoltaico, se genera una ganancia interna convirtiendo al PHEMT en foto-transistor. Incluso cuando  $V_{GS}$  es más pequeño que el voltaje de umbral, es observado un pequeño incremento en la  $I_{DS}$  con iluminación. Lo anterior se debe al efecto foto-conductor en el cual los electrones foto-generados incrementan la conductividad del canal y, por lo tanto, incrementan la corriente  $I_{DS}$ . Sin embargo, cuando el transistor se encuentra por debajo de su voltaje de umbral no proporciona ninguna ganancia interna ya que se encuentra apagado.

##### 3.1.1. Efecto fotovoltaico interno y externo

El efecto fotovoltaico interno se presenta cuando la luz es absorbida en la capa buffer generando pares electrón-hueco. Los electrones son barridos al pozo cuántico contribuyendo levemente en la corriente  $I_{DS}$  mientras que los huecos que no pueden ser alcanzados por este campo eléctrico se acumulan en la capa buffer del lado de la fuente. La acumulación de los huecos fotogenerados induce un fotovoltaje interno, por lo que el voltaje de umbral ( $V_{TH}$ ) es desplazado hacia valores de compuerta más negativos. El desplazamiento del

$V_{TH}$  produce un incremento en la corriente del drenador. Entonces, un pequeño cambio en el  $V_{GS}$  induce corrientes de drenador, lo que hace que varíe la transconductancia del transistor. Por lo tanto, el transistor tiene ganancia interna proporcionada por el efecto fotovoltaico interno [6,7,8].

Por otro lado, el efecto fotovoltaico externo se presenta cuando pares electrón-hueco son generados en la capa donadora. Los campos internos del transistor provocan que los electrones sean barridos al pozo cuántico, permitiendo un pequeño incremento en la corriente  $I_{DS}$ , mientras que los huecos son atraídos por el potencial negativo presente en la compuerta. La corriente de compuerta producida por el flujo de huecos induce un fotovoltaje que se suma al voltaje de polarización de compuerta provocando un incremento de la corriente  $I_{DS}$ . El efecto fotovoltaico externo llega a ser dominante únicamente con una resistencia externa de valor grande ( $\sim 1\text{ M}\Omega$ ) en el circuito de polarización de compuerta además de que el transistor debe estar en conducción [9].

##### 3.1.2. Efecto fotoconductor

Cuando la energía del fotón incidente es mayor que la energía de la banda prohibida del material semiconductor, el fotón es absorbido en dicho semiconductor y se generan pares electrón-hueco. Los portadores fotogenerados incrementan la conductividad del material. El incremento en la conductividad debido a la absorción óptica es llamado efecto fotoconductor. Específicamente, se presenta cuando los fotones son absorbidos en la capa canal del transistor, foto-generándose pares electrón-hueco que incrementan la concentración superficial de los electrones y son directamente colectados en el pozo cuántico debido al campo eléctrico de polarización del drenador. Este exceso de electrones es el que permite aumentar la conductividad de dicho material. La corriente generada por el efecto fotoconductor puede responder a elevadas frecuencias de modulación del láser sin verse afectada por pequeñas variaciones en el voltaje  $V_{GS}$ , quedando solamente en función del espesor de la capa canal y de la potencia óptica absorbida por el semiconductor [10].

### 3.2. Mezclador optoelectrónico basado en un PHEMT

En la Fig. 4 se muestra un mezclador optoelectrónico auto-oscilante formado por un PHEMT, un filtro paso-banda, un atenuador, un cambiador de fase y un acoplador direccional. Sin incidencia de una portadora óptica modulada, el esquema de la Fig. 4 es el de un oscilador de retroalimentación. Con la presencia de una portadora óptica modulada, el oscilador se convierte en un mezclador optoelectrónico auto-oscilante, ya que existe la penetración y absorción de la luz dentro de las capas internas del transistor, generando portadores libres en dicho dispositivo. El término auto-oscilante se refiere a que el mezclador no requiere de un oscilador local externo para realizar el mezclado, ya que una oscilación senoidal es generada por el propio circuito [11].

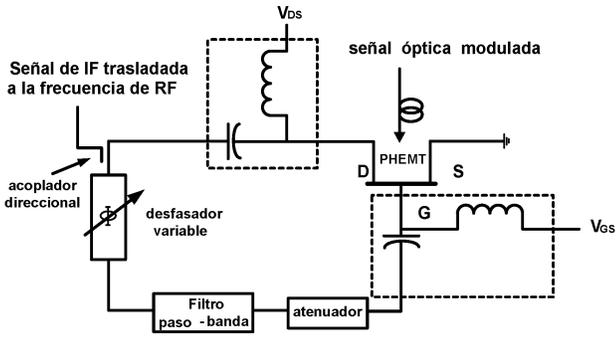


FIGURE 4. Mezclador optoelectrónico empleando PHEMT.

Para utilizar al PHEMT como foto-transistor y mezclador optoelectrónico, el transistor debe proporcionar una ganancia interna para lo cual debe estar en la condición de encendido. El efecto fotovoltaico es el mecanismo de fotodetección dominante que contribuye a la ganancia interna del fototransistor, así cuando señales ópticas de baja potencia  $P_{opt}$  iluminan al PHEMT, el fotovoltaje ( $V_{PH}$ ) está dado por:

$$V_{PH} \approx a_1 P_{OPT} \quad (2)$$

donde  $a_1$  es el coeficiente de la eficiencia de acoplamiento de la señal láser al transistor. La corriente en el drenador  $I_{DS}$  en pequeña señal está dada por:

$$I_{DS} = g_m(t) V_{GS}(t) \quad (3)$$

$g_m(t)$  es la transconductancia y  $V_{GS}(t)$  es el voltaje de compuerta a fuente. Debido a las propiedades no-lineales del PHEMT, la corriente del drenador puede ser expresada como una serie de potencias del voltaje de compuerta:

$$I_{DS} = I_S + b_1 V_{GS} + b_2 V_{GS}^2 + b_3 V_{GS}^3 + \dots \quad (4)$$

donde  $b_1, \dots, b_n$  son los coeficientes de la serie de Taylor e  $I_S$  es la corriente estática de DC del drenador. Sea  $f(t)$  la señal que modula en intensidad a la portadora óptica. Considerando que el valor promedio de  $f(t)$  es igual a cero, y que la magnitud de  $f(t)$  se encuentra normalizada a un valor unitario o menor, la potencia óptica de la señal óptica modulada por una señal de radiofrecuencia está descrita por:

$$\begin{aligned} P_{OPT}(t) &= P_0 [1 + m f(t)] \\ &= P_0 [1 + m \cos(2\pi f_{IF} t)] \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $P_0$  es la potencia óptica promedio,  $m$  es el índice de modulación óptica:

$$m = \frac{P_{MAX} - P_{MIN}}{P_{MAX} + P_{MIN}} \quad (6)$$

Si se aplica una señal óptica modulada a la compuerta, ésta es absorbida dentro de las capas internas del PHEMT (produciendo un fotovoltaje ( $V_{PH}$ )), el voltaje  $V_{GS}$  será:

$$V_{GS} = V_{GB} + V_S \cos(2\pi f_{LO} t) + V_{PH} \quad (7)$$

donde  $V_{GB}$  es el voltaje de alimentación en DC de la compuerta,  $V_S$  y  $f_{LO}$  corresponden a la amplitud y frecuencia del oscilador local, respectivamente. Usando las Ecs. (2), (5) y (7) se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{GS} &= V_{GB} + V_S \cos(2\pi f_{LO} t) \\ &+ a_1 P_0 [1 + m \cos(2\pi f_{IF} t)] \end{aligned} \quad (8)$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser manipuladas para obtener la expresión de la corriente de drenador de los productos de mezclado  $f_{LO} + f_{IF}$  (sustituyendo la Ec. (8) en (4), desarrollando la ecuación resultante y despreciando los términos de corriente directa y productos de intermodulación se llega a la ecuación mostrada abajo):

$$\begin{aligned} I_{DS}(f_{LO} \pm f_{IF}) &= 2b_2 V_S \cdot a_1 P_0 m \\ &\cdot \cos(2\pi f_{LO} t) \cos(2\pi f_{IF} t) \\ &+ 6b_3 (V_{GB} + a_1 P_0) V_S a_1 P_0 m \\ &\times \cos(2\pi f_{LO} t) \cos(2\pi f_{IF} t) \\ &+ 12b_4 (V_{GB} + a_1 P_0)^2 V_S a_1 P_0 m \\ &\times \cos(2\pi f_{LO} t) \cos(2\pi f_{IF} t) \\ &+ 20b_5 (V_{GB} + a_1 P_0)^3 V_S a_1 P_0 m \\ &\times \cos(2\pi f_{LO} t) \cos(2\pi f_{IF} t) + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

que se puede expresar como:

$$\begin{aligned} I_{DS}(f_{LO} \pm f_{IF}) &= V_S \cdot a_1 P_0 m \cdot \frac{1}{2} (\cos(2\pi (f_{LO} + f_{IF}) t) \\ &+ \cos(2\pi (f_{LO} - f_{IF}) t)) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (n^2 + n) \\ &\times (V_{GB} + a_1 P_0)^{n-1} b_{n+1} \end{aligned} \quad (10)$$

En esta expresión se puede apreciar que la potencia de la señal trasladada es proporcional al índice de modulación óptico, la potencia óptica incidente, la amplitud del oscilador local y a los coeficientes no lineales. Además, se asume que el término de segundo orden no-lineal de los coeficientes es mayor que los términos de mayor orden. Asimismo, la eficiencia de mezclado de las componentes de frecuencia deseada puede ser controlada mediante la condición de alimentación de la compuerta, de la cual son fuertemente dependientes los coeficientes no-lineales.

## 4. Experimentos

### 4.1. Caracterización sin iluminación

Las características eléctricas en DC (curvas características  $I_{DS}$ - $V_{DS}$ ,  $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ,  $g_m$ - $V_{GS}$ ) de los PHEMTs en sustrato de InP y en sustrato de GaAs, respectivamente, son obtenidas experimentalmente (ver Fig. 5) para elegir el punto

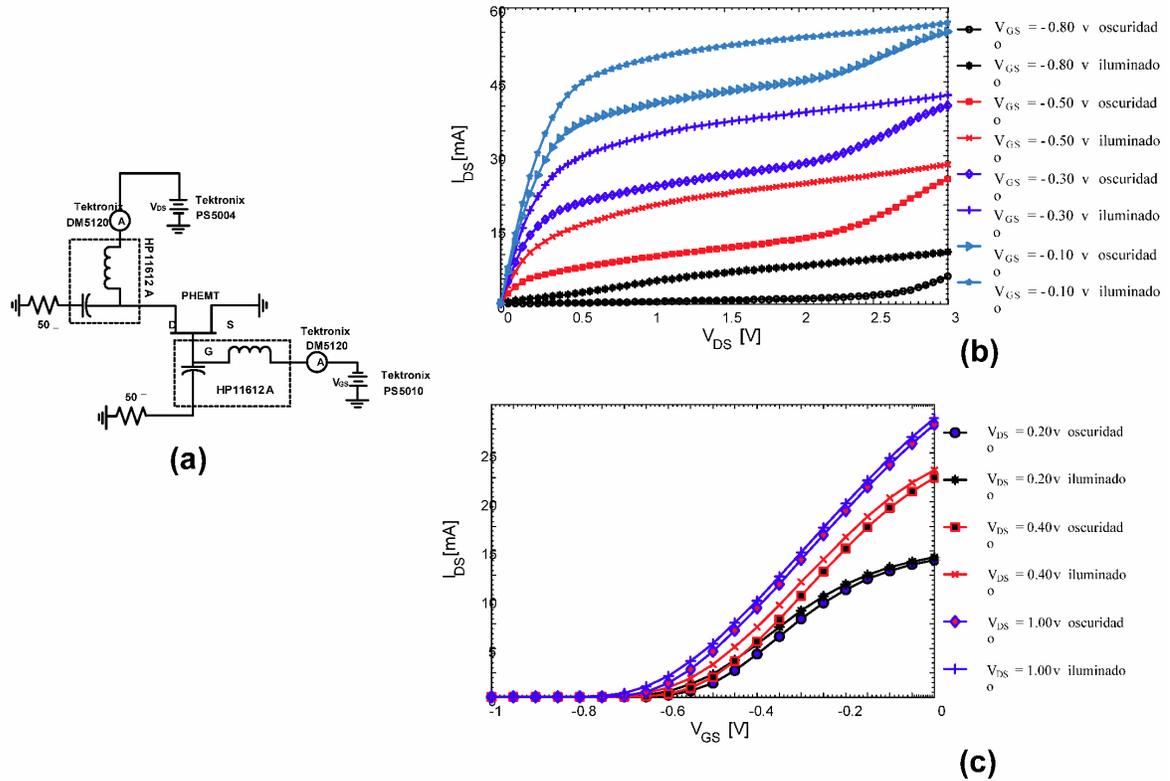


FIGURE 5. a) Esquema experimental para caracterización en DC del PHEMT y curvas características b)  $I_{DS}-V_{DS}$ , c)  $I_{DS}-V_{GS}$  obtenidas.

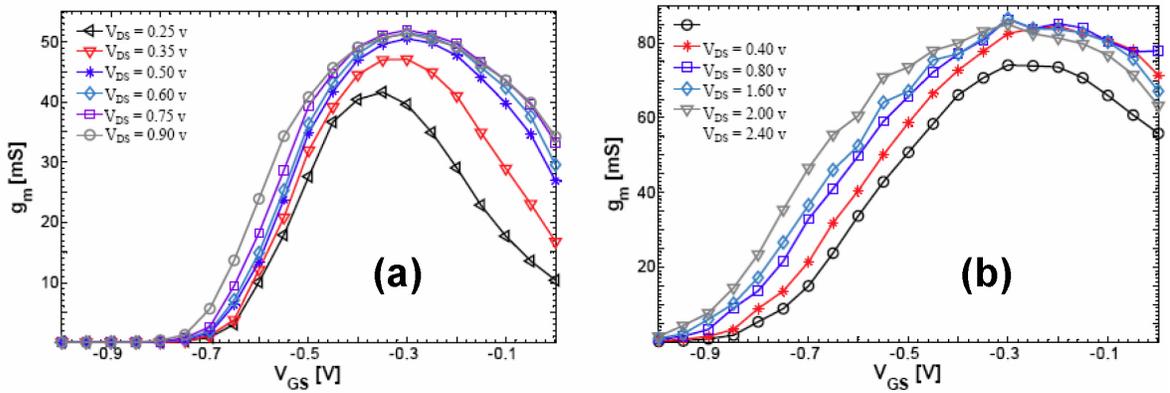


FIGURE 6. Transconductancia  $g_m$  como una función del voltaje  $V_{GS}$  para diferentes voltajes de compuerta y de drenador  $V_{DS}$ .

de operación para los mezcladores optoelectrónicos auto-oscilantes a diseñar y que permitan generar los productos de mezclado. En particular, la Fig. 6 muestra resultados de la medición experimental de la transconductancia  $g_m$  como una función del voltaje  $V_{GS}$  para diferentes voltajes de compuerta y de drenador  $V_{DS}$ .

**4.2. Caracterización con iluminación**

La Fig. 7 muestra la configuración empleada para la medición de los parámetros en DC del transistor bajo la incidencia de una fuente óptica (láser). El láser empleado para la iluminación del PHEMT en sustrato de GaAs es un VCSEL

multimodal (New Focus, modelo 1780), cuya ventana óptica de operación corresponde a la de 850 nm. Por otro parte, el láser empleado para iluminar al PHEMT en sustrato de InP es un láser DFB sintonizable (New Focus, modelo TLB-3902), cuya ventana óptica de operación es la de ventana de 1550 nm. Asimismo, el tipo de fibras ópticas empleadas para el transporte de la señal óptica es multimodal (MMF) y de polarización preservada (PMF), para el PHEMT de sustrato de GaAs y para el PHEMT de sustrato de InP, respectivamente.

De manera similar al caso sin iluminación para los PHEMT's indicados en la figura anterior se obtuvieron las curvas características  $I_{DS}-V_{GS}$ ,  $g_m-V_{GS}$ , así como curvas

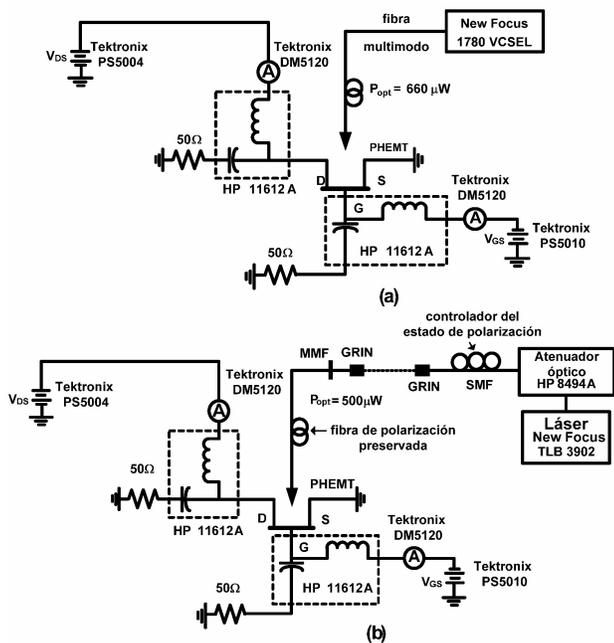


FIGURE 7. Esquema para la obtención de las características en DC del PHEMT bajo iluminación. (a) Esquema del PHEMT en sustrato de GaAs. (b) Esquema del PHEMT en sustrato de InP. SMF: fibra monomodo, MMF: fibra multimodo, GRIN: lente de índice gradiente.

de fotocorriente  $I_{PH}-V_{DS}, I_{PH}-V_{GS}$  para diferentes valores de potencia óptica incidente. En particular, la Fig. 8 muestra la curva  $I_{PH}-V_{DS}$  para diferentes voltajes de compuerta (el haz de luz multimodal tiene una potencia óptica de aproximadamente  $660 \mu W$  en la ventana óptica de 850 nm) así como la curva de fotocorriente en función de la potencia óptica incidente ( $I_{PH}-P_{OPT}$ ) para un PHEMT en sustrato de GaAs.

La Fig. 9 muestra la dependencia de la fotocorriente en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ) para un PHEMT en sustrato de InP.

Con el fin de evaluar la dependencia de la fotocorriente en función del estado de polarización de la luz incidente se realizó el montaje mostrado en la Fig. 10, obteniéndose gráficas como la de la Fig. 11 donde puede apreciarse que la absorción de los fotones dentro del PHEMT es dependiente del estado de polarización de la señal láser incidente, traduciéndose en una variación de la foto-corriente generada por los pares electrón-hueco foto-generados dentro de las capas del PHEMT en sustrato de InP. Se obtuvieron también curvas  $I_{PH}-V_{DS}$  e  $I_{PH}-V_{GS}$  bajo la incidencia de una señal láser con distintos estados de polarización, para una potencia óptica de aproximadamente  $500 \mu W$ .

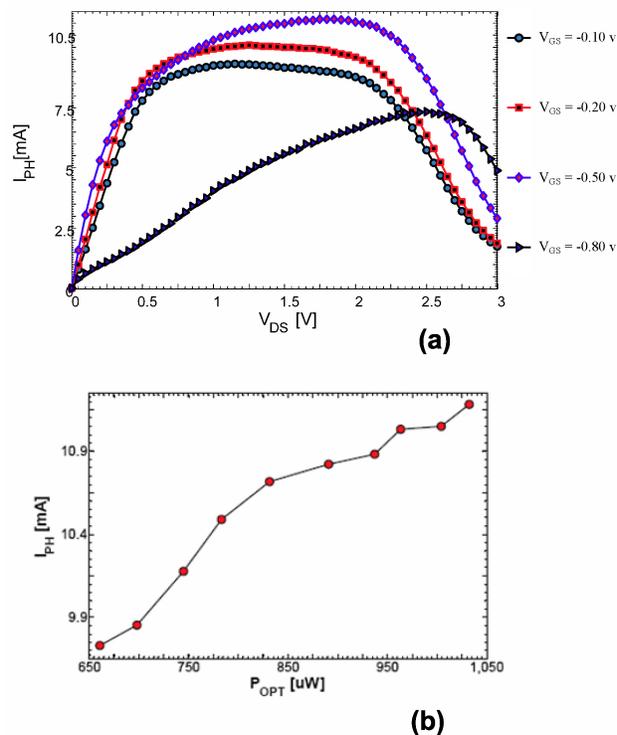


FIGURE 8. a) Curva  $I_{PH}-V_{DS}$  para diferentes voltajes de compuerta para un PHEMT en sustrato de GaAs; el haz de luz multimodal tiene una potencia óptica de aproximadamente  $660 \mu W$  en la ventana óptica de 850 nm, b) curva  $I_{PH}-P_{OPT}$  para un voltaje  $V_{GS}$  de -200 mV y un voltaje  $V_{DS}$  de 1 V.

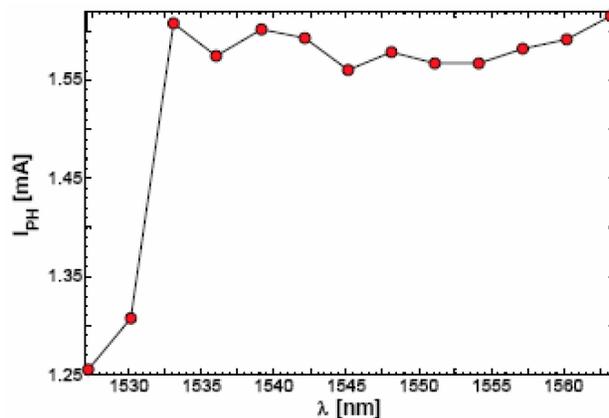


FIGURE 9. Curva  $I_{PH}-\lambda$  para un voltaje  $V_{GS}$  de -300 mV y un voltaje  $V_{DS}$  de 0.75 V.

### 4.3. Mezclador optoelectrónico auto-oscilante para GSM sobre fibra óptica

El esquema de la Fig. 12 muestra el mezclador optoelectrónico auto-oscilante implementado a base de un PHEMT en sustrato de InP, para realizar la foto-detección y el mezclado de una señal óptica modulada por una señal de radiofrecuencia. La oscilación local es realizada por medio del circuito mostrado en la Fig. 4. El transistor se encuentra

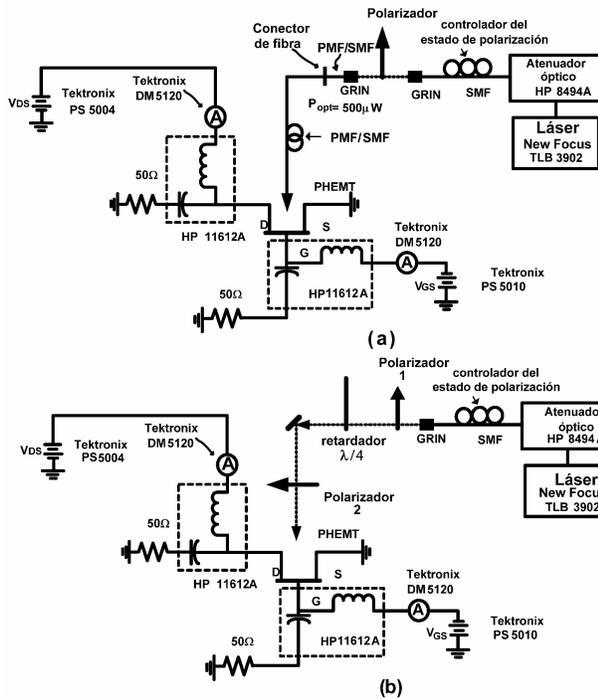


FIGURE 10. Montaje para evaluar la dependencia de la fotocorriente en función del estado de polarización de la luz incidente.

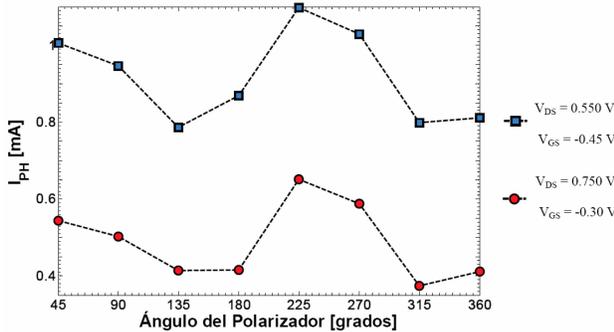


FIGURE 11. Foto-corriente de un PHEMT en sustrato de InP iluminado por un fuente láser monomodal de 1533.1 nm a diferentes ángulos de un polarizador.

operando en modo activo, el punto de operación es donde el transistor tiene mejor respuesta óptica ( $V_{GS} = -0.35$  volt,  $V_{DS} = 1$  volt), y la condición de auto-oscilación se obtiene al realimentar la señal del drenador a la terminal de la compuerta mediante un filtro pasabanda (BPF) de 5.29 GHz, el cual permite la generación de una oscilación senoidal en la frecuencia del BPF y en los múltiplos de frecuencia del mismo. Con la presencia de una portadora óptica modulada, el oscilador se convierte en un mezclador optoelectrónico auto-oscilante, debido a la penetración y absorción de la luz dentro de las capas internas del transistor, generando portadores libres en dicho dispositivo. El láser empleado para iluminar al PHEMT en sustrato de InP es un láser DFB sintonizable (New Focus modelo TLB-3902). El nivel de po-

tencia óptica empleado para iluminar al transistor es ajustado por medio del amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) y un atenuador óptico.

Para caracterizar el desempeño del mezclador ante una señal GSM existen diversas posibilidades, entre otras inyectar una señal GSM al modulador óptico de intensidad para generar una señal GSM sobre fibra óptica, o alternativamente se puede realizar un barrido en frecuencia para las diferentes bandas de GSM con una señal de ancho de banda similar al de dichas bandas como entrada de radiofrecuencia al driver JDS Uniphase ilustrado en la Fig. 12. En particular, nosotros aplicamos por sencillez la última alternativa, y en la Fig. 13 se muestra la potencia detectada en las bandas laterales que son generadas por en el mezclado ascendente. Los resultados experimentales indican que a pesar de tener una pequeña ganancia en el PHEMT de sustrato de InP empleado, el mezclador opto-electrónico auto-oscilante es capaz de foto-detectar y generar los productos de mezclado para una señal TTL con una velocidad y un ancho de banda similar a la tecnología GSM, tal y como se presenta en la Fig. 14.

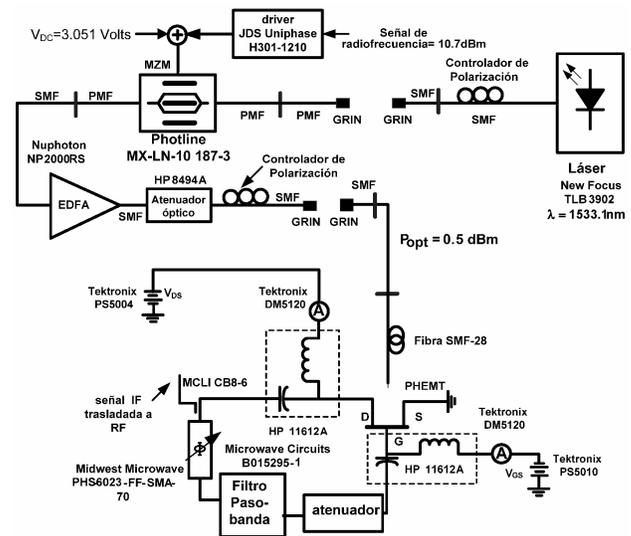


FIGURE 12. Diagrama esquemático de un mezclador optoelectrónico auto-oscilante a base de un transistor pseudomórfico de alta movilidad electrónica en sustrato de InP.

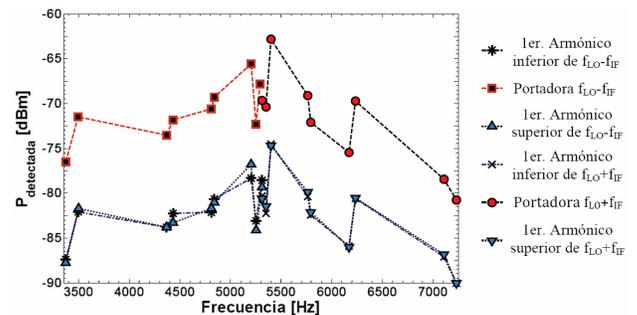


FIGURE 13. Potencia detectada en las bandas laterales generadas por el mezclado ascendente de las señales TTL en las diferentes bandas de la tecnología GSM.

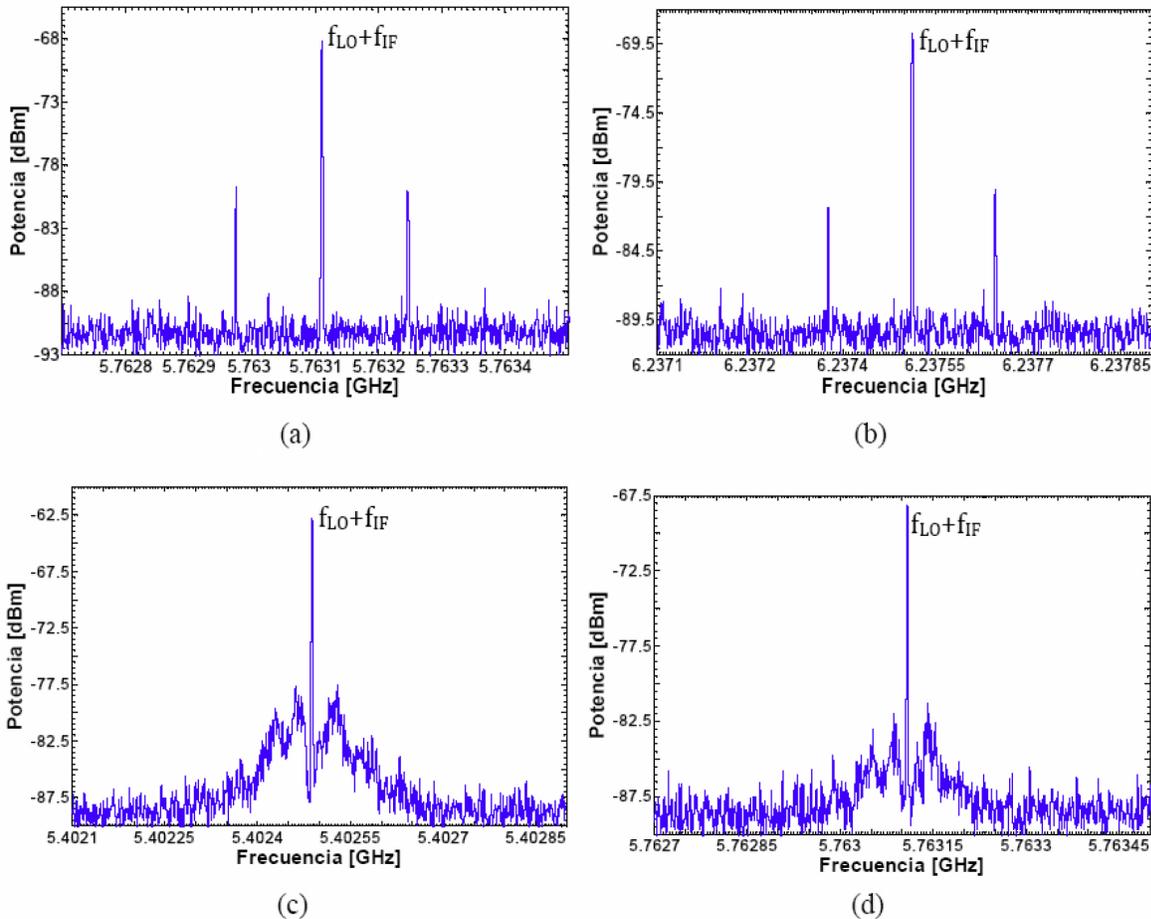


FIGURE 14. Señales de RF trasladadas a la banda de 5 GHz. (a) 8 bits modulados en la banda de GSM-450. (b) 8 bits modulados en la banda de GSM-900. (c) Señal pseudoaleatoria (PRBS-6) modulada a 100 MHz. (d) Señal pseudoaleatoria (PRBS-6) modulada en la banda de GSM-450.

## 5. Conclusiones

En este trabajo presentamos la aplicación de transistores pseudomórficos de alta movilidad electrónica (PHEMT's) en la implementación de mezcladores optoelectrónicos auto-oscilantes. En particular, reportamos el desarrollo de etapas de fotorrecepción (conversión de bajada) y conversión de subida para sistemas RoF a dos diferentes longitudes de onda: para 1550 nm empleando un mezclador basado en un PHEMT en tecnología de InP como dispositivo activo para detección y otro con un PHEMT en tecnología de GaAs para 850 nm. Para la evaluación del PHEMT como fotodetector, oscilador local y mezclador, fue necesario realizar el estudio y caracterización del mismo, tanto en oscuridad como en iluminación. Las curvas obtenidas de la caracterización en DC del PHEMT en oscuridad permiten seleccionar el punto óptimo de operación del mezclador optoelectrónico auto-oscilante, seleccionado de acuerdo a la ganancia ( $g_m$ ) máxima del dispositivo, empleada en la etapa de amplificación de un oscilador de retroalimentación y para generar las oscilaciones senoidales. Las curvas obtenidas de la carac-

terización en DC del PHEMT iluminado muestran el comportamiento de la foto-corriente ( $I_{PH}$ ) generada por el dispositivo. Se demostró experimentalmente que la foto-corriente del PHEMT ( $I_{PH}$ ) es dependiente del estado de polarización del haz de luz monocromático. Consideramos importante mencionar que a lo mejor de nuestro conocimiento esta es la primera vez que se reportan resultados de esta dependencia.

Los resultados experimentales muestran que el mezclador optoelectrónico auto-oscilante posee amplios rangos de mezclado dentro de la banda de 5 GHz de oscilación local, siendo capaz de seguir generando productos de mezclado para una señal de IF de 2 GHz a pesar de no contar con una transconductancia muy grande. Lo anterior permite asegurar que en transistores con mayores niveles de ganancia ( $g_m$ ) se podrán obtener productos de mezclado con mayores niveles de potencia, lo que permitiría su empleo en los sistemas de RoF. Además, el mezclado ascendente para generar señales de radiofrecuencia milimétrica no presenta ninguna dificultad de diseño, ya que solo es necesario el cambio del filtro BPF. Lo anterior representa gran beneficio para las comunicaciones inalámbricas de banda ancha, las cuales buscan cada vez

más su operación en la banda de frecuencias milimétricas, minimizando el área de cobertura de cada estación base, por lo que requieren una gran cantidad de estaciones bases. El mezclador optoelectrónico auto-oscilante lograría la re-

ducción de elementos empleados dentro de la estación transceptora, minimizando los costos del sistema de comunicaciones inalámbricas.

- 
1. P. Tien Dat, A. Bekkali, K. Kazaura, K. Wakamori, T. Suzuki, M. Matsumoto, *Proceedings IEEE Globecom* (2009) 6.
  2. H.B Kim, *Radio over Fiber based Network Architecture*, Tesis de Maestría, (Technischen Universitat Berlin 2005) P.148
  3. A. Ng'oma, *Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communications Systems*, Tesis de Doctorado (Technische Universiteit Eindhoven 2005. (TU/e)) p.158.
  4. C.-S. Choi, H.-S. Kang, W.-Y. Choi, D.-H. Kim, and K.-S. Seo, *IEEE Trans.on Microw.Th. and Techn.* **53** (2005) 256-263.
  5. H.-S. Kang, *Photodetection Characteristics of Metamorphic HEMT and its Application for Radio-on-fiber systems* Tesis de Maestría (The Graduate School Yonsei University 2004) p. 80.
  6. A.A. De Salles and M.A. Romero, *IEEE Trans.on Microw.Th. and Techn.* **39** (1991) 2010-2017.
  7. M.A. Romero, P. Herczfeld, *IEEE Trans.on Microw.Th. and Techn.* **43** (1995) 511-517.
  8. Y. Takahashi, K. Takahata, Y. Muramoto, *IEEE Elec.Dev. Lett.* **19** (1998) 472-474.
  9. G. Soberanes Flores, *Modelado y Simulación de Mezcladores Optoelectrónicos a Base de FETs Modelado y Simulación de Mezcladores Optoelectrónicos a Base de FETs.*, (Tesis de Maestría CICESE 2005) p.108.
  10. L.A. Pérez Pérez *et al.*, *Detection and Mixing of Two Modulated Optical Signals Using only a Single GaAsFET (Experimental Study)*, 13<sup>th</sup> (GaAS Symposium, Paris 2005), p.117-120.
  11. M.B. Fong Mata, *Modelado y Simulación de Osciladores Optoelectrónicos a Base de PHEMT's* (Tesis de Maestría CICESE 2006) p. 99.
  12. I. González Insua, D. Plettemeier, and C.G. Schäffer, *J. Light-wave Technol.* **28** (2010) 2289-2295.
  13. Nguyễn Lâm Duy, Journet, B. Vu Doan Miên, Vu Van Luc, *Direct modulation of an opto-electronic oscillator: Towards radio over fiber Conference on Advanced Technologies for Communications* (International, 20-22 Oct. 2010, Ho Chi Minh City).