

CAPACITOR COPLANAR DE GRAFENO INCORPORADO EM UMA FIBRA ÓPTICA DE PERFIL D PARA APLICAÇÕES FOTÔNICAS

Sérgio Adriano Gimenes Junior (IC) e Lúcia Akemi Miyazato Saito (Orientadora)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

O uso do grafeno como meio ativo em modulador eletro-óptico tem sido de grande interesse da pesquisa na atualidade devido a sua compatibilidade com diversos materiais. Neste trabalho, o objetivo foi analisar as propriedades de um capacitor coplanar de grafeno com o objetivo de reduzir a capacitância total do dispositivo quando comparado à configuração tradicional de placas paralelas. Por meio de simulações deste capacitor depositado na lateral polida de uma fibra óptica (perfil D), foram obtidos valores de profundidade de modulação de 7,6 dB/mm e 5,3 dB/mm, capacitância de 98,4 fF/mm e 63,1 fF/mm e frequências de 16,2 GHz e 25,3 GHz, utilizando como parâmetro inicial a espessura máxima de 1 μm de PMMA depositado sobre o grafeno e 0,1 e 1 μm de distância (d) entre as placas, respectivamente. Como preparação para este estágio, foram realizados testes preliminares em placas de fenolite com uma fina camada de cobre em sua superfície. Utilizando-se 3 (três) modelos, pôde ser vista a diferença entre as dimensões utilizadas em suas fabricações, assim como o impacto ao ser depositada uma fina camada de PMMA sobre as amostras. Este trabalho teve como contribuição demonstrar as propriedades de um capacitor coplanar, tendo em vista o objetivo de melhorar os parâmetros de profundidade de modulação, aumento dos valores de frequência, redução dos valores de capacitância do grafeno depositado na lateral polida de uma fibra óptica (perfil D). Outra possibilidade é a otimização do processo de fabricação, uma vez que não há a necessidade de empilhamento de materiais 2D para a criação do capacitor, tal como necessita o processo para a confecção do capacitor de placas paralelas.

Palavras-chave: Capacitor coplanar; modulador eletro-óptico; fibra óptica perfil D.

ABSTRACT

The use of graphene as an active device in an electro-optical modulator has been of great interest in research today. In this work, the objective is to analyze the properties of graphene on the side-polished of an optical fiber (D-shaped fiber) in the coplanar capacitor configuration in order to reduce the total capacitance of the device when compared to the traditional parallel plate configuration. Through simulations, it was obtained modulation depth values of 7.6 dB/mm and 5.3 dB/mm, capacitance of 98.4 fF/mm and 63.1 fF/mm and frequencies of 16.2 GHz and 25.3 GHz, using as an initial parameter the maximum thickness of 1 μm of PMMA deposited on graphene and 0.1 and 1 μm of distance (d) between the plates, respectively. In

preparation for this stage, preliminary tests were carried out on phenolite plates with a thin layer of copper on their surface. Using 3 (three) models, it was possible to see the difference between the dimensions used in their fabrications, as well as the impact when a thin layer of PMMA was deposited on the samples. This work contributes to demonstrate the properties of an electro-optical modulator in the coplanar capacitor configuration, with the intention to improve the parameters of depth of modulation, increase frequency values, reduce capacitance values and optimize the manufacturing process, since there is no need to stack materials for the creation of the capacitor, just as the process for making the capacitor of parallel plates.

Keywords: Coplanar capacitor; electro-optical modulator; D-shaped optical fiber.

1. INTRODUÇÃO

As pesquisas por melhores sistemas para as telecomunicações têm ganhado grande atenção à medida que a demanda da taxa de transmissão de dados cresce. Isso se dá devido aos avanços tecnológicos dos dispositivos eletrônicos, o surgimento dos dispositivos *IoT* (*Internet of Things*) e o conceito de *IoE* (*Internet of Everything*). Como resultado, o volume de dados que circula nestes meios cresce cada vez mais e a necessidade de velocidade e eficiência na transmissão cresce também. Utilizando a fibra óptica como guia de onda, a luz como sinal de transmissão e recepção, e o modulador óptico como conversor de sinal elétrico em sinal óptico, a possibilidade de atingir boas condições de velocidade e eficiência na transferência é grande. Com foco na solução do problema da alta demanda por taxa de transmissão de dados, estudos vêm sendo realizados sobre moduladores eletro-ópticos utilizando grafeno. Sendo um campo relativamente pouco explorado, deixando grandes desafios para pesquisas de novos modelos de dispositivos em diversas configurações.

O grafeno é considerado um material ideal para aplicações optoeletrônicas, pois suas propriedades fotônicas fornecem algumas vantagens sobre o silício, como o fato de ser um bom condutor elétrico e térmico, e ter boas propriedades mecânicas fazendo com que seja um material transparente, flexível e impermeável (FONSECA, 2011).

A principal motivação, no entanto, tem sido a possível compatibilidade com tecnologias e materiais já existentes a fim de colaborar para o desenvolvimento de novas propriedades como por exemplo, dispositivos para eletrônica flexível e transparente, redução de área efetiva e integração com materiais tipicamente usados na área da óptica e na fotônica como o silício, polímero e a própria fibra. A primeira demonstração de um modulador a base de grafeno foi apresentada em 2011 numa configuração capacitiva de placas paralelas de grafeno com uma fina camada dielétrica de dióxido de alumínio (Al_2O_3) sobre um guia de onda de silício. Neste

trabalho, Liu e colaboradores apresentaram resultados experimentais de um modulador com modulação de 0,1 dB/ μm na faixa de comprimento de onda de 1350 a 1600 nm, apresentando 0,22 pF de capacitância e desta forma, limitando a operação do dispositivo em 1 GHz (LIU et al., 2011). Desde então, as pesquisas em moduladores a base de grafeno se intensificaram e novas configurações de montagem tem sido projetada, exploradas e otimizadas (ROMAGNOLI et al., 2018).

Neste trabalho buscamos analisar uma configuração pouco explorada de estrutura capacitiva a base de grafeno chamada de capacitor coplanar. Os objetivos são: 1) calibrar o sistema de caracterização para medidas precisas de capacitância da ordem de fF (10^{-15}); 2) reduzir a capacitância total do dispositivo na configuração coplanar; 3) reduzir as etapas do processo de fabricação numa configuração simplificada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentadas as principais características do grafeno e seu uso na configuração de capacitor de placas paralelas e capacitor coplanar. Os principais parâmetros como área, capacitância resultante e a correspondente frequência máxima de operação são verificados na literatura e apresentados aqui para posterior comparação.

Primeiro material bidimensional (2D) isolado a partir do grafite (NOVOSELOV et al., 2004), o grafeno tornou-se um importante objeto de pesquisa na fotônica, graças à possibilidade de controlar suas propriedades ópticas através da ação de campos elétricos (CASTRO NETO; GUINEA; PERES; NOVOSELOV; GEIM, 2009). Composto por 6 átomos de carbono hexagonalmente distribuídos por cada célula unitária, resulta numa camada com a espessura de um átomo. Esta recebe o nome de folha de grafeno e tem como possibilidade a construção de outras estruturas a partir dela. O uso do grafeno vem sendo importante para melhorar a eficiência dos moduladores ópticos, devido às suas propriedades elétricas de condução que podem ser alteradas sob efeitos de campo (CHEN; QING; XIA; TAO, 2010).

O grafeno vem sendo considerado por diferentes áreas da eletrônica o principal sucessor dos semicondutores inorgânicos como o silício, devido à superioridade de suas propriedades como condutividade elétrica e térmica. Suas propriedades mecânicas e químicas também fazem com que ele seja um material transparente, flexível e impermeável, aumento a sua vantagem. Estas características têm relação com as suas bandas de energia, abaixo representadas (FONSECA, 2011).

No material condutor as bandas de valência e condução estão sobrepostas, sendo livre e fácil o deslocamento dos elétrons de uma banda para outra. O material isolante apresenta uma grande distância entre as bandas, o que impede a passagem dos elétrons de uma banda

para outra e, conseqüentemente, a corrente elétrica. Essa distância também tem o nome de *bandgap*. Nos materiais semicondutores também é possível ver um *bandgap*, porém menor que o dos isolantes, o que torna possível a passagem de elétrons de uma camada para outra contanto que haja uma aplicação de tensão no material, uma variação de temperatura ou uma dopagem deste material.

O grafeno apresenta um perfil um pouco diferente. Ele não possui um *bandgap* entre suas bandas, mas elas possuem um único ponto de encontro, comumente conhecido como ponto de Dirac, que torna possível a passagem dos elétrons para a banda de condução muito mais rápido que nos demais semicondutores. Este fenômeno pode ser visto abaixo.

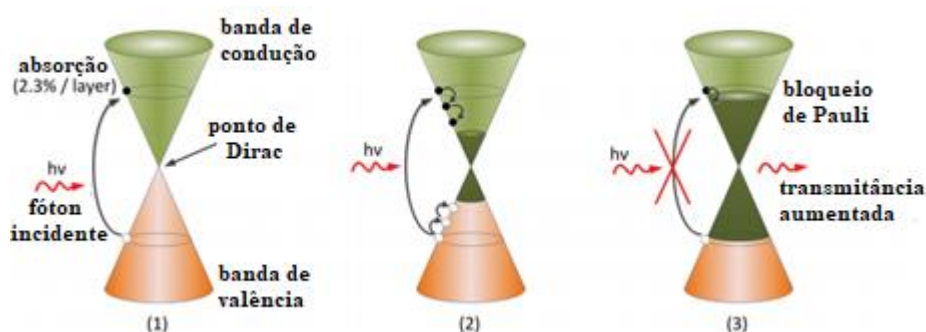


Fig. 1. Sintonização de Energia de Fermi para ampla faixa de comprimentos de onda.

Adaptado de (SOBON, 2016, p. 131).

A Fig. 1. mostra os estágios do recebimento dos fótons na camada do grafeno, assim como a configuração entre as bandas de energia. Esta, que depende do comprimento de onda, está representada por duas linhas finas localizadas no meio de cada banda, delimitando a área que o nível de Fermi deve agir para transmitir a luz. Quando incide no material, a luz causa excitação dos elétrons para a banda de condução mais energética enquanto houver estados livres disponíveis. Causa também a absorção dos fótons incidentes, que vão sendo distribuídos pela banda. Uma vez que a banda de condução está cheia e um fóton passa pelo material, ela o rejeita, caracterizando a transmissão do fóton (ARAÚJO, 2016).

2.1 CAPACITOR COPLANAR

São comumente caracterizados por materiais de pequena largura (w) por uma curta altura (h), divididos por uma distância (d), como representado na Fig. 2. O valor da capacitância geralmente é obtido pela combinação de dois componentes diferentes, o valor direto da capacitância e a capacitância devido ao *fringing effect*. A capacitância direta é obtida entre as placas e a capacitância pelo *fringing effect* é obtida nas bordas. O valor de capacitância direta deve ser menor que o de *fringing effect*, para esse caso específico. O capacitor coplanar simples tem a peculiaridade de ser sensível a perturbações tanto acima

quanto abaixo dele, pois seu campo elétrico permeia o espaço em ambas as direções a partir dos eletrodos (BODINI; SARDINI; SERPELLONI, 2018).

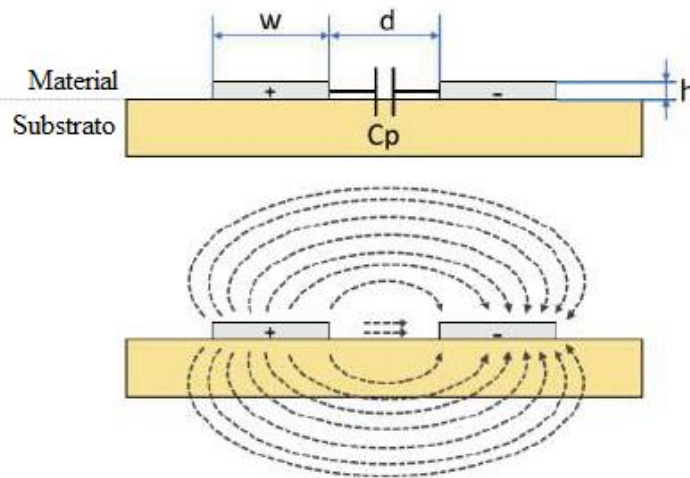


Fig. 2. Parâmetros e princípio básico do capacitor coplanar. Adaptado de (BODINI; SARDINI; SERPELLONI, 2018).

A Fig. 2 representa a configuração de um capacitor coplanar em que C_p é a capacitância intrínseca (ou direta), w é a largura do material, d é a distância entre eles e h é a altura da camada de material (BODINI; SARDINI; SERPELLONI, 2018).

O grafeno tem propriedades de grande importância para dispositivos de alta frequência e estas propriedades tornam acessível a busca por altos valores de profundidade de modulação, que são muito atraentes para a maioria das aplicações. A profundidade de modulação é basicamente a diferença, mensurada em decibéis (dB), entre os estados de maior e menor atenuações do sinal provocados pelo modulador (MARQUES, 2018).

3. METODOLOGIA

Serão realizadas simulações, fabricação de dispositivos base para o estudo e análise dos valores de capacitância destes dispositivos. As simulações serão feitas no programa *COMSOL Multiphysics*, a fabricação dos dispositivos base será feita por uma prototipadora de placas impressas e a análise dos valores de capacitância será feita no analisador de semicondutores. Após a obtenção dos valores no analisador, será depositada uma camada 1 μm do polímero PMMA sobre as três amostras e serão realizadas novas medições para a verificação de mudanças de comportamento quanto à capacitância.

3.1 SIMULAÇÃO

As simulações terão a finalidade de confrontar dados com os valores experimentais a fim de obter valores confiáveis de capacitância dos dispositivos base que serão fabricados

para, em seguida, fabricar o dispositivo final. O programa *COMSOL Multiphysics* possibilitará a simulação da capacitância utilizando como entrada as dimensões do dispositivo, valores correspondentes ao material desse dispositivo e o meio em que ele está inserido (ar, vácuo e água, por exemplo).

3.2 FABRICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS BASE

Três dispositivos foram desenhados utilizando o programa *Autodesk Eagle* e impressos com a prototipadora ProtoMat E33 da LPKF na placa de cobre sobre substrato de fenolite com dimensões de $1 \times 2 \text{ cm}^2$, $1 \times 1 \text{ cm}^2$ e $0,5 \times 2 \text{ cm}^2$ com distâncias (d) de 418,5, 356,1 e 346,7 μm .

3.3 ANÁLISE DE CAPACITÂNCIA

Os valores experimentais de capacitância dos três dispositivos base foram obtidos através do Analisador de Semicondutores B1500A da Keysight. Estes valores serão confrontados com os valores obtidos nas simulações a fim de encontrar uma maneira de obter valores confiáveis de capacitância da ordem de femto-Farad.

3.4 CAMADA DE PMMA

Foi depositada uma camada do polímero PMMA sobre as três amostras base utilizando o *Spin Coater 100* da *Best Tools*. Após este processo, novas análises de capacitância serão realizadas para a verificação de mudanças de comportamento nos valores.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Simulação do capacitor coplanar de grafeno em fibra óptica de perfil D

A configuração simulada no programa *Comsol Multiphysics* consiste em duas camadas simples de grafeno depositadas na lateral polida de uma fibra óptica (perfil D), separadas por uma distância d . A camada de superstrato de PMMA, núcleo da fibra e revestimento da fibra têm um índice de refração de 1,481, 1,449 e 1,444 e permissividade relativa de 3,4, 2,1 e 2,085, respectivamente (OLIVEIRA, MATOS, 2015).

O projeto do modelo é mostrado na Fig. 3 com a distância d do capacitor coplanar à base de grafeno alinhada com o núcleo da fibra. A largura total de grafeno $2W$ é 120 μm considerando uma distância d de 0. O intervalo de distância d simulado foi de 0 a 10 μm . A distância entre o núcleo da fibra e a superfície lateral polida é 0, portanto a luz dentro do núcleo da fibra tem mais interação com as camadas de grafeno (ARAÚJO, BONANDO, SAITO, 2018).

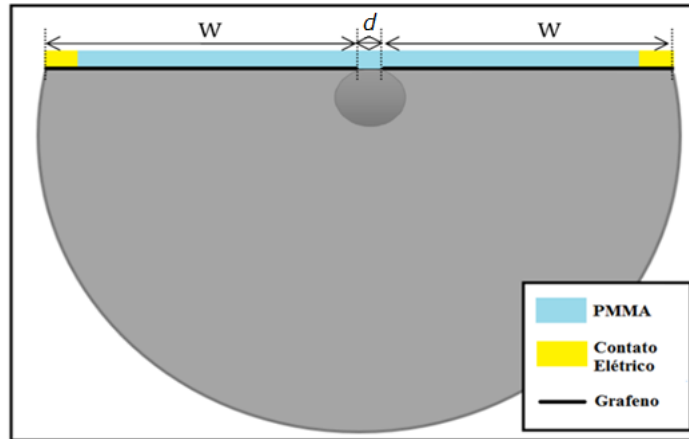


Fig. 3. Esquema da seção transversal do dispositivo: fibra polida lateralmente com duas camadas de grafeno separadas por uma distância d , camada de superstrato de PMMA e contatos elétricos.

O confinamento da luz usando a espessura de PMMA de 0,8, 1,0 e 1,2 μm respectivamente é mostrado na Fig. 4. É possível visualizar que com espessura de PMMA de 0,8 (Fig. 4a) e 1 μm (Fig. 4b), a parte da luz com maior intensidade (vermelho escuro) ainda está confinada no núcleo da fibra (círculo branco), mas com 1,2 μm (Fig. 4c), uma pequena parte não está mais confinada. Por este motivo, o limite de espessura deste material foi considerado 1,0 μm em todas as próximas simulações.

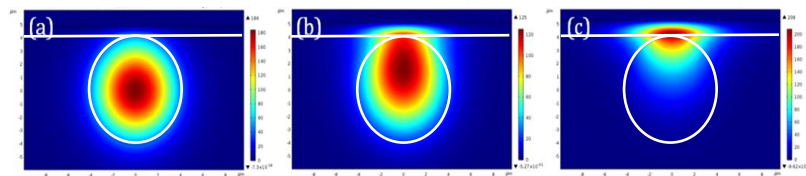


Fig. 4. Confinamento da luz no núcleo da fibra sem distância ($d = 0$) e espessura do superstrato de PMMA de (a) 0,8 μm , (b) 1,0 μm e (c) 1,2 μm .

A próxima etapa foi a análise da distância d entre as camadas de grafeno de 0 a 10 μm para ver quanto é o impacto na profundidade de modulação. Considerando esta condição limite de 1,0 μm de espessura do PMMA, a profundidades máximas de modulação alcançadas foram $\sim 7,6$ dB/mm e $\sim 5,3$ dB/mm para 0,1 e 1 μm de distância (d) entre as placas, respectivamente, como mostrado na Fig. 5.

Para os valores mais altos de distância d , obtivemos a profundidade de modulação mais baixa que ocorre porque a luz dentro do núcleo da fibra interage com menos grafeno quando as camadas de grafeno são separadas. Assim, na próxima etapa, foi considerado a menor distância d de 0,1 μm .

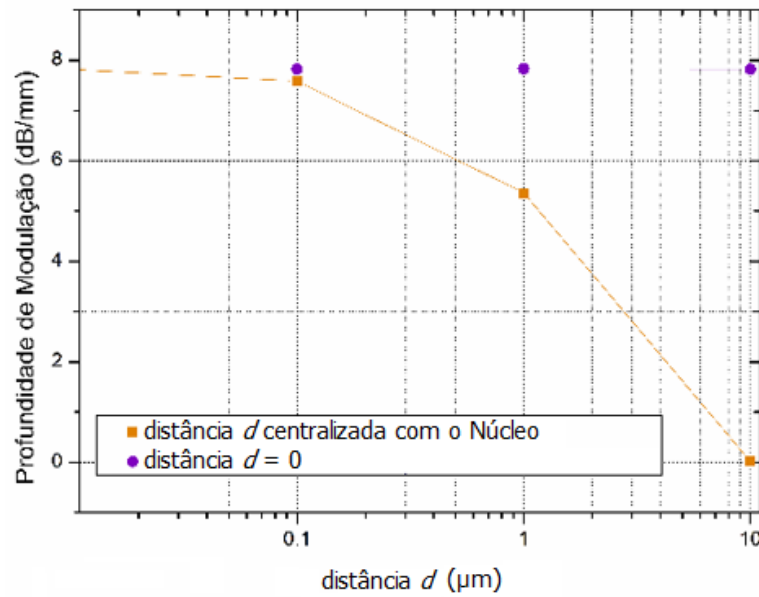


Fig. 5. Profundidade de modulação em função de d . Espessura de PMMA de 1,0 μm .

A capacitância foi simulada no programa *Comsol Multiphysics* e comparada com o cálculo do MATLAB com base na equação (1):

$$C = L * \epsilon_0 * \epsilon_{eff} * \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (1)$$

onde L é o comprimento do grafeno, $K(k)$ é a integral elíptica completa do primeiro tipo, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, k é o módulo da função integral elíptica e ϵ_{eff} é a constante dielétrica efetiva.

A primeira simulação consiste em duas camadas de grafeno (separadas por uma distância d) transferidas para um substrato de vidro com 3 mm de espessura. A Fig. 6 mostra a capacitância obtida pelas simulações MATLAB e *Comsol Multiphysics* como uma função do comprimento do grafeno ao alterar a distância d de 0,1 a 100 μm .

Para valores de 0,1 e 1,0 μm , a diferença entre a capacitância do *COMSOL Multiphysics* e do MATLAB é de 0,09% e 0,67%, respectivamente, portanto, em outras simulações, foram usadas as simulações do *COMSOL Multiphysics*.

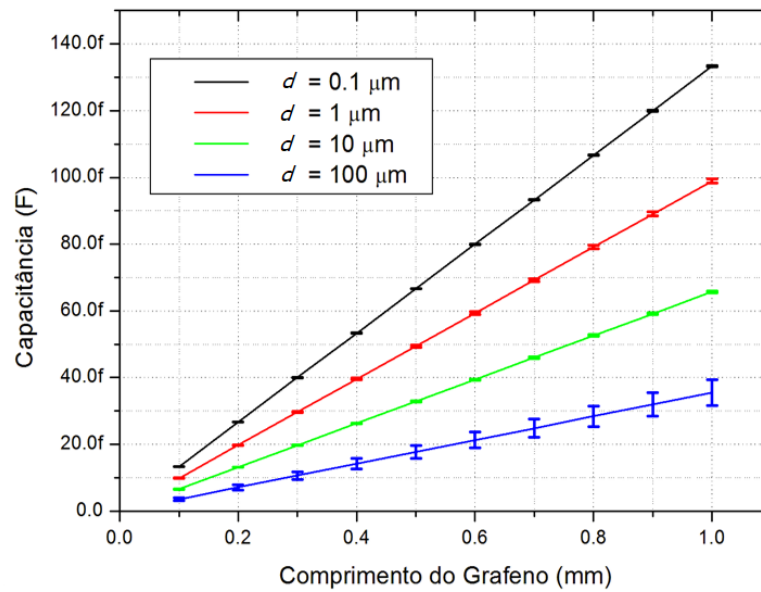


Fig. 6. A capacitância é uma função do comprimento do grafeno para diferentes valores de d .

A comparação entre a capacitância do dispositivo com um intervalo de 0,1 a 1,0 μm em função do comprimento do grafeno é mostrada na Fig. 7.

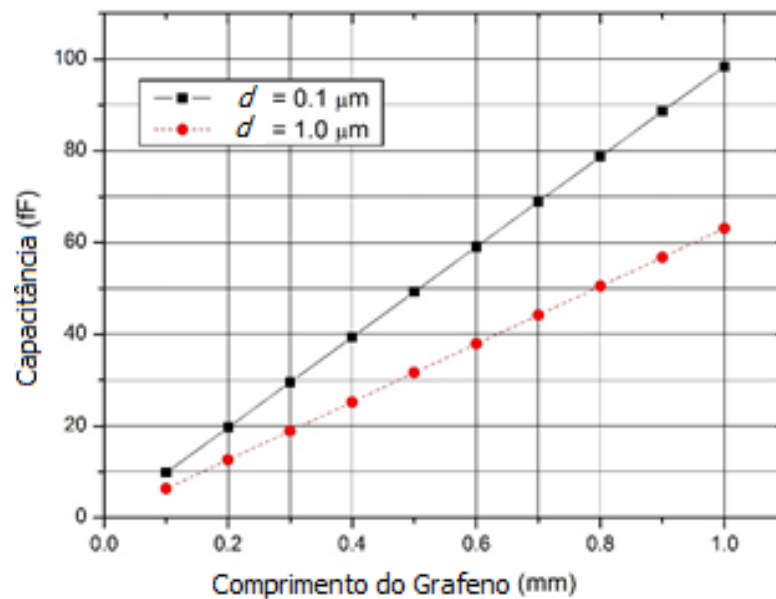


Fig. 7. A capacitância é uma função do comprimento do grafeno para valores de distância d de 0,1 e 1 μm .

A frequência pode ser obtida com base na equação (2):

$$f = \frac{1}{2\pi R.C} \quad (2)$$

onde C é a capacitância obtida anteriormente na equação (1) e R é a resistência do dispositivo que foi estimada em 100 Ω (Phare *et al.* 2015). Para uma distância d de 0,1 e 1,0 μm e um

comprimento de grafeno de 1 mm, os resultados estimados para f são, respectivamente, 16,2 GHz e 25,3 GHz.

4.2 Montagem experimental de capacitor coplanar

Os objetivos da fabricação dos capacitores coplanares em cobre foi preparar amostras de referência para medidas de capacitância da ordem de picoFarad (10^{-12} F) e femtoFarad (10^{-15} F), calibrar o equipamento e a estação de trabalho (*probe station*) com micromanipuladores e comparar seus resultados experimentais com os modelos de simulação.

A partir dos três dispositivos fabricados com placas de fenolite e capacitor coplanar de cobre (que receberão os nomes de Placa A, Placa B e Placa C), foram obtidos resultados simulados e experimentais com a finalidade da obtenção de valores confiáveis de capacitância. Para a simulação, foi realizada uma varredura no comprimento L , partindo de 0,5 cm à 6 cm para verificar a variação nos resultados de capacitância conforme L aumenta ou diminui. Para o experimental, foram realizados testes colocando a ponta de prova do analisador em diferentes locais do dispositivo.

4.2.1 Capacitor coplanar de cobre na Placa A

A Fig. 8 mostra as dimensões da Placa A, sendo 1,5 mm a espessura da placa de fenolite, 71,5 μm a espessura do cobre, 418,5 μm é a distância entre as placas de cobre (d), 0,5 cm é a largura de cada cobre, 1,0 cm é a largura da placa e $L = 2$ cm o comprimento da placa.

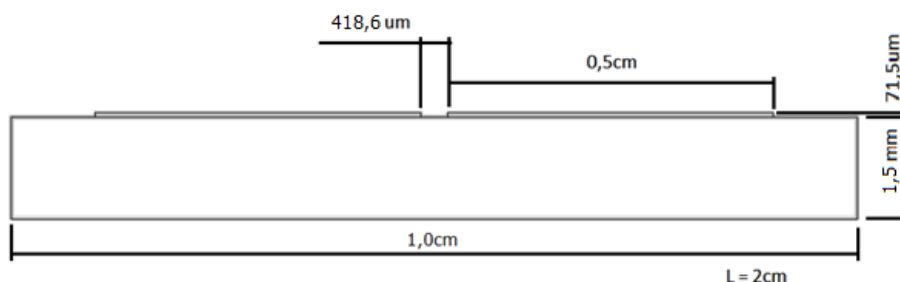


Fig. 8. Esquema de montagem do capacitor coplanar de cobre na placa A e suas respectivas dimensões.

A Fig. 9(a) mostra a Placa A, desenhada utilizando o software Autodesk Eagle e impressa com a prototipadora ProtoMat E33 da LPKF na placa de cobre sobre substrato de fenolite com dimensões de $1 \times 2\text{ cm}^2$ e com distância (d) de 418,6 μm conforme mostrado na Fig. 9(b).

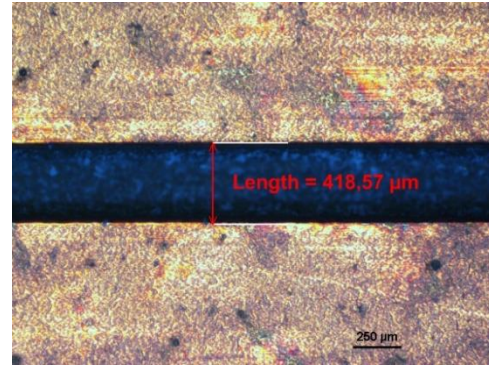


Fig. 9. (a) Vista superior da Placa A com 1,0 cm de largura 2,0 cm de comprimento. (b) Imagem óptica no microscópio utilizando lente de 5X destacando-se a região de distância entre as placas de cobre de 418,6 μm .

A Fig. 10 apresenta o gráfico de medida de capacitância no capacitor coplanar de cobre da Placa A, medido no analisador referente ao melhor resultado de 5 medidas correspondendo a $1,16 \pm 0,01$ pF.

Tabela 1:

PLACA A	
L	Capacitância
0,5 cm	263 fF
1 cm	525 fF
2 cm	1,05 pF
3 cm	1,58 pF
4 cm	2,10 pF
5 cm	2,63 pF
6 cm	3,15 pF

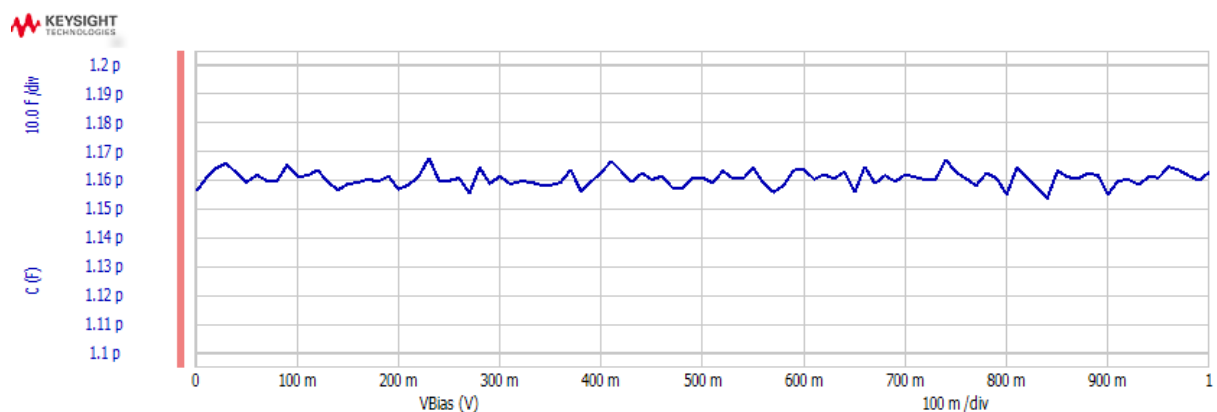


Fig. 10. Gráfico de medida de capacitância na Placa A obtido no analisador de semicondutores B1500A da Keysight no capacitor coplanar de 1,0 cm de largura, 2,0 cm de comprimento e distância d de 418,6 μm .

A Tabela 1 apresenta valores de capacitância analisadas na Placa A considerando distância entre as placas de cobre de $418,6 \mu\text{m}$, simulados no *COMSOL Multiphysics*, variando-se o comprimento L de $0,5 \text{ cm}$ à 6 cm com destaque para o comprimento de $2,0 \text{ cm}$ correspondente a amostra fabricada obtendo-se o valor de $1,05 \text{ pF}$. Comparando as medidas previstas de simulação (teoria) e do analisador (experimental), nota-se que há uma diferença de $10,47\%$.

4.2.2 Capacitor coplanar de cobre na Placa B

A Fig. 11 mostra as dimensões da Placa B, sendo $1,5 \text{ mm}$ a espessura da placa de fenolite, $66,2 \mu\text{m}$ a espessura do cobre, $352,1 \mu\text{m}$ é a distância entre as placas de cobre, $0,5 \text{ cm}$ é a largura de cada cobre, $1,5 \text{ cm}$ é a largura da placa e $L = 1 \text{ cm}$ o comprimento da placa.

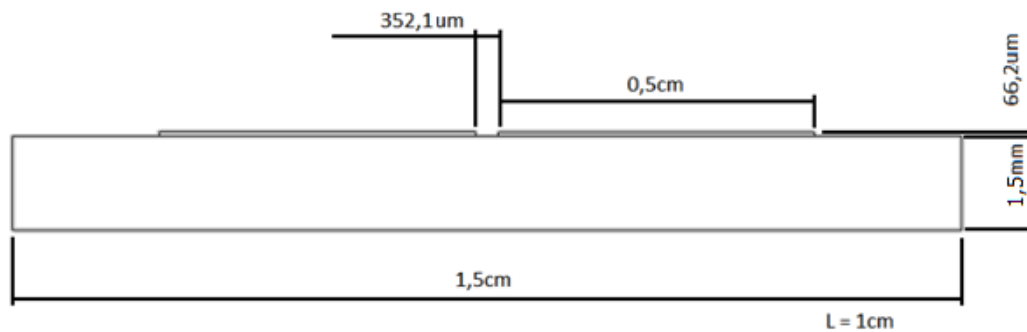


Fig. 11. Esquema de montagem do capacitor coplanar de cobre na placa B e suas respectivas dimensões.

A Fig. 12(a) mostra a Placa B, desenhada utilizando o software Autodesk Eagle e impressa com a prototipadora ProtoMat E33 da LPKF na placa de cobre sobre substrato de fenolite com dimensões de $2 \times 1 \text{ cm}^2$ e com distância (d) de $356,1 \mu\text{m}$ conforme mostrado na Fig. 12(b).

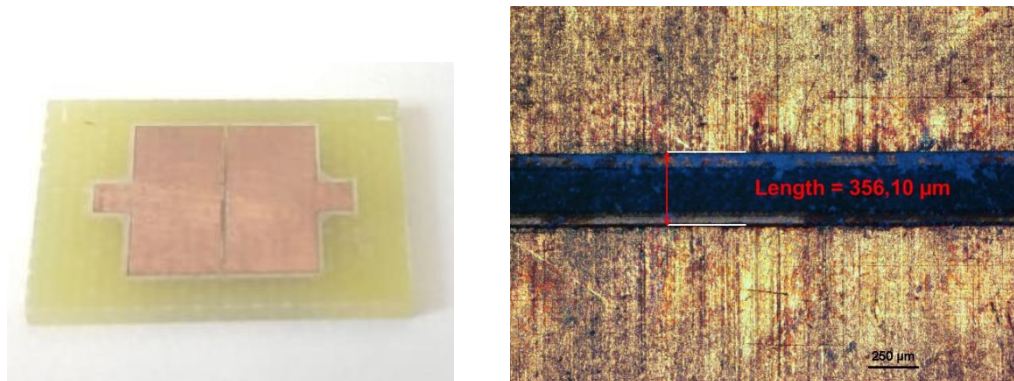


Fig. 12. (a) Vista superior da Placa B com $2,0 \text{ cm}$ de largura $1,0 \text{ cm}$ de comprimento. (b) Imagem óptica no microscópio utilizando lente de $5X$ destacando-se a região de distância entre as placas de cobre de $356,1 \mu\text{m}$.

A Fig. 13 apresenta o gráfico de medida de capacitância no capacitor coplanar de cobre da Placa B, medido no analisador referente ao melhor resultado de 5 medidas correspondendo a 758 ± 8 fF. A Tabela 2 apresenta valores de capacitância analisadas na Placa B considerando distância entre as placas de cobre de $356,1 \mu\text{m}$, simulados no *COMSOL Multiphysics*, variando-se o comprimento L de 0,5 cm à 6 cm com destaque para o comprimento de 1,0 cm correspondente a amostra fabricada obtendo-se o valor de 534 fF.

Tabela 2:

PLACA B	
L	Capacitância
0,5 cm	267 fF
1 cm	534 fF
2 cm	1,07 pF
3 cm	1,60 pF
4 cm	2,13 pF
5 cm	2,67 pF
6 cm	3,20 pF

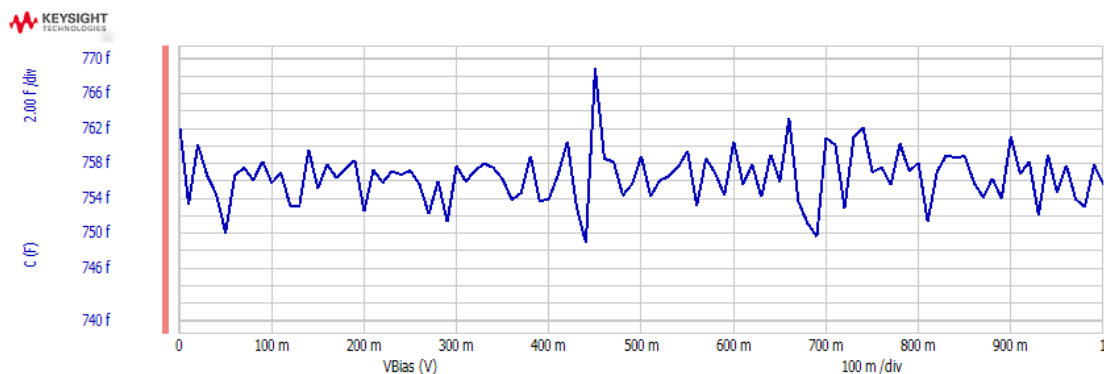


Fig. 13. Gráfico de medida de capacitância na Placa B obtido no analisador de semicondutores B1500A da *Keysight* no capacitor coplanar de 2,0 cm de largura, 1,0 cm de comprimento e distância d de $356,1 \mu\text{m}$.

Comparando as medidas previstas de simulação (teoria) e do analisador (experimental), nota-se que há uma diferença de 41,95%.

4.2.3 Capacitor coplanar de cobre na Placa C

A Fig. 14 mostra as dimensões da Placa C, sendo 1,5 mm a espessura da placa de fenolite, $39,5 \mu\text{m}$ a espessura do cobre, $346,7 \mu\text{m}$ é a distância entre as placas de cobre, 0,25 cm é a largura de cada cobre, 1,0 cm é a largura da placa e $L = 2$ cm o comprimento da placa.

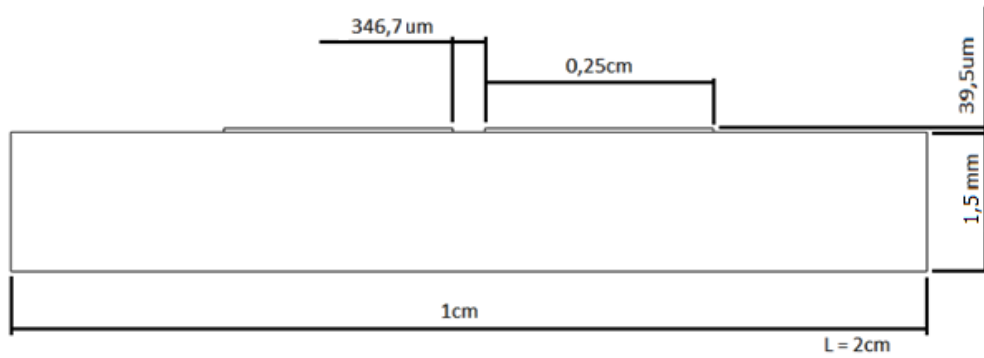


Fig. 14. Esquema de montagem do capacitor coplanar de cobre na placa C e suas respectivas dimensões.

A Fig. 15(a) mostra a Placa C, desenhada utilizando o programa *Autodesk Eagle* e impressa com a prototipadora ProtoMat E33 da LDKF na placa de cobre sobre substrato de fenolite com dimensões de $1 \times 2 \text{ cm}^2$ e com distância (d) de $346,7 \mu\text{m}$ conforme mostrado na Fig. 15(b).

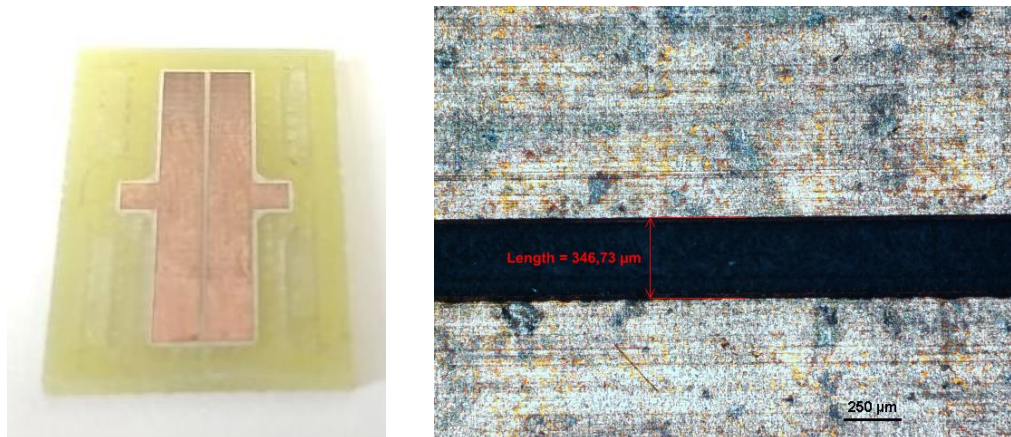


Fig. 15. (a) Vista superior da Placa C com 1,0 cm de largura e 2,0 cm de comprimento. (b) Imagem óptica no microscópio utilizando lente de 5X destacando-se a região de distância entre as placas de cobre de $346,7 \mu\text{m}$.

A Fig. 16 apresenta o gráfico de medida de capacitância no capacitor coplanar de cobre da Placa C, medido no analisador referente ao melhor resultado de 5 medidas correspondendo a $1,79 \pm 0,01 \text{ pF}$. A Tabela 3 apresenta valores de capacitância analisadas na Placa C considerando distância entre as placas de cobre de $346,7 \mu\text{m}$, simulados no *COMSOL Multiphysics*, variando-se o comprimento L de 0,5 cm à 6 cm com destaque para o comprimento de 2,0 cm correspondente a amostra fabricada obtendo-se o valor de 1,03 fF.

Tabela 3:

PLACA C	
L	Capacitância
0,5 cm	258 fF
1 cm	516 fF
2 cm	1,03 pF
3 cm	1,55 pF
4 cm	2,07 pF
5 cm	2,58 pF
6 cm	3,10 pF

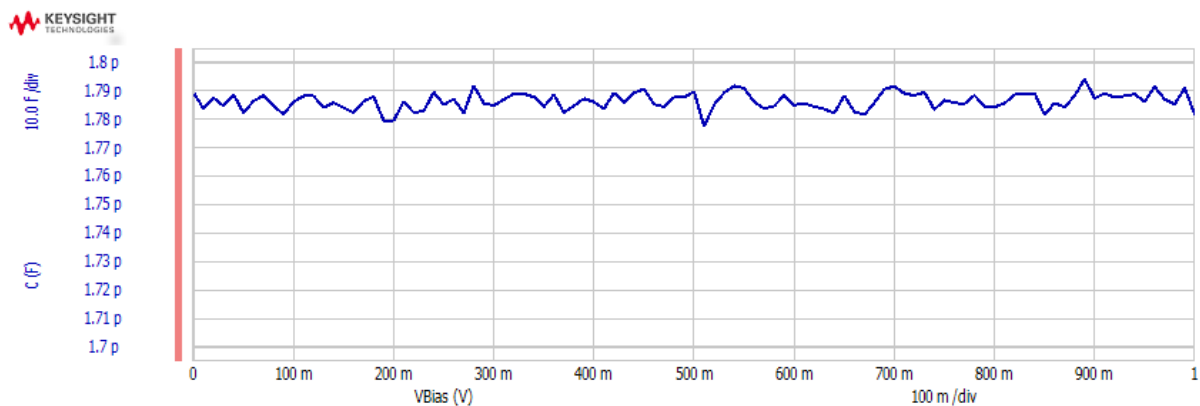


Fig. 16. Gráfico de medida de capacitância na Placa C obtido no analisador de semicondutores B1500A da *Keysight* no capacitor coplanar de 1,0 cm de largura, 2,0 cm de comprimento e distância d de 346,7 μm .

Comparando as medidas previstas de simulação (teoria) e do analisador (experimental), nota-se que há uma diferença de 73,78%.

4.3 Análise das placas com camada de PMMA como superstrato

Após a análise dos valores obtidos das Placas A, B e C, foi depositada uma camada de PMMA (Polimetilmetacrilato) sobre a superfície dos dispositivos a fim de observar o seu comportamento nos valores de capacitância. Também foram realizadas simulações variando a espessura do PMMA para avaliar o impacto dessa variação nos valores de capacitância de capacitores coplanares. O PMMA foi depositado nas amostras por meio de uma pipeta descartável e espalhado com auxílio do *Spin Coater*, nas configurações de rotação mostradas na Tabela 4. Após este procedimento, as amostras da Fig. 17 ficaram por 5 minutos no *Hot Plate* à temperatura de 75°C.

PASSO	VELOCIDADE (rpm)	TEMPO (s)	ACELERAÇÃO (rpm/s)
1	150	30	50
2	1500	120	100

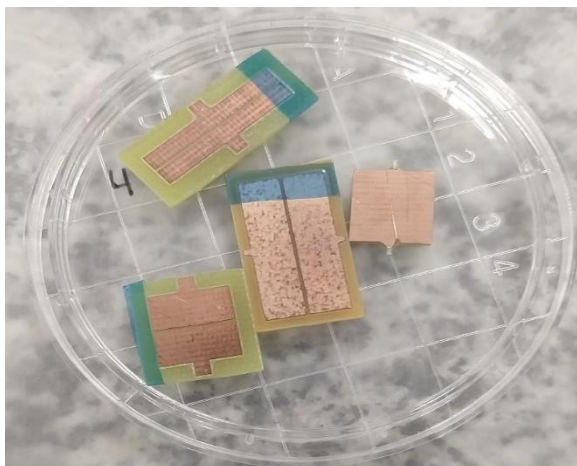
Tabela 4. Configuração utilizada no *Spin Coater* para espalhar o PMMA nas amostras.

Fig. 17. Placas A, B e C após o depósito da camada de PMMA sobre suas superfícies.

4.3.1 PLACA A

A Tabela 5 apresenta valores de capacitância da Placa A (capacitor coplanar de 1,0 cm de largura 2,0 cm de comprimento e distância d de 418,6 μm) com uma camada de PMMA em sua superfície, simulados no *COMSOL Multiphysics*, variando a espessura do PMMA de 1 μm à 46 μm obtendo-se com resultado de 1,02 a 1,09 pF.

PLACA A (COMSOL)	
PMMA (Espessura)	Capacitância
1 μm	1,02 pF
6 μm	1,03 pF
11 μm	1,04 pF
16 μm	1,05 pF
21 μm	1,06 pF
26 μm	1,06 pF
31 μm	1,07 pF
36 μm	1,07 pF
41 μm	1,08 pF
46 μm	1,09 pF

Tabela 5. Valores de capacitância simulados da Placa A com camada de PMMA.

A Tabela 6 mostra resultados obtidos através do Analisador de Semicondutores B1500A da *Keysight* com a caixa fechada e com a caixa aberta, mostrando também o desvio calculado entre os valores. As posições A1 e A2 se referem às posições dos contatos do Analisador quando em contato com o dispositivo.

PLACA A (PMMA - Analisador)			
Posições	Capacitância (Caixa Fechada)	Capacitância (Caixa Aberta)	Desvio
A1	1,13 pF $\pm$ 0,01 pF	1,42 pF $\pm$ 0,01 pF	20,42%
A2	1,17 pF $\pm$ 0,01 pF	1,43 pF $\pm$ 0,01 pF	22,22%

Tabela 6. Valores de capacitância experimentais da Placa A com camada de PMMA.

4.3.2 PLACA B

A Tabela 7 apresenta valores de capacitância da Placa B (capacitor coplanar de 2,0 cm de largura 1,0 cm de comprimento e distância d de 356,1 μ m) com uma camada de PMMA em sua superfície, simulados no *COMSOL Multiphysics*, variando a espessura do PMMA de 1 μ m à 46 μ m obtendo-se com resultado de 533 a 556 fF.

PLACA B (PMMA)	
PMMA (Espessura)	Capacitância
1 μ m	533 fF
6 μ m	537 fF
11 μ m	540 fF
16 μ m	542 fF
21 μ m	544 fF
26 μ m	547 fF
31 μ m	550 fF
36 μ m	551 fF
41 μ m	553 fF
46 μ m	556 fF

Tabela 7. Valores de capacitância simulados da Placa B com camada de PMMA.

A Tabela 8 mostra resultados obtidos através do Analisador de Semicondutores B1500A da *Keysight* com a caixa fechada e com a caixa aberta, mostrando também o desvio calculado entre os valores. As posições B1 e B2 se referem às posições dos contatos do Analisador quando em contato com o dispositivo.

PLACA B (PMMA - Analisador)			
Posições	Capacitância (Caixa Fechada)	Capacitância (Caixa Aberta)	Desvio
B1	822 fF $\pm$ 6 fF	1,07 pF $\pm$ 0,01 pF	30,17%
B2	848 fF $\pm$ 6 fF	1,15 pF $\pm$ 0,01 pF	35,61%

Tabela 8. Valores de capacitância experimentais da Placa B com camada de PMMA.

4.3.3 PLACA C

A Tabela 9 apresenta valores de capacitância da Placa C (capacitor coplanar de 1,0 cm de largura 2,0 cm de comprimento e distância d de 346,7 μm) com uma camada de PMMA em sua superfície, simulados no *COMSOL Multiphysics*, variando a espessura do PMMA de 1 μm à 46 μm obtendo-se com resultado de 1,01 a 1,08 pF.

PLACA C (PMMA)	
PMMA (Espessura)	Capacitância
1 μm	1,01 pF
6 μm	1,03 pF
11 μm	1,04 pF
16 μm	1,05 pF
21 μm	1,05 pF
26 μm	1,06 pF
31 μm	1,07 pF
36 μm	1,07 pF
41 μm	1,08 pF
46 μm	1,08 pF

Tabela 9. Valores de capacitância simulados da Placa C com camada de PMMA.

A Tabela 10 mostra resultados obtidos através do Analisador de Semicondutores B1500A da *Keysight* com a caixa fechada e com a caixa aberta, mostrando também o desvio calculado entre os valores. As posições C1 e C2 se referem às posições dos contatos do Analisador quando em contato com o dispositivo.

PLACA C (PMMA - Analisador)			
Posições	Capacitância (Caixa Fechada)	Capacitância (Caixa Aberta)	Desvio
C1	1,33 pF $\pm$ 0,01 pF	1,60 pF $\pm$ 0,01 pF	20,30%
C2	1,43 pF $\pm$ 0,01 pF	1,70 pF $\pm$ 0,01 pF	18,88%

Tabela 10. Valores de capacitância experimentais da Placa C com camada de PMMA.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações mostraram que a variável que altera os valores de capacitância é o comprimento L da placa. Já os valores experimentais tiveram algumas alterações expressivas entre os três modelos, mas há a possibilidade de não ter tido uma boa conexão entre os terminais do Analisador de Semicondutores e o dispositivo a ser medido. As simulações também mostraram que o valor de capacitância após o depósito da camada de PMMA sobre os dispositivos não sofre grande alteração com a variação da espessura da camada de

PMMA. Comparando os valores obtidos experimentalmente das placas com e sem PMMA, tem-se que a Placa A apresentou valores próximos sem e com PMMA, sendo ambos aproximadamente 1,17 pF, a Placa B apresentou valores sem PMMA de aproximadamente 758 fF e valores com PMMA entre 822 e 848 fF e a Placa C apresentou valores sem PMMA de aproximadamente 1,79 pF e com PMMA entre 1,33 e 1,43 pF, sendo todos estes valores obtidos com a caixa do Analisador de Semicondutores fechada. Os testes preliminares realizados nos três dispositivos confeccionados em placas de fenolite mostraram que quanto menor o valor de capacitância a ser medido (ordem de fF), mais crítico se torna o sistema. Para melhorar a precisão das medições, é necessário considerar o uso de cabos apropriados (com blindagem adequada e melhor método de conexão no dispositivo a ser medido) e a blindagem do sistema de medidas do Analisador de Semicondutores, ou seja, realizar as medições com a caixa metálica fechada.

Simulações do capacitor coplanar depositado na lateral polida de uma fibra óptica (perfil D) entregaram valores de profundidade de modulação de 7,6 dB/mm e 5,3 dB/mm, capacitância de 98,4 fF/mm e 63,1 fF/mm e frequências de 16,2 GHz e 25,3 GHz, tendo como parâmetros a espessura máxima de 1 μ m de PMMA depositado sobre o grafeno e 0,1 e 1 μ m de distância (d) entre as placas, respectivamente.

Uma proposta para trabalhos futuros pode ser a busca de um modo de validação do valor da espessura de PMMA depositado sobre os dispositivos estudados e a construção do dispositivo final.

6. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Maria C. S. Projeto de Moduladores Ópticos de Grafeno em Fibras Ópticas. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2016.
- ARAÚJO, Maria C. S, BONANDO, M. G. and SAITO, Lucia A. M., "All-fiber graphene electro-optical modulator with PMMA superstrate layer", In: Latin America Optics and Photonics Conference. Optical Society of America, 2018. p. Th3B. 4.
- BODINI, Andrea & SERPELLONI, Mauro & SARDINI, Emilio & PANDINI, Stefano. (2018). Design and fabrication of a flexible capacitive coplanar force sensor for biomedical applications. 10.1109/SAS.2018.8336775.
- PHARE, C. T. & LEE, Y.-H. D. & CARDENAS, J. & LIPSON, M., "Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth", Nature Photonics 9, 511 (2015).

CHEN, Fang; QING, Quan; XIA, Jilin; TAO, Nongjian et al. Graphene Field-Effect Transistors: Electrochemical Gating, Interfacial Capacitance, and Biosensing Applications. *Chemistry – An Asian Journal*, [S.1.], v. 18, n. 2, p. 2144-2153, 04 out. 2010.

CASTRO NETO, A. H.; GUINEA, F.; PERES, N. M. R.; NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K. The electronic properties of graphene. *Mod. Phys.*, v. 81, n. 1, p. 109-162, 2009.

FONSECA, Alexandre Fontes da. Introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e nanotubos de carbono. Mini-Curso, Niterói. Departamento de Física do ICEx-UFF, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

JONAH, I'm With the (Valence) Band: Band Structure and the Science of Conduction. Disponível em: <<http://www.thephysicsmill.com/2013/02/03/im-with-the-valence-band-band-structure-and-the-science-of-conduction/>>. Acesso em: 31 mar. 2019.

LIU, M., Yin, X., Ulin-Avila, E. et al. A graphene-based broadband optical modulator. *Nature* 474, 64–67 (2011). <https://doi.org/10.1038/nature10067>

MARQUES, Israel Avansi. Moduladores de Eletro-Absorção Integrados com Materiais Bidimensionais. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, Programa de Pós-Graduação, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

NOVOSELOV, K. S. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, [S.1.], v. 306, n. 5696, p. 666-669, 22 set. 2004.

OLIVEIRA, R. E. P. and MATOS, C. J. S., “Graphene-Based Waveguide Polarizers: In-Depth Physical Analysis and Relevant Parameters,” *Sci. Rep.*, [S.1.], v. 5, p.1-8, 19 nov. 2015. Nature Publishing Group. <http://dx.doi.org/10.1038/srep16949>.

ROMAGNOLI, M., SORIANELLO, V., MIDRIO, M. et al. Graphene-based integrated photonics for next-generation datacom and telecom. *Nat. Rev. Mater.* 3, 392–414 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0040-9>

SOBON, Grzegorz. Application of 2D Materials to Ultrashort Laser Pulse Generation. *Two-dimensional Materials – Synthesis, Characterization And Potential Applications*, [S.1.], p.123-152, 31 ago. 2016.

Contatos: sergio.gimenes@live.com; lucia.saito@mackenzie.br