

Antena de Grafeno Composta com Largura de Banda Controlável pelo Potencial Químico

Rodrigo G. de Azevedo, Karlo Q. da Costa e Felipe B. Soares

Resumo— Neste artigo é apresentada uma antena de grafeno de banda larga para aplicação na faixa do terahertz. A antena é definida por uma combinação de um dipolo retangular e uma espira circular, onde o dipolo é alimentado por uma fonte de tensão no seu gap. O método dos momentos bidimensional (MoM-2D) com impedância superficial é utilizado para análise numérica da antena para fins de investigação da dependência da impedância de entrada, do coeficiente de reflexão e largura de banda da antena em função de sua geometria. Os resultados mostram que esta simples configuração pode proporcionar um aumento considerável na largura de banda em torno de 90%.

Palavras-chaves— Antenas de grafeno, Terahertz, Método dos Momentos, Largura de banda.

Abstract— This paper presents a broadband graphene antenna for operation in the terahertz band. The antenna is defined by a combination of a rectangular and a circular loop dipole, where the dipole is fed by a voltage source in its gap. The method of two-dimensional Moments (MoM 2D) with surface impedance is used for numerical analysis of the antenna for research dependency of the input impedance, reflection coefficient, and bandwidth of the antenna due to its geometry is investigated. The results show that this simple configuration can provide a considerable increase in bandwidth around 90%.

Keywords— Graphene antennas, Terahertz, Method of Moment, Bandwidth.

I. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o tráfego de dados sem fio aumentou drasticamente devido a uma mudança na forma como a sociedade atual cria, compartilha e consome informação. Este cenário tem sido acompanhado por uma crescente demanda por maior velocidade de comunicação em qualquer lugar, a qualquer hora. Soluções avançadas de camada física e, mais importante, novas bandas espectrais surgem como soluções para suportar estas taxas de dados extremamente altas [1].

Neste contexto, a comunicação na banda do terahertz (THz) [2-8] é vista como um dos meios de satisfazer essa procura, pois é uma alternativa as limitações de capacidade dos sistemas de comunicação atuais. A faixa THz é a banda espectral que compreende as frequências entre 0,1 THz e 10 THz. Enquanto as regiões de frequência imediatamente abaixo e acima dessa faixa (as micro-ondas e o infravermelho distante, respectivamente) têm sido amplamente estudados, a faixa do THz é uma das menos exploradas para comunicação [1].

Por isso a necessidade de se criar novas arquiteturas de transceptores que sejam capazes de operar na faixa THz de

frequências e, mais importante ainda, capazes de explorar a grande largura de banda disponível nessa faixa. Atualmente, bastantes tecnologias são consideradas. Nesse artigo, irá se dar um enfoque na tecnologia do grafeno.

O grafeno é uma monocamada de átomos de carbono arranjados em uma rede hexagonal bidimensional em forma de favo de mel [9]. As excepcionais propriedades do grafeno como a mobilidade dos elétrons excessivamente alta, a espessura da camada atômica, a possibilidade de miniaturizar antenas baseado nesse material e muitas outras propriedades fazem do grafeno um dos materiais promissores em muitas áreas desde células solares [10] até transistores de velocidades ultrarrápidas [11]. Porém, como a tecnologia ainda não está tão amadurecida como outras tecnologias (como por exemplo, dispositivos a base de germânio de silício e nitreto de gálio) e algumas de suas propriedades permanece desconhecidas, alguns resultados preliminares motiva os estudiosos ao desenvolvimento de tecnologias baseado no grafeno.

Significantes benefícios podem ser obtidos pelas antenas de grafeno em aplicações de telecomunicações como por exemplo a integração monolítica com nanoeletrônicos de grafeno em rádio frequência, o ajuste dinâmico eficiente através do potencial químico, as perdas relativamente baixas na banda de terahertz (THz) e a possibilidade de miniaturização de antenas devido a efeito plasmônico comum em metamateriais [12-13].

As características de transporte do grafeno podem ser controlados por um parâmetro denominado potencial químico, μ_C , que altera a condutividade do grafeno, pois controla a densidade de portadoras no material e consequentemente sua condutividade [14]. Esse potencial químico pode ser modificado, por exemplo, via campo elétrico-estático ou por dopagem química [15,16].

Neste artigo, é feita uma análise teórica de uma antena de grafeno de banda larga composta por um dipolo retangular e uma espira circular. A análise é feita pelo método dos momentos bidimensional (MoM-2D) com impedância superficial. São calculadas a impedância de entrada e o coeficiente de reflexão para uma composição de antenas com diferentes potenciais químicos na faixa de 0,5 a 2THz. Alguns resultados são calculados com o software Comsol [19].

Rodrigo G. de Azevedo, Karlo Q. da Costa e Felipe B. Soares, Departamento de Engenharia Elétrica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Laboratório de Nanoeletrônica e Nanofotônica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brasil, E-mails: rodrigodeazevedo@gmail.com, karlo@ufpa.br, felipe.bamberg@hotmail.com. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (processo nº 1576927/2014-4).

II. DESCRIÇÃO DA ANTENA

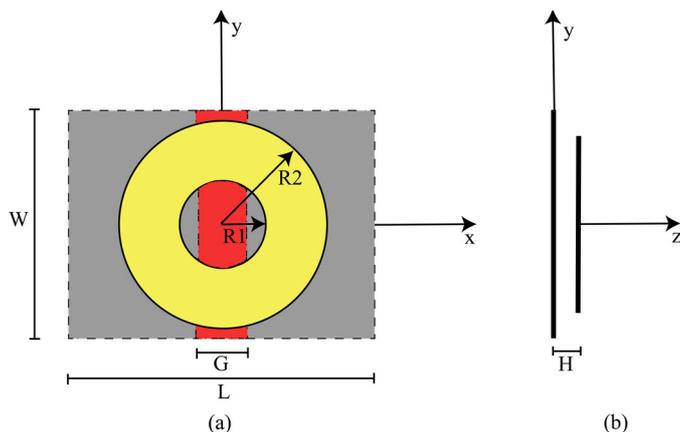


Fig. 1. Geometria do dipolo planar retangular de grafeno acoplada a uma espira de mesmo material. (a) Visão do topo. (b) Visão lateral.

A geometria da antena de grafeno proposta nesse artigo é composta por dois elementos: um dipolo planar retangular com dimensões: $L = 17\mu\text{m}$ e $W = 10\mu\text{m}$, as mesmas da referência [13], e um anel circular passivo (ou espira circular) com raio interno $R1$ (igual a $0,4 \times R2$) e raio externo $R2$ (igual a $5\mu\text{m}$). O meio em que os elementos estão inseridos possui uma permissividade $\epsilon_r = 2,4$, a qual é a média das permissividades do ar e do substrato utilizado em [13]. Os dois elementos estão separados por uma altura H (igual a $1\mu\text{m}$), conforme mostra a Fig. 1.

A dimensão do dipolo de grafeno tem apenas uma dimensão planar porque está sendo considerada uma folha de grafeno de espessura muito pequena. Além disso, a antena considerada está em um meio homogêneo, com ausência de substrato. A antena foi alimentada por uma fonte de tensão ideal denominada *photomixer* [13] com comprimento do *gap* G ($2\mu\text{m}$) no meio do dipolo e largura W .

III. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Nesta seção, apresentamos o modelo utilizado da condutividade superficial do grafeno e um resumo do modelo teórico do MoM-2D usado na análise.

A. Condutividade de Superfície do Grafeno

Os resultados experimentais mostram que os efeitos de borda sobre a condutividade do grafeno pode ser desconsiderado na escala micrométrica [17]. Portanto, pode ser utilizado o modelo de condutividade elétrica desenvolvida para folhas de grafeno infinitas. Neste trabalho, utilizou-se o modelo de Drude para a condutividade de superfície do grafeno.

$$\sigma(\omega) = \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar^2} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right] \frac{-j}{\omega - j\tau^{-1}} \quad (1)$$

onde $\tau = 10^{-12}\text{s}$ é o tempo de relaxação, T é a temperatura e μ_c é o potencial químico. A Fig. 2 mostra exemplos desta condutividade versus a frequência.

B. Modelo do Método dos Momentos

A condição de contorno na superfície da antena resulta na seguinte equação integral de espalhamento do campo elétrico no domínio da frequência com dependência temporal $\exp(j\omega t)$.

$$[(\bar{E}_s + \bar{E}_i) \cdot \bar{a}_t] \bar{a}_t = Z_s \bar{J} \quad (2)$$

onde \bar{E}_s (V/m) é o campo espalhado da antena, \bar{E}_i (V/m) é o campo elétrico incidente da fonte de tensão, \bar{a}_t é o vetor unitário tangencial a superfície da antena, \bar{J} (A/m) é a densidade de corrente superficial e $Z_s = 1/\sigma$ é a impedância de superfície do grafeno.

O campo espalhado é dado por:

$$\bar{E}_s = -j\omega\mu_0 \iint_S \bar{J} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} ds' + \nabla \left[\frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_S \nabla \cdot \bar{J} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' \right] \quad (3)$$

onde j é a unidade imaginária, $k = \omega(\mu_0\epsilon)^{1/2}$, ω é a frequência angular (rad/s), $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$, ϵ_r a permissividade relativa do meio, μ_0 e ϵ_0 são a permeabilidade magnética e permissividade elétrica, respectivamente, no espaço livre, e R é a distância entre os pontos da fonte e os pontos de observação, ambos na superfície da antena S .

A solução numérica de (2) pelo MoM consiste em aproximar a corrente de superfície na antena pela combinação linear em um determinado conjunto de funções base e executar o procedimento de teste convencional com um dado conjunto de “funções teste”, que constam em [18]. Ao substituímos a equação (3) na (2), podemos transformar a equação integral resultante através de aproximação em um sistema linear algébrico, o qual é resolvido numericamente para a corrente \bar{J} .

Tanto para o dipolo retangular isolado (Seção IV) quanto para a antena composta dipolo-espira (Seção V) foi criado um programa utilizando o MoM-2D. Mesmo que tenha-se utilizado o Comsol para validar nossos resultados, a opção por usar MoM-2D deve-se ao tempo de simulação ser mais rápida (já que este simula em 2D e aquele em 3D) além do consumo de memória excessivo que o Comsol necessita para simular a antena composta.

C. Modelo Comsol

O software Comsol utiliza o método dos elementos finitos para resolver os problemas propostos. O grafeno é declarado utilizando-se a equação de condutividade elétrica (1) e a fonte de tensão é inserido através de uma *lumped port* que utiliza um condutor perfeitamente elétrico na ligação entre a fonte e o dipolo. A antena é discretizada usando tetraedros e o meio onde se encontra a antena possui permissividade relativa. A camada perfeitamente casada (PML) necessária para absorver as ondas refletidas pelas fronteiras por condição de espalhamento é discretizada usando *swept*.

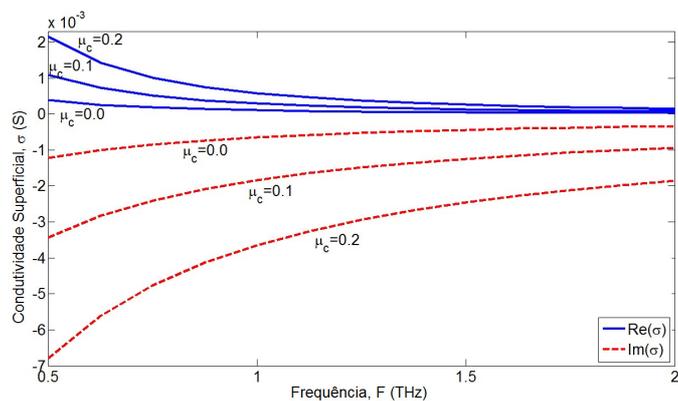


Fig. 2. Conduividade superficial do grafeno versus a frequência para diferentes valores do potencial químico μ_c .

IV. DIPOLO RETANGULAR ISOLADO

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos para a antena dipolo de grafeno retangular convencional isolado, sendo que os dados da antena são os mesmos utilizados em [13]. A impedância de entrada obtida para a antena é apresentada na Fig. 3, onde são apresentados os resultados calculados por MoM, Comsol e obtidos em [13]. A Tabela I mostra os valores das duas primeiras frequências de ressonância e as Figs. 4 e 5 mostram as distribuições de corrente superficial nestas frequências.

Os resultados da Fig. 3 e Tabela I mostram uma boa concordância dos resultados de MoM-2D com os resultados do Comsol e os de [13]. Além disso, observa-se para a primeira ressonância uma relação $L/\lambda = 0,05$ a qual é dez vezes menor que a relação de um dipolo retangular metálico de microondas ($L/\lambda = 0,5$). Isto se deve a impedância superficial do grafeno que suporta ondas plasmônicas com comprimento de onda menores que da fonte de excitação. Apesar dessa diferença, as antenas dipolo de grafeno e as convencionais (microondas) apresentam distribuição de corrente semelhantes (Figs. 4 e 5), mas com fases diferentes entre a fonte e as placas do dipolo.

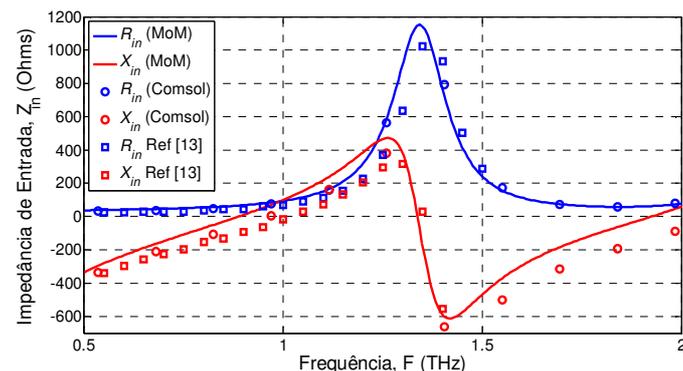


Fig. 3. Impedância de entrada do dipolo de grafeno retangular. Dados: $W = 10\mu\text{m}$, $L = 17\mu\text{m}$, $G = 2\mu\text{m}$ e $\mu_c = 0,13\text{ eV}$.

TABELA I. COMPARAÇÃO ENTRE AS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA CALCULADAS POR DIFERENTES MÉTODOS

	1ª Ressonância	2ª Ressonância
MoM	F1=0,89 THz	F2=1,34 THz
Comsol	F1=0,97 THz	F2=1,33 THz
Ref [12]	F1=1,02 THz	F2=1,35 THz

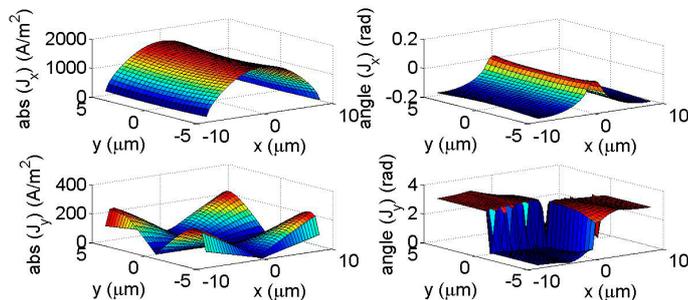


Fig. 4. Distribuição da corrente superficial do dipolo retangular de grafeno da Fig. 3 obtida na 1ª frequência de ressonância ($F1 = 0,89\text{THz}$).

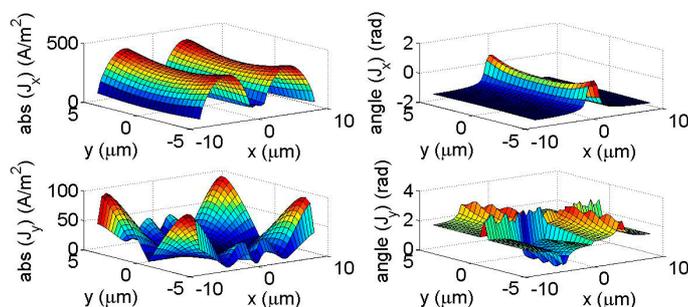


Fig. 5. Distribuição da corrente superficial do dipolo retangular de grafeno da Fig. 3 obtida na 2ª frequência de ressonância ($F2 = 1,34\text{THz}$).

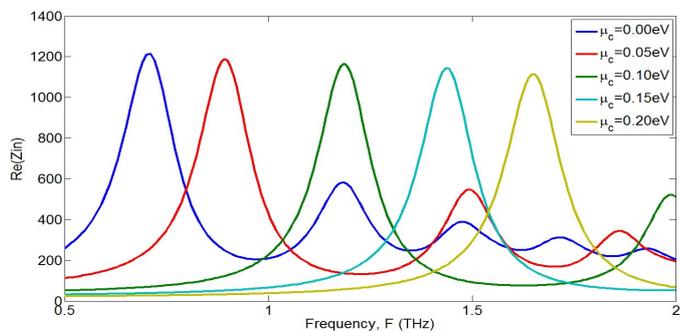


Fig. 6. Variação da impedância de entrada R_{in} versus frequência para diferentes valores de potencial químico μ_c . Tamanhos da antena $L = 17\text{mm}$ e $w = 10\text{mm}$.

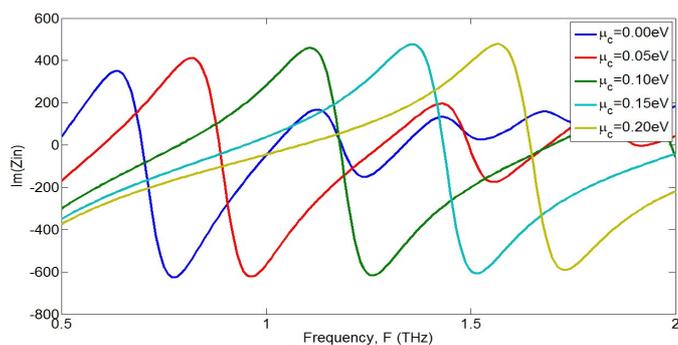


Fig. 7. Variação da reatância de entrada X_{in} versus frequência para diferentes valores de potencial químico μ_c . Tamanhos da antena $L = 17\text{mm}$ e $w = 10\text{mm}$.

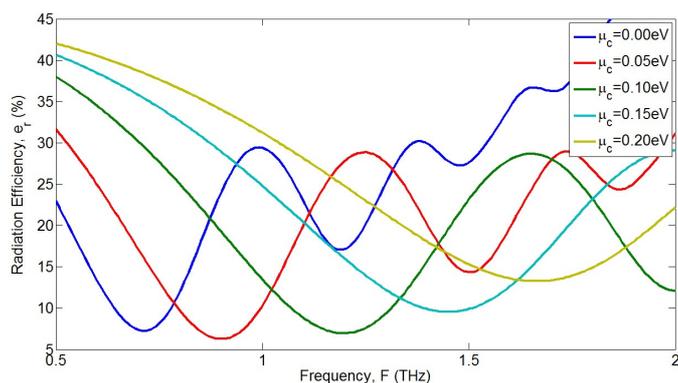


Fig. 8. Variação da eficiência de radiação e_r versus frequência para diferentes valores de potencial químico μ_c . Tamanhos da antena $L = 17\text{mm}$ e $w = 10\text{mm}$.

O efeito de diferentes valores de μ_c na impedância de entrada e a eficiência é apresentada nas Figs. 6-8. Nestes resultados a geometria da antena é fixada em $L = 17\ \mu\text{m}$ e $W = 10\ \mu\text{m}$. Quando o potencial químico é aumentado, as curvas R_{in} e X_{in} de impedância de entrada serão deslocadas para direita com menor variação nas amplitudes nestas curvas. Em outras palavras, a forma das curvas permanece quase o mesmo quando são deslocadas.

O mesmo comportamento ocorre para as curvas de eficiência de radiação da Fig. 8. Estas curvas são apenas deslocadas para a direita em que o valor da eficiência da ressonância permanece quase constante. Por exemplo, a eficiência da primeira ressonância é aproximadamente constante ($e_r \approx 25\%$) para diferentes valores de potencial químico.

V. ANTENA COMPOSTA DIPOLO-ESPIRA

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos da análise da antena composta dipolo retangular e espira circular da Fig. 1, sendo que as dimensões do dipolo planar permanecem as mesmas da antena analisada em [13], porém com o acréscimo de uma antena espira circular acima do dipolo a uma altura H . A geometria e a malha da antena composta, que consiste em $H = 1\ \mu\text{m}$, $R_1 = 0,4 \times R_2$ e $R_2 =$

$5\ \mu\text{m}$, podem ser visualizadas na Fig. 9. Para análise foram alterados os valores do potencial químico da espira em $\mu_c = 0$; 0,03; 0,07 e 0,1 eV e mantido o potencial do dipolo em $\mu_c = 0,13\ \text{eV}$.

Tanto para o dipolo retangular isolado (Seção IV) quanto para a antena composta dipolo-espira (Seção atual) foi desenvolvido um programa que utiliza o MoM-2D na realização dos cálculos. Mesmo que na seção anterior tenha-se utilizado o Comsol como forma de validar nossos resultados, a opção por usar MoM-2D deve-se ao tempo de simulação ser mais rápido (já que este simula em 2D e aquele em 3D) além do consumo de memória excessivo do Comsol.

A análise dos resultados dessas simulações permitiu concluir inicialmente que alterando os valores do potencial químico da espira obtivemos uma maior largura de banda e para os valores citados acima o que teve melhor resultado foi o $\mu_c = 0,07\ \text{eV}$.

Na Fig. 10 são apresentadas a impedância de entrada para os diferentes valores de μ_c e analisando as partes real e imaginária da impedância de entrada, concluiu-se que o melhor casamento entre impedância da carga e da linha, nos dá um valor próximo de $Z_0 = 200\ \Omega$ para impedância de linha.

A Fig. 11 apresenta os resultados do coeficiente de reflexão. Através destas curvas obtemos a largura de banda para cada um dos valores de μ_c . Os valores percentuais da largura de banda para todas as simulações com $H = 1\ \mu\text{m}$ são apresentados na Tabela II. Para calcular a largura de banda percentual a equação usada é a seguinte:

$$\%B = 200 \times \left(\frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \right) \quad (5)$$

Onde f_H é a frequência mais alta e f_L é a frequência mais baixa em -10dB.

Os resultados mostram que alterando os valores de potencial químico podemos aumentar ou diminuir a largura de banda da antena. Comparando as quatro variações de μ_c , nota-se que o melhor resultado é quando $\mu_c = 0,07\ \text{eV}$, tendo um valor de 38,15% de largura de banda. Vale comentar aqui que a largura de banda do dipolo de grafeno convencional isolado é em torno de 10%, o qual é 3 vezes maior que o melhor caso.

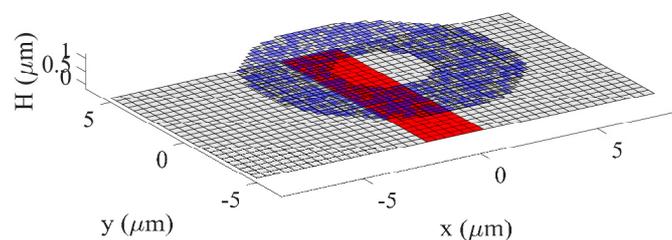


Fig. 9. Geometria e malha do MoM-2D da antena dipolo-espira de grafeno para $R_2 = 5\ \mu\text{m}$, $R_1 = 0,4 \times R_2$ e $H = 1\ \mu\text{m}$.

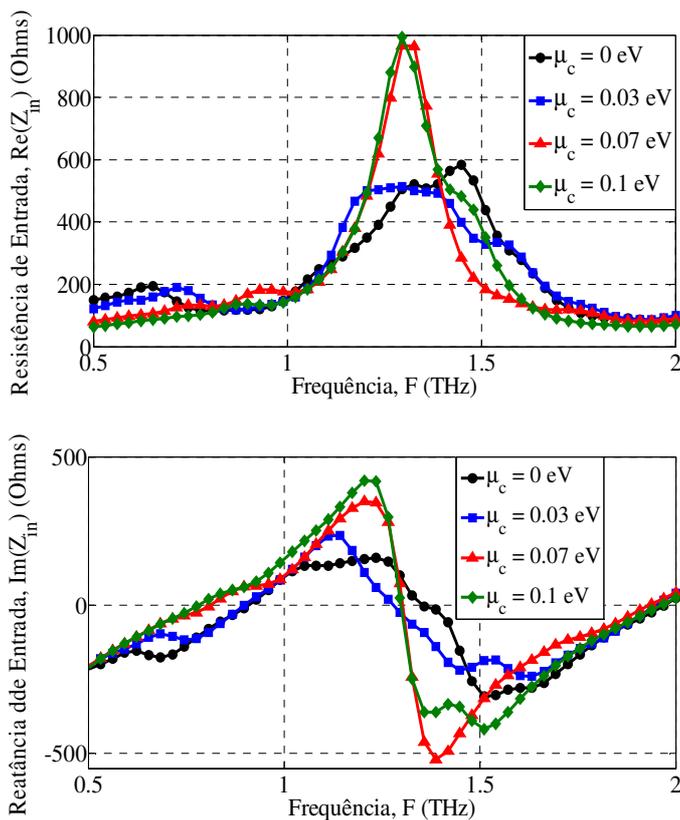


Fig. 10. Impedância de entrada da antenna composta dipolo-espira para $R_2 = 5 \mu\text{m}$, $R_1 = 0,4 \times R_2$ e $H = 1 \mu\text{m}$. (cima parte real. (baixo) parte imaginária.

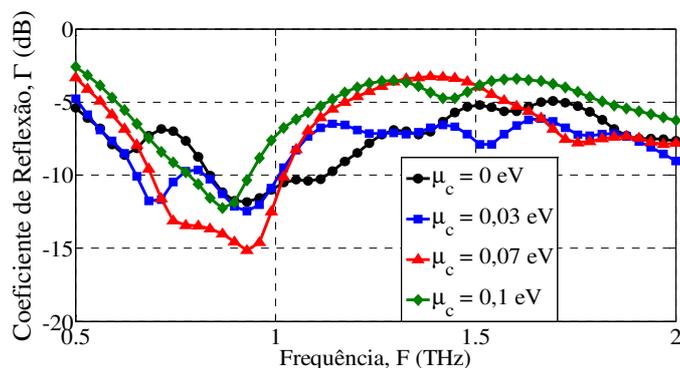


Fig. 11. Coeficiente de reflexão da antenna dipolo-espira para $R_2 = 5 \mu\text{m}$, $R_1 = 0,4 \times R_2$ e $H = 1 \mu\text{m}$.

TABELA II. LARGURA DE BANDA PERCENTUAL DA ANTENA DIPOLO-ESPIRA DE GRAFENO PARA DIFERENTES VALORES DOS RAIOS R_1 E R_2

R2	Largura de Banda Percentual			
	Potencial Químico			
	0	0,03	0,07	0,1
5 μm	30,9278%	17,1429%	38,1503%	17,3410%

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma antenna de grafeno de banda larga composta por um dipolo retangular e uma espira

circular. Os resultados mostraram que podemos controlar a largura de banda do conjunto de antenas apenas alterando o valor do potencial químico. Nesse sentido, o melhor valor obtido para o conjunto de antenas apresentado nesse trabalho foi $\mu_c = 0,07 \text{ eV}$, em que se obteve um percentual de largura de banda de 38,15%

REFERÊNCIAS

- [1] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, C. Han, Terahertz band: next frontier for wireless communications, *Phys. Commun.* 12, 16-32 (2014).
- [2] M. Koch, Terahertz communications: a 2020 vision, in: R. Miles, X. C. Zhang, H. Eisele, A. Krotkus (Eds.), *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*, in: NATO Security through Science Series, vol. 19, Springer, 2007, pp. 325–338.
- [3] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebel, T. Kurner, Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives, *IEEE Antennas Propag. Mag.* 49 (6) (2007) 24–39
- [4] J. Federici, L. Moeller, Review of terahertz and subterahertz wireless communications, *J. Appl. Phys.* 107 (11) (2010) 111101.
- [5] K.-C. Huang, Z. Wang, Terahertz terabit wireless communication, *IEEE Microw. Mag.* 12 (4) (2011) 108–116.
- [6] T. Kleine-Ostmann, T. Nagatsuma, A review on terahertz communications research, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* 32 (2011) 143–171.
- [7] H. Song, T. Nagatsuma, Present and future of terahertz communications, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 1 (1) (2011) 256–263.
- [8] T. Kürner, S. Priebe, Towards THz communications-status in research, standardization and regulation, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* 35 (1) (2014) 53–62
- [9] A. Geim and K. Novoselov, “The rise of graphene,” *Nature materials*, vol. 6, no. 3, pp. 183–91, Mar. 2007.
- [10] Z. Fang, et al, “Graphene-Antenna Sandwich Photodetector,” *Nano Letters*, pp.3808-3813, June, 2012.
- [11] F. Schwierz, “Graphene transistors,” *Nature Nanotechnology*, no. May, May 2010.
- [12] J. Perruisseau-Carrier, “Graphene for Antenna Applications - Opportunities and Challenges from Microwaves to THz”, *Loughborough Antennas & Propagation Conference*, UK, 2012.
- [13] M. Tamagnone, J. S. Gómez-Díaz, J. R. Mosig and J. Perruisseau-Carrier, “Analysis and Design of Terahertz Antennas Based on Plasmonic Resonant Graphene Sheets,” *Journal of Applied Physics*, vol. 112, Dec. 2012.
- [14] I. Llatser, C. Kremers, A. Cabellos-Aparicio, J. M. Jornet, E. Alarco and D. N. Chigrin, “Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation”, *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, vol. 10, no. 4, pp. 353-358, 2012.
- [15] G. W. Hanson, “Dyadic Green’s Function’s and Guided Surface Waves for a Surface Conductivity Model of Graphene”, *J. Appl. Phys.* 103, 064302., 2008.
- [16] B. D. Guo, L. Fang, B. H. Zhang, J. R. Gong, “Graphene Doping: A Review Beidou” *Insci. J.* 2011, 1, 80-89.
- [17] M. Y. Han, B. Ozyilmaz, Y. Zhang and P. Kim, “Energy band-gap engineering of graphene nanoribbons,” *Physical Review Letters* 98, May 2007.
- [18] K. Q. da Costa, V. Dimitriev, D. C. M. Nascimento and J. C. da S. Lacava, “Análise Numérica pelo Método dos Momentos de uma Antena de Microfita Retangular Alimentada via L-Probe,” *Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, September, 2006.
- [19] COMSOL Multiphysic 4.4, COMSOL Inc., <http://www.comsol.com>