

ANÁLISE DO IMPACTO DA TEMPERATURA NOS DISPOSITIVOS A BASE DE GRAFENO

Aluno: Bruno Giribone Cardoso

Orientadora: Lúcia Akemi Miyazato Saito

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Neste artigo é apresentado um estudo sobre o impacto da temperatura na eficiência de operação e transmissão de um modulador eletro-óptico composto de uma estrutura capacitiva de grafeno depositada sobre a superfície polida de uma fibra óptica de perfil D (*Side Polished Fiber* - SPF), de forma a compará-los com os dispositivos eletro-ópticos utilizados comercialmente. No início do processo, foi utilizado o software *MATLAB* para adquirir os valores de condutividade, correspondentes a 0,3 eV e 0,5 eV de nível de Fermi, de forma que esses representem os níveis de modulação óptica para operação em comprimento de onda de 1550 nm. Esse procedimento foi feito para as temperaturas de 298K (25°C), 328K (55°C), 268K (-5°C), 233K (-40°C) e 358K (85°C). Posteriormente, estes valores foram colocados no software de simulação *COMSOL Multiphysics*, com o intuito de verificar o quanto há de desvio no valor de profundidade de modulação em relação a temperatura ambiente (25°C), quando o dispositivo é submetido a diferentes temperaturas. A partir dos resultados, os desvios correspondentes a 268K (-5°C) e 328K (55°C), são de 2,37% e -2,41% respectivamente. Já nas temperaturas de 233K (-40°C) e 358K (85°C), os desvios são de 5,03% e -4,82% respectivamente. A partir destes resultados, é possível concluir que o grafeno é um excelente material para a confecção de dispositivos eletro-ópticos, em que quando comparado com a faixa de temperatura (0°C a 70°C) de funcionamento utilizado em outros moduladores eletro-ópticos utilizados comercialmente, o modulador apresentado neste projeto tem a capacidade de ter uma maior estabilidade numa ampla faixa de temperatura.

Palavras-chave: Fibra óptica de perfil D, Moduladores eletro-ópticos, Grafeno.

ABSTRACT

This paper presents a study on the impact of temperature on the operation and transmission efficiency of an electro-optical modulator composed of a graphene capacitive structure deposited on the polished surface of a D-shaped optical fiber (Side Polished Fiber - SPF) to compare them with the electro-optic devices used commercially. At the beginning of the process, the MATLAB software was used to acquire the conductivity values corresponding to the Fermi level's 0.3 eV and 0.5 eV. These represent the optical modulation levels for operation at the wavelength of 1550 nm. This procedure was done for temperatures of 298K (25°C), 328K (55°C), 268K (-5°C), 233K (-40°C) and 358K (85°C). Subsequently, these values were placed in the COMSOL Multiphysics simulation software to verify how much there is deviation in the modulation depth value in relation to the ambient temperature (25°C) when the device is subjected to different temperatures. From the results, the deviations corresponding to 268K (-5°C) and 328K (55°C), are 2.37% and -2.41%, respectively. At temperatures of 233K (-40°C) and 358K (85°C), the deviations are 5.03% and -4.82%, respectively. From these results, it is possible to conclude that graphene is an excellent material for the manufacture of electro-optical devices. When compared to the commercially operating temperature range (0°C to 70°C), the electro-optical modulators presented in this project can provide a stable operation on broader temperature range.

Keywords: D-shaped optical fiber, Eletro-optical modulators, Graphene.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia surgiram vários tipos de fibras ópticas pós-processadas para diversas aplicações, uma delas é a fibra óptica com a lateral polida também chamada de fibra de perfil D a qual é abordada neste artigo.

Uma fibra óptica de perfil D trata-se de uma fibra óptica monomodo padrão de telecomunicações (*Standard Single Mode Fiber* - SSMF). O intuito do polimento da fibra em perfil D é de possibilitar o acesso ao núcleo onde se propaga o feixe de luz proporcionando uma interação entre o grafeno (ou outros materiais bidimensionais) com o campo evanescente (Zhang *et al.*, 2014), gerando assim novas tecnologias ópticas do tipo: sensores e moduladores ópticos, componentes eletro-ópticos, absorvedores saturáveis, etc.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Analisar e avaliar a eficácia do grafeno na confecção de dispositivos ópticos, comparando o impacto de temperatura desses com os dispositivos eletro-ópticos utilizados atualmente.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar e entender o impacto da temperatura em dispositivos ópticos baseados em grafeno.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar as propriedades do grafeno quando aplicado em dispositivos ópticos.

Analisar o impacto de temperatura em dispositivos ópticos baseados em grafeno.

Comparar o modulador estudado com moduladores utilizados atualmente.

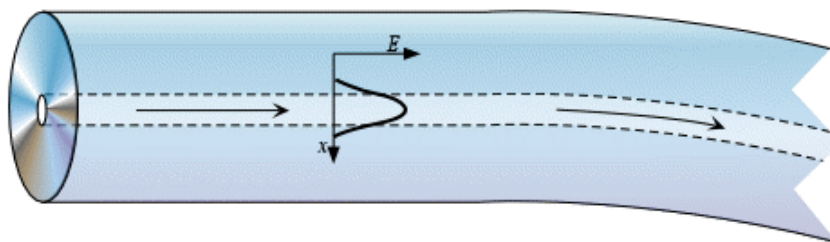
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA FIBRAÓPTICA DE PERFIL D

Um cabo de fibra óptica é composto por duas camadas concêntricas, denominadas núcleo e revestimento. O núcleo e o revestimento têm diferentes índices de refração, com o núcleo tendo um índice de refração de n_1 e o revestimento tendo um índice de refração de n_2 . O índice de refração do núcleo, n_1 , é sempre maior que o índice de refração do revestimento, n_2 , permitindo desta maneira, que a luz se propague pela fibra pelo princípio de reflexão interna total. A luz é guiada através do núcleo e a fibra atua como um guia de ondas óptico.

Conforme apresentado na Figura 1, a luz se propaga no núcleo da fibra óptica gerando um campo evanescente que viaja pela casca.

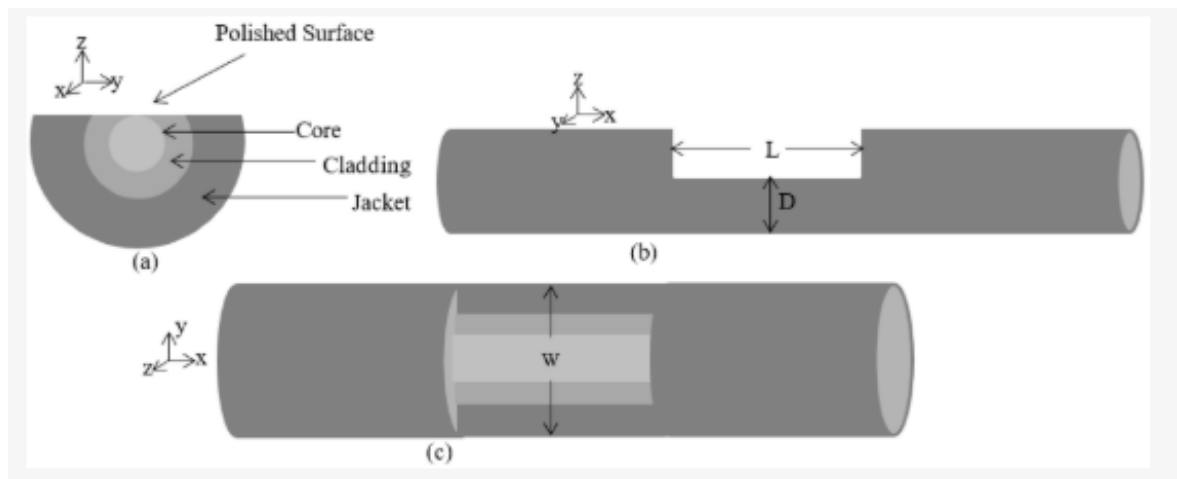
Figura 1 – Campo evanescente na fibra óptica



(Fonte: Evanescent Optics Inc.)

A Figura 2 mostra o polimento lateral de fibras ópticas, pois desta forma permite-se a exposição da luz pela superfície do núcleo da fibra via campo evanescente, possibilitando a deposição de materiais que possuam uma boa interação com ele, como por exemplo, o grafeno.

Figura 2 - Fibra óptica com polimento lateral



(Fonte: Hummad Habib, 2016)

2.2 SENSORIAMENTO ÓPTICO

O grafeno é uma monocamada de átomos de carbono dispostos em uma estrutura hexagonal bidimensional de forma que cada átomo seja unido a outros três por ligação sp^2 . O uso de três elétrons- σ na ligação carbono-carbono resulta em um sistema de π -elétrons deslocalizados perpendiculares ao plano do grafeno, dando origem às propriedades elétricas excepcionais dele (Hernaez *et al.*, 2017). Os elétrons nessa estrutura distinta emergem como uma relação distinta de dispersão, tornando as quase-partículas formalmente idênticas a sem massa, férmions quirais, alta mobilidade de elétrons, alta condutividade térmica e elétrica etc. Consequentemente, vários tipos de dispositivos optoeletrônicos foram fabricados com base em grafeno, incluindo sensores optoeletrônicos. Uma maneira eficiente de construir esses novos sensores ou dispositivos é combinando o grafeno e o guia de ondas óptico, o que poderia permitir uma forte interação luz-grafeno (Zhang *et al.*, 2014).

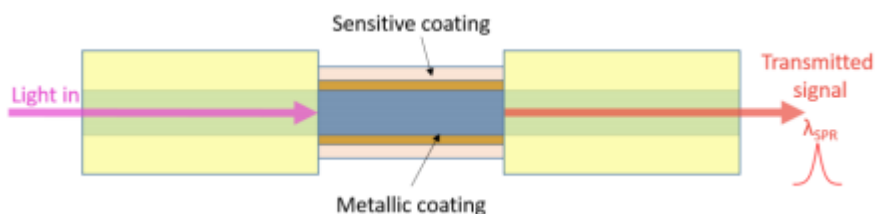
A fibra óptica com polimento lateral permite uma forte interação da luz via campo evanescente com o ambiente externo. Usando essa característica, existem muitos sensores de fibra óptica como sensores de potência ultravioleta (UV), sensores de fibra óptica por ressonância de plásmon de superfície, sensores baseados na grade de Bragg etc.

2.2.1 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA POR RESSONÂNCIA DE PLÁSMON DE SUPERFÍCIE

Segundo Hernaez *et al.*, nas últimas duas décadas, os sensores baseados em ressonância plasmônica de superfície (SPR) atraíram a atenção de muitos pesquisadores devido às suas possíveis aplicações no campo das ciências físicas, químicas e biomédica. Devido ao decaimento exponencial do campo elétrico do plasmon, ele é fortemente localizado na interface metal-dielétrica. Quando um plasmon é excitado, um pico de absorção (SPR) é produzido em um determinado comprimento de onda (comprimento de onda de ressonância, λ_{SPR}).

No caso de sensores SPR baseados em fibra óptica, o dispositivo mostrado na Figura 8 é normalmente usado para excitar um plásmon de superfície. O revestimento de uma pequena parte da fibra é removido e nesta parte é revestida com uma fina camada de metal. A luz de uma fonte policromática é acoplada à fibra de uma extremidade e o espectro da potência transmitida é coletado na outra extremidade. Devido ao SPR, um pico λ_{SPR} é obtido no espectro transmitido. Este λ_{SPR} mostra uma forte dependência do índice de refração do meio sensor em torno da camada de metal. Usando esse esquema, é possível obter uma grande variedade de sensores depositando na película fina de metal um material sensível ao composto químico ou propriedade física de interesse.

Figura 3 – Sensor de fibra óptica por ressonância plasmônica de superfície



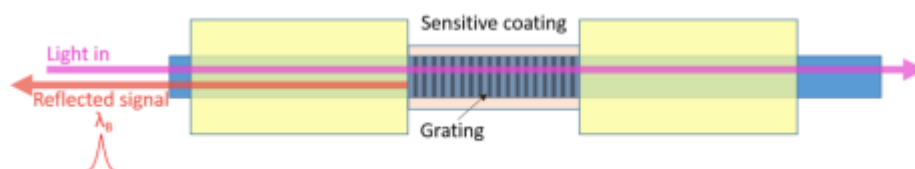
(Fonte: Hernaez, 2017)

2.2.2 SENSORES ÓPTICOS BASEADOS NA GRADE DE BRAGG

Segundo Hernaez *et al.*, as grades de fibra consistem em uma perturbação periódica das propriedades da fibra óptica, geralmente do índice de refração do núcleo (Figura 9). Nas fibras com grades de Bragg (FBGs), essa alteração produz um acoplamento de luz do modo de propagação direta da fibra óptica para o modo de propagação reversa. Esse acoplamento ocorre em um comprimento de onda específico que depende do período do FBG e do índice efetivo do modo de propagação. Como consequência, uma variação em qualquer um desses parâmetros produz uma alteração no comprimento de onda do acoplamento (comprimento de onda de Bragg, λ_B) que pode ser medido. Como a deformação e a temperatura influenciam diretamente os parâmetros mencionados, muitos esquemas de detecção baseados em FBGs foram desenvolvidos para medir esses sinais.

Os FBGs também podem ser usados para sensoriamento químico e biológico. Para esse fim, os FBGs são revestidos com um material cuja estrutura varia na presença de um composto químico específico (analito). Quando a concentração deste analito muda, a deformação do revestimento produz uma deformação axial. O FBG se estende ou encolhe sob essa tensão e, portanto, o padrão espectral da luz refletida muda, produzindo uma mudança no comprimento de onda refletido.

Figura 4 – Sensor óptico baseado na grade de Bragg



(Fonte: Hernaez, 2017)

2.3 FIBRA SPF COM rGO COMO SENSOR DE TEMPERATURA

Segundo o artigo de Zhang et al., a fibra em perfil D possibilita a fabricação de sensores de temperatura utilizando uma monocamada de óxido de grafeno reduzido (rGO).

À medida que a temperatura sobe, ocorre um aumento na concentração de lacunas-elétrons termicamente excitados, o que por sua vez reduz a parte real da condutividade dinâmica, a qual essa determina a absorção de luz induzida por transições intrabanda e interbanda no rGO, este comportamento é baseado na equação (1) definida por Falkovsky.

$$\sigma(\omega) = \frac{e^2 \omega}{i\pi \hbar} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} d\varepsilon \frac{|\varepsilon|}{\omega^2} \frac{df_0(\varepsilon)}{d\varepsilon} - \int_0^{+\infty} d\varepsilon \frac{f_0(-\varepsilon) - f_0(\varepsilon)}{(\omega + i\delta)^2 - 4\varepsilon^2} \right],$$

where $f_0(\varepsilon) = \{\exp[(\varepsilon - \mu)/T] + 1\}^{-1}$ is the Fermi function.

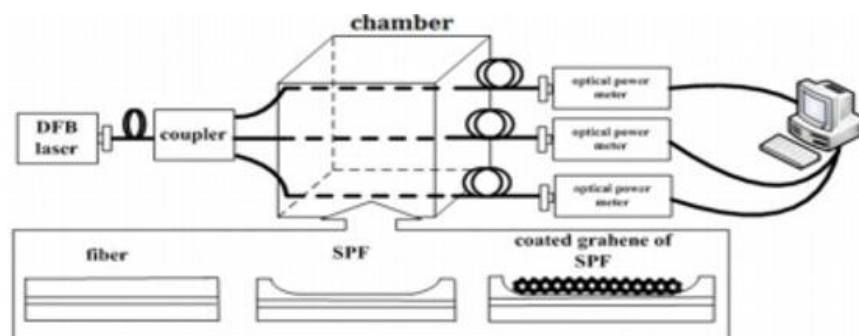
onde ω representa a frequência, σ é a condutividade dinâmica, T a temperatura e μ o potencial químico.

Portanto, após um aumento de temperatura, a condutividade dinâmica do rGO é reduzida, o que diminui a absorção de luz, e, simultaneamente, ocorre o aumento na potência óptica transmitida na fibra D com rGO depositado.

Neste experimento foi colocado em uma câmara climática três fibras ópticas (mostradas na figura 5), que teriam as seguintes configurações:

- Fibra óptica sem o revestimento;
- Fibra óptica com polimento lateral, porém sem o rGO;
- Fibra óptica com polimento lateral com o rGO.

Figura 5 – Setup do experimento

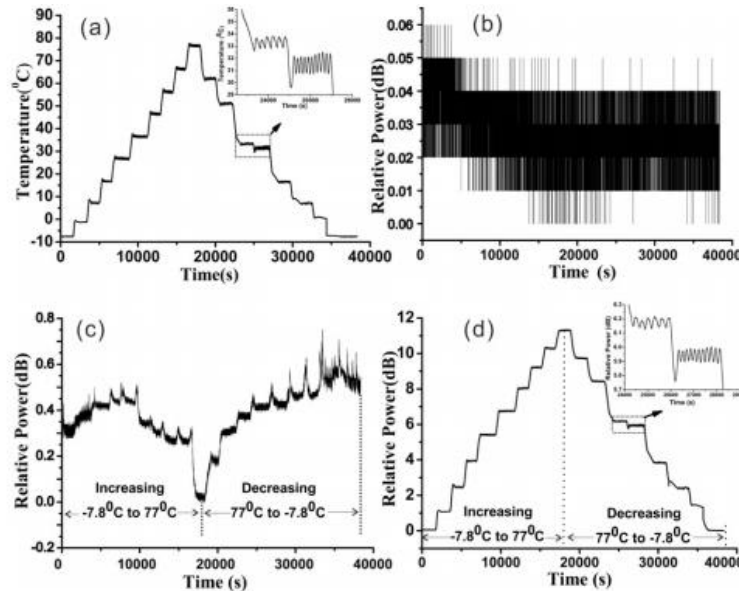


(Fonte: Zhang, 2014)

A partir destes três tipos de fibras ópticas, foi medido as potências transmitidas por elas, conforme a variação de temperatura de -7,8°C a 77°C com degraus de 10°C na câmara.

Notou-se que a potência transmitida pela fibra óptica com polimento lateral com o rGO apresentou pouca variação de temperatura, conforme a Figura 6.

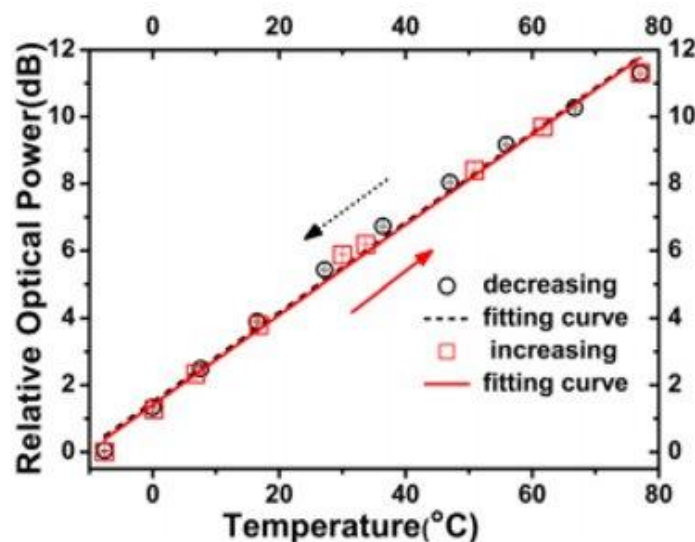
Figura 6 – Potência relativa transmitida pelas fibras em função da variação da temperatura no tempo



(Fonte: Zhang, 2014)

Por fim, os gráficos da figura 6(a) e 6(d) foram relacionados, gerando assim uma relação entre a potência transmitida na fibra D com rGO e a variação de temperatura, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Relação entre a potência relativa transmitida e a variação da temperatura na fibra com rGO



(Fonte: Zhang, 2014)

A partir da Figura 7, foi concluído que o novo sensor de temperatura utilizando rGO na superfície polida da fibra D possui um coeficiente de correlação linear de 99,4% e uma

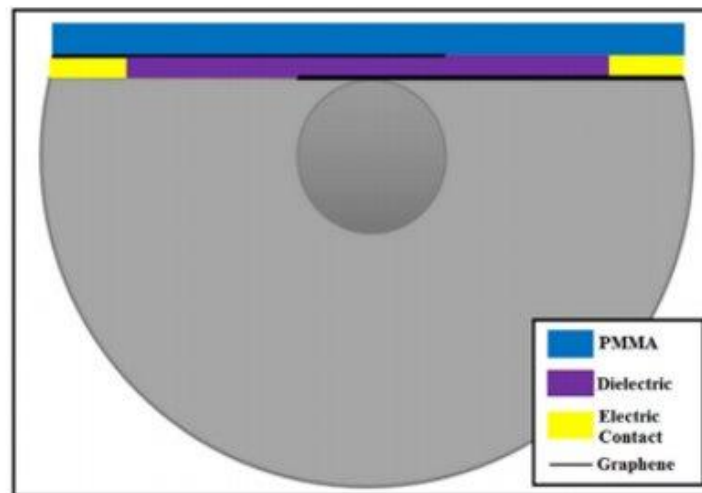
sensibilidade de 0,134 dB/°C. A partir desses resultados, é possível concluir que o grafeno não possui uma sensibilidade suficiente para ser utilizado como sensor de temperatura, mostrando que o grafeno é um material promissor para a confecção de dispositivos ópticos.

2.4 MODULADOR ELETROÓPTICO BASEADO EM GRAFENO

No projeto de iniciação científica o dispositivo utilizado para estudar foi um modulador que consistia em uma estrutura capacitiva de grafeno depositada sobre a superfície polida da fibra D, onde o dielétrico é o óxido de alumínio, Al_2O_3 .

O funcionamento deste modulador é baseado no chaveamento elétrico nos terminais conectados nas respectivas camadas de grafeno (Figura 8) de forma que quando a nível de Fermi no grafeno for de 0,3 eV, esse representará o nível lógico 0 e quando for 0,5 eV, representará o nível lógico 1, ou seja, dependendo da energia aplicada nos terminais elétricos, 0,3 eV ou 0,5 eV, a atenuação do sinal transmitido é diferente, em que o valor de atenuação que corresponde a 0,3 eV é maior que o valor correspondente a 0,5 eV.

Figura 8 – Modelo do modulador que utiliza uma estrutura capacitiva de grafeno

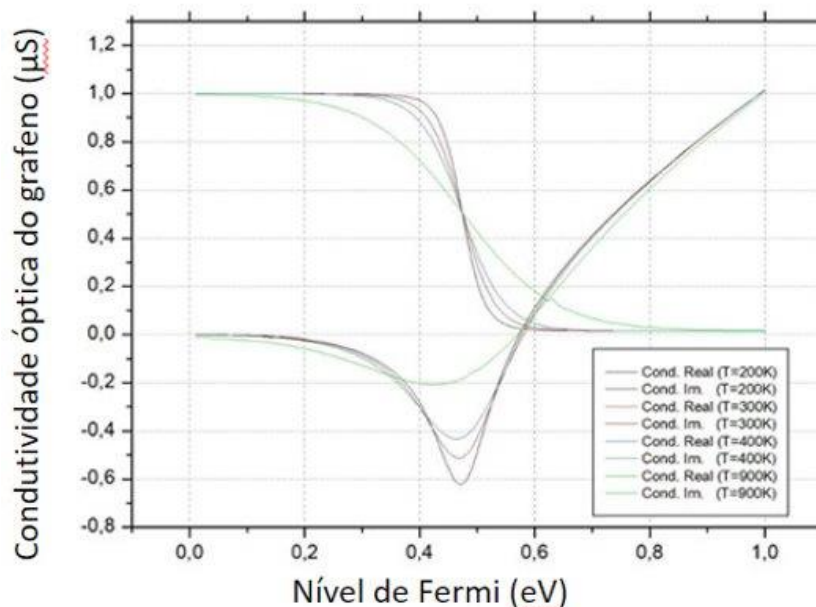


(Fonte: Bonando, 2018)

3. METODOLOGIA

Foi utilizado o software MATLAB para obter os valores de condutividade do grafeno de cada nível de Fermi (como mostrado na Figura 9), com o intuito de obter posteriormente os valores de constante de atenuação, ou seja, primeiramente seria obtido os valores de condutividade para os níveis de Fermi de 0,3 eV e 0,5 eV.

Figura 9 – Condutividade do grafeno em relação ao nível de Fermi



Depois estes valores de condutividade foram inseridos no COMSOL para obter através da simulação os respectivos valores de constante de atenuação em uma determinada temperatura, em que o valor correspondente a condutividade no nível de Fermi 0,3 eV representa o nível lógico 1, já o valor correspondente a condutividade no nível de Fermi 0,5 eV representa o nível lógico 0.

Por fim, o valor de constante de atenuação que corresponde ao nível lógico 1 foi subtraído do valor correspondente ao nível lógico 0 para se obter o valor da profundidade de modulação (Tabela 1), isto foi feito para as temperaturas 298K, 328K, 268K, 233K, 358K. Estas temperaturas foram escolhidas com o intuito de analisar a funcionalidade do modulador óptico comparando com outros dispositivos eletro-ópticos (233K e 358K) e com uma variação de 30K em direções distintas (268K e 328K) em relação a temperatura ambiente (298K), a fim de verificar se o valor da profundidade de modulação possui uma variação distinta ou igual em relação ao valor de profundidade de modulação correspondente a temperatura ambiente.

Tabela 1 – Cálculo da profundidade de modulação na temperatura de 298K para espessura de 0,14 μm de Al_2O_3 . Adaptado de Bonando (2018).

T= 298K		
Constante de atenuação (dB)		Profundidade de modulação (dB/mm)
0,3 eV	0,5 eV	
Modo TM		
0,079	0,010	0,069
0,085	0,011	0,074
0,093	0,012	0,081
0,102	0,013	0,089
0,113	0,015	0,099
Modo TE		
3,115	0,392	2,724
3,948	0,497	3,451
5,125	0,646	4,480
6,841	0,863	5,978
9,420	1,190	8,229

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A partir das simulações no software COMSOL e dos cálculos de profundidade de modulação foi feito uma tabela apresentando a relação do mesmo com a espessura do dielétrico para cada temperatura como mostrado abaixo.

Tabela 2 – Profundidade de modulação por espessura do dielétrico em μm

Espessura do dielétrico (μm)	Profundidade de modulação (dB/mm)				
	T = 268K	T = 298K	T = 328K	T = 233K	T = 358K
0,10	2,786	2,723	2,660	2,857	2,597
0,11	3,531	3,451	3,370	3,621	3,290
0,12	4,584	4,480	4,374	4,701	4,268
0,13	6,118	5,978	5,835	6,276	5,693
0,14	8,424	8,229	8,031	8,643	7,833

Posteriormente, foi analisada a variação da profundidade de modulação para cada temperatura e depois calculado o desvio do valor em relação à temperatura ambiente utilizando a espessura de 0,14 μm .

Tabela 3 – Desvio dos valores de profundidade de modulação em relação a temperatura ambiente

Espessura do dielétrico (μm)	Desvio em relação a temperatura ambiente (%)	
	T = 233K	T = 358K
0,14	5,03	-4,82

Considerando uma variação de -40°C a 85°C , o desvio foi de $\pm 5\%$ em relação a temperatura ambiente (25°C), ou seja, nesta faixa de temperatura, o dispositivo continua funcionando de forma adequada, em que quando comparado com a faixa de temperatura (0°C a 70°C) de funcionamento utilizado em outros moduladores eletro-ópticos no estado da arte, o modulador apresentado neste projeto tem a capacidade de ter uma maior faixa de temperatura de funcionamento.

Tabela 4 – Desvio dos valores de profundidade de modulação em relação a temperatura ambiente

Espessura do dielétrico (μm)	Desvio em relação a temperatura ambiente (%)	
	T = 328K	T = 268K
0,14	-2,41	2,37

Considerando o desvio do valor de profundidade de modulação das temperaturas 268K (-5°C) e 328K (55°C), é possível perceber que esta se trata de um decréscimo e acréscimo de 30K respectivamente. A partir destes valores pode-se observar que o desvio no valor da profundidade de modulação em relação à temperatura ambiente é praticamente a mesma (2,4%).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos do projeto eram de estudar e compreender o impacto da temperatura em dispositivos ópticos baseados em grafeno como o modulador óptico estudado neste projeto, de forma a comprovar a eficácia na utilização do grafeno para a confecção dos futuros dispositivos e equipamentos.

No projeto foi possível comprovar a eficácia da utilização do grafeno em um modulador óptico em que esse possui a capacidade de funcionar em uma faixa de temperatura de funcionamento maior do que os moduladores que estão no estado da arte, onde esses trabalham em altas frequências de transmissão, ou seja, nos moduladores atuais, com altas frequências de transmissão a faixa de temperatura de funcionamento é de 0°C a 70°C, porém no modulador estudado nesse projeto, uma variação de -40°C a 85°C, a qual corresponde a moduladores mais antigos onde a frequência de transmissão é menor, possui pouca variação no valor de profundidade de modulação utilizando a mesma frequência de transmissão.

Portanto os estudos feitos neste projeto comprovam as vantagens da utilização do grafeno em dispositivos ópticos de forma que estes podem trabalhar em maiores faixas de temperatura, sendo esta uma variável pouco determinante no funcionamento destes dispositivos comparados com dispositivos atualmente utilizados.

No caso do uso da fibra óptica polida com deposição de grafeno para aplicação em sensoriamento, é possível monitorar a variação de potência, porém a sensibilidade em nível de potência é relativamente baixa.

6. REFERÊNCIAS

AGO, HIROKI. **CVD Growth of High-Quality Single-Layer Graphene**. Institute for Materials Chemistry and Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan, Fev 2015.

AGRAWAL, GOVIND P. **Nonlinear Fiber Optics**. ScienceDirect, 1989.

AHMAD, HARITH; BAKAR MOHAMMAD ABU; HABIB QAZI, HUMMAD; ZAMANI ZULKIFLI, MOHD. **D-Shaped Polarization Maintaining Fiber Sensor for Strain and Temperature Monitoring**. Faculty of Electrical Engineering, Univerriti Teknologi Malaysia; Photonics Research Centre, University of Malaya, Ago 2016.

ARAÚJO, MARIA; BONANDO, MATHEUS; SAITO, LÚCIA. **All-fiber graphene electro-optic modulators with different dielectric materials**. MackPesquisa; Fapesp, jun 2018.

CARTER, ADRIAN; SAMSON, BRYCE. **Panda-style fibers move beyond telecom.** Laser Focus World, Vol. 40 Issue 8, pS11, Ago 2004.

CAUCHETEUR, CHRISTOPHE; GUO, TUAN; ALBERT, JACQUES. **Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection.** Analytical and Bioanalytical Chemistry, jan 2015.

CAO, DONG; CAI, XIANG; CHEN, ZHE; JIN, SHAOSHEN; LIAO, GUOZHEN; LU, HUIHUI; LUO, YUNHAN; ZHANG, JUN; WEI, QINGSON; YU, JIANHUI; TAN, SHAOZAO; XIAO, YI; TANG, JIEYUAN. **All-fiber-optic temperature sensor based on reduced graphene oxide.** Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University; Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University; Department of Chemistry, Jinan University, Fev 2014.

CONNET. **2.0UM BAND SINGLE FREQUENCY PM FIBER AMPLIFIER (15-50W), 2007.**

EVANESCENT OPTICS, INC. **The Wave Guide, Modes and Evanescent Tails Basics,** 2009.

Falkovsky, L. A. **Optical properties of graphene.** L.D. Landau Institute for Theoretical Physics, Russia; Institute of the High-Pressure Physics, Russia, 2008.

Fujikura Ltd. **Introduction of PANDA fibers,** Japão, 2019.

Gooch & Housego; Kehayas, Efstratios. **Space Photonics: A Platform Technology for Satellite Systems.** The European Space Agency; NASA Goddard Space Flight Center, 2007.

HERNAEZ, MIGUEL; ZAMARREÑO R., CARLOS; MELENDI-ESPINA, SONIA; BIRD R., LIAM; MAYES G., ANDREW; ARREGUI J., FRANCISCO. **Optical Fiber Sensors Using Graphene-Based Materials: A Review.** School of Chemistry, Faculty of Science, University of East Anglia, Norwich Research Park, Norwich; Department of Electrical and Electronic

Engineering, Universidad Publica Navarra; Institute of Smart Cities; School of Mathematics, Faculty of Science, University of East Anglia, Norwich Research Park, Norwich, Jan 2017.

HOFFMAN, MARTIN. Fiber ribbon alignment structures based on rhombus-shaped channels in silicon. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY, 2000.

Lfiber. **Polarization Maintaining (PM) Optical Fiber Patch Cord**, jun 2019.

LI, Ming-Jun; Stone, Jeffery Scott. **POLARIZATION MAINTAINING OPTICAL FIBER.** New York: Intelectual Property Department, 2016.

MINDSPEED. Fiberoptic Postamplifier MC2045 - 2, 1999.

NAVARRO, ANDRES; ARDILA, CARLOS. 3D BROADCASTING OVER DVB – T/T2. ICESI University, jun 2013.

PRIMEROV, NIKOLAY; THÉVENAZ, LUC. Generation and application of application of dynamic gratings in optical fiber usng stimulated Brillouin scattering. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, jan 2013.

The Optical Society. **Fiber-optic vibration sensors could prevent train accidents**, 2019.

THORLABS, INC. Polarization-Maintaining Single Mode Optical Fiber, 1999.

THORLABS, INC. 40 GHz Phase and Intensity Modulators, Reino Unido, 1999.

ZAPATA, J. D; STEINBERG, D.; SAITO, L. A. M; OLIVEIRA, R. E. P.; CÁRDENAS, A. M.; THOROH, E. A.; Efficient graphene saturable absorbers on D-shaped optical fiber for ultrashot pulse Generation, Scientific Reports Vol.6, p. 1-8, 09 Feb 2016.

Contatos:

Aluno: cardosobruno018@gmail.com

Orientador(a): lucia.saito@mackenzie.br