

# GENERACIÓN DE PULSOS OPTICOS A 1,5 $\mu\text{m}$ MEDIANTE CONMUTACIÓN DE GANANCIA EN LÁSERES DE CAVIDAD VERTICAL.

A. Consoli, I. Esquivias y F. J. López-Hernández

[antonio.consoli@tfo.upm.es](mailto:antonio.consoli@tfo.upm.es), [esquivia@tfo.upm.es](mailto:esquivia@tfo.upm.es), [dxtn@tfo.upm.es](mailto:dxtn@tfo.upm.es)

<sup>(1)</sup> Dpto. de Tecnología Fotónica, E. T. S. I. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid.

**Abstract-** Optical pulses with duration below 60 ps were generated by gain-switching a Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) at 1535 nm. We used a radio frequency (RF) sinusoidal signal to modulate the device near threshold. Relaxation oscillations or pulse train generation were observed depending on the gain switching conditions. Repetition rates between 100 MHz and 2 GHz were tested. The dependence of the pulse width and amplitude was investigated in relation with the bias current and excitation frequency and amplitude. The optimal configuration of the current bias and RF modulating signal provided the shortest pulse duration of 57 ps at repetition rate of 800 MHz.

## I. INTRODUCCIÓN

La generación de impulsos ópticos con duración en el rango de picosegundos es de gran interés en diferentes aplicaciones, tanto en el campo de las comunicaciones ópticas de alta velocidad, como en el procesado óptico de señales. Estos impulsos son fundamentales en el multiplexado por división en el tiempo (OTDM), en sistemas híbridos multiplexados en el tiempo y en longitud de onda (DWDM/OTDM), o en multiplexado por división de código (OCDMA). En un sistema OCDMA, los datos se codifican de forma que pueden establecerse varias comunicaciones simultáneas en el mismo canal físico. Para codificar un mensaje, se divide cada uno de los periodos de bit en varios intervalos, de igual duración, llamados *chips*. Para transmitir un "1", se emite un pulso óptico en determinados *chips* definidos por el código utilizado. El cociente entre el periodo de bit y el periodo de chip, define la *longitud del código* ( $L$ ). El número de usuarios posibles depende de la longitud del código. En esta aplicación se pretende obtener impulsos de muy corta duración, con una baja frecuencia de repetición, para permitir un mayor número de canales.

En la figura 1 se presenta una implementación, sencilla y de bajo coste, de un transmisor de un sistema OCDMA. Los impulsos se generan con una tasa de repetición baja, de forma que el periodo de chip es la duración del impulso y la tasa de bit es la frecuencia de repetición. Para construir el código se utilizan líneas de retardo.

Hay varias técnicas para hacer que un láser de semiconductor genere un tren de impulsos. Las más adecuadas son el bloqueo de modos (*mode-locking*) [1] y la conmutación de ganancia (*gain-switching*) [2]. El bloqueo de modos permite obtener impulsos muy cortos con muy buenas

características, pero a costa de una implementación compleja y poca flexibilidad en la frecuencia de repetición. Por el contrario, la conmutación de ganancia es mucho más sencilla y permite generar impulsos de ps con la tasa de repetición requerida. Básicamente la conmutación de ganancia consiste en la modulación de la ganancia del láser por medio de la corriente inyectada. El método más empleado consiste en la superposición de una señal sinusoidal de alta frecuencia a una corriente de polarización cercana a la corriente umbral ( $I_{th}$ ).

Los primeras referencias al uso de esta técnica en láseres Fabry-Perot de emisión lateral datan de hace treinta años. Con la introducción de los láseres de emisión superficial y cavidad vertical (VCSEL) y su difusión comercial, se ha realizado un importante esfuerzo de investigación orientado a la producción de trenes de impulsos de corta duración en estos dispositivos. Los VCSEL presentan una serie de ventajas importantes para las comunicaciones ópticas, como su baja corriente umbral, bajo consumo, monocromaticidad, buen perfil de emisión y bajo coste de fabricación.

Varios grupos han estudiado el comportamiento de los VCSELs emitiendo en 850 nm en conmutación de ganancia [3-7]. Nakazawa *et al.* [6] obtuvieron impulsos de 22 ps de duración, con una frecuencia de repetición de 10 GHz, comprimiendo posteriormente los impulsos a 8,7 ps por medio de una fibra compensadora de dispersión. Peperjugowsky *et al.* [7] obtuvieron impulsos de 13,5 ps, que redujeron a 3,7 ps.

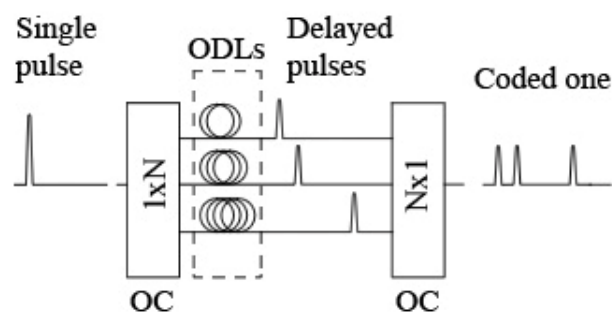


Fig. 1. Esquema del transmisor OCDMA descrito en la introducción. Los impulsos se acoplan a varias líneas de retardo óptico (ODL) por medio de un acoplador (OC)  $1 \times N$ , siendo  $N$  el peso del código. Otro OC  $N \times 1$  reúne los impulsos retardados formando el código.

En este trabajo presentamos, por primera vez según nuestras referencias, la generación de impulsos cortos por conmutación de ganancia en un VCSEL operando a 1,5  $\mu\text{m}$ . Este trabajo se organiza de la siguiente forma: en la Sección II se describe el montaje experimental y las características del láser; la Sección III presenta los resultados de las medidas y la discusión de los resultados. Las principales conclusiones se resumen en la Sección IV.

## II. MONTAJE EXPERIMENTAL

En la figura 2 se presenta el montaje utilizado. El láser es un VCSEL comercial (Raycan) emitiendo alrededor de 1535 nm. La corriente de polarización está controlada por un generador de corriente de precisión (Keithley 236). Para acoplar la corriente de polarización y la señal de RF se utiliza una T de polarización. La señal RF procede de un generador Agilent 8684B. Para las medidas en el dominio del tiempo se empleó un Analizador de Señales de Comunicaciones (Tektronix CSA8000) dotado de un módulo óptico (80C01-CR) cuyo ancho de banda es 20 GHz. Para las medidas espectrales se utilizó un Analizador de Espectro Óptico (Ando AQ-6315A) con una resolución de 0,05 nm.

## III. RESULTADOS

La característica potencia-corriente-tensión (P-I-V) del láser se muestra en la figura 3(a). La corriente umbral ( $I_{th}$ ) es 1,6 mA, la eficiencia diferencial tiene un valor máximo de 96  $\mu\text{W}/\text{mA}$  y la potencia máxima de salida es 0,45 mW. La figura 3(b) muestra el espectro del láser al aplicarle 2,4 mA. El pico de emisión está en 1532,47 nm, con una anchura a 3dB (ancho total a mitad de máximo, FWHM) de 0,056 nm, limitada por la resolución del equipo de medida, y una relación de extinción de modo lateral (SMSR) de 30 dB. Los picos secundarios a 1531,7 y a 1532,97 nm se interpretan como originados por modos transversales y/o estados de polarización ortogonales al modo fundamental.

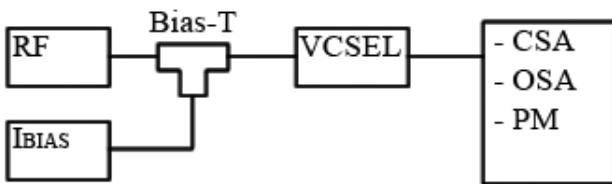
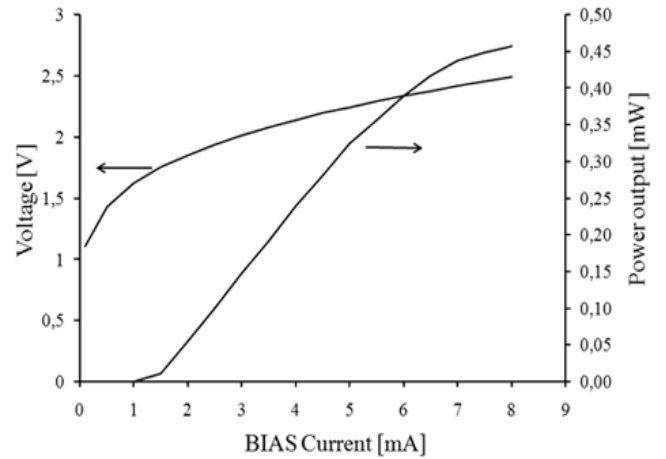
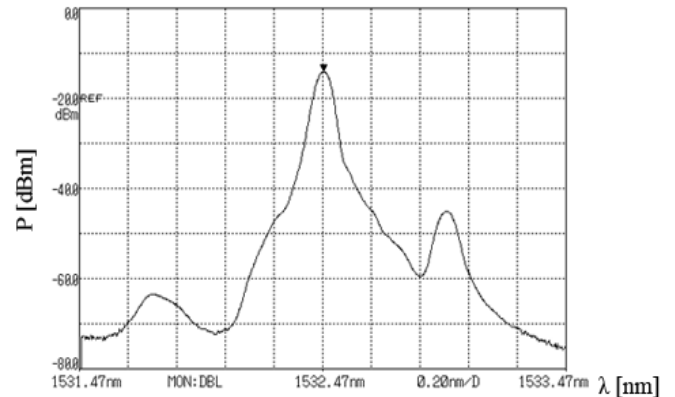


Fig. 2. Diagrama de bloques del montaje experimental. El VCSEL se ataca, por medio de la T de polarización, por el generador de corriente continua ( $I_{BIAS}$ ) y el de RF. La medida se realiza mediante uno de los elementos del bloque de la derecha: fotodiodo y osciloscopio (PD-CSA), analizador de espectro óptico (OSA) o medidor de potencia (PM).



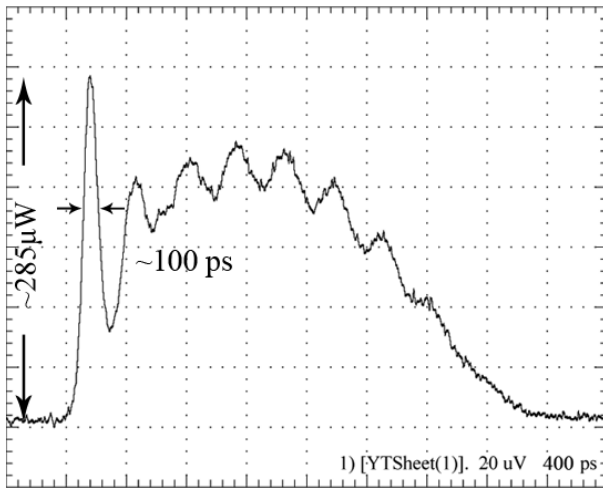
a)



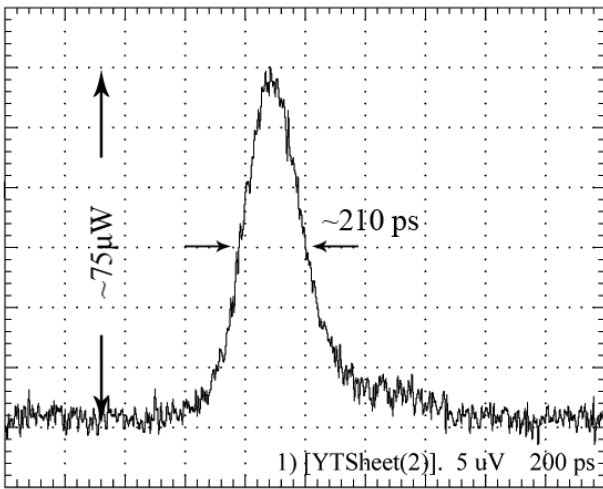
b)

Fig. 3. a) Potencia de salida versus corriente de polarización ( $I_b$ ). b) Espectro para  $I_b = 2,4 \text{ mA} = 1,5I_{th}$ .

La figura 4 presenta la respuesta temporal al aplicar una señal de frecuencia ( $f_{RF}$ ) 100 MHz, con una potencia RF ( $P_{RF}$ ) 10,6 dBm y corriente de polarización ( $I_b$ ) igual a  $I_{th}$  (a) y a  $0,25 \cdot I_{th}$  (b). En el primer caso se observa un intenso pico seguido de oscilaciones de relajación de una frecuencia de aproximadamente 3,6 GHz. En estas condiciones la corriente sobrepasa el umbral durante un tiempo suficientemente largo para excitar más de un periodo de relajación.



a)



b)

Fig. 4. a) Oscilaciones de relajación observadas con una frecuencia  $f_{RF} = 100$  MHz, potencia  $P_{RF} = 10,5$  dBm y polarización  $I_b = I_{th}$ . b) Impulsos observados con las mismas condiciones para  $f_{RF}$  y  $P_{RF}$  con  $I_b = 0,25 I_{th}$ .

Si la corriente de polarización es mucho más baja que la umbral (Fig. 4b), el pico es menos intenso y su anchura es mayor que en el caso anterior (Fig. 4 a). Debido al menor valor de la corriente de polarización, la zona en la que la sinusoide supera la corriente umbral es más corta y se obtiene un único impulso; sin embargo, el pico de corriente es más bajo y la potencia emitida es menor y el pico de mayor anchura (la frecuencia de relajación es menor).

La figura 5 muestra la potencia del pico y su anchura para diferentes valores de  $I_b/I_{th}$ . Se observan las oscilaciones de relajación hasta una determinada frecuencia que depende de  $I_b/I_{th}$ . Si se aumenta la frecuencia, se produce un incremento de amplitud y una reducción de la duración del primer pico, hasta que se logra la emisión de un único pico. A partir de una determinada frecuencia, el impulso pierde potencia y aumenta su anchura.

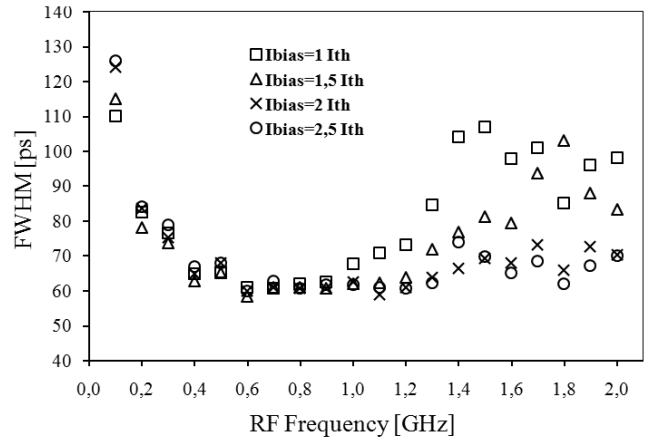
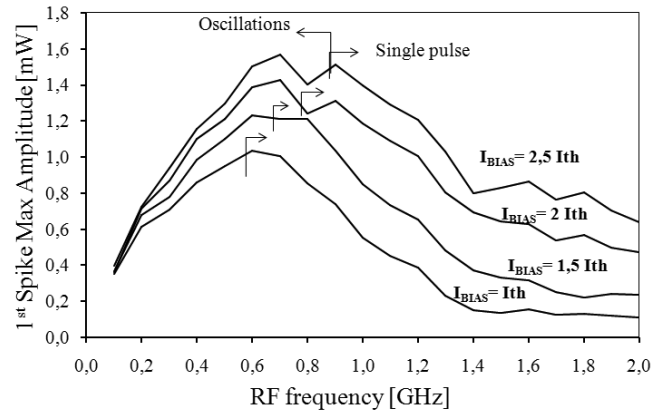


Fig. 5. Amplitud (figura superior) y duración FWHM (abajo) del primer pico de las oscilaciones de relajación en función de la frecuencia RF.  $P_{RF}$  se fija a 10,5 dBm y  $f_{RF}$  se varía entre 100 MHz y 2 GHz para diferentes polarizaciones. Las flechas fijan el punto en que se pasa de múltiples oscilaciones de relajación a un solo impulso.

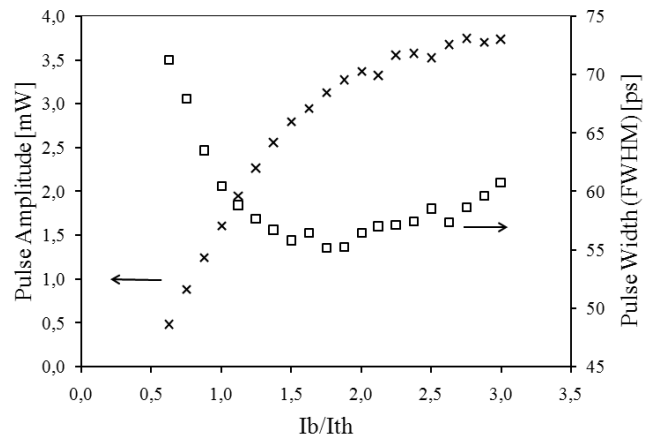


Fig. 6.  $P_{RF} = 14,2$  dBm,  $f_{RF} = 800$  MHz.  $I_b$  varía entre 0,5  $I_{th}$  y 31 $I_{th}$ . Amplitud (cruces) y duración FWHM (cuadrados) medidos.

Como se aprecia en la figura 5, los impulsos más cortos (~60 ps) y más altos (entre 1 y 1,5 mW) se obtuvieron para frecuencias próximas a 800 MHz. La dependencia de la anchura y amplitud del pulso con la corriente de polarización se ha representado en la Fig. 6. La amplitud del pulso aumenta y su anchura disminuye al aumentar la corriente hasta  $I_b \sim 1,5 I_{th}$ ; para mayores  $I_b$  la cola del impulso es más larga, lo que aumenta su anchura, aunque la amplitud sigue creciendo lentamente. Un comportamiento similar se ha observado en otros tipos de diodos láser bajo conmutación de ganancia [8].

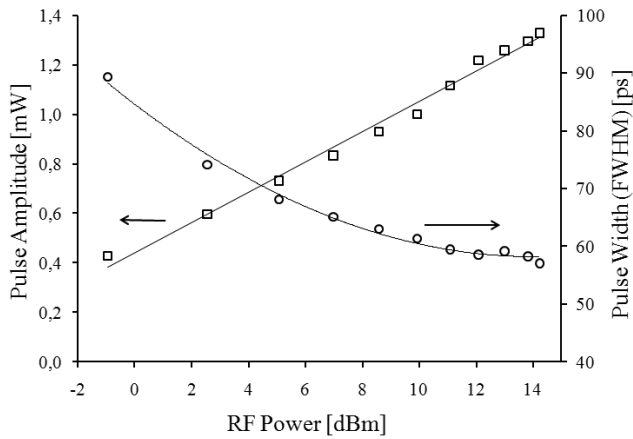


Fig. 7.  $I_b = 1,5 I_{th}$  y  $f_{RF} = 800$  MHz.  $P_{RF}$  recorre el rango entre -1 y + 14,6 dBm.

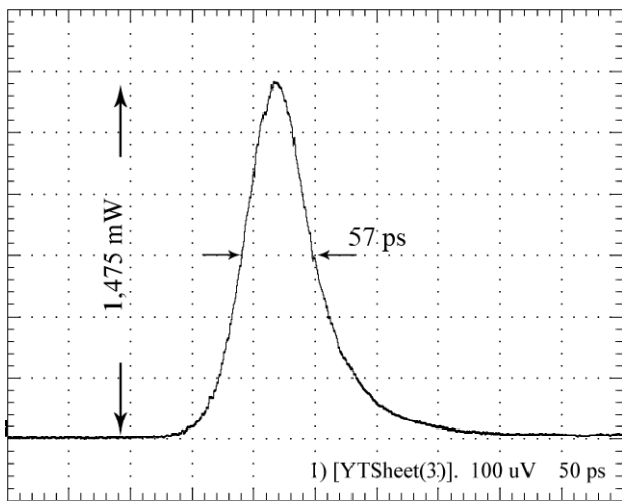


Fig. 8. Impulso obtenido a 800 MHz,  $I_b = 1,5 I_{th}$  y  $P_{RF} = 14,6$  dBm..

La dependencia de la amplitud del impulso y su duración en función de la potencia RF aplicada, a una frecuencia de 800 MHz y una corriente de polarización  $1,5 \cdot I_{th}$ , se puede observar en la Fig. 7. Al aumentar la potencia, los impulsos son de mayor amplitud y más cortos. La menor anchura se obtuvo para la potencia máxima  $P_{RF}$  de 14 dBm, a 800 MHz y con  $I_b = 1,5 I_{th}$ . El impulso es ligeramente asimétrico y tiene una amplitud de  $\sim 1,5$  mW y una anchura de 57 ps (FWHM), según se muestra en la Fig.8

En la Fig.9 se presenta el espectro del tren de impulsos en las condiciones anteriores, que puede compararse con el espectro cw correspondiente a la misma polarización (Fig. 3b). Los impulsos muestran un ensanchamiento y desplazamiento hacia el rojo en comparación con la operación en cw.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el comportamiento de un láser de cavidad vertical a  $1,5 \mu\text{m}$  en modo de conmutación de ganancia. El objetivo general es obtener un tren de impulsos ópticos de anchuras en el rango de ps con una frecuencia de repetición baja. Se ha encontrado que el uso de una señal sinusoidal de RF en el rango de 100 MHz ofrece impulsos de corta duración, pero de escasa potencia. Se estima que el empleo de otra señal moduladora, tal como un tren de

impulsos, permitirá obtener impulsos de mayor potencia a frecuencias incluso inferiores.

Se ha investigado la dependencia de la amplitud del impulso y su duración en función de la potencia y frecuencia de la señal de RF, así como de la corriente de polarización. Los resultados muestran que la configuración óptima se logra con una frecuencia de 800 MHz y una polarización a  $1,5$  veces el umbral, obteniéndose pulsos con una duración de 57 ps y una amplitud de  $\sim 1,5$  mW.

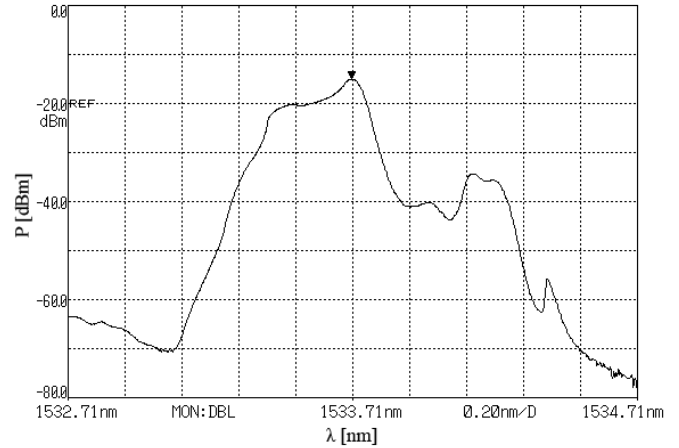


Fig. 9. Espectro del tren de impulsos obtenido con  $I_b = 1,5 I_{th}$ ,  $f_{RF} = 800$  MHz y  $P_{RF} = 14,2$  dBm.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado en el marco del proyecto TEC2006-13887-C05-01, financiado por el MEC.

#### REFERENCIAS

- [1] J.E. Bowers, P.A. Morton, A. Mar, and S.W. Corzine, "Actively mode-locked semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1426-1439, 1989.
- [2] J. Auyeung, "Picosecond optical pulse generation at gigahertz rates by direct modulation of a semiconductor laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 5, pp. 308-310, 1981.
- [3] J.R. Karin, L.G. Melcer, R. Nagarajan, J.E. Bowers, S.W. Corzine, P.A. Morton, R.S. Geels, and L.A. Coldren, "Generation of picosecond pulses with a gain-switched GaAs surface-emitting laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 10, pp. 963-965, 1990.
- [4] J. Lin, J.K. Gamelin, S. Wang, M. Hong, and J.P. Mannaerts, "Short pulse generation by electrical gain switching of vertical cavity surface emitting laser", *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 21, pp. 1956-1958, 1991.
- [5] J.M. Wiesenfeld, G. Hasnain, J.S. Perino, J.D. Wynn, R.E. Leibenguth, Y. Wang, and A.Y. Cho, "Gain-switched GaAs Vertical-cavity surface-emitting lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1996-2005, 1993.
- [6] M. Nakazawa, H. Hasegawa, and Y. Oikawa, "A 10 GHz, 8.7 ps pulse generation from a single-mode, gain-switched AlGaAs VCSEL at 850 nm", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 16, pp. 1251-1253, 2007.
- [7] P. Pepeljugoski, J. Lin, J. Gamelin, M. Hong, and K.Y. Lau, "Ultralow timing jitter in electrically gain-switched vertical cavity surface emitting lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 14, pp. 1588-1590, 1993.
- [8] C.W. Chuah, B. Xu, T.S. Tan, N. Xiang, and T.C. Chong, "Tunable GHz repetitive ps pulse InGaN laser", *IEEE Phot. Tech. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 70-72, 2007.