

Breve revisión del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia

H.H. Cerecedo-Núñez

CIICAP, Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Torre Universitaria 6^{to} Piso, Col. Chamilpa, 62210 Cuernavaca, Morelos, Mexico

E.A. Kuzin

Fotónica y Física Óptica, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica
Apartado postal 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., Mexico

Recibido el 28 de febrero de 2000; aceptado el 24 de mayo de 2000

En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica del estado actual del interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia. Esta aportación muestra los trabajos más significativos e importantes para el entendimiento de dicho interferómetro. Se muestran los antecedentes del interferómetro de Sagnac usando en su fabricación fibra óptica y los trabajos recientes de este mismo interferómetro, pero ahora formado completamente de fibra óptica. Además, se da una breve descripción de los temas relacionados con el estudio y desarrollo de este interferómetro.

Descriptores: Fibras ópticas; dispositivos de fibras ópticas

We describe the evolution of the high birrefringent fiber Sagnac interferometer. This contribution shows the most important works, necessary to understand such interferometer. We mention the first works in which were used optical fiber and the recent works in which are using all fiber Sagnac interferometer. Also, we mention the topics related with the study and development of this interferometer.

Keywords: Optical fibers; optical fibers devices

PACS: 42.81.-i; 42.81.Gs; 42.81.Pa

1. Introducción

El impacto actual de la fibra óptica, en nuevos conocimientos y aplicaciones, es innegable. Como todo avance tecnológico de nuestro tiempo, las investigaciones sobre fibra óptica se han desarrollado con gran rapidez. En sus inicios, éstas fueron enfocadas hacia las comunicaciones ópticas. En la actualidad existen básicamente tres líneas de desarrollo: comunicaciones ópticas, procesamiento de señales y sensores, de las cuales se derivan las principales investigaciones. Sin embargo, todavía existen problemas en algunos usos prácticos de estas fibras y sus esquemas derivados. Es por eso que aún se siguen realizando investigaciones entre los dispositivos y esquemas existentes y en la búsqueda de nuevas soluciones.

Además del desarrollo de la fibra como medio de transmisión, se han desarrollado múltiples dispositivos con ellas, entre los cuales se encuentran aquellos elementos de fibra que permiten la generación (láseres), transmisión (acopladores, multiplexores, espejos selectivos, etc.), amplificación de señales ópticas y sensores, entre otros. Uno de estos dispositivos en desarrollo es el *interferómetro de Sagnac*. Tales dispositivos, en general, han sido propuestos como giroscopio [1], sensores [2, 3], espejos en el régimen lineal [4] y no lineal [5], láseres [1], multiplexores [6], etc.

En este trabajo realizamos una breve revisión acerca de los trabajos y desarrollo del interferómetro de Sagnac, formado completamente de fibra óptica. La razón por lo que hacemos esto es porque un interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica, presenta una configuración mucho más

compacta (está en su totalidad formada con fibra óptica) y presenta ciertas ventajas funcionales que le permiten competir satisfactoriamente con otros dispositivos de fibra óptica con funciones similares, ya que es posible utilizarlo como espejo, multiplexor, cavidad láser, sensor, etc., tal y como se menciona en el párrafo anterior y lo cual ha quedado de manifiesto en diversos reportes [7, 8]. Incluso, es flexible y fácil de transportar, contiene una respuesta relativamente rápida (dependiendo ésta de los aparatos de monitoreo y no del esquema mismo), no es afectado por perturbaciones externas a frecuencias eléctricas, posee pérdidas más bajas que cualquier otro esquema interferométrico formado con fibra óptica. Además, este arreglo puede llegar a ser un dispositivo de apoyo a aplicación de otras configuraciones más complejas. Entre sus "desventajas" principales podemos mencionar que este arreglo es muy sensible, frágil (puesto que está formado por una fibra óptica) y, quizás, con aplicaciones relativamente "específicas".

Los autores de este trabajo consideramos que el estudio del interferómetro de Sagnac es importante. Primero porque es un dispositivo que aún se encuentra en un periodo de experimentación (es decir, no existe en el mercado un dispositivo llamado "interferómetro de Sagnac compuesto por fibra óptica"). Segundo, porque en varias instituciones del país se busca el desarrollo de dispositivos, así como de técnicas y aplicaciones propias. Por esto, la utilización de un dispositivo como el interferómetro de Sagnac, en una aplicación concreta, debe comenzar con el entendimiento y control de los parámetros del mismo (investigación), para después propo-

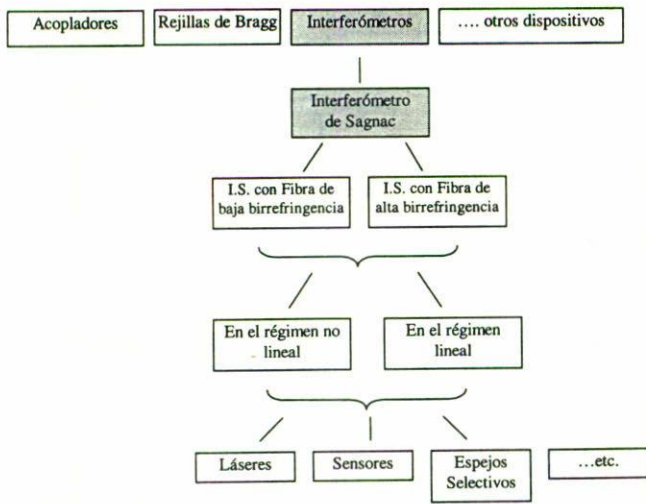


FIGURA 1. Esquema general del desarrollo de las fibras ópticas, en el cual se ubica el interferómetro de Sagnac.

ner mejoras y aplicaciones originales en éste. En otras palabras, para poder realizar aplicaciones de un dispositivo como el interferómetro de Sagnac hay que estudiarlo desde su origen, pasando por su reproducción, el entendimiento de su esquema y de sus resultados, para después proponer aplicaciones concretas y originales.

Uno de los objetivos de este trabajo es que este pueda ayudar a aquellos investigadores y estudiantes que desean iniciarse en el estudio de este esquema o tener conocimiento general de este dispositivo.

Los interferómetros de Sagnac pueden estar formados por fibra óptica de alta o baja birrefringencia (Fig. 1). El interés en estudiar un interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta o baja birrefringencia, radica en las características que presenta la señal transmitida y los propósitos de aplicación que se requieran. A la vez, este tipo de interferómetro puede estudiarse tanto en el régimen de la óptica lineal como en el régimen no lineal.

2. Interferómetro de Sagnac

Un interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica está compuesto por: a) una fuente emisora (no necesariamente de alta coherencia), utilizada con fines de monitoreo; b) un acoplador direccional de fibra monomodal, el cual divide (en amplitud) el haz que entra al interferómetro, en dos haces que se contrapropagarán (viajarán en sentidos opuestos) y que posteriormente interferirán en uno de los puertos de salida; c) el lazo del interferómetro, formado completamente con fibra óptica monomodal y por el cual se contrapropagan los haces divididos por el acoplador; y d) un elemento de detección de la interferencia de los haces, colocado a la salida del arreglo.

El funcionamiento básico de un interferómetro de Sagnac se puede explicar de manera sencilla, considerando lo siguiente.

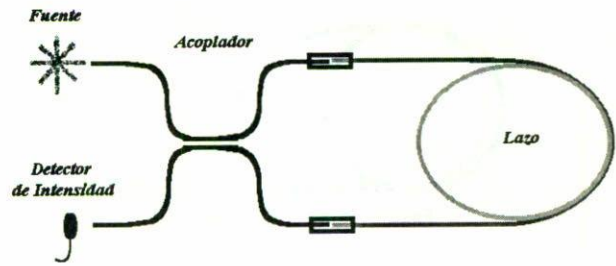


FIGURA 2. Esquema general de un interferómetro de Sagnac formado completamente de fibra óptica.

Es conocido que para que exista interferencia en un interferómetro de Sagnac, como en cualquier otro, se requiere que dos haces posean idénticos estados de polarización (cuando estos haces se superponen en el detector) [9]. Únicamente bajo esta condición se puede obtener un gran contraste de interferencia (o profundidad de modulación: PM, como también es llamado [10]). Cuando la polarización entre ambos no es completamente paralela, el contraste de interferencia se reduce, y cuando la polarización es ortogonal no existe interferencia. Por lo tanto, para obtener señales estables y reproducibles será esencial controlar el estado de polarización de la luz que se propaga en los brazos de un interferómetro de Sagnac formado por fibra óptica (Fig. 2).

Además de los cambios en la polarización mencionados anteriormente, existen otros que afectan de manera secundaria [9] y que son inherentes a cualquier interferómetro de Sagnac con fibra (debido a la topología del anillo del lazo que forma dicho interferómetro). Estos cambios pueden causar severas modificaciones en el contraste y la fase de interferencia. Estas modificaciones están relacionadas con la diferencia de camino óptico, lo cual a la vez se manifiesta como una diferencia de fase entre los haces contrapropagándose dentro del lazo.

3. Antecedentes del interferómetro de Sagnac usando fibra óptica

Los antecedentes más cercanos al interferómetro de Sagnac compuesto completamente de fibra óptica son los giroscopios formados con un lazo de fibra óptica. Los giroscopios son interferómetros de Sagnac que se habían venido utilizando sólo como sensores de rotación y basaban su funcionamiento en el efecto Sagnac (Ref. 11, parte 1). Probablemente el primer trabajo que propuso el empleo de fibra óptica para guiar la luz y formar un interferómetro de Sagnac con este elemento fue reportado en 1976, por V. Vali y R.W. Shorthill [1]. En este trabajo se analizó un interferómetro de Sagnac utilizando un lazo de fibra óptica y se propuso además el uso de éstos como anillos interferométricos y anillos láser.

El interferómetro propuesto (Fig. 3) se monitoreaba con un haz láser, el cual era dividido en otros dos haces por un cubo divisor B1, y los cuales se enfocaban en los extremos de una fibra. Una vez que ambos haces habían recorrido la

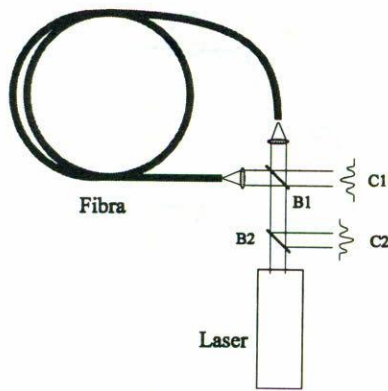


FIGURA 3. Esquema interferométrico propuesto por V. Vali y R.W. Shorthill [1].

fibra óptica, éstos se recombinaban de manera paralela por el mismo cubo divisor y la imagen de esto era recolectada en la pantalla C1. El divisor de haz B2, muestra las franjas observadas, pero con una diferencia de fase de 180° .

Posteriormente en 1979, R. Ulrich y M. Johnson [12] realizaron análisis de los cambios en la polarización de este mismo interferómetro considerando también una fibra en el lazo. En este trabajo Ulrich menciona que en la fibra que forma el lazo del interferómetro existen dos modos de polarización ortogonal, cada uno con diferentes velocidades, lo cual a la vez origina que en el interferómetro existan inestabilidades (como el corrimiento inesperado de las franjas de interferencia cuando éste permanece en reposo, e incluso cuando la fibra es tocada o sometida a vibración mecánica), causadas por variaciones en la birrefringencia de la fibra. Además de estos dos trabajos, existe una vasta bibliografía al respecto (Ref. 11, parte 1 y Refs. 13 y 14).

A partir de estos trabajos se puede considerar que surge una segunda etapa en el estudio y aplicaciones de los interferómetros de Sagnac, dado que los estudios que se realizan a partir de éstos son encaminados a tratar de reducir (o eliminar en algunos casos) el número de fuentes de error que influyen en el desarrollo del nuevo giroscopio de fibra óptica, con lo cual aparecen nuevas propuestas de arreglo, se descubren nuevos efectos y nuevas propuestas para aplicaciones.

4. Interferómetro de Sagnac compuesto totalmente de fibra óptica

El primer interferómetro de Sagnac realizado completamente con fibra óptica fue el propuesto por R.A. Bergh *et al.* [15], en 1981. Esto surge (básicamente) a partir de la aparición del acoplador direccional de fibra óptica [16] y el controlador de polarización [17]. En el reporte de Bergh se menciona que con el interferómetro totalmente de fibra se simplifica y estabiliza el sistema (interferómetro), además se eliminan los problemas de alineamiento en el arreglo, con lo cual se proporciona una alta sensibilidad en la detección de rotación. Los factores restantes que limitan la sensibilidad de éstos,

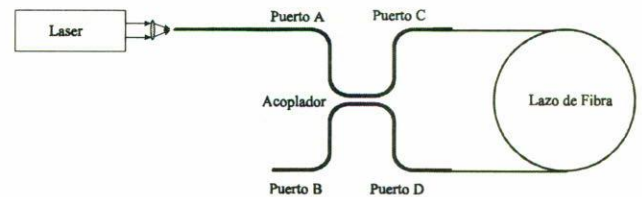


FIGURA 4. Arreglo del interferómetro de Sagnac propuesto por R.A. Bergh *et al.* [15].

según Bergh, son independientes de los nuevos componentes que se emplean. En el arreglo de Bergh (Fig. 4), un acoplador direccional de cuatro puertos es utilizado como un cubo divisor, el cual separa el haz de entrada, en el puerto A, en otros dos (puertos C y D) que se propagan en dirección opuesta dentro del lazo de fibra. Posterior a esto, los haces nuevamente pasan por el acoplador e interfieren. La interferencia de estos haces es debida a la diferencia de fase entre los dos haces contrapropagándose.

Además de esto, en 1982, K. Böhm *et al.* [18] reportan que campos magnéticos ambientales pueden causar considerables errores en la razón de detección del "nuevo" giroscopio. Aunque experimentalmente se muestra que el efecto del campo magnético de la Tierra se puede reducir hasta un orden de magnitud, este aún persiste. Esta investigación, como se verá más tarde, llegará a ser útil en ciertas aplicaciones.

Bajo este nuevo esquema, inmediatamente se re-diseña el antiguo giroscopio (Ref. 12, parte 4), sin dejar a un lado las nuevas investigaciones en él y se formaliza una nueva línea de investigación en el reciente arreglo, ésta se inicia por el camino de aplicaciones en sensores y posteriormente se extiende a comunicaciones.

Con la aparición de investigaciones en sensores (con el nuevo esquema del interferómetro), se abre una brecha entre el giroscopio y éstos, ya que en el giroscopio principalmente se busca una alta estabilidad, mientras que en los sensores se aprovechan y se buscan estas mismas sensibilidades a cambios ambientales.

Tal parece que los primeros análisis formales del interferómetro de Sagnac formado completamente por fibra óptica, encaminados a aplicaciones diferentes a los giroscopios, son realizados por D.B. Mortimore [4], en 1988. En su trabajo, Mortimore realiza un análisis matricial de dicho arreglo interferométrico, considerando en su análisis que la fibra contiene dos modos de propagación. Con este trabajo Mortimore describe las ecuaciones generales en términos matriciales que gobiernan el comportamiento de este interferómetro. Es curioso que ya en este trabajo Mortimore se refiere a un "lazo reflector formado por fibra", y no al interferómetro de Sagnac completamente de fibra óptica, con lo cual además ya se le está dando la aplicación como de un espejo de fibra óptica.

En este mismo año, y casi de manera simultánea, N.J. Doran y D. Wood [19] proponen un "lazo reflector no lineal". En este trabajo se propone un dispositivo no lineal para procesamiento ultra rápido. Este dispositivo se basa en la propagación no

lineal dentro de una guía de ondas en forma de lazo que se conecta a los puertos de salida de un acoplador convencional. El dispositivo muestra que tiene un gran potencial, incluso para razones de acoplamiento diferentes y tiene la habilidad de operar con pulsos (~ 1 ps) cuando se incluyen los efectos de solitones. Un trabajo posterior a éste sobre el mismo tema, y más completo, se muestra en la Ref. 20.

El artículo de E. Udd, 1991 [2], es uno de los primeros que realiza una revisión sobre el reciente interferómetro de Sagnac completamente de fibra óptica. En su trabajo, Udd describe una serie de sensores distribuidos que utilizan este esquema, y que permiten determinar la posición y la amplitud de disturbios que varían en el tiempo. Además, Udd realiza una breve comparación entre el sensor de Sagnac y el compuesto por una mezcla entre el interferómetro de Sagnac y el de Match-Zehnder, que se han estado utilizando hasta esta fecha. Con lo cual sale favorecido el interferómetro de Sagnac, ya que la fuente que utiliza éste requieren una baja longitud de coherencia y es inmune a reflexiones de superficies.

En 1992, J.P. Dakin [21], realiza una revisión muy completa de los sensores distribuidos de fibra óptica, en ella se puede ver que el uso de los interferómetros de Sagnac es una alternativa viable y además se compara con otras técnicas como las de "retro-reflexión" (en la cual está incluida la técnica OTDR: reflectometría óptica en el dominio temporal) y las técnicas hermanas de sistemas de transmisión distribuida. En este artículo de Dakin, se menciona un ejemplo del uso del interferómetro de Sagnac como un sensor de posición en el cual ocurre un disturbio.

L.R. Jaroszewicz [22], propone en 1994 aplicar el interferómetro de Sagnac para mediciones dinámicas de fase de componentes que vibran. Con lo cual se muestra que es posible medir, con precisión, frecuencias características de moduladores de fase y se propone aplicarlo en el estudio de vibraciones de poca amplitud (del orden de nanómetros). Y además, propone la detección de disturbios de fase [23] y un sensor distribuido basado en estos últimos [24].

En este mismo año aparece otra revisión de E. Udd [3] sobre las aplicaciones a sensores e instrumentación de este interferómetro. A diferencia de la primera revisión [2], Udd ahora realiza una revisión más completa sobre aplicaciones, en la cual incluye sensores de rotación, detección de variaciones temporales, detección de efectos ambientales con variación lenta, sensores distribuidos y mediciones espectrales.

En 1995, R.T. de Carvalho [25] propone el arreglo interferométrico de Sagnac como un sensor de dos parámetros, campo magnético y campo eléctrico, los cuales pueden monitorearse independientemente o simultáneamente. Usando efectos recíprocos se inducen cambios de fase, con lo cual se afecta de manera diferente a los haces contrapropagándose dentro del lazo, los cuales son detectados con exactitud por un esquema de detección muy sensible. También se usan efectos recíprocos, introduciendo un modulador birrefringente dentro de un lazo (de fibra con conservación de polarización), la cual a la vez está conectada con el lazo del interferómetro, pero sus ejes están rotados, es decir, éstos no coinciden. Co-

mo resultado, algunos parámetros de esta señal modulada son proporcionales al corrimiento de fase inducido por efectos recíprocos del lugar de prueba, haciendo con esto que el interferómetro esté disponible para sensar dos parámetros. Esto se demuestra sensando dos parámetros: campo eléctrico y magnético.

Otra aplicación interesante fue la propuesta por X. Fang y R.O. Claus [6], en 1995. En ésta se propone la utilización de este esquema como un multiplexor basado en la no-reciprocidad de la birrefringencia. Se muestran resultados teóricos que indican los resultados de multiplexión son similares a otras técnicas con fibra óptica. También mencionan que tanto el ancho de banda como la máxima longitud de onda del multiplexor puede variarse cambiando la birrefringencia de la fibra.

5. Trabajos recientes con el interferómetro de Sagnac

A continuación discutiremos los trabajos más recientes que se han realizado en este campo.

El primero de ellos se muestra en 1996 y 1997, por E.A. Kuzin *et al.* [10, 26], en el cual se propone un sensor de fibra óptica basado en un interferómetro con lazo de fibra de alta birrefringencia. En este trabajo se propone un sensor de tipo polarimétrico, con lo cual dos modos ortogonalmente polarizados (que se propagan dentro del lazo) y su diferencia de fase puede depender de la presión, temperatura o cualquier otro parámetro externo. La radiación polarizada en la salida del arreglo, se convierte de un desplazamiento de la fase a modulación en la amplitud, lo cual es detectado con un fotodetector.

En 1997, A.N. Starodumov *et al.*, proponen una variante del interferómetro de Sagnac como sensor de temperatura [27] y como multiplexor [28]. Las variantes de este interferómetro consisten en introducir un "desequilibrio en dicho interferómetro", es decir, se realiza un corte en uno de los extremos del lazo de dicho interferómetro, con la finalidad de evitar una birrefringencia arbitraria y así obtener una selectividad espectral. En este trabajo se menciona que la operación del arreglo es independiente de la polarización de la luz que se utiliza para el monitoreo y que existe una alta sensibilidad a cambios de temperatura. Además, se realiza una comparación de la propuesta de este sensor con otro en el cual se utiliza una rejilla de Bragg, con lo que se muestra que la sensibilidad del interferómetro de Sagnac es un orden o dos menor que el de las rejillas de Bragg.

Casi de manera simultánea en 1997, E.A. Kuzin *et al.* [29] propone una modificación en el esquema de su propuesta inicial [16, 26]. En este nuevo esquema se muestra un interferómetro de lazo de fibra birrefringente que puede ajustarse torciendo sus brazos y a la vez usarse como un sensor polarimétrico. Se menciona que una de las ventajas de este sensor polarimétrico es que éste puede operar sin necesidad de utilizar ningún elemento óptico de polarización, siendo éste

completamente de fibra óptica. Se menciona también que éste puede operar con cualquier polarización de la fuente de luz. La operación de este arreglo se muestra monitoreando cambios de temperatura.

S.J. Spammer y P.L. Swart proponen [30], en este mismo año 1997, un arreglo interferométrico combinado (Sagnac-Michelson) para la medición de disturbios. Este sensor distribuido muestra una respuesta a la dependencia de la posición de disturbios que varían temporalmente, tales como vibraciones y temperatura. Los resultados que se mencionan se obtienen de manera distribuida a lo largo de 200 metros de fibra-sensor. También en 1997, P.A. Fomitchov *et al.* [31], plantean una propuesta de un interferómetro de Sagnac compacto para su uso en la detección de ultrasonido. Dicho arreglo tiene la ventaja de que no requiere estabilización de trayectoria. Se menciona que puede ser menos caro y más robusto que otros. El dispositivo provee una alta resolución espacial de detección ultrasónica.

Por último, en este mismo año, 1997, K. Hotate [8] realiza una de las revisiones más recientes y completas sobre la tecnología de sensores de fibra óptica que existe hasta hoy en día. En dicho trabajo, Hotate describe diversos arreglos de sensores de fibra óptica, entre los cuales se encuentran los interferómetros de Sagnac, los cuales a la vez se comparan con los sensores distribuidos y con las más recientes propuestas en sensores, como son las rejillas de Bragg, los espejos rotatorios de Faraday y la fibra de vidrio "flint".

En 1998 aún existen propuestas para la utilización del interferómetro de Sagnac completamente de fibra óptica. Una de ellas es la propuesta de S.X. Short *et al.* [32], para compensar una retardación de fase de $\lambda/4$ en un sensor interferométrico de Sagnac, utilizado para monitoreo de corriente eléctrica. Otro trabajo es el propuesto por A.N. Starodumov [33], en el cual se propone un interruptor no lineal basado en esparcimiento Raman, bajo la configuración de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica.

Recientemente, en 1999, E. A. Kuzin *et al.* [34] consolidan la propuesta de un ajuste por torsión de un interferómetro de Sagnac formado con fibra óptica de alta birrefringencia,

realizada con anterioridad y por el mismo autor [29]. En este trabajo se describe un modelo teórico para explicar dicho ajuste y se muestran resultados experimentales.

6. Trabajos relacionados con el desarrollo del interferómetro de Sagnac

En paralelo a los resultados previamente descritos, existe una gran información acerca del análisis de los efectos de la birrefringencia y polarización de la luz en fibras ópticas [35–43], en los cuales se basan muchas de las propuestas que se han mencionado. Aunado a esto existen varios libros, muchos de ellos conocidos, en los cuales se puede encontrar una basta información y análisis relacionados con este tema, birrefringencia y polarización en fibras ópticas. Una muestra de ellos son los libros editados por William K. Burns [9], S. Ezekiel y H.J. Arditty [11] y Charles Tsao [44].

7. Conclusiones

El uso del interferómetro de Sagnac como giroscopio da origen a una implementación de nuevos esquemas para mejorarlo, de lo cual surge el interferómetro de Sagnac formado completamente de fibra óptica, y con lo cual se deja de usar sólo como giroscopio, para dar paso a otras aplicaciones que proporcionan una alta confiabilidad en sus resultados, tales como cavidades láser, amplificadores, sensores y espejos. Los trabajos recientes en este esquema proponen técnicas alternativas (y diferentes al uso convencional de los controladores de polarización) para ajustar un interferómetro de este tipo y nuevas propuestas para usar este tipo de interferómetro junto con otros dispositivos existentes con la finalidad de mejorar los usos y aplicaciones que éstos tienen.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por CONACyT: I32960-U.

1. V. Vali and R.W. Shorthill, *SPIE* **77** (1976) 110.
2. E. Udd, *SPIE* **1586** (1991) 46.
3. E. Udd, *SPIE* **2341** (1994) 52.
4. D.B. Mortimore, *Journal of Lightwave Technology* **6** (1988) 1217.
5. B.K. Nayar *et al.*, *Optical Computing and processing* **1** (1991) 81.
6. X. Fang and R.O. Claus, *Optics Letters* **20** (1995) 2146.
7. D.C. Jones, *SPIE* **2341** (1994) 222.
8. K. Hotate, *Optical Fiber Technology* **3** (1997) 356.
9. W.K. Burns, *Optical Fiber Rotation Sensing*, (Academic Press, Inc., U.K., 1994) Cap. 2.
10. E.A. Kuzin *et al.*, *Rev. Mex. Fís.* **43** (1997) 374.
11. S. Ezekiel and H.J. Arditty, *Fiber-Optic Rotating Sensors and Related Technologies*, (Springer-Verlag, Germany, 1982).
12. R. Ulrich and M. Johnson, *Optics Letters* **4** (1979) 152.
13. B. Culshaw and I.P. Giles, *SPIE* MS108 (1983) 256.
14. R.A. Bergh *et al.*, *SPIE* MS108 (1983) 267.
15. R.A. Bergh *et al.*, *Optics Letters* **6** (1981) 198.
16. R.A. Bergh *et al.*, *Electron. Lett.* **16** (1980) 260.
17. H.C. Lefevre, *Electron. Lett.* **16** (1980) 778.
18. K. Böhm *et al.*, *Optics Letters* **7** (1982) 180.

19. N.J. Doran and D. Wood, *Optics Lett.* **13** No. 1 (1988).
20. B.K. Nayar *et al.*, *Optical Computing and Processing* **1** (1991) 81.
21. J.P. Dakin, *SPIE* **1797** (1992) 76.
22. L.R. Jaroszewicz, *SPIE* **2341** (1994) 66.
23. M. Szustakowski and L.R. Jaroszewicz, *SPIE* **2341** (1994) 74.
24. M. Szustakowski *et al.*, *SPIE* **2341** (1994) 84.
25. R.T. de Carvalho and J. Blake, *Journal of Lightwave Technology* **13** (1995) 1250.
26. E.A. Kuzin *et al.*, *SPIE* **2770** (1996) 397.
27. A.N. Starodumov *et al.*, *Applied Physics Letters* **70** (1997) 19.
28. A.N. Starodumov *et al.*, *Optics Communications* **138** (1997) 31.
29. E.A. Kuzin *et al.*, *Optik* **106** (1997) 172.
30. S.J. Spammer *et al.*, *Journal of Lightwave Technology* **15** (1997) 972.
31. P.A. Fomitchov *et al.*, *Optics and Laser Technology* **29** (1997) 333.
32. S.X. Short *et al.*, *Journal of Lightwave Technology* **16** (1998) 1212.
33. A.N. Starodumov *et al.*, *Optical Fiber Technology* **4** (1998) 285.
34. E.A. Kuzin *et al.*, *Optics Communications* **160** (1999) 37.
35. R. Ulrich and A. Simon, *Applied Optics* **18** (1979) 2241.
36. I.P. Kaminow, *Journal of Quantum Electronics* **QE-17** (1981) 15.
37. M. Imai and Y. Ohtsuka, *Optics Letters* **10** (1985) 423.
38. J. Noda, *et al.*, *Journal of Lightwave Technology* **LT-4** (1986) 1071.
39. M.J. Marrone *et al.*, *Optics Letters* **12** (1978) 60.
40. R.P. Tatin *et al.*, *Journal of Lightwave Technology* **LT-5** (1987) 980.
41. S.F. Feldman *et al.*, *Journal of the Optical Society of America B* **10** (1993) 1191.
42. C.R. Menyuk and P.K.A. Wai, *Journal of the Optical Society of America B* **11** (1994) 1288.
43. A.W. Domanski *et al.*, *SPIE* **2341** (1994) 21.
44. C. Tsao, *Optical Fiber Waveguide Analysis*, (Oxford Science Publications, New York, USA, 1992) Chaps. 1 and 2.