

ESTUDIO DE UNA CAVIDAD LASER DE FIBRA ÓPTICA PARA LA GENERACIÓN DE MÚLTIPLES LONGITUDES DE ONDA

De la Cruz Mendoza Enrique (1), Jauregui-Vazquez Daniel (2), Estudillo-Ayala Julian Moises (3),
Rojas-Laguna Roberto (4), Sierra-Hernandez Juan Manuel (5)

1 [Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Guanajuato] | [e.delacruzmendoza@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [jaureguid@ugto.mx]

3 [Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [julian@ugto.mx]

4 [Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [rlaguna@ugto.mx]

5 [Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [jm.sierrahernandez@ugto.mx]

Resumen

En este trabajo se presenta de forma comparativa dos cavidades laser de anillo para la generación de múltiples longitudes de onda basadas en un interferómetro de fibra óptica modal. Modificando la curvatura sobre el interferómetro se pueden generar emisiones laser simples, duales y triples en ambas cavidades. Cuando no existe curvatura en el interferómetro se observa una emisión laser simple en las dos configuraciones posteriormente las diferentes respuestas fueron evaluadas cualitativa y cuantitativamente, su análisis se muestra en este reporte. El ancho de banda de las emisiones laser es alrededor de 0.5 nm y la relación de supresión de modo lateral (SMRS) es de más de 25 dB. Este laser ofrece una sencilla implementación y bajo costo.

Abstract

In this work two different ring fiber laser cavities based on modal fiber optic interferometers are analyzed and compared. The fiber laser emissions of the laser are controlled by applying curvature over the modal fiber interferometer, as a result, single dual and triple simultaneous laser emissions are achieved. The lasers offer a 3 dB band width of 0.5 nm and its side mode suppression ratio is higher than 25 dB. This lasers offer simple implementation and low cost.

Palabras Clave

Cavidad laser, interferómetro, múltiples longitudes de onda.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el estudio de los láseres de fibra dopada con erbio (EDFL, Erbium doped fiber laser), por sus siglas en inglés, se ha visto incrementado debido a las ventajas que ofrece como fácil implementación, versatilidad y su larga vida útil. Sus aplicaciones son diversas en sensores, comunicaciones ópticas y espectroscopía óptica [1-3]. Gran parte de las cavidades laser de fibra óptica utilizan distintas técnicas para generar múltiples longitudes de onda, que involucran el uso de interferómetros del tipo Sagnac [4], interferómetros Mach-Zehnder [5-7], filtros Fabry-Perot [8-10], rejillas de Bragg [11] entre otras. Por ejemplo, en la referencia [8] utilizan un interferómetro intrínseco Fabry-Perot para la generación de múltiples longitudes de onda aplicando una carga transversal sobre el mismo. Otro ejemplo de generación y conmutación de múltiples longitudes de onda lo presenta Zhou *et al* [6] donde utiliza un interferómetro Mach-Zehnder para obtener hasta cuatro salidas de longitud de onda laser mediante la rotación del control de polarización. La sintonización de múltiples longitudes de onda usando un interferómetro Sagnac se presenta en [4], donde mediante un ajuste en el control de polarización del interferómetro se obtienen hasta tres longitudes de onda láser.

En este trabajo se presenta en forma comparativa dos cavidades laser de fibra óptica para la generación de múltiples longitudes de onda, la primera de estas es de tipo anillo mientras que la segunda presenta una variante en la forma de colocación del interferómetro en la cavidad antes señalada. Se presentan los resultados experimentales que muestran las ventajas y desventajas de cada una de las cavidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la figura 1 se muestran las dos cavidades laser utilizadas durante este trabajo las cuales se definen, para su simplicidad, como CA_1 para la mostrada en la figura 1(a) y CA_2 para la figura 1(b). Las distintas configuraciones se describen a continuación. Ambas cavidades utilizan un diodo laser QFBGLD-980-500 el cual se utiliza como señal de bombeo, este diodo presenta una corriente de umbral de 36 mA y una longitud de onda centrada en 976 nm. La cavidad CA_1 se conforma de un multiplexor por división de longitud de onda de fibra óptica 1550/980 (WDM, wavelength division multiplexor, por sus siglas en inglés), al cual en el puerto de 980 nm se conecta la señal de bombeo (Pump Signal), en seguida se tiene la fibra dopada con erbio (EDF, Erbium doped fiber, por sus siglas en inglés) que actúa como medio de ganancia, y al ser excitada mediante la señal de bombeo genera una emisión espontánea amplificada (ASE, Amplified spontaneous emission, por sus siglas en inglés). A la salida de la EDF se conecta un aislador de fibra óptica, el cual garantiza la propagación unidireccional de la luz. Posterior a esto se coloca un control de polarización (PC, polarization controller, por sus siglas en inglés) el cual permite ajustar la ganancia en la cavidad laser. Después se coloca el interferómetro (IFM), su principio de operación se discute más adelante. Al otro extremo del IFM se coloca un acoplador de fibra óptica 90/10 y se utiliza el 10% (Output) de la señal para ser examinada en un analizador de espectros ópticos Yokogawa AQ6370B. El puerto de 90% del acoplador de fibra óptica se conecta al puerto de 1550 nm del WDM para cerrar la cavidad. En la cavidad CA_2 la señal de bombeo, el WDM y la EDF se mantienen de igual forma que en la cavidad descrita anteriormente, presentando el primer cambio en la salida de la EDF, en este caso se conecta al control de polarización. El otro extremo del PC llega al puerto 1 del circulador de fibra óptica, la señal se transmite al acoplador de fibra óptica 90/10 mediante el puerto 2 del circulador de fibra óptica. En este caso el IFM modificado se ubicó como se muestra en la figura 1(b) (recuadro de líneas punteadas), esto debido a que el interferómetro no generó la suficiente reflexión en la cavidad lineal propuesta y no se logró obtener emisión laser alguna. A la salida del acoplador se monitorea la respuesta de esta cavidad laser mediante un analizador de espectros ópticos, modelo mencionado anteriormente. Finalmente, el puerto 3 del circulador se conecta al puerto de 1550 nm del WDM para completar la cavidad.

El interferómetro de fibra óptica modal fue elaborado mediante el empalme de dos fibras ópticas una monomodo con núcleo de 8 μm de diámetro y otra de núcleo delgado con 4 μm de diámetro, también se

utilizó una fibra sin núcleo. Dicho interferómetro genera interferencia modal debido a la diferencia de núcleos, el espectro de reflexión del interferómetro en relación con la curvatura se presenta en la figura 2. La curvatura se logra al fijar un extremo del interferómetro y mediante un ajustador diferencial (Thorlabs, modelo MBT612D/M) se acorta la distancia del otro extremo. Las unidades de la curvatura (figura 2) son el número de vueltas del tornillo con el que se realiza el ajuste de desplazamiento.

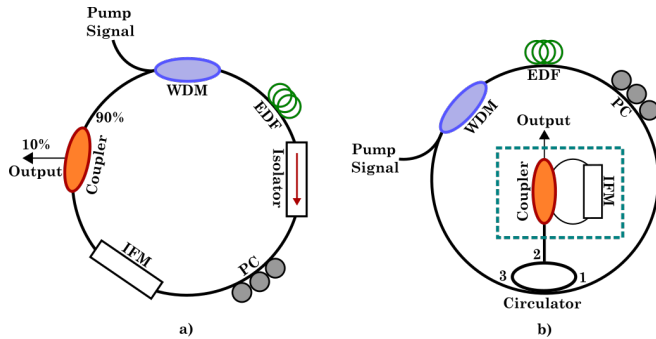


Figura 1: L Diagrama de las cavidades laser.

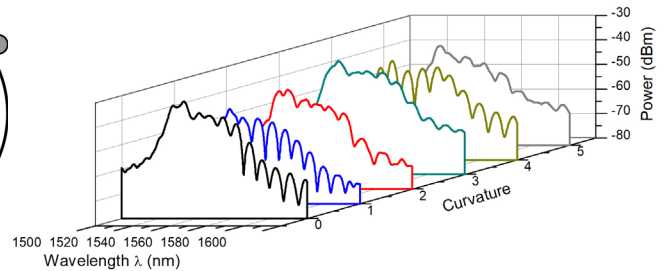


Figura 2: Respuesta del espectro de reflexión del interferómetro al aplicar distinta curvatura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar la respuesta de las distintas cavidades laser, la corriente del diodo de bombeo se fijó en 400 mA para la cavidad CA₁ y 200 mA para CA₂. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente. La cavidad CA₁ generó una sola emisión laser (λ_1) cuando el IFM no presentaba curvatura (ver figura 3), esta emisión se centra en 1556.3 nm con un pico máximo de potencia de -17.63 dBm. Esta emisión laser presenta una relación de supresión de modo lateral (SMSR, side mode suppression ratio, por sus siglas en inglés) de 42 dB y un ancho de banda laser de 0.5 nm. El análisis de estabilidad de λ_1 se llevó a cabo mediante el registro del espectro laser durante una hora en intervalos de 3 minutos, el cual se muestra en la figura 4, la variación de la longitud de onda fue de 0.1 nm y la fluctuación de potencia de 0.29 dBm. Bajo las mismas condiciones sobre el interferómetro, en la cavidad CA₂ se generó de igual forma una emisión simple (λ_2) mostrada en la figura 5, con un pico máximo de potencia de -3.24 dBm centrado en 1555.4 nm, en este caso se observó un SMSR de 36 dB y el ancho de banda laser se duplicó. En la figura 6 se observa el análisis de estabilidad para esta emisión laser, que muestra una variación de la longitud de onda de 0.2 nm y fluctuación de potencia menores de 0.1 dBm.

Al modificar la ganancia en la configuración de la cavidad CA₁, ajustando cuidadosamente el PC, se obtuvieron dos emisiones laser (λ_3 y λ_4), mostradas en la figura 7, las cuales se observaron en 1556.14 nm y 1556.8 nm respectivamente con un pico máximo de potencia de -22.37 dBm (λ_3) y -19.82 dBm (λ_4). Esta doble emisión laser muestra un SMSR de 36.88 dB (λ_3) y 39.43 dB (λ_4). De acuerdo con el estudio de estabilidad de esta emisión dual (figura 8), la emisión laser λ_3 presenta 0.18 nm de variación de longitud de onda y fluctuaciones de potencia alrededor de 0.3 dBm, en la emisión laser λ_4 estos valores son muy parecidos. En la cavidad CA₂ además de rotar el control de polarización se aplicó curvatura sobre el interferómetro para lograr obtener dos emisiones laser, mostradas en la figura 9, las cuales se centraron en 1556.6 nm (λ_5) y 1562.6 nm (λ_6) con picos de potencia máxima de -10.23 dBm y -14.54 dBm respectivamente. Para λ_5 el valor de SMSR es de 36 dB y de 31.72 dB para λ_6 . El análisis de estabilidad se presenta en la figura 10, donde se observa una variación de la longitud de onda alrededor de 0.2 nm y fluctuaciones de potencia menores de 3.12 dBm para λ_5 , mientras que para λ_6 presenta variaciones de longitud de onda menores de 0.4 nm, sin embargo, las fluctuaciones de potencia son mayores a 9 dBm.

Finalmente se logró obtener una emisión laser triple (λ_7 , λ_8 y λ_9) en la cavidad CA₁ al cambiar la curvatura en el IFM, así como un pequeño ajuste en el control de polarización. Las emisiones (ver figura 11) presentan picos máximos de potencia de -24.72 dBm (λ_7), -21.64 dBm (λ_8) y -22.34 dBm (λ_9) centrados en 1553.7 nm,

1556.3 nm y 1558.4 nm respectivamente. Su SMSR es de 36.41 dB (λ_7), 39.49 dB (λ_8) y 38.79 dB (λ_9) y el ancho de banda laser es menor que 0.5 nm para las tres emisiones. El análisis de estabilidad se muestra en la figura 12, se observa una variación de la longitud de onda de 0.1 nm para las tres líneas de emisión, para λ_7 la fluctuación de potencia es alrededor de 1 dBm, la emisión laser λ_8 presentó 2.65 dBm de fluctuación de potencia y el valor de este parámetro en la emisión λ_9 fue de 2.28 dBm. Mediante el mismo método en la cavidad CA₂, modificando la curvatura sobre el interferómetro y variando la ganancia, se obtuvieron tres emisiones laser (λ_{10} , λ_{11} y λ_{12}) mostradas en la figura 13. Las emisiones se centran en 1532.4 nm, 1546.1 nm y 1553.5 nm respectivamente con picos máximos de potencia de -18.27 dBm (λ_{10}), -10.48 dBm (λ_{11}) y -15.37 dBm (λ_{12}). Se presenta una SMSR de 27.59 dB (λ_{10}), 35.38 dB (λ_{11}) y 30.49 dB (λ_{12}), el ancho de banda laser presentado en estas emisiones es menor que 0.5 nm. El análisis de estabilidad (figura 14) muestra para λ_{10} una variación de la longitud de onda de 0.3 nm y una fluctuación de potencia de 2.67 dBm, λ_{11} presenta variaciones de la longitud de onda de 0.2 nm sin embargo las fluctuaciones de potencia son mayores a 8 dBm, por último, la variación de la longitud de onda de λ_{12} es de 0.4 nm y la fluctuación de potencia es de 5.07 dBm.

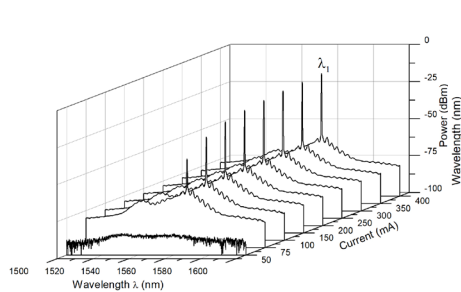


Figura 3: Respuesta de la cavidad CA₁ para diferente corriente de bombeo, emisión laser λ_1 .

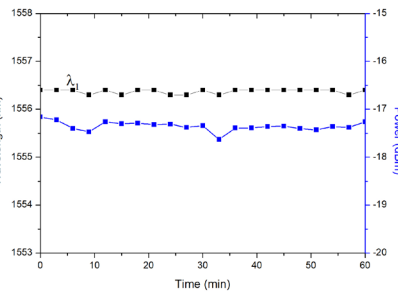


Figura 4: Análisis de estabilidad para emisión laser λ_1 .

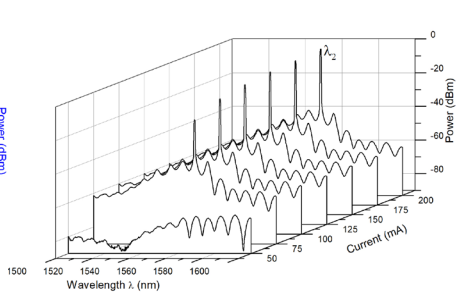


Figura 5: Respuesta de la cavidad CA₂ para diferente corriente de bombeo, emisión laser λ_2 .

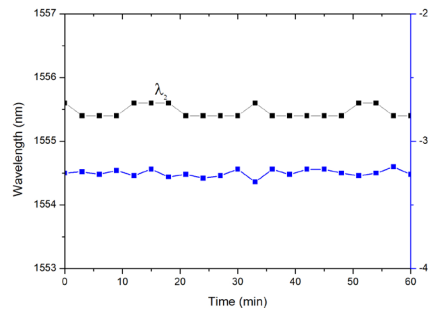


Figura 6: Análisis de estabilidad para emisión laser λ_2 .

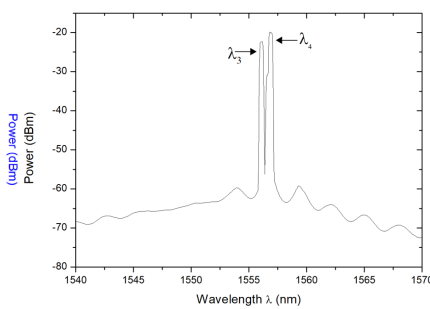


Figura 7: Emisión laser dual de la cavidad CA₁ ajustando el PC.

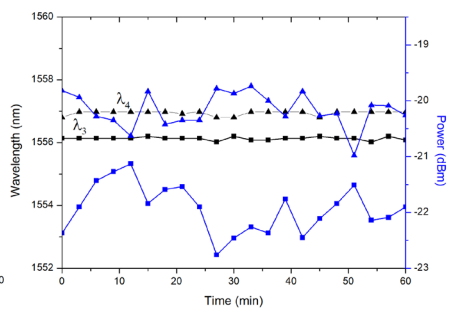


Figura 8: Emisión laser dual de la cavidad CA₁ monitoreada durante 1 h.

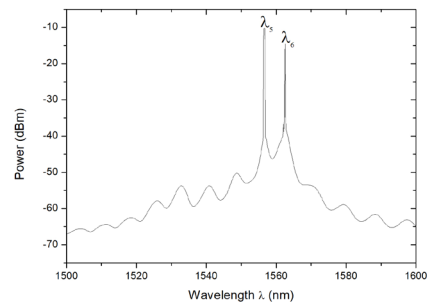


Figura 9: Emisión laser dual de la cavidad CA₂.

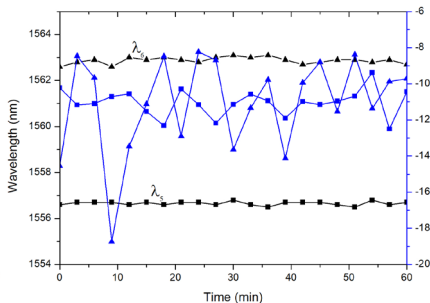


Figura 10: Análisis de estabilidad para emisiones laser λ_5 y λ_6 .

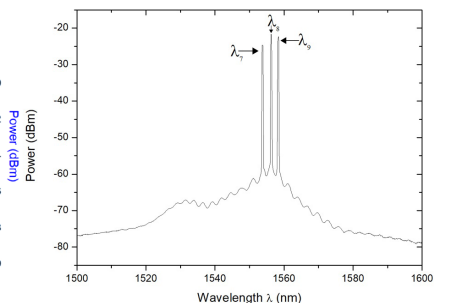


Figura 11: Emisión laser triple de la cavidad CA₁.

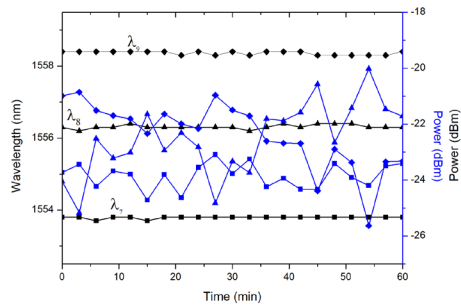


Figura 12: Análisis de estabilidad para emisión laser triple de cavidad CA₁.

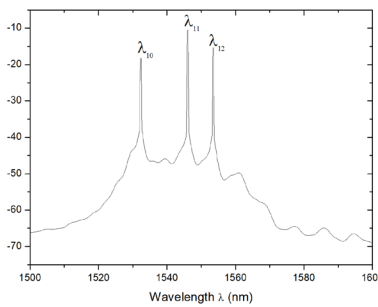


Figura 13: Emisión laser triple de la cavidad CA₂.

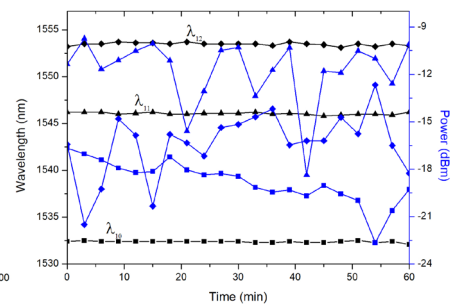


Figura 14: Emisión laser triple de la cavidad CA₂ monitoreada durante 1 h.

CONCLUSIONES

En conclusión, dos cavidades laser de fibra óptica para la generación de múltiples longitudes de onda se desarrollaron experimentalmente. Al modificar la curvatura del interferómetro se pueden generar emisiones laser simples, duales y triples en ambas cavidades. La cavidad CA₁ ofrece una mejor SMSR, en promedio de 38 dB mientras que en la cavidad CA₂ es de 32 dB. Las variaciones en la longitud de onda de las emisiones generadas en la primera cavidad laser (CA₁) son todas menores a 0.2 nm y las fluctuaciones de potencia son inferiores a 3 dBm, mientras que en la segunda cavidad (CA₂) se llegan a duplicar las variaciones en la longitud de onda y las fluctuaciones de potencia sobrepasan los 5 dBm. Por otra parte, la corriente de operación de la señal de bombeo en la cavidad CA₂ es de 200 mA y de 400 mA para la cavidad CA₁, los picos máximos de potencia fueron de -17.63 dBm y -3.24 dBm respectivamente en emisión laser simple. El interferómetro mostró una mayor sensibilidad en la cavidad CA₂ por lo que es más sencillo poder localizar las emisiones laser. Al elegir la cavidad CA₁ se dispone de una mayor SMSR, mejor estabilidad, y variaciones pequeñas de longitud de onda y potencia, pero se deja de lado la sensibilidad del interferómetro y una corriente de operación baja, que se puede complementar con la cavidad CA₂. Las cavidades laser mostradas ofrecen bajo costo e implementación sencilla.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al equipo de trabajo del laboratorio de fibras ópticas y telecomunicaciones de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca.

REFERENCIAS

- [1] Zhi-bo, L., Yang, L., Yan, L., Zhong-Wei, T. & Shuisheng, J. (2013). A Static Axial Strain Fiber Ring Cavity Laser Sensor Based on Multi-Modal Interference. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 21, pp. 2050-2053.
- [2] Umyy, M. A., Madamopoulos, N. & Dorsinville, R. (2011). Tunable Multi-wavelength SOA based Linear Cavity fiber laser source for Optical Communications Applications. *International Conference on Communications and Information Technology*. pp. 87-91.
- [3] Zhang, Q., Chang, J., Wang, Q., Wang, Z., Wang, F. & Qin, Z. (2017). Acousto-Optic Q-Switched Fiber Laser-Based Intra-Cavity Photoacoustic Spectroscopy for Trace Gas Detection. *Sensors*. doi: 10.3390.
- [4] Muqing, Z., Fang, R., Juhao, L., Dawei, G., Yichi, Z., Zhangyuan, C. & Yongqi, H. (2018). Tunable Multi-Wavelength EDF Laser Based on Sagnac Interferometer with Weakly-Coupled FMF Delay Line. *OFC*.
- [5] Sierra-Hernandez, J. M., Rojas-Laguna, R., Vargas-Rodriguez, E., Estudillo-Ayala, J. M., Jauregui-Vazquez, D., Guzmán-Chávez, A. D. & Zaca-Moran, P. (2013). A tunable multi-wavelength erbium doped fiber laser based on a Mach-Zehnder interferometer and photonic crystal fiber. *Laser Phys*. pp. 23. doi: 10.1088.
- [6] Zhou, Y., Wang, X., Tang, Z. & Lou, S. (2018). Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser based on a tapered in-line Mach-Zehnder interferometer. *Laser Phys*. pp. 28.

- [7] Ai-Ping, L., Zhi-Chao, L. & WenCheng, X. (2009). Tunable and switchable multiwavelength erbium-doped fiber ring laser based on a modified dual-pass Mach–Zehnder interferometer. *Optics Letters*, Vol. 34, No. 14, pp. 2135-20137.
- [8] Jauregui-Vazquez, D., Rojas-Laguna, R., Estudillo-Ayala, J. M., Lopez-Dieguez, Y. & Sierra-Hernandez, J. M. (2016). A multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser using an intrinsic Fabry–Perot interferometer. *Laser Phys.* pp. 26. doi: 10.1088.
- [9] Estudillo-Ayala, J. M., Jauregui-Vazquez, D., Haus, J. W., Perez-Maciel, M., Sierra-Hernandez, J. M., Avila-Garcia, M. S., Rojas-Laguna, R., Lopez-Dieguez, Y. & Hernandez-Garcia, J. C. (2015). Multi-wavelength fiber laser based on a fiber Fabry–Perot interferometer. *Appl. Phys.* doi: 10.1007.
- [10] Yeh, C. H., Chow, C. W., Wu, Y. F., Shin, F. Y., Wang, C. H. & Chi, S. (2009). Multiwavelength erbium-doped fiber ring laser employing Fabry–Perot etalon inside cavity operating in room temperature. *Optical Fiber Technology*. pp. 344-347. doi: 10.1016.
- [11] Yang, J., Tijin, S. C. & Ngo, N. Q. (2004). Multiwavelength Tunable Fiber Ring Laser Based on Sampled Chirp Fiber Bragg Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 4, pp. 1026-1028.