

Instrumentación y diseño de una fuente de alto voltaje para fabricar rejillas de fibra óptica mediante la técnica de arco eléctrico

J.C. Hernández-García^a, J.M. Estudillo-Ayala^{a,*}, R. Rojas-Laguna^a, R.I. Mata Chávez^a, A. Martínez-Ríos^b, J.G. Gutiérrez^c, M. Trejo-Durán^a, E. Vargas-Rodríguez^a, J.A. Andrade-Lucio^a y E. Alvarado-Méndez^a

^aDepartamento de Electrónica, División de Ingenierías,
Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato,
Carretera Salamanca-Morelia Km 3.5 + 1.8 Comunidad Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, México.

^bCentro de Investigaciones en Óptica,
Lomas del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., México.

^cEscuela de Ciencias, Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca,
Av. Universidad S/N, Ex Hacienda Cinco Señores, Oaxaca de Juárez, Oax. 68120, México,
*e-mail: julian@salamanca.ugto.mx

Recibido el 8 de noviembre de 2007; aceptado el 11 de mayo de 2010

En este trabajo se presenta la instrumentación y construcción de una fuente de alto voltaje, la cual fue controlada por el puerto de comunicación de entrada/ salida de una tarjeta de adquisición de datos, utilizando el lenguaje de programación gráfica LabView®. La fuente fue utilizada para la fabricación de rejillas de periodo largo de fibra óptica mediante la técnica de arco eléctrico punto por punto, con el diseño y construcción de la fuente se logró fabricar rejillas de periodo largo con un costo de fabricación menor del 80 % con respecto a la fabricación de rejillas de periodo largo con una empalmadora de fibra óptica. El instrumento fabricado tiene un panel de control virtual para modificar el tiempo de duración del arco, el voltaje aplicado y la corriente eléctrica aplicada a dos electrodos y de esa manera modificar la estructura de la fibra óptica. Las rejillas fueron fabricadas con fibra óptica convencional SMF-28 y las rejillas pueden ser utilizadas en láseres de fibra óptica, filtros ópticos y en la implementación de sensores ópticos.

Descriptores: Fuente de alto voltaje; fibras ópticas; rejillas de fibra óptica.

In this work we present the instrumentation and construction of a source of high voltage, the source is controlled by the communication port Input/Output of a card of acquisition of data, we used programming language LabView®, is a tool for the design of acquisition systems, instrumentation and control. The source was utilize for to fabricate long period grating of optical fibers by means of inducing an electric arc with the point by point procedure, with this source is have low cost in the fabrication, this is 80 % down of technique with others devices. The instrument has a panel of virtual control to modify the time of duration of the arch, the voltage and the electric current applied to the optic fiber by means of two electrodes. The gratings were fabricated with SMF-28. These gratings can be used with optical fiber lasers as optical filters and in the implementation of optical sensors.

Keywords: High voltage source; optical fibers; fiber optic gratings.

PACS: 42.81.i; 42.81.Wg.

1. Introducción

En la actualidad una fuente de alto voltaje desempeña un papel importante en el ámbito de la investigación, debido a que estos dispositivos pueden ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones de distintas áreas, como física, química, mecánica, eléctrica y óptica.

En el área de óptica las fuentes de alto voltaje son construidas y diseñadas principalmente para alimentar fuentes de bombeo en láseres y fuentes de corriente para diodos láser. Una manera conveniente de unir dos fibras ópticas es por medio de una empalmadora de fibra óptica, la cual tiene un costo elevado; la empalmadora contiene una fuente de alto voltaje, y junto con dos electrodos realizan una descarga eléctrica para calentar las dos fibras que se desean unir y con un empuje realizado con la propia empalmadora las fibras quedan unidas. Con estas empalmadoras surgieron algunas técnicas para fabricar rejillas de periodo largo (RPL) de fibra aplicando periódicamente descargas de arco eléctrico en una sección de

la fibra óptica [1-3], obteniendo una modulación del índice de refracción del núcleo inducida directamente por el cambio de la estructura del vidrio sin alterar el diámetro de la fibra [4]. Este método de fabricación de RPL ha sido estudiado en diferentes artículos [5], pero el costo elevado de las empalmadoras hace que el proceso de fabricación de las rejillas sea muy caro, por lo que en este trabajo presentamos una fuente de alto voltaje de un costo mucho menor que la empalmadora comercial. La fuente diseñada es dedicada a la fabricación de las RPL por el método de arco. Actualmente no existen artículos relacionados a la elaboración de la fuente de alto voltaje para la fabricación de RPL por el método de arco y los fabricantes de empalmadoras no proporcionan datos relacionados al voltaje y corriente para la realización de las descargas aplicadas a la fibra, por lo que nosotros realizamos una investigación y diseño de la fuente para fabricar rejillas de periodo largo y con la fabricación de esta rejillas obtener diferentes aplicaciones en el área de sensores y comunicaciones con fibras ópticas.

TABLA I. Características más importantes de las rejillas de periodo largo.

Tienen bajas pérdidas de inserción de 1-3 dB.
Profundidad de modulación de 7-15 dB.
Ancho de banda espectral de 11-55 nm.
Baja reflexión, casi no hay regreso de luz reflejada en el núcleo.
Eficiencia del 100 % en el modo de acoplamiento núcleo-revestimiento.
Presenta un alto grado de control en su fabricación, debido a que el periodo de la rejilla es muy grande (entre 100 μm a 1 mm).

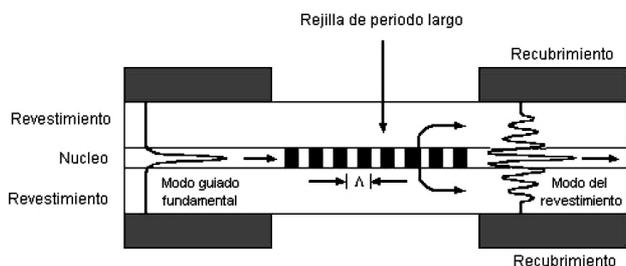


FIGURA 1. Esquemático de una rejilla de periodo largo en la que se muestra el modo guiado fundamental de la fibra y algunos modos del revestimiento después de transmitirse por la rejilla y así como la distancia de separación Λ entre periodos.

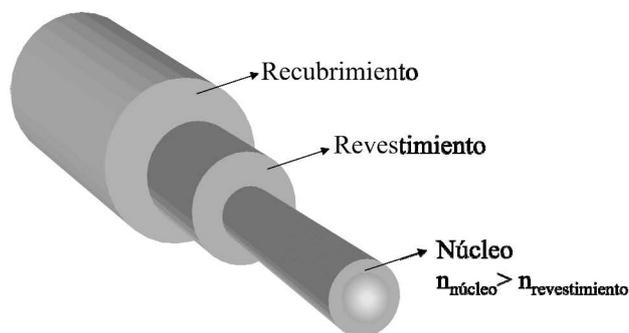


FIGURA 2. Estructura de una fibra óptica en la que se aprecia en la parte central el núcleo de la fibra en la segunda etapa el revestimiento y en la tercer etapa el recubrimiento plástico.

2. Rejillas de periodo largo (RPL)

En 1996 apareció el concepto de rejillas de periodo largo en fibras ópticas [6], (LPFG, por sus siglas en inglés) y desde entonces, la investigación de estos dispositivos se sigue haciendo en diferentes tipos de fibras y con diversos métodos de fabricación. El principio de operación de estas rejillas de periodo largo se basa en el acoplamiento del modo guiado fundamental del núcleo a los modos del revestimiento a longitudes de onda que satisfacen la condición de ajuste de fase.

Una RPL consiste de un periodo de modulación del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica. En las fibras

monomodo la conexión es llevada a cabo entre el modo guiado y los modos del revestimiento que se propagan en la misma dirección. Debido a que los modos de revestimiento sufren una alta atenuación, el espectro de transmisión de una RPL contiene un número de bandas de atenuación, cada una correspondiente a la conexión para diferentes modos de revestimiento [7]. En la Fig. 1 se presenta una rejilla de periodo largo, así como los principales parámetros de fabricación.

La fibra por si misma consiste de dos estructuras de guía de onda como se muestra en la Fig. 2, una es el núcleo de dióxido de sílice de mayor índice de refracción rodeado por el revestimiento de más bajo índice de refracción, y la otra es el recubrimiento plástico rodeado por aire.

3. Propiedades y características de las rejillas de periodo largo

Las RPL son conocidas por tener propiedades térmicas interesantes. Las longitudes de onda en las bandas centrales de atenuación pueden exhibir una sensibilidad cero, positiva o negativa a la temperatura, dependiente del periodo de la RPL, la geometría y la composición de la fibra.

Las características de alta temperatura de las RPL inscritas por arco son de principal interés dado que su estabilidad térmica las hace excelentes candidatos para aplicaciones en ambientes rigurosos de alta temperatura, como los boilers en las plantas eléctricas, donde pocos sensores de temperatura pueden funcionar [8]. (Ver Tabla I).

4. Principio de operación de las rejillas de periodo largo

4.1. Modo de acoplamiento

El acoplamiento de la luz de un modo a otro a través de una rejilla de fibra ocurre si se satisface la siguiente condición de igualamiento de fase:

$$\Delta\beta = \beta_{11} - \beta_{qm} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

donde, β_{11} es la constante de propagación del modo inicial, tomando HE_{11} como el modo de propagación fundamental del núcleo β_{qm} , es la constante de propagación del modo final, Λ , es el periodo de la rejilla de la fibra.

La $\Delta\beta$ más grande posible surge entre los modos de propagación del núcleo que viajan en dirección al eje de propagación y los modos de propagación que viajan en sentido contrario a la dirección de propagación. En la Fig. 3a se muestra la periodicidad de las rejillas que se necesita para alcanzar el acoplamiento entre estos dos modos es muy pequeña del orden de medio micrómetro. Estas rejillas son llamadas rejillas de periodo corto o rejillas de Bragg. Mientras que para una rejilla de periodo largo, se necesita acoplar los modos de propagación del núcleo que viajan en el mismo sentido que los modos de propagación del revestimiento tal y como se

muestra en la Fig. 3b La periodicidad de una rejilla de periodo largo típicamente es de varios cientos de micrómetros. Los periodos más largos de las LPG son necesarios para acoplarse en los modos de revestimiento guiados, y los periodos cortos para acoplarse en los de radiación [5].

El modo guiado fundamental LP₀₁ puede acoplar solamente a los modos de revestimiento de orden impar LP_{0m}, en caso de que se tenga una asimetría en el perfil transversal de la fibra, los modos de diferente orden pueden acoplarse. Para fibras con un modo LP₀₁, el acoplamiento a los modos de propagación de diferente orden se puede lograr con una inclinación en la rejilla. Las constantes de acoplamiento para los modos de radiación de orden *v* y el modo del núcleo (LP₀₁) siguen las siguientes definiciones:

$$K_{v \rightarrow 01}(z) = \frac{n\omega\epsilon_0\Delta n(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \times \int_0^a (E_r^{rev} E_r^{nucleo*} + E_\phi^{rev} E_\phi^{nucleo*}) r dr, \quad (2)$$

donde *n* es el índice de refracción, ω es la frecuencia, ϵ_0 es la constante dieléctrica y *E* es el campo eléctrico.

Los eigenvalores y las distribuciones de campo para los modos de revestimiento pueden ser calculados igualando los campos en los límites, tanto para el núcleo como para los modos de mas bajo orden LP_{0n}. Solamente el acoplamiento a los modos de radiación con el orden azimutal *l* = 1 (tipo LP_{l-1,v}) tienen una integral diferente de cero. Las ecuaciones que describen la integral de la Ec. (2) están relacionadas.

Para los modos *v* = 2,4, el campo en el núcleo es muy bajo lo cual contribuye muy poco al acoplamiento. Sin embargo, el campo para los modos *v* con numero-impar tiene intensidad alta y dominan el acoplamiento para los modos de más bajo orden.

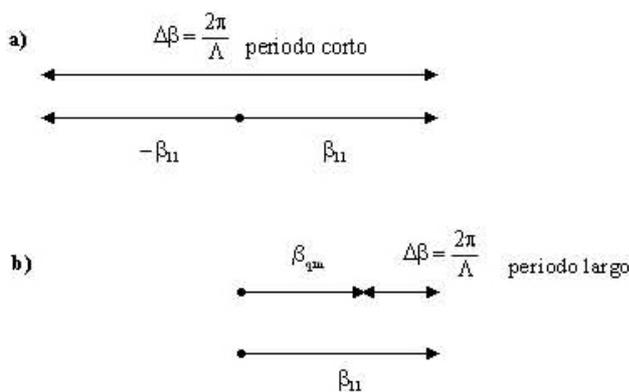


FIGURA 3. Diagrama esquemático ilustrando las condiciones de igualamiento de fase para el acoplamiento de los modos de propagación del núcleo y a) los modos de propagación que también viajan en el núcleo pero en sentido contrario (rejillas de periodo corto); b) los modos de propagación del revestimiento que viajan en el mismo sentido (rejillas de periodo largo).

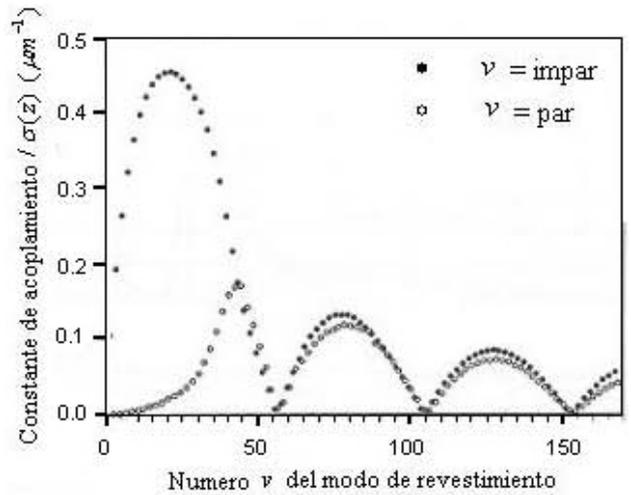


FIGURA 4. Constantes de acoplamiento para el modo guiado fundamental para los modos de revestimiento de orden impar y orden par (*l* = 2) con orden azimutal 1 (tipo LP_{0n}).

En la Fig. 4 se muestran las constantes de acoplamiento, calculadas para un total de 168 modos de revestimiento para una fibra a 1550 nm, normalizada con la modulación del índice de refracción $\Delta n(z)$. El punto importante es que el acoplamiento para los modos de orden par es débil comparado a los modos impar. Para *v* > 40, tantos los modos de orden par como los de orden impar tienen casi idénticas las constantes de acoplamiento.

Igualando la fase entre el modo de propagación en el núcleo de la fibra y un modo del revestimiento en la dirección de propagación, la longitud de onda λ satisface la siguiente expresión,

$$\lambda = [n_{eff}(\lambda) - n_{revestimiento}^i(\lambda)]\Lambda, \quad (3)$$

donde $n_{eff}(\lambda)$ es el índice de refracción efectivo de la propagación del modo del núcleo en la longitud de onda λ , $n_{revestimiento}^i(\lambda)$ es el índice de refracción del *i*-th modo del revestimiento y Λ es el periodo de la RPL [9].

La mínima transmisión de las bandas de atenuación esta gobernada por la expresión

$$T_i = 1 - \text{sen}^2(k_i L), \quad (4)$$

donde *L* es la longitud de la RPL y k_i es el coeficiente de acoplamiento para el *i*-th modo de revestimiento, el cual es determinado por la integral de traslape del modo del núcleo y del revestimiento y por la amplitud de la modulación periódica de las constantes del modo de propagación.

Debido a que el revestimiento generalmente tiene un radio grande, se tiene un número grande de modos de revestimiento. El análisis teórico ha mostrado que el acoplamiento eficiente es posible solamente entre los modos del núcleo y del revestimiento que tienen una integral de traslape, un ejemplo son los modos que tienen perfiles de campo eléctrico similares [5].

5. Fabricación de rejillas con arco eléctrico

Existen en la actualidad dos métodos para la fabricación de RPL por descargas de arco eléctrico. El primero crea micro curvaturas introduciendo un pequeño desplazamiento lateral en uno de los extremos de la fibra. El otro adelgaza la fibra colocando un peso a un extremo de la misma. Ambos métodos inducen modulación en el índice de refracción por deformación mecánica.

La técnica de arco eléctrico consiste en una serie de descargas sucesivas a través de la fibra expuesta, por la descarga de dos electrodos que afectan a la fibra directamente con una diferencia de potencial entre dos puntos, ocasionando, una refracción interna del núcleo hacia el revestimiento.

Mediante cada descarga se altera el índice de refracción del núcleo, inscribiendo así la rejilla. Este método requiere una fuente de alto voltaje con electrodos como la que se propone en este trabajo o una empalmadora de fibra óptica la cual tienen un costo muy elevado. Con este método se requieren controlar varios parámetros como: el periodo entre rejillas, tiempo de exposición de la fibra al arco eléctrico, cantidad de corriente del arco eléctrico y el valor de la tensión de la fuente de alto voltaje.

Las rejillas que se fabrican con la fuente diseñada son de periodo largo, ya que pueden tener un periodo de modulación de 10 a 1000 μm , el periodo es usado para acoplar la luz entre los modos de propagación en la misma dirección. El vector de onda de la correspondiente rejilla promueve el acoplamiento entre modos de co-propagación de la fibra óptica como se explico en la Sec. 4 del artículo.

La ubicación de las bandas de absorción en el espectro de transmisión, pérdida de inserción, eficiencia y ancho de banda, son algunos de los cambios que se realizan en la fabricación por este método.

6. Fuente de alto voltaje y menu de programación

En la Fig. 5 se presenta una fotografía del arco eléctrico generado con la fuente de alto voltaje para las descargas sucesivas para la fabricación de rejillas. En la construcción de la fuente se utilizó el circuito de la Fig. 6, el cual cuenta con un convertidor analógico digital de 8 bits (DAC0808), la entrada del circuito fue proporcionada mediante la PC (Personal Computer) haciendo uso del puerto paralelo, dependiendo del dato de 8 bits el convertidor proporciona una corriente relacionada al mismo y mediante un amplificador operacional LM741 la corriente que proporcionó el DAC0808 fue convertida a un voltaje que tuvo una variación de 5 a 0 V, para realizar el calculo del voltaje a la salida del circuito se utilizó la Ec. (5):

$$V_o = V_{ref} \left(\frac{A1}{2} + \frac{A2}{4} + \dots + \frac{A8}{256} \right), \tag{5}$$

donde V_o representa el voltaje de salida, V_{ref} el voltaje de referencia que se esta utilizando en el DAC0808 y $A1, A2, \dots, A8$ indican los bits que se están manejando en la conversión

digital-analógica, en donde los bits del dato proporcionado se encuentran de tal manera que $A1$ (Low Significant Bit) y $A8$ (More Significant Bit).

El circuito de la Fig. 6 tiene la finalidad de convertir la información digital proveniente de la PC en información analógica para obtener la señal de entrada necesaria en el circuito de la fuente variable de voltaje que se muestra en la Fig. 7, el circuito controla la variación del voltaje a la salida mediante el uso de una PC, además el circuito fue diseñado de tal forma que se tuvo una ventaja muy importante, y consiste en que al estar en funcionamiento se logran mantener aisladas las partes en las cuales se está introduciendo la señal de la PC y donde se varía el voltaje, lo cual nos sirve de protección. Mediante el uso del TRIAC (Tiristor en Corriente Alterna) BTB24 en el circuito, se puede tener un adecuado manejo de la variación del voltaje a la salida del transformador, esto es posible debido a las características con las que cuenta el TRIAC y a la configuración que se utilizó en el circuito construido para la fuente variable de voltaje. Otro parámetro importante es el ángulo de retardo de disparo, que se define como el número de grados de un ciclo de CA que transcurren

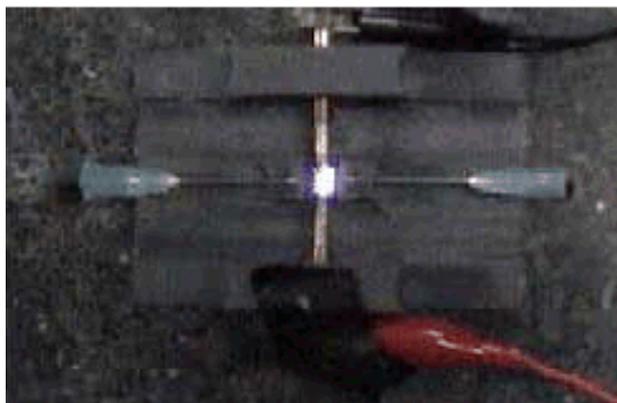


FIGURA 5. Fotografía del arco eléctrico producido por la fuente de alto voltaje.

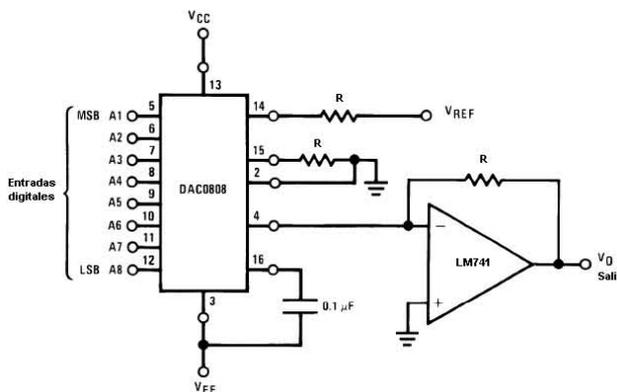


FIGURA 6. Diagrama del circuito convertidor digital-analógico de 8 bits.

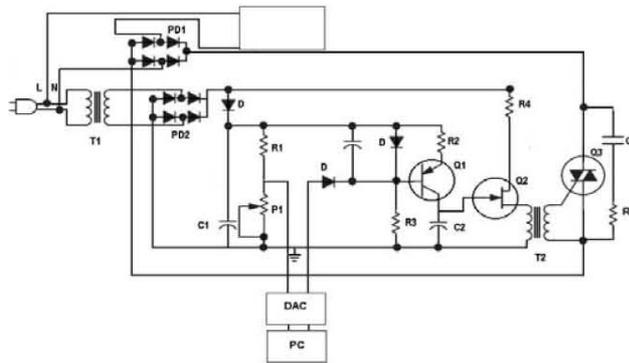


FIGURA 7. Diagrama del circuito de la fuente de alto voltaje variable en la que se utiliza un convertidor analógico digital y es controlada por medio de una PC.



FIGURA 8. Menú de programación de la fuente de alto voltaje con la que se puede ajustar el tiempo de duración del arco eléctrico y el nivel del voltaje aplicado.

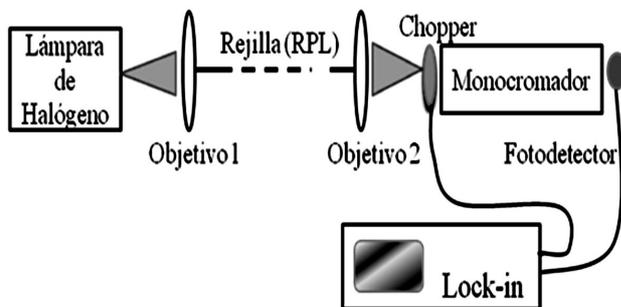


FIGURA 9. Arreglo experimental para la obtención del espectro de las rejillas fabricadas con la fuente de alto voltaje.

antes que el dispositivo sea encendido, tomando en cuenta que para los términos anteriormente descritos se basan en que el tiempo total del ciclo es de 360° [10]. Se utilizó un transformador con la finalidad de obtener en la salida alto voltaje y lograr producir el arco eléctrico en la fuente, el transformador usado cuenta con las siguientes características:

- Transformador monofásico.
- 5000 Volts de RMS en el lado secundario.

- 100 Volts de RMS en el lado primario.
- 500 mili Amperes de RMS en el lado primario.
- 10 mili Amperes de RMS en el lado secundario.
- 48 a 62 Hertz de frecuencia de operación.

Para el control de la fuente se utilizó el programa LabView®, en la que se generó un panel de control para la fuente mediante el cual se puede programar el voltaje y la duración del arco eléctrico. LabView® es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo Matlab®. En la Fig. 8 se muestra el menú usado en la programación de la fuente, el cual consta de dos teclados (uno para la selección del voltaje y otro para la selección del tiempo de duración del arco eléctrico), un botón de encendido y un botón de inicio.

TABLA II. En esta tabla se muestra los parámetros que se utilizaron para fabricar algunas rejillas por ejemplo los del region 2 son los parámetros utilizados en obtención de la RPL fabricada en la que en la Fig. 11 se muestra el espectro de transmisión.

	Voltaje a la salida de la fuente	Corriente	Tiempo de descargas	Numero de descargas	Periodo
Rejilla 1	1071V	8.82 mA	3 seg	15	510 μm
Rejilla 2	1326V	15.49mA	2 seg	30	510 μm

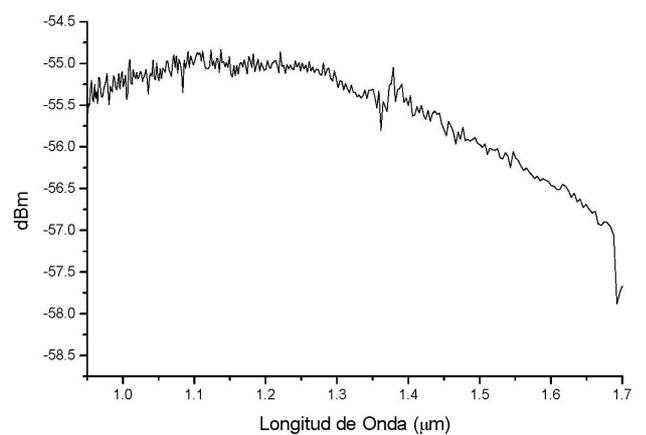


FIGURA 10. Espectro de la luz blanca obtenido de una fuente de Tungsteno-Halógeno.

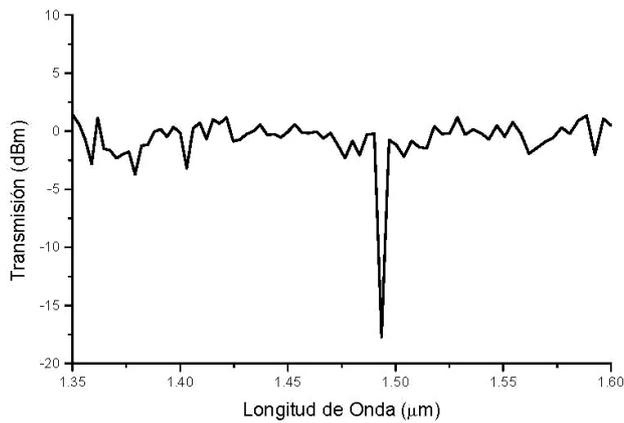


FIGURA 11. Espectro de luz propagada a través de la rejilla en la que se muestra una longitud de onda de resonancia aproximada de 1490nm y con una profundidad de modulación mayor de -15dBm.

7. Pruebas ópticas

Para la fabricación de las rejillas se utilizó fibra óptica monomodo estándar para comunicaciones (SMF28), con un diámetro del núcleo de $9\ \mu\text{m}$ y de revestimiento de $125\ \mu\text{m}$, para realizar la fabricación de las rejillas de fibra óptica se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se determinó la separación de las rejillas, para esto se hizo uso de la Ec. (3).

$$\lambda = (n_{\text{eff}} - n_{\text{revestimiento}})\Lambda, \quad (6)$$

donde λ es la longitud de onda de resonancia, n_{eff} y $n_{\text{revestimiento}}$ son los índices de refracción efectivo del modo del núcleo en la longitud de onda λ y el índice de refracción del revestimiento respectivamente y Λ es el periodo de la RPL [11].

2. Se realizó la alineación de la fibra mediante el mecanismo implementado con tornillos micrométricos.
3. Se eligió el rango de voltaje y el tiempo de duración del arco eléctrico, a través del menú de programación de la fuente.
4. Se proporcionó la separación entre rejillas y al finalizar su fabricación, se retiró la fibra óptica para que esta fuera sometida a las pruebas ópticas.

Las pruebas realizadas a las rejillas de fibra óptica consistieron en obtener el espectro de una fuente de luz blanca y el espectro de salida de la rejilla fabricada, con los datos obtenidos se realizó una diferencia entre la señal de la fuente de luz blanca y la señal de la rejilla fabricada y con esto se obtuvo una gráfica de transmisión de la rejilla como se muestra en la Fig. 11. Se utilizó el arreglo experimental mostrado en la Fig. 9, y consiste de un monocromador DK 240 con una resolución de 1nm, un amplificador lock-in, y un detector de germanio, el cual tiene un rango espectral de operación de los 800 nm a 1700 nm.

8. Resultados

En la Tabla II se muestran las condiciones de voltaje, corriente, tiempo y periodo utilizadas en dos de las rejillas de fibra óptica que se fabricaron en el laboratorio mediante la fuente de alto voltaje construida. En la Fig. 10 se muestra el espectro de emisión de la fuente de luz utilizada para caracterizar las rejillas fabricadas.

En la Fig. 11 se muestra el espectro de transmisión de la luz blanca que se propaga por la rejilla fabricada con un periodo $\Lambda=510\ \mu\text{m}$, la longitud de onda de resonancia es aproximadamente de 1490 nm, entre mayor sea el número de descargas realizadas a la fibra mayor es la profundidad de modulación. Para conseguir otra longitud de onda de rechazo de banda se requiere que se varíe el periodo (Λ), por lo que se pueden obtener filtros para diferentes longitudes de onda. La ventaja de utilizar la fuente diseñada con respecto a una fusionadora comercial son los costos de fabricación, ya que una fusionadora comercial tiene un costo aproximado de 20 mil dólares, y el costo de la fuente que fabricamos tiene un costo aproximado de 400 dólares, otra ventaja es que con la fuente diseñada se puede controlar los rangos de voltaje y corriente aplicados a la fibra por medio del arco eléctrico y con esto se controla el proceso de fabricación de las rejillas, con una empalmadora comercial es difícil cambiar los parámetros de corriente y voltaje ya que éstos están preestablecidos por el fabricante.

9. Conclusiones

En este trabajo presentamos la construcción de una fuente de alto voltaje la cual cumple con los objetivos de obtener descargas eléctricas sobre la fibra y con esto modificar la estructura física de la fibra óptica, estos cambios en la estructura son los responsables de que la fibra funcione como filtro óptico. La fuente que se diseñó es económica comparada con el costo de una empalmadora de fibra, la fuente fue elaborada para un fácil manejo entre los usuarios. La fabricación de rejillas de periodo largo de fibra óptica se requiere mucha precisión al momento de aplicar las descargas debido a las dimensiones que se está manejando entre los periodos de las rejillas. El obtener un dispositivo para fabricar rejillas de periodo largo es de gran utilidad ya que estas rejillas tienen muchas aplicaciones como filtros ópticos, sensores ópticos, dispositivos como acopladores de fibra óptica que se pueden utilizar en comunicaciones ópticas y láseres de fibras.

Agradecimientos

Al CONCYTEG por el apoyo recibido a través del proyecto “Diseño de fibras microestructuradas para aplicaciones en sensores ópticos” (Convenio 07-16-K662-061-A09). A la Universidad de Guanajuato por el proyecto No. E20391 “Fabricación de filtros y acopladores de fibra óptica”, Programa Institucional de Fortalecimiento a la Investigación 2008 y Al CONACYT por los proyectos No. 93398 y J51264.

-
1. S.G. Kosinski y A.M. Vengsarkar, *Proceedings of the optical fiber communications conference*, **2** (1998) 278.
 2. G. Rego, P. Marques, J.L. Santos y Salgado, "Arc-Induced Long-Period Gratings" *H.M. Fiber and Integrated Optics* **24** (2005) 245.
 3. G. Rego *et al.*, *Optics Letters* **30** (2005) 2065.
 4. S. Nam *et al.*, *Optics Express* **13** (2005) 731.
 5. M. Ashish *et al.*, *Journal of Lightwave Technology* **14** (1996) 58.
 6. H. Cerecedo-Núñez y M.D. Iturbe-Castillo, *Rev. Mex. Fís.* **44** (1998) 107.
 7. K.O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau y D.C. Johnson, *Annu. Rev Mater. Sci.* **23** (1993) 125.
 8. V. Grubsky, A. Skorucak, D.S. Starodubov y J. Feinberg, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** (1999) 87.
 9. W. James, Stephen, P. Tatam y Ralph, *Meas. Sci. Technol.* **14** (2003) R49.
 10. H. Lilien, "Tiristores y triacs" Editorial: Marcombo National Instrument Corp., "La instrumentación virtual"
 11. Francis T.S. Yu y Shizhuo Yin "Fiber Optics Sensor" (2002) 153.