

Análise dos estados de polarização da luz através da determinação experimental dos parâmetros de Stokes

Ricardo Vignoto Fernandes¹ e Edson Laureto¹.

¹Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina.
E-mail: ricardofernandes@uel.br

DOI: <https://doi.org/10.30609/jeti.v4i04.12918>



Abstract. Nowadays polarized light sources have various applications in optoelectronic devices, displays, stress tests on mechanical parts and even in studies of mineralogy. One of the main requirements is to determine the state of polarization (linear, circular, elliptical, or a superposition of them) of the light beam. In this work, we apply the emission ellipsometry technique to investigate the polarization states of different light sources. This technique is based on the theory of Stokes and the types of polarization are correlated to the Stokes parameters. The measurements were performed on beams of light from a polarized LASER, a polarized LASER passing through a quarter wave lag at $\pm 45^\circ$ (circular polarization), a depolarized LED and the same LED with light reflected onto glass plate at various angles including the Brewster angle. The experimental setup is composed by an achromatic quarter wave plate, a linear polarizer and a photodetector. The results have presented a discrepancy of about 1% compared to the already known polarization of the light sources. Thus we have verified that the emission ellipsometry technique can be applied to determine the polarization state of light produced by sources in general.

Keywords: Stokes parameters. Ellipsometry Issue. Polarization of Light. Light Emitting Sources.

Resumo. Atualmente, fontes de luz polarizada encontram diversas aplicações em dispositivos optoeletrônicos, “displays”, em testes de tensões em peças mecânicas e até em estudos de mineralogia. Uma das principais necessidades é determinar o estado de polarização (linear, circular, elíptico, ou uma sobreposição destes) do feixe luminoso. Para este fim, aplicamos neste trabalho a técnica de Elipsometria de Emissão para investigar os estados de polarização de diferentes fontes de luz. Esta técnica está baseada na teoria de Stokes e os tipos de polarização estão correlacionados aos parâmetros de Stokes. Realizamos medidas em feixes de luz proveniente de um LASER polarizado, um LASER polarizado passando por um defasador quarto de onda a $\pm 45^\circ$ (polarização circular), um LED despolarizado e, esse mesmo LED, com sua luz refletida sobre uma placa de vidro em diversos ângulos e inclusive no ângulo de Brewster. A montagem experimental é composta de um defasador quarto de onda, um polarizador linear e um detector de luz. Os resultados obtidos apresentaram um desvio de aproximadamente 1% em relação à polarização conhecida das fontes de luz. Desta maneira, foi possível constatar que a técnica de Elipsometria de Emissão pode ser aplicada para se determinar a polarização da luz proveniente de fontes luminosas em geral.

Palavras-chave: Parâmetros de Stokes. Elipsometria de Emissão. Polarização da Luz. Fontes Emissoras de Luz.

1. Introdução

Atualmente, luz polarizada vem sendo aplicada em diversas áreas do conhecimento, como Física aplicada, Engenharias, Biologia, entre outras, e também na Indústria. Em cristais líquidos utiliza-se a luz polarizada como uma ferramenta de investigação de suas propriedades; a distribuição de tensão em peças mecânicas é analisada por meio de modelos transparentes colocados entre polarizadores cruzados. Luz polarizada é igualmente utilizada em microscópios que atuam, por exemplo, na investigação dos processos de gelatinização e extrusão de Amido de Milho [1, 2].

Elementos ópticos utilizados com o objetivo de polarizar um feixe de luz são comuns em nosso cotidiano, como os óculos de sol com lentes polarizadoras [3]. Esses são apropriados para essa finalidade, pois quando uma luz despolarizada passa por esse elemento óptico, ele permite apenas a passagem das ondas eletromagnéticas que tenham seu campo elétrico com a orientação paralela ao eixo óptico do elemento polarizador. Em óculos utilizados para assistir TV com definição 3D também se utiliza a técnica de polarização da luz, a qual provoca a sensação de 3D. O funcionamento é bem simples, pois uma lente do

óculo tem um elemento polarizador na direção vertical e o outro na direção horizontal, causando assim essa sensação de três dimensões [4, 5].

Existem vários métodos para identificar o tipo de polarização de um feixe luminoso; porém, nem todos possibilitam analisar um feixe com polarização desconhecida. Os métodos geralmente permitem identificar apenas um tipo de polarização (linear, circular ou elíptica). Neste trabalho, nos baseamos na teoria de Stokes para determinar parâmetros que descrevem o estado de polarização de uma onda eletromagnética qualquer, isto é, permitem caracterizar a polarização de qualquer feixe luminoso [6, 7].

Algumas técnicas baseadas na teoria de Stokes já são bem conhecidas. Uma delas é a Análise de Fourier de um quarto de onda rodado, descrita em Goldstein [8]. A técnica de Elipsometria de Emissão, que iremos utilizar neste trabalho é desenvolvida a partir da técnica de Análise de Fourier de um quarto de onda rodado. A Elipsometria pode ser utilizada para analisar a luz emitida por polímeros orgânicos associada à técnica de fotoluminescência. Um exemplo de polímero orgânico analisado pela técnica de Elipsometria é o PPV [9].

Como fundamentação teórica (material suplementar), será apresentado um desenvolvimento matemático com a finalidade de obter as equações apropriadas. A técnica de Elipsometria de Emissão será usada para avaliar o estado de polarização da luz proveniente de fontes emissoras das quais temos conhecimento prévio de suas respectivas polarizações. O trabalho tem como objetivo atestar a técnica de Elipsometria de Emissão como uma ferramenta para analisar o estado de polarização de qualquer feixe luminoso.

2. Materiais e Métodos

2.1 Fontes Analisadas

Foram escolhidas fontes com diferentes graus de polarização: um LASER com máximo de emissão em 405 nm, com uma intensidade de potência atenuada (de modo a não ultrapassar a sensibilidade do detector) e com alto grau de polarização linear; um LED com seu máximo de emissão em 400 nm, com uma intensidade de potência atenuada (de modo a não ultrapassar a sensibilidade do detector) e despolarizado; o mesmo LED com seu feixe refletido em uma superfície de vidro no ângulo de Brewster (aproximadamente 53°) e em ângulos próximos a este; e um feixe de luz circularmente polarizado, produzido por uma luz linearmente polarizada ao passar por um quarto de onda girado de 45° para o lado positivo e negativo.

2.2 Elipsometria de Emissão

A montagem experimental da técnica é mostrada na Figura 1. Nesta figura, (1) ilustra a fonte a ser analisada, (2) é a placa de vidro utilizada para desviar o feixe de luz emitido por um LED despolarizado; (3) é uma lente de vidro com distância de 15 cm para focalizar o feixe luminoso refletido pela placa de vidro; (4) é um defasador quarto de onda acromático modelo 10RP54-1 da Newport, que foi colocado em um goniômetro cuja referência (0°) coincide com o eixo rápido do defasador; (5) é um polarizador linear fixo na vertical, (6) é um filtro de densidade neutra e (7) é o fotodetector (um miniespectrômetro USB4000 da Ocean Optics). O goniômetro pode girar de 0° a 360° . A luz sai da fonte, é refletida por uma placa de vidro, passa pela lente e é focalizada na entrada do espectrômetro, passando pelo defasador e pelo polarizador. São feitas medidas da intensidade luminosa que chega ao detector variando o ângulo do defasador. Nas medidas realizadas neste trabalho, essa variação foi feita de dez em dez graus. Esses dados são salvos pelo sistema de aquisição de dados acoplado ao espectrômetro. Para medidas diretas dos feixes, a montagem experimental é a mesma, exceto pela ausência da placa de vidro. Nestas medidas, a fonte emissora de luz é colocada na posição (2) da Figura 1.

A intensidade do máximo de emissão obtido pelo espectrômetro é coletada em função do ângulo do goniômetro (ou seja, do giro do defasador). A curva resultante é ajustada pela expressão (2.1) ou [(1.143) do material suplementar], onde θ é o ângulo do goniômetro/defasador. Os ajustes são realizados pelo método de mínimos quadrados, através do programa ORIGIN 7.5. Os coeficientes A, B, C e D estão correlacionados com os parâmetros de Stokes S_0 , S_1 , S_2 e S_3 de acordo com as equações (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5) ou [(1.151), (1.152), (1.153) e (1.154) do material suplementar]. A partir da determinação dos parâmetros de Stokes, possível quantificar o estado de polarização de cada feixe luminoso.

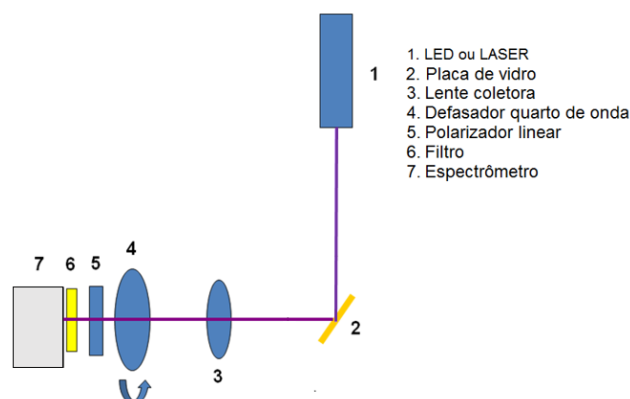


Figura 1 - Montagem experimental da técnica de Elipsometria de Emissão.

Em sequência, seguem apresentadas as principais equações que norteiam este estudo, em que maiores detalhes estão disponíveis no material suplementar. Em específico, a equação (2.1) é utilizada para o ajuste de dados:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} [A + B \cdot \text{sen}2\theta + C \cdot \cos 4\theta + D \cdot \text{sen}4\theta] \quad (2.1)$$

Já as relações (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5) correlacionam as constantes da equação (2.1) com os parâmetros de Stokes:

$$S_0 = A - C \quad (2.2)$$

$$S_1 = 2 \cdot C \quad (2.3)$$

$$S_2 = 2 \cdot D \quad (2.4)$$

$$S_3 = -B \quad (2.5)$$

3. Resultados e discussões

Nesta seção serão mostrados os resultados experimentais obtidos utilizando a técnica de elipsometria de emissão em diferentes fontes emissoras de luz, assim como os ajustes teóricos. Em todos os dados foram colocados uma barra de erro com 0.5% do valor da intensidade medida pelo detector.

A Figura 2 apresenta o gráfico da intensidade do pico em função do ângulo do defasador para a luz emitida pelo LED. Pelo fato de ser despolarizada, a intensidade de emissão tem uma variação muito pequena com relação à variação do ângulo do defasador, dificultando o ajuste teórico (linha contínua na Figura 2).

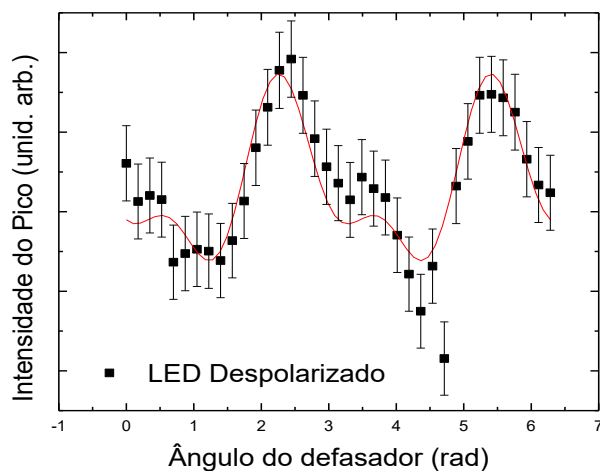


Figura 2 - Gráfico de elipsometria de emissão em LED.

A Figura 3 mostra a variação de intensidade do LASER em função do ângulo do defasador. Percebe-se aqui uma mudança acentuada na intensidade à medida que o ângulo do defasador é variado.

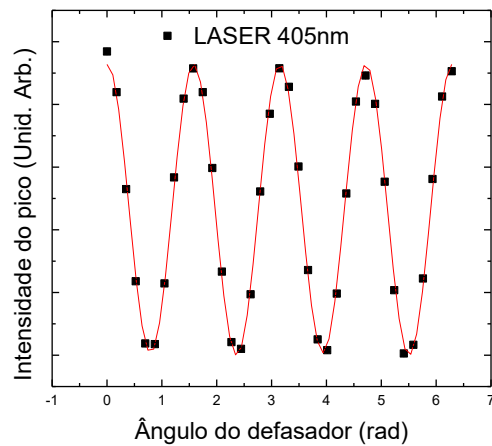


Figura 3 - Gráfico de elipsometria de emissão em LASER.

A Figura 4, foi obtida utilizando o mesmo LED da Figura 2, porém nestas medidas o feixe de luz emitido pelo LED sofre uma reflexão em uma placa de vidro. Assim, a luz analisada é justamente a luz refletida por essa placa de vidro. De acordo com a teoria da reflexão, quando um feixe de luz despolarizado atinge a superfície de um material com índice de refração maior, parte da luz é refletida. Essa parcela de luz refletida adquire uma polarização linear e perpendicular ao plano de incidência. Essa polarização será máxima quando o ângulo de incidência assume o valor do ângulo de Brewster [1, 2]. A Figura 4, é mostrada a seguir.

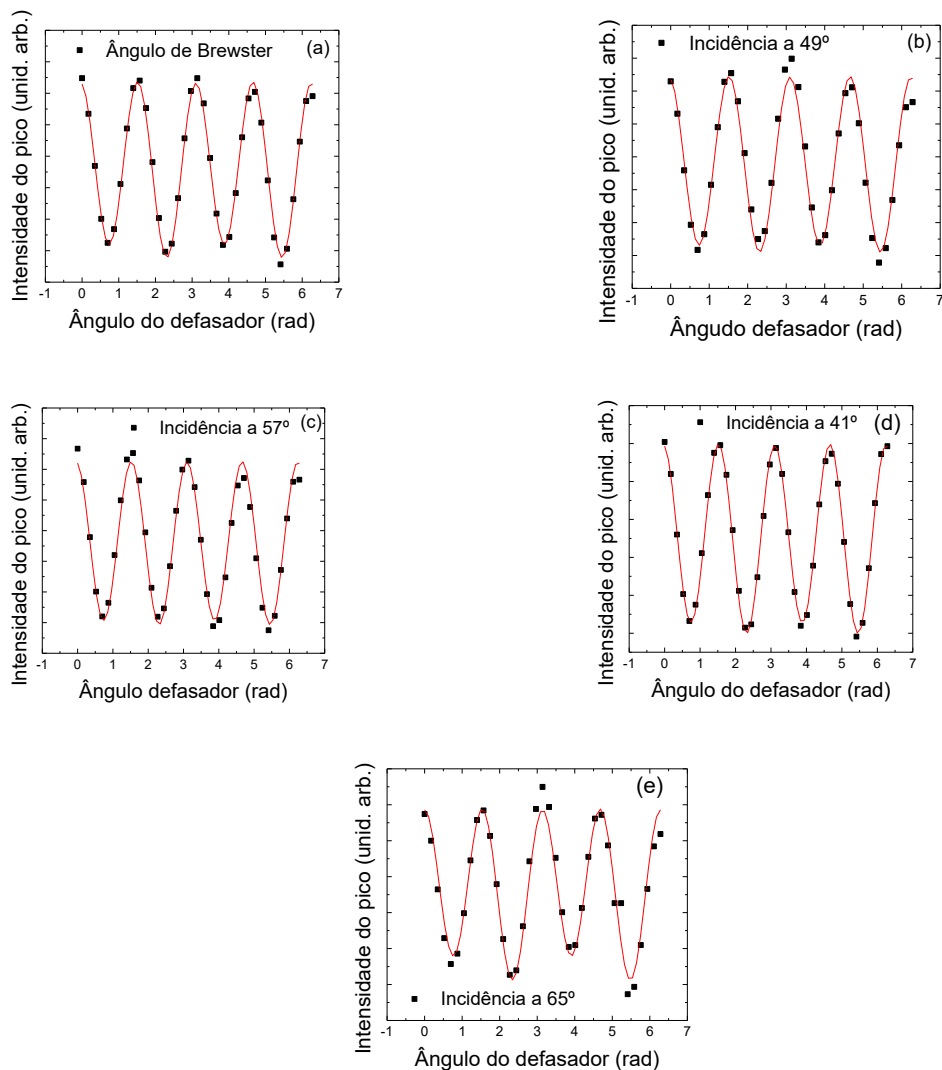


Figura 4 – Gráfico de elipsometria de emissão do LED refletido em vidro (a) no ângulo de Brewster (b) 4° abaixo do ângulo de Brewster (c) 4° acima do ângulo de Brewster (d) 12° abaixo do ângulo de Brewster e (e) 12° acima do ângulo de Brewster.

A Figura 5, foi obtida após o feixe do LASER (linearmente polarizado) passar por um quarto de onda orientado a 45° e -45°, respectivamente. Com a finalidade de se obter uma luz circularmente polarizada.

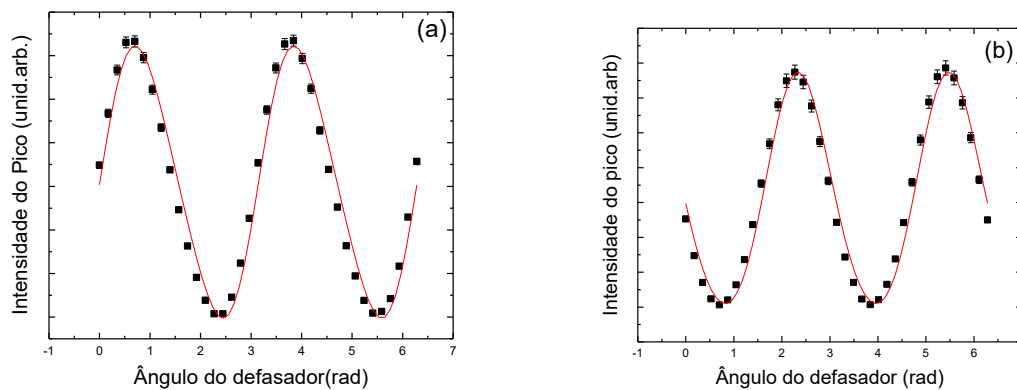


Figura 5 – Gráfico de elipsometria de emissão de um LASER passado por um quarto de onda (a) orientado a 45° e (b) orientado a -45° .

Através dos ajustes realizados nos gráficos utilizando a expressão (1.143) do material suplementar, foi possível obter os valores dos coeficientes A, B, C e D de todas as fontes luminosas analisadas, os quais foram agrupados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes adquiridos com o ajuste feito em todos os gráficos pela relação (1.143) do material suplementar.

	A (10^2)	B (10^2)	C (10^2)	D (10^2)
LED	943±1	9±1	4±1	3±1
LASER	733±2	2±3	231±3	8±3
LED refletido de 53°	867±3	21±5	263±4	49±5
LED refletido de 49°	882±6	10±9	257±8	50±9
LED refletido de 57°	862±5	7±8	258±7	48±8
LED refletido de 41°	956±2	14±3	238±3	41±3
LED refletido de 65°	867±6	33±9	220±9	15±9
LASER Quarto de Onda a 45°	613±13	615±19	-7±19	56±19
LASER Quarto de Onda -45°	640±14	-663±20	-45±19	18±18

Através das equações (1.151), (1.152), (1.153) e (1.154) do material suplementar, foram obtidos os parâmetros de Stokes S_0 , S_1 , S_2 e S_3 a partir dos coeficientes A, B, C e D da Tabela 1 (determinados pelos ajustes). A Tabela 2 traz os valores dos parâmetros de Stokes para cada fonte analisada.

Tabela 2 - Os parâmetros de Stokes.

	$S_0 (10^2)$	$S_1 (10^2)$	$S_2 (10^2)$	$S_3 (10^2)$
LED	939±2	8±2	5±2	9±1
LASER	502±5	462±6	17±6	2±3
LED refletido de 53°	603±8	526±9	98±9	21±5
LED refletido de 49°	625±15	513±17	99±17	10±9
LED refletido de 57°	605±13	516±15	96±15	7±8
LED refletido de 41°	718±5	476±6	83±6	14±3
LED refletido de 65°	647±16	440±18	30±19	33±9
LASER Quarto de Onda a 45°	620±18	13±8	-112±20	615±10
LASER Quarto de Onda -45°	685±20	90±15	-36±19	-635±9

Vale a pena lembrar aqui a relação dos parâmetros de Stokes com os diferentes possíveis estados de polarização da luz: S_0 representa a intensidade total de feixe de luz; S_1 refere-se à quantidade de luz com polarização linear; S_2 refere-se à quantidade de luz linearmente polarizada em 45 graus com relação à horizontal; e S_3 representa a quantidade de luz circularmente polarizada. Normalizando os parâmetros com relação à S_0 , temos uma quantidade que representa a porcentagem de luz com determinada polarização em relação à sua intensidade total. Esses valores estão mostrados na Tabela 3, assim como o fator P, dados pela equação (1.33) do material suplementar, que fornece o grau de polarização total do feixe de luz.

Os resultados apresentados na Tabela 3 são bastante coerentes. O grau de polarização total do LED é de 1,5%, de acordo com o esperado, pois o LED não é uma fonte de luz polarizada. Para o LASER, que trata-se de um feixe com alto grau de polarização, era de se esperar um alto índice de polarização, o que foi obtido através da análise realizada neste trabalho: o grau de polarização total é de aproximadamente 92% (segunda linha da Tabela 3).

Também exploramos a possibilidade de se polarizar um feixe de luz despolarizado através de uma reflexão no ângulo de Brewster. Pelos dados da Tabela 3, podemos observar que a reflexão do feixe originalmente despolarizado do LED se torna altamente polarizado quando o ângulo de incidência é próximo do ângulo de Brewster (aproximadamente 89% da

intensidade se torna linearmente polarizada). Esse grau de polarização do feixe refletido diminui à medida que nos afastamos do ângulo de Brewster. O gráfico da Figura 6 torna explícito esse resultado.

Para o LASER, quando atravessa um quarto de onda a 45° ou a -45° , gera uma onda circularmente polarizada e os resultados mostraram que realmente é gerada uma onda circularmente polarizada para a direita e para a esquerda, o que é representado pelo sinal de positivo ou negativo (parâmetro S_3/S_0).

Tabela 3 – Parâmetros de Stokes normalizados pela intensidade total (S_0), e fator de polarização P, para as diferentes fontes luminosas analisadas.

	$S_1/S_0 (10^{-2})$	$S_2/S_0 (10^{-2})$	$S_3/S_0 (10^{-2})$	P (10^{-2})
LED	$0,9 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,6$
LASER	92 ± 2	3 ± 1	$0,4 \pm 1,0$	92 ± 3
LED refletido de 53°	87 ± 3	20 ± 10	4 ± 1	89 ± 4
LED refletido de 49°	82 ± 6	16 ± 3	2 ± 2	84 ± 7
LED refletido de 57°	85 ± 5	16 ± 2	1 ± 2	87 ± 6
LED refletido de 41°	66 ± 2	12 ± 1	$2,0 \pm 0,7$	67 ± 2
LED refletido de 65°	68 ± 6	5 ± 3	5 ± 2	68 ± 7
LASER Quarto de Onda a 45°	2 ± 1	-18 ± 3	99 ± 3	100 ± 10
LASER Quarto de Onda -45°	13 ± 3	-5 ± 3	-97 ± 3	98 ± 9

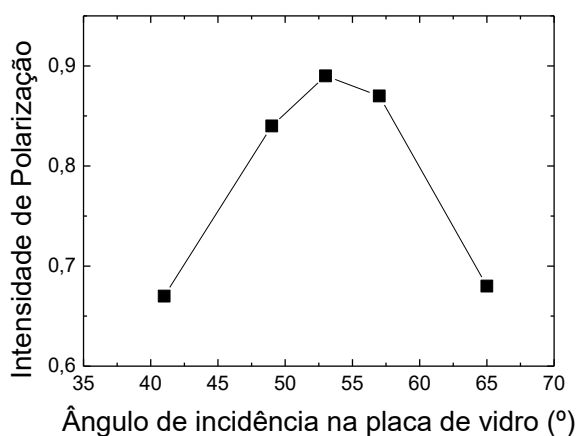


Figura 6 – Gráfico da polarização total com relação ao ângulo de incidência na placa de vidro. A linha é somente um guia para os olhos.

Com esses resultados, fica demonstrado o alto potencial da técnica de elipsometria de emissão para a determinação do estado de polarização de um feixe luminoso.

4. Conclusões

Foi observado que a técnica de Elipsometria de Emissão é altamente eficaz para analisar o estado de polarização de qualquer feixe de luz. Feixes de diferentes fontes, provenientes de um LED (feixe direto ou feixe refletido) ou de um LASER, foram analisados através desta técnica. É interessante observar a grande confiabilidade nesta análise, o que pode ser comprovado pelos resultados obtidos com o LED despolarizado: obteve-se uma polarização abaixo de 2%, o que mostra que o feixe é totalmente despolarizado, de acordo com o esperado. Além disso, para feixes linearmente polarizados, como o LASER, obteve-se uma polarização acima de 90% e feixes circularmente polarizados também são possíveis de serem analisados utilizando a técnica de Elipsometria de Emissão. Fica assim demonstrado o alto potencial desta técnica para a caracterização do estado de polarização de feixes luminosos em geral.

Agradecimentos

A Gilberto F. Borges e Alexandre Marletta, pelos dados de luz circularmente polarizada.
Ao CNPq, CAPES e INEO, pelo apoio financeiro.

Referencias Bibliograficas

1. Mali, S., M.V.E. Grossmann, and F. Yamashita, *Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização*. Semina: Ciências Agrárias, 2010. **31**(1): p. 137-155.
2. Nieri, V., et al., *Efeito protetivo de formulação de cristal líquido liotrópico na oxidação do chá verde/Protective effect of lyotropic liquid crystal formulation on green tea oxidation*. Brazilian Journal of Development, 2020. **6**(3): p. 14529-14538.
3. Crato, N., *Passeio aleatório pela ciência do dia a dia*. 2009: Editora Livraria da Física.
4. Seabra, R.D. and E.T. Santos, *Utilização de técnicas de realidade virtual no projeto de uma ferramenta 3D para desenvolvimento da habilidade de visualização espacial*. Revista Educação Gráfica, Bauru, 2005(9): p. 111-122.
5. Soares, B.R., et al., *A realidade virtual na reabilitação do paciente com sequelas de acidente vascular encefálico: uma revisão bibliográfica*. Research, Society and Development, 2020. **9**(8): p. e734986253-e734986253.
6. Collett, E., *Polarized light: Fundamentals and applications*. Optical engineering-new york-marcel dekker incorporated-, 1994. **43**: p. 36-36.

7. Lima, R., et al., *Measuring the Stokes' parameters: A new practice for teaching optics*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2020. **42**.
8. Goldstein, D.H., *Polarized light*. 2017: CRC press.
9. Alliprandini Filho, P., *Efeitos de ordenamento na polarização da luz emitida por filmes de polímeros semicondutores*. 2007.
10. Nussenzveig, H.M., *Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica (vol. 4)*. 2014: Editora Blucher.
11. Modenez, I.d.A., *Transferência de elétrons entre citocromo ce nanopartículas de óxidos de ferro como biomimético da cadeia respiratória*. 2020, Universidade de São Paulo.