

Desenvolvimento e Caracterização de um Sistema Automatizado para Polarimetria

Rafael E. de Góes, Leandro G. B. Becker, Paulo E. Martins, Cláudio A. Lima,
Rosane Falate, Márcia Müller, Hypolito J. Kalinowski, José L. Fabris

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná

Av. Sete de Setembro 3165, 80230-901, Curitiba - Paraná

Recebido em 15 de abril, 2002. Revisão recebida em 25 de outubro, 2002.

Neste artigo, é descrito um sistema automatizado de baixo custo para a análise do estado de polarização da luz. A versatilidade do equipamento permite a montagem de diferentes arranjos experimentais, adequados às necessidades de cada aplicação. O desempenho do instrumento é analisado mediante sua utilização na medida do grau de polarização de um feixe laser, bem como na determinação dos eixos óticos de materiais birrefringentes.

A low cost automatized system developed to analyse the state of optical polarization is described. The apparatus versatility allows the assembling of different setups, each one suitable for a particular application. We characterize the instrument performance measuring a laser beam degree of polarization, and the optical axes of birefringent materials.

I Introdução

A natureza transversal das oscilações eletromagnéticas resulta na existência de estados de polarização específicos para o campo eletromagnético. A forma exata que a luz irá apresentar (ou seja, seu *estado de polarização*), e como é possível observar, produzir, alterar e utilizar estes estados, é uma parte essencial da pesquisa em diversos campos da ótica [1,2].

Na maioria das aplicações de fibras óticas em sistemas de transmissão, existe interesse somente em analisar a amplitude do sinal transmitido ao longo da fibra ótica, que é detectado por um dispositivo insensível à sua polarização ótica ou fase. No entanto, em alguns dispositivos (como moduladores eletro-óticos e sensores óticos [3]) a polarização da luz desempenha um papel importante. Como exemplos podemos citar os experimentos usados para medir a dispersão dos modos de polarização [4] e a birrefringência de fibras óticas [5], para caracterizar acopladores de polarização baseados em fibras óticas [6] e para formar filtros ou elementos de sintonia [7]. Nesses experimentos, o estado de polarização da luz é importante e os aparatos experimentais usam um polarizador ou um conjunto de polarizador e analisador no controle/análise da polarização da luz. Os dispositivos conhecidos como filtros de *rocking* em fibras óticas fazem um acoplamento entre modos de polarização da luz guiada na fibra, utilizando para isso suas propriedades de birrefringência [8-11]. A escrita e leitura desses dispositivos sensores depende

da medida da birrefringência e da identificação precisa da orientação espacial dos eixos de birrefringência. Para isso se torna necessária a utilização de um sistema que permita uma caracterização rápida da fibra ótica a ser usada, e um controle preciso da orientação do estado de polarização da luz lançada na fibra. Com o objetivo de solucionar essas dificuldades, desenvolvemos o sistema automatizado que é descrito neste trabalho. O sistema desenvolvido apresenta custo reduzido em comparação com sistemas comerciais, tornando interessante o seu uso para fins didáticos, em experimentos onde se possa observar o estado de polarização da luz e compreender de que formas este estado de ser alterado. Além disso, a sua utilização é viável como instrumento de apoio em atividades de pesquisa onde não seja exigido um grau de precisão tão elevado quanto aquele apresentado pelos equipamentos comerciais.

II Desenvolvimento

O equipamento desenvolvido é composto por dois polarizadores lineares da Shiro Photo Company, utilizados em câmeras fotográficas, montados em uma plataforma vertical rotatória, cada qual podendo ser controlado independentemente por um motor de 200 passos por revolução, 4 fases e corrente de 85 mA por fase. Os motores são acoplados aos polarizadores por meio de coroas dentadas torneadas em polietileno. Com a razão mecânica de 1,5, uma resolução an-

gular de $1,2^\circ$ por passo foi conseguida. A figura 1 mostra o esquema do circuito para acionamento dos motores através da porta paralela de um microcomputador PC. Dois sinais controlam o contador 4029, um deles gera o pulso de contagem e o outro define o sentido (incremento ou decremento). Os dois bits menos significativos do contador são aplicados a um decodificador, implementado pelas portas NAND e NOT (4069 e 4061). Este, por sua vez, gera a seqüência que aci-

ona as fases do motor através de transistores que suportam a corrente de pico dos enrolamentos dos motores. O programa desenvolvido roda em ambiente Windows e apresenta interfaces que permitem a visualização dos gráficos tanto em coordenadas cartesianas como polares. Outra facilidade implementada é a possibilidade da gravação de tabelas de dados em formato .DAT, que podem ser utilizadas com software gráficos.

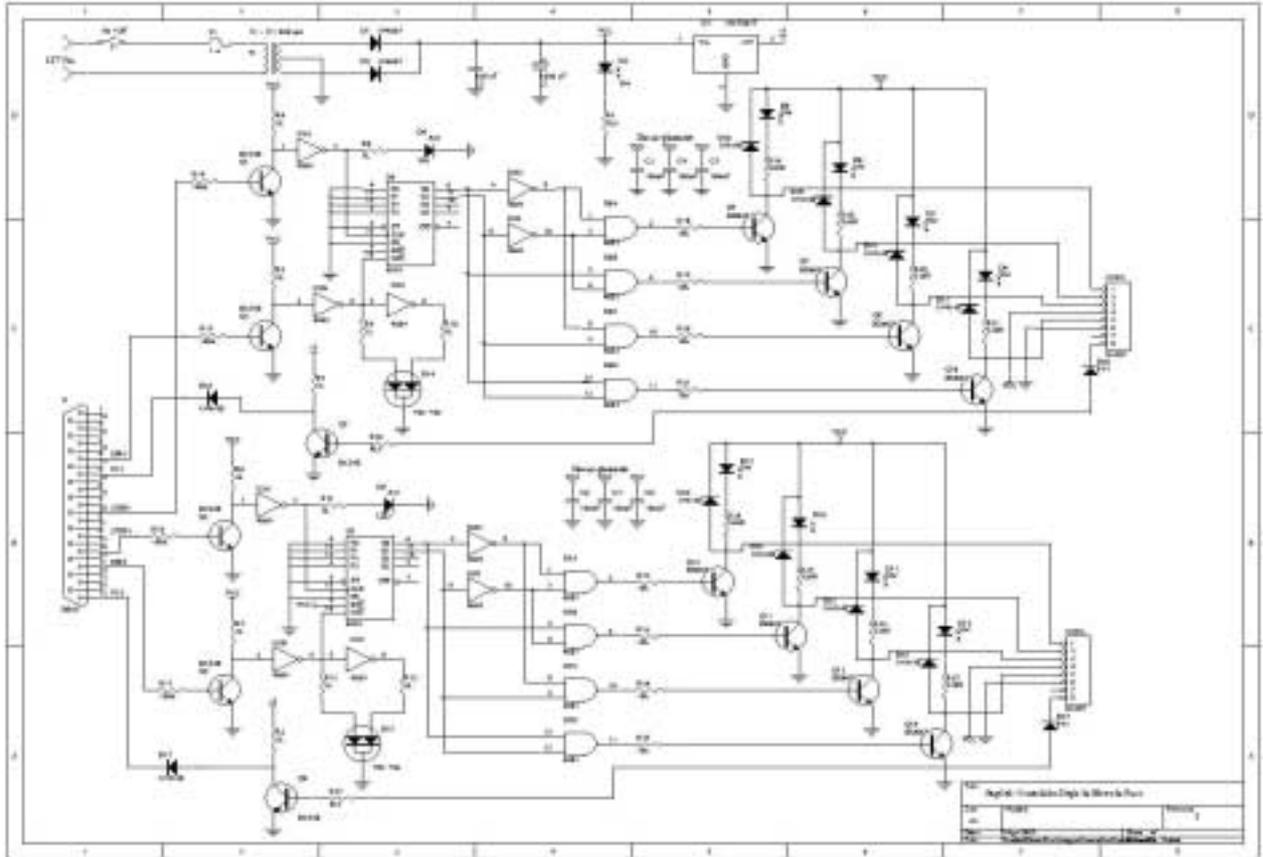


Figura 1. Diagrama esquemático do circuito de acionamento dos motores do equipamento, utilizando a porta paralela do computador.

O procedimento utilizado para a determinação do grau de polarização de uma fonte ótica consiste em fazer sua luz atravessar um polarizador linear que pode ser girado em torno de seu eixo, incidindo em seguida em um detector ótico insensível à polarização. Este polarizador atua como um analisador, e após um giro de 360° o detector terá registrado dois valores extremos de intensidade. O grau de polarização é definido pela relação:

$$GP = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})} \quad (1)$$

onde I_{max} e I_{min} são respectivamente as intensidades máxima e mínima que atingem o detector. O processo, embora possa ser realizado manualmente, está sujeito a erros

de leitura do sinal e posicionamento do analisador, além de consumir um tempo considerável dependendo do dispositivo mecânico de rotação.

Para exemplificar o funcionamento e o desempenho do sistema, fizemos o levantamento do estado de polarização da luz de um laser de He-Ne com razão de polarização de 1:500. A figura 2 mostra um aspecto da tela de aquisição do programa, onde também é mostrado o grau de polarização calculado pelo programa com o auxílio da equação (1). A janela "Analyse" permite definir qual motor será utilizado na medição, os ângulos inicial e final da varredura do giro e o passo do movimento. A janela "Motor 1 Controller" pode ser utilizada para movimentar o motor independentemente do processo de aquisição de dados, e a janela "Lockin" apre-

senta o valor lido pelo sistema de aquisição em cada ponto.

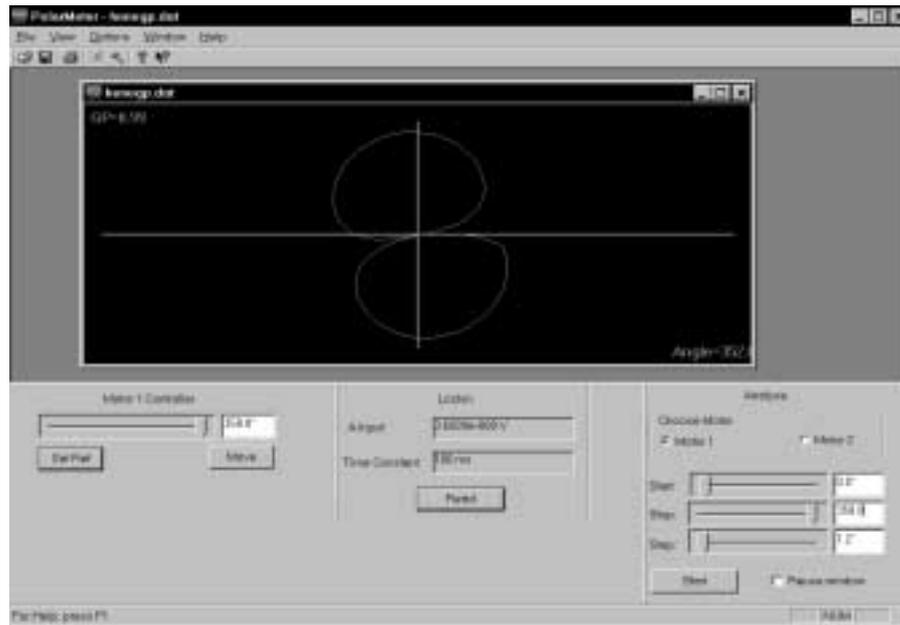


Figura 2. Aspecto da tela de aquisição do programa do equipamento desenvolvido, mostrando a determinação do grau de polarização de uma fonte luminosa. O gráfico em coordenadas polares mostra a intensidade no detector para cada ângulo do analisador.

A determinação dos eixos de birrefringência de um cristal uniaxial ou de uma fibra ótica birrefringente é feita pela análise do estado de polarização da luz após percorrer uma determinada espessura do material. O material a ser analisado é colocado entre os dois polarizadores do equipamento, o primeiro atuando como um polarizador e o segundo como um analisador. Sobre o polarizador incide um feixe monocromático despolarizado, resultando num feixe linearmente polarizado cujo vetor campo elétrico pode ser girado livremente com uma amplitude constante. Após passar pelo material, a intensidade do sinal é obtida para diferentes posições angulares do analisador. Se o eixo ótico do elemento birrefringente estiver orientado paralelamente às superfícies anterior e posterior do material, é possível incidir um feixe perpendicularmente a estas superfícies de tal forma que o vetor campo elétrico de uma onda plana monocromática tenha componentes paralela e perpendicular ao eixo. Desta forma, duas ondas planas irão se propagar através do material sujeitas a índices de refração diferentes, resultando numa diferença de fase relativa $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda_0) d \Delta n$, onde λ_0 é o comprimento de onda da luz no vácuo, d a espessura do material e Δn a diferença entre os índices de refração ordinário e extraordinário do material. Nesse caso, a onda emergente apresentará um estado de polarização não-linear, que pode ser detectado pelo equipamento. No caso de luz incidente com o vetor campo elétrico paralelo a um dos eixos de birrefringência do material, a

onda emergente apresentará um estado de polarização linear.

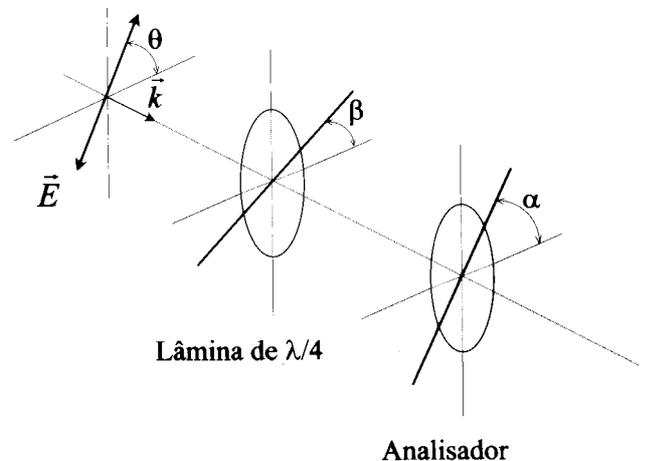


Figura 3. Diagrama esquemático da montagem experimental utilizada para a determinação dos eixos de birrefringência de um material.

No experimento, utilizamos como amostra uma lâmina de quarto de onda em 632,8 nm, com o eixo lento orientado com um ângulo β relativamente à direção horizontal. O polarizador do equipamento é orientado de forma a produzir luz com o campo elétrico \vec{E} formando um ângulo θ com a horizontal, enquanto que o analisador tem seu eixo de transmissão formando um ângulo α com a horizontal, conforme esquematizado na figura 3. Para esse sistema, as matrizes de Jones [2] podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + i \cos 2\beta & i \sin 2\beta \\ i \sin 2\beta & 1 - i \cos 2\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde E_x e E_y são as componentes do campo elétrico da luz que deixa o analisador e i é a unidade imaginária. A intensidade que atinge o detector pode então ser expressa como:

$$I = E_x E_x^* + E_y E_y^* = 1 + \cos 2\alpha \cos 2\theta + \frac{1}{2} \sin 4\beta \sin (2\theta + 2\alpha) - \sin^2 2\beta \cos (2\theta + 2\alpha) \quad (3)$$

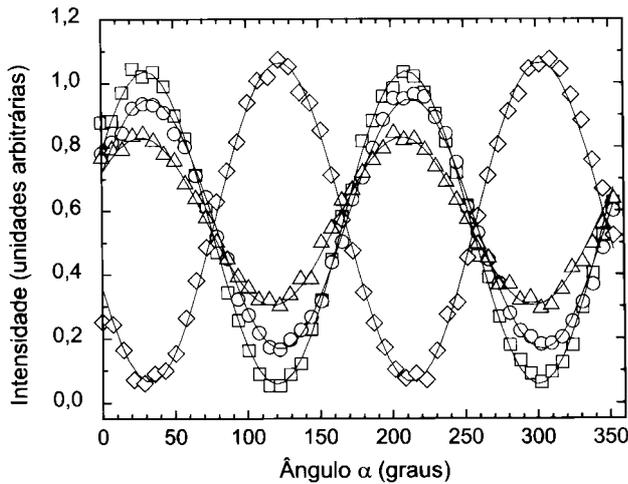


Figura 4. Gráfico da intensidade no detector em função do ângulo α de giro do analisador, para quatro diferentes ângulos θ do polarizador: \square ($\theta = 0^\circ$), \circ ($\theta = 30^\circ$), \triangle ($\theta = 40^\circ$), \diamond ($\theta = 90^\circ$). Os pontos de máxima e mínima intensidade correspondem as posições angulares dos eixos de birrefringência do material.

Essa expressão apresenta máximos e mínimos para $\alpha = \beta$ independentemente do valor de θ , ou seja, quando o eixo de transmissão do analisador estiver paralelo a um dos eixos de birrefringência da lâmina. Assim, para determinar estes eixos, basta posicionar o polarizador em um ângulo arbitrário θ e fazer uma varredura de 180° com o analisador, medindo a intensidade para cada ângulo α . Os pontos de máxima e mínima intensidade correspondem aos eixos de birrefringência da lâmina. Para o caso particular do ângulo θ coincidir com um desses eixos de birrefringência, o estado de polarização da luz que atinge o detector será linear. A figura 4 mostra os gráficos de intensidade em função do ângulo α de giro do analisador para quatro diferentes ângulos θ do polarizador. As tabelas de dados foram obtidas com o sistema desenvolvido e exportadas para tratamento em um software gráfico. Também são mostradas as curvas de ajuste da equação (3) aos dados experimentais (linhas sólidas).

O sistema desenvolvido também permite que sejam encontrados os eixos de birrefringência utilizando um proce-

dimento automatizado. A rotina de leitura do instrumento gira o polarizador por um incremento angular definido pelo usuário, realizando para cada nova posição angular um giro completo do analisador, procurando por um máximo de sinal. Dessa forma, o sinal de maior valor encontrado para um giro de 180 graus do polarizador corresponde à direção na qual o campo elétrico do feixe de entrada é paralelo a um dos eixos do material. A figura 5 mostra um aspecto da tela de aquisição do programa para este procedimento, onde também é mostrada a posição angular do eixo calculado pelo programa. A janela “Find Axis” controla o movimento do polarizador (“Independent Variable”), permitindo definir as posições inicial e final do giro bem como o incremento angular, além do incremento angular do analisador (“Dependent Variable”).

III Conclusões

Descrevemos o desenvolvimento de um sistema polarimétrico de baixo custo que pode ser utilizado em aplicações didáticas para controlar e medir o estado de polarização de uma fonte de luz, e/ou compreender como o controle e a análise da polarização da luz pode ser útil em sistemas de comunicação e sensoriamento ótico. O custo do sistema desenvolvido pode ser tão baixo quanto 10% quando comparado com equipamentos comerciais, tornando atraente o seu uso não só em demonstrações com fins didáticos, como também em laboratórios de pesquisa. A versatilidade do sistema permite que os seus componentes sejam facilmente substituídos de acordo com a necessidade exigida pela aplicação à qual ele se propõe. O sistema utiliza lâminas polarizadoras de equipamentos fotográficos, que podem ser substituídas por polarizadores apropriados para expandir a faixa de comprimento de onda de operação do equipamento e melhorar a razão de extinção, o que se constitui numa das causas de perda de resolução do sistema. Outro fator limitante da resolução são as roldanas dentadas empregadas no protótipo, que resultaram numa resolução angular de $1,2^\circ$ por passo. Estas roldanas dentadas podem

ser substituídas por outras que apresentem uma resolução angular superior, em função das necessidades individuais de cada aplicação. Uma simplificação considerável no projeto

foi conseguida utilizando a porta paralela de um microcomputador, eliminando assim a necessidade de interfaces internas.

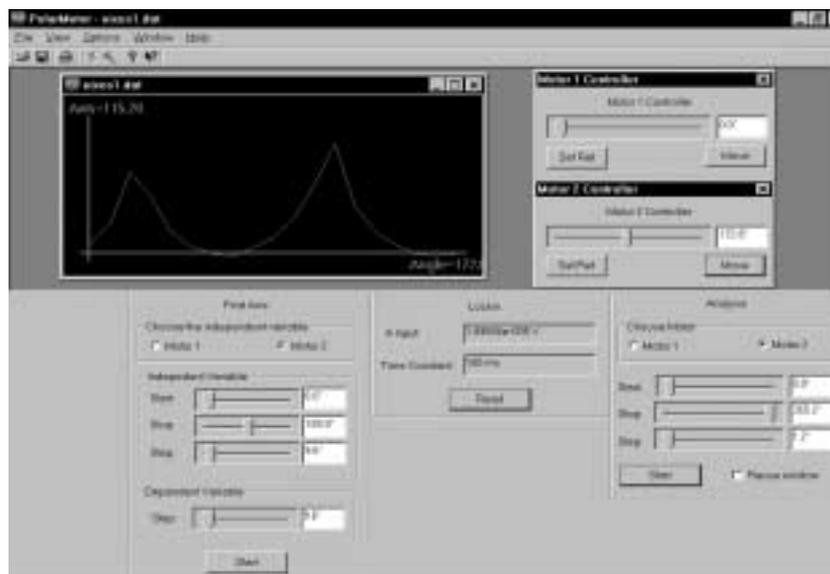


Figura 5. Aspecto da tela de aquisição do programa de equipamento desenvolvido, mostrando a determinação dos eixos de birrefringência de um material. O gráfico em coordenadas cartesianas mostra a intensidade no detector para cada ângulo do analisador.

Os resultados apresentados nesse artigo mostram que o sistema desenvolvido possui um desempenho satisfatório, apesar de sua baixa resolução quando comparada com a de equipamentos comerciais. O levantamento do estado de polarização da luz de um laser, com uma razão de polarização nominal de 1:500, resultou num grau de polarização medido pelo equipamento de 0,99. Para as quatro medidas realizadas no levantamento dos eixos de birrefringência da lâmina de quarto de onda, os valores encontrados para as posições angulares dos eixos apresentaram uma variação de $\pm 2,9^\circ$. Os limites na determinação do estado de polarização ou dos eixos principais de birrefringência decorrem da razão de extinção dos polarizadores utilizados, do espalhamento nos componentes óticos do sistema, e da resolução angular das roldanas dentadas utilizadas.

Apesar das limitações do sistema descrito nesse artigo, a viabilidade do seu uso em pesquisa é evidenciada pelos resultados obtidos pelo Grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações do CEFET-PR, onde o equipamento tem sido empregado com sucesso na produção e caracterização de filtros de *rocking* e de redes de Bragg em fibras birrefringentes [10,11].

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e CAPES.

Referências

- [1] E. Hecht, *Optics*, second edition Addison-Wesley Publishing Company, ch.8 (1988).
- [2] E. Collett, *Polarized Light: Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker Inc. (1993).
- [3] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G.H. Sigel Jr., J.H Cole, S.C.Rashleigh, R.G. Priest, "Optical Fiber Sensor Technology", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-18, No. 4, 626-664 (1982).
- [4] A. Galtarossa, L. Palmieri, A. Pizzinat, M. Schiano, T. Tambosso, "Measurement of local beat-length and differential group delay in installed single-mode fibers", *Journal of Lightwave Technology*, **18**(10), 1389-1394 (2000).
- [5] A. J. Barlow, "Optical-fiber birefringence measurement using a photo-elastic modulator", *Journal of Lightwave Technology*, LT-3(1), 135-145 (1985).
- [6] R. H. Stolen, A. Ashkin, W. Pleibel, J. M. Dziedzic, "In-line fiber-polarization-rocking rotator and filter", *Opt. Lett.* **9**(7), 300-302 (1984).
- [7] R. C. Youngquist, J. L. Brooks, H. J. Shaw, "Birefringent fiber polarization coupler", *Optics Letters* **8**(12), 656-658 (1983).
- [8] P. St. J. Russell, D. P. Hand, "Rocking Filter formation in photosensitive high birefringence optical fibres", *Electronics Letters*, **26**(22), 1846-1848 (1990).
- [9] S. E. Kanellopoulos, L. C. G. Valente, V. A. Handerek, A. J. Rogers, "Polarization properties of permanent and nonpermanent gratings in hi-bi fibers", *IEEE Photonics Technology Letters* **3**(4),345-347 (1991).

- [10] R. E. de Góes, R. da Costa, R. Falate, M. Müller, H. J. Kalinowski, J. L. Fabris, E. Silveira, “Polarization couplers in fibers with different core shapes”, Proc. 4th Iberoamerican Meeting on Optics and 7th Latin American Meeting in Optics, Lasers and Applications, v. **4419**, 376-378 (2001).
- [11] I. Abe, M. C. Fugihara, B. W. Diesel, R. C. Kamikawachi, J. L. Fabris, H. J. Kalinowski, C. L. Barbosa, “Modeling and production of high birefringence FOBG sensors”, Proc. 4th Iberoamerican Meeting on Optics and 7th Latin American Meeting in Optics, Lasers and Applications, v. **4419**, 371-374 (2001).