

Design of Terahertz Antenna Based on Fractal Distribution of Graphene Layers

Dr. Alsamowal Saleh*

Dr. Taghred Hadad**

Rana Hasan ***

(Received 6 / 12 / 2022. Accepted 16 / 2 / 2023)

□ ABSTRACT □

In last few decades ,Microstrip antenna plays an important role in the field of wireless communications and fields of biomedical and military applications, due to its compact size, light weight and better ease of fabrication. Among many materials, graphene is attracting many researchers in developing Microstrip -antenna due to its unique electrical properties . In This work, we propose a design of terahertz antenna based on Cantor distribution of graphene, that provides a multi-dimensional structure, in order to generate different frequencies.

The requested antenna was designed using CST simulator and analyzed the effect of the variation of resonance patch numbers and dimensions on the antenna proprieties. The proposed antenna has agood gain and return loss at terahertz frequencies.

Keywords: Graphene , Terahertz Frequencies,Cantor Distribution. Microstrip antenna

* Professor, Department of Communications Engineering ,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Associate Professor, Department of Communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate Student (Ph.D.), Department of Communications Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University ,Lattakia, Syria.

تصميم هوائي يعمل في مجال ترددات التيراهرتز باستخدام التوزيع التجزيئي لشرائح الغرافين

د. السموعل صالح*

د. تغريد حداد**

رنا حسن***

(تاريخ الإيداع 6 / 12 / 2022. قُبِلَ للنشر في 16 / 2 / 2023)

□ ملخص □

لقد لاقى استخدام الهوائيات المطبوعة انتشارا واسعا في أواخر القرن الماضي وخاصة في تطبيقات الاتصالات الفضائية وتطبيقات الانترنت والتطبيقات الطبية وذلك لما تتمتع به من خواص إشعاعية مهمة بالإضافة إلى أنها صغيرة الحجم وتتلاءم مع الاسطح المستوية ومنخفضة التكلفة. اكتسبت الهوائيات المطبوعة القائمة على الغرافين اهتماماً كبيراً في تقنيات الاتصالات لنقل البيانات بسرعة عالية بسبب الخصائص المميزة لمادة الغرافين.

نقدم في هذا البحث تصميماً هوائياً تجزيئياً مطبوع عريض الحزمة باستخدام التوزيع التجزيئي للغرافين باعتباره الرقعة المشعة مما يقدم بنية قابلة للتوليف وذات بارامترات تصميمية متعددة وبالنتيجة توليد ترددات رنين مختلفة قابلة للتوليف في البنية المقترحة. يعمل الهوائي المقترح في مجال ترددات التيراهرتز وعند عدة مجالات ترددية مناسبة لتطبيقات الاتصالات الفضائية والتطبيقات الطبية اللاسلكية .

تم تصميم وتحليل بارامترات الهوائي والتغيرات الحاصلة على معاملات الهوائي تبعاً لتغيرات عدد وأبعاد الفتحات الرنينية المقترحة. ودراسة تأثير تغيير مادة طبقة الأساس على معاملات الهوائي باستخدام المحاكاة Cst Suit Studio بهدف الوصول إلى التصميم المناسب. الهوائي الناتج يملك خصائص جيدة جداً في مجال ترددات التيراهرتز.

الكلمات المفتاحية: هوائي تجزيئي، الغرافين، ترددات الرنين، بارامترات الهوائي.

* أستاذ - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين -اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد_ قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين -اللاذقية - سورية.

*** طالبة دكتوراه_قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين -اللاذقية - سورية

مقدمة:

تطورت تكنولوجيا الاتصالات اللاسلكية بسرعة كبيرة منذ بداية القرن الحادي والعشرين وأدى الطلب المتزايد على المعلومات ومعدات الاتصالات إلى حاجة متزايدة لمعدل بيانات عال ونظراً لمحدودية الطيف الترددي تم التوجه لاستخدام المجالات الترددية الأعلى وهي ترددات التيراهرتز التي توفر مجال ترددي عريض وبالتالي معدل بيانات عالي جداً يوفر الاحتياجات المطلوبة [1,2] ومن أجل تمكين الاستخدام الفعال لهذا المجال الترددي كان لابد من تطوير مكونات النظام المختلفة من معدلات، مرشحات، مبدلات، مضخمات وهوائيات، إضافة إلى ذلك فإن معظم المواد التقليدية المستخدمة عادة في مجالات الترددات الميكروية لا يمكنها الاستجابة بكفاءة لترددات التيراهرتز وتظهر ضياعات كبيرة في هذه الترددات كما تتطلب التطبيقات العملية مواد قابلة لإعادة التشكيل كهرومغناطيسياً والتي تشكل أساس جميع مكونات أجهزة التيراهرتز، وفي هذا السياق تم اقتراح الغرافين مؤخراً باعتباره مادة نشطة في مجال ترددات التيراهرتز [3,4,5].

يعتبر الغرافين مادة مهمة في مجال ترددات التيراهرتز بسبب خصائصه المميزة وقد تم استخدامه في تصميم المرشحات والهوائيات والمبدلات والعديد من البنى الأخرى، [5-6] تم اقتراح العديد من البنى والأجهزة القائمة على الغرافين مع تطبيقات في الإلكترونيات الضوئية والإلكترونيات النانوية في السنوات الأخيرة .

اهمية البحث وأهدافه:

توفر الهوائيات التي تعمل في نطاق THz مجالاً ترددياً أكبر بكثير من الهوائيات التقليدية. يشكل الغرافين مادة واعدة للبحث والتطوير في مجال ترددات التيراهرتز بسبب خصائصه المميزة في هذا المجال وقد تم استخدامه في تصميم المرشحات والهوائيات والمبدلات والعديد من البنى الأخرى. إن الهدف من هذا البحث هو تصميم هوائي عريض الحزمة قابل للتوليف يعمل في مجال ترددات التيراهرتز، باستخدام التوزيع التجزيئي لشرائح الغرافين. تتميز هذه البنية التجزيئية بوجود فجوات ذات أبعاد مختلفة وبالتالي ينتج عنها ترددات رنين مختلفة لعمل الهوائي. سنقوم بدراسة وتصميم وتحليل بارامترات الهوائي باستخدام المحاكاة CST للحصول على حزم ترددية مناسبة لتطبيقات الانترنت اللاسلكية والأجهزة الطبية اللاسلكية والاتصالات الفضائية وملائمة لتطوير أنظمة الاتصالات اللاسلكية.

طرائق البحث ومواده:**1- الهندسة التجزيئية:**

تتميز البنية التجزيئية بخاصة تميزها عن الهندسة الاقليدية وهي خاصة التشابه الذاتي self-similarity حيث يكون الجسم أو السطح متشابهاً ذاتياً إذا أمكن تحليله إلى نسخ أصغر متشابهة وتشبه الجسم الأصلي، وتعني الهندسة التجزيئية بالبحث في المكونات الجزئية للأشكال الرياضية والأشكال الهندسية غير النظامية وغير قابلة للوصف أو القياس باستخدام الهندسة الإقليدية ومن أهم الأمثلة عليها (سيبرينسكي- فان كوخ - شريط كانتور) [7,8] ويعرف الجسم التجزيئي بأنه غير منتظم يمكن أن يكون محدد ولكنه غير منته ويمتلك خاصية التشابه الذاتي الداخلي ويتولد

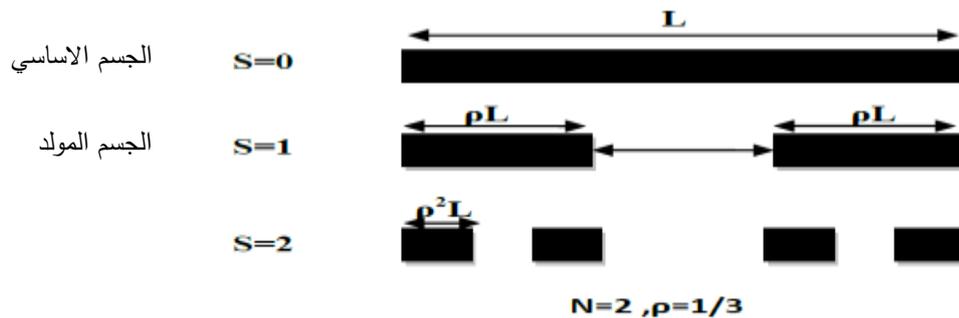
بالتجزئي، أي بتجزئة الشكل الأساسي إلى أصغر فأصغر وبشكل مشابه للجسم الأساسي ويوصف الجسم التجزيئي عن طريق مجموعة من المعاملات:

• البعد التجزيئي (Fractal dimension D): ونعبر عنه: $D = \ln(N)/\ln(1/\rho)$

ρ : عدد القطع الموجودة في الجسم التجزيئي N: تمثل درجة التجزيء.

• مرحلة التجزيء (Stag of growth S): ندعو كل مرحلة من مراحل الحصول على الجسم التجزيئي بدرجة التجزيء تبدأ هذه العملية بالمرحلة S=0 والتي تعبر عن الجسم الأساسي ثم S=1 التي تعبر عن مولد الجسم التجزيئي، وتستمر العملية إلى اللانهاية حتى تصغر قطع المادة وتتعدم ضمن الجسم .

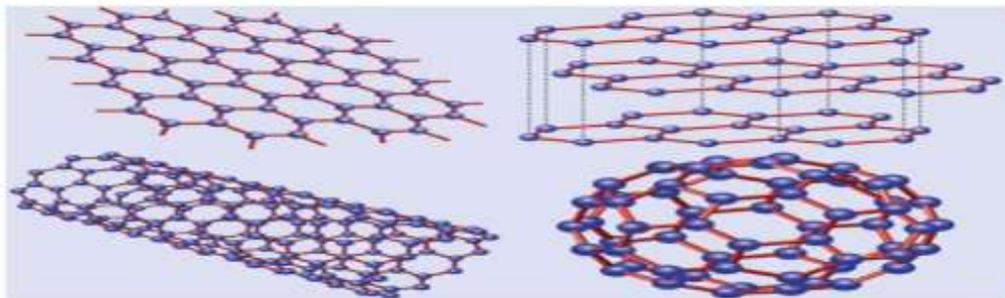
• معامل تغير أبعاد الفجوات أو الفراغات (Lacunarity a): يعبر عن كثافة توزع المادة في الجسم التجزيئي الذي يكون بأشكال مختلفة ولها نفس البعد التجزيئي D ونفس درجة التجزيء ولكنها تختلف عن بعضها البعض بتوزع المادة ضمن الشكل التجزيئي للجسم. سنعتمد في تصميمنا على الجسم التجزيئي شريط كانتور .



الشكل (1) شريط كانتور ذو البعد التجزيئي $D = \ln(2)/\ln(3)$

2-الغرافين (Graphene):

تم عزل الغرافين لأول مرة عام (2004) على يد الباحثين من جامعة مانشستر اندريه جيم ونوفوسيلوف [9] و يعد الغرافين أحد الأشكال المختلفة لعنصر الكربون كالفحم والغرافيت والألماس وهو عبارة عن مادة ثنائية البعد على هيئة طبقة رقيقة جداً" يبلغ سُمكها ذرة كربون واحدة، حيث تتوضع ذرات الكربون في هذه الطبقة بأشكال سداسية مترابطة تشبه قرص العسل.



الشكل (2): أشكال الكربون: الفلورين (0D)، الغرافين (2D) وانايبب الكربون (1D)، الغرافيت (3D)

طبيعة الروابط التكافؤية بين ذرات الكربون تمنحه العديد من الخصائص كالقوة والمرونة والشفافية وخفة الوزن والناقلية الكهربائية العالية [10,9]، كما وتتميز مادة الغرافين بفجوة طاقة معدومة وهذا مايميزها عن المواد العازلة ومواد أنصاف النواقل كما أنها تمتلك إمكانية التحكم بهذه الفجوة من خلال تطبيق جهد خارجي والذي يؤدي إلى التحكم بهذه المادة لتعمل كمادة ناقلة أو عازلة من خلال تغيير طاقة فيرمي، وهذا ماجعلها محط أنظار الباحثين في مجال تكنولوجيا النانو لناقليته الكهربائية العالية ومقدرتها على المحافظة على الطاقة من خلال المحافظة على الإلكترونات من التشتت، وتوصف الناقلية الكهربائية للغرافين كتابع للتردد استخدام معادلة كوبو [13,12,11]

$$\sigma = \sigma_{inter} + \sigma_{intra} \quad (1)$$

Intraband: ويمثل الجزء الحقيقي والذي يساهم في امتصاص الطاقة أو تبديدها بسبب الإلكترونات البينية. ويعبر

$$\sigma_{intra} = i \frac{e^2 K_B T}{\pi h^2 (\omega + i\tau^{-1})} \left[\frac{\mu_c}{K_B T} + 2 \ln \left(\exp \left(\frac{-\mu_c}{K_B T} \right) + 1 \right) \right] \quad (2)$$

Interband: تعبر عن انتقال الإلكترون بين السويات الطاقية وقيمتها صغيرة جدا عندما تكون $\hbar\omega$

أصغر بكثير من الكمون الكيميائي للغرافين ويعبر عنها بالمعادلة (3):

$$\sigma_{inter} = \frac{ie^2}{4\pi h} \ln \left(\frac{2\mu_c - (\omega + i\tau^{-1})}{2\mu_c + (\omega + i\tau^{-1})} \right) \quad (3)$$

T: على درجة الحرارة، μ_c : الكمون الكيميائي، ω : تردد الإشعاع، τ زمن الاسترخاء للإلكترونات وتختلف قيمته حسب المجال الترددي ويعطى بـ 10^{-12} و 10^{-13} من أجل ترددات THz [13,12] وفي الترددات الميكروبية [13] يأخذ قيمة 20 ps .

K_B : ثابت بولتزمان، h : ثابت بلانك، e : شحنة الإلكترون.

يمكن التحكم بالناقلية الكهربائية للغرافين من خلال الكمون الكيميائي μ_c والتي يمكن التحكم بها عن طريق جهد تحييز خارجي ويرتبط الكمون الكيميائي والجهد الخارجي بالعلاقة التالية [12]:

$$\mu_c = h\nu_f \sqrt{\frac{\pi\epsilon_s\epsilon_0 V_g}{et_s}} \quad (4)$$

ν_f : سرعة فيرمي، V_g : جهد التحييز الخارجي.

3-الهوائي المطبوع:

لاقت الهوائيات المطبوعة اهتماما واسعا نظرا لهيكلتها المستوية وتكلفتها المنخفضة وتكاملها مع الأسطح المستوية. يتكون الهوائي المطبوع من رقعة معدنية تستخدم كمشع وسماكتها مهمة بالنسبة لطول الموجة ولأبعاد الهوائي ولكن معظم المواد المستخدمة في مجال الأمواج الميكروبية لا يمكنها الاستجابة بكفاءة لترددات التيراهرتز وتبدي ضياعات كبيرة كما أنها غير قابلة لإعادة التشكيل مغناطيسيا وبالتالي لا تلبي متطلبات أجهزة التيراهرتز [14] وهنا اعتمدنا في تصميمنا على مادة الغرافين لما تتمتع به من خواص فيزيائية وكيميائية قابلة للتوليف بالإضافة إلى ناقليته الكهربائية القابلة للتوليف.

يعبر شكل الرقعة (المشع) وأبعادها الهندسية عن تردد الرنين المرغوب فيه وبالتالي فإن إحداث فتحات ضمن هذه الرقعة تؤدي إلى إحداث مجموعة من الفتحات الطنينية وبالتالي تغيير سلوك الهوائي والتردد العامل وهذا ما يضيفه استخدام الهندسة التجزيئية.

يتوضع الغرافين كرقعة مشعة على طبقة أساس [15] والتي يتحدد ارتفاعها بالشرط [15]:
 $0.003\lambda < h < 0.05\lambda$ وبالنسبة لخطوط التغذية توصل مباشرة إلى الهوائي فوق طبقة الأساس. عند حساب
 الطول الفعال للهوائي تم الأخذ بالاعتبار ما يسمى بأثر التهذيب حيث يتم زيادة طول رقعة المشع نظريا بمقدار Δl
 فيتم تمديد أبعاد الرقعة عند كل نهاية بمقدار Δl وبالتالي تبدو الرقعة ذات طول كهربائي أكبر من الأبعاد المادية
 للرقعة كما أن الطول الكلي للهوائي يتبع لنسبة عرض خط التغذية وارتفاع طبقة الأساس w/h ولثابت العازلية
 الكهربائية الفعالة لطبقة الأساس [15-16-17] والتي تعطى وفق العلاقة التالية:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

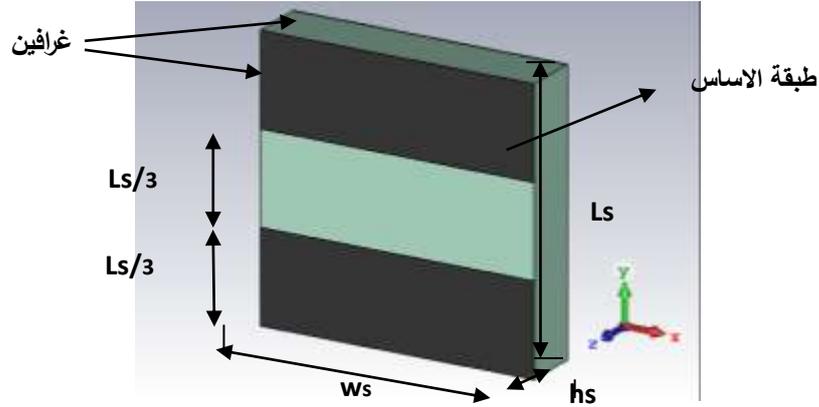
أما الطول الفعال للهوائي l_{eff} :

$$l_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (6)$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (7)$$

$$l_{\text{eff}} = l + 2\Delta l \quad (8)$$

في بحثنا هذا قمنا بتصميم الهوائي التجزيئي باستخدام مادة الغرافين كرقعة مشعة ومستوي الأرضي واستخدمنا مادة
 roger3210 الملائمة لترددات التيرا هرتز كطبقة أساس وحسب المناقشة والعلاقات السابقة في مرحلة التجزيء $s=1$
 ليعمل عند التردد 0.77THz وبحساب أبعاد الهوائي



الشكل (3) الهوائي لتجزيئي في المرحلة $S=1$

يبين الجدول (1) أبعاد الهوائي التجزيئي بوحدة μm ويعمل عند التردد 0.77THz كمرحلة أولى في التصميم :

جدول (1) أبعاد الهوائي التجزيئي

أبعاد الهوائي	μm
طول طبقة الأساس L_s	200
عرض طبقة الأساس W_s	200
ارتفاع طبقة الأساس h_s	42
طول خط التغذية L_f	66.6

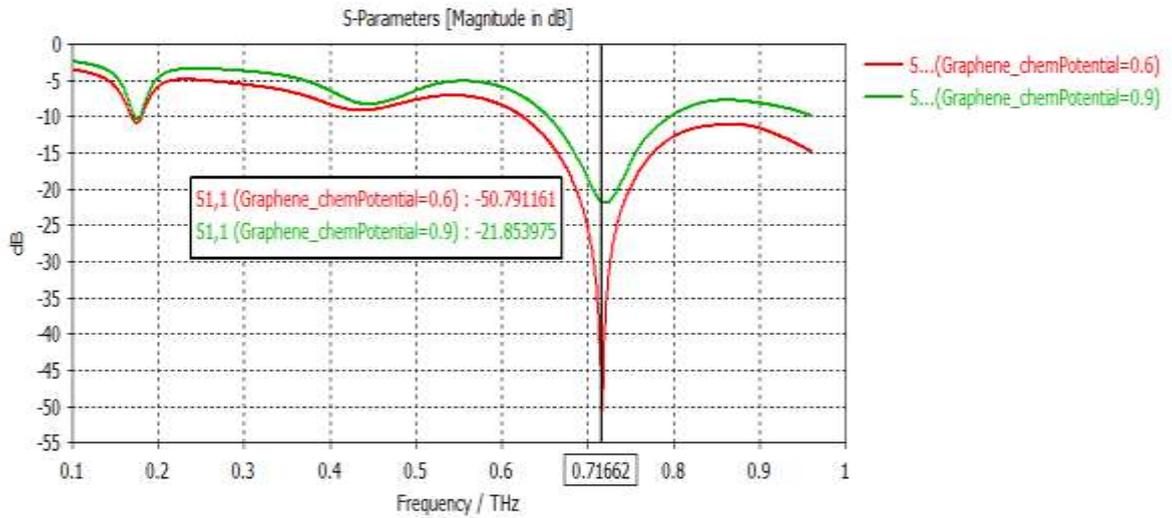
النتائج والمناقشة:

سوف نستخدم في تصميمنا برنامج CST كوسيلة للمحاكاة وباستخدام طريقة محلل مجال التردد (frequency domain solver) والتي تستخدم طريقة العناصر المحدودة (FEM:finite element methode) في حل معادلات ماكسويل وإيجاد بارامترات الهوائي المقترح مثل معامل الانعكاس ومخطط الإشعاع والريخ حيث سنقوم بتثبيت أبعاد الهوائي في مرحلة التصميم الأولى وإحداث فتحات طنينية وبأبعاد مختلفة وموزعة بشكل محدد بحيث تساهم بتشكيل عدة ترددات رنين لنفس الهوائي. الهوائي المقترح له البارامترات التالية $\epsilon_s = 10.8, h_s = 42$ حيث ϵ_s تمثل ثابت العازلية الكهربائي لطبقة الأساس وباستخدام العلاقات (8,7,5) قمنا بحساب :

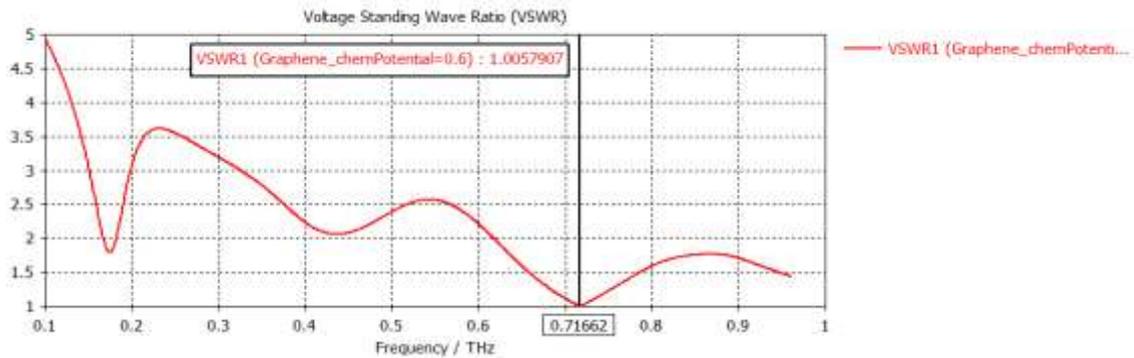
$\epsilon_{\text{reff}} = 8.512, \Delta l = 16.694\mu\text{m}, l_{\text{eff}} = 100.054\mu\text{m}$ وقمنا بدراسة بارامترات الهوائي على عدة

مراحل:

أولاً: دراسة تأثير طاقة فيرمي على سلوك الهوائي في مرحلة التجزيء $s=1$ ويظهر الشكل (4) معامل الانعكاس للهوائي التجزيئي

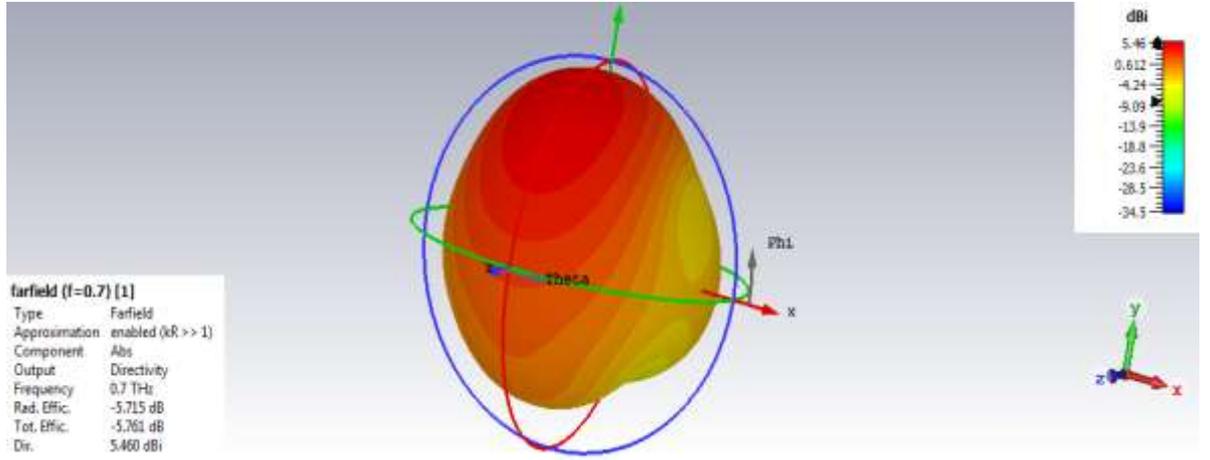


الشكل (4) تأثير طاقة فيرمي على الهوائي التجزيئي في المرحلة $s=1$

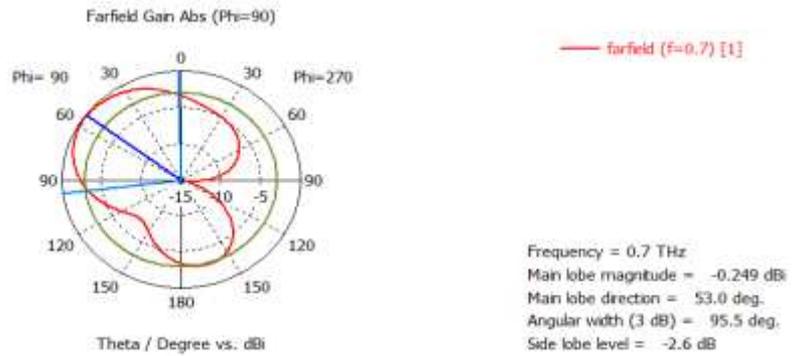


الشكل (5) VSWR عند كمون كيميائي 0.6 eV

نلاحظ أن تردد الرنين يزداد نحو الترددات الأدنى ضمن المجال الترددي نتيجة تغير الدارة المكافئة للهوائي ونلاحظ عند التردد 0.71662THz أن خسارة العودة $S_{11} = -50.79$ وبتبلغ $\text{vswr}=1.00579$ وذلك عند كمون كيميائي $\mu_c = 0.6$ وبتغير هذه القيم عند تغير قيمة الكمون الكيميائي حيث بزيادة الكمون الكيميائي تقل قيمة معامل S_{11} وتتزداد نحو الترددات الأعلى. ويكون المخطط الإشعاعي بالشكل التالي :



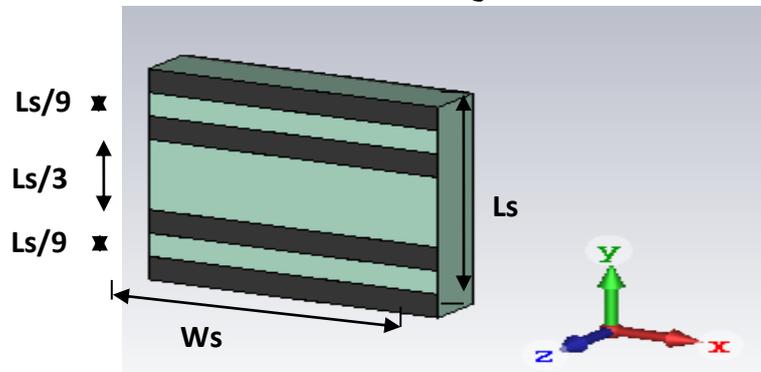
(a)



(b)

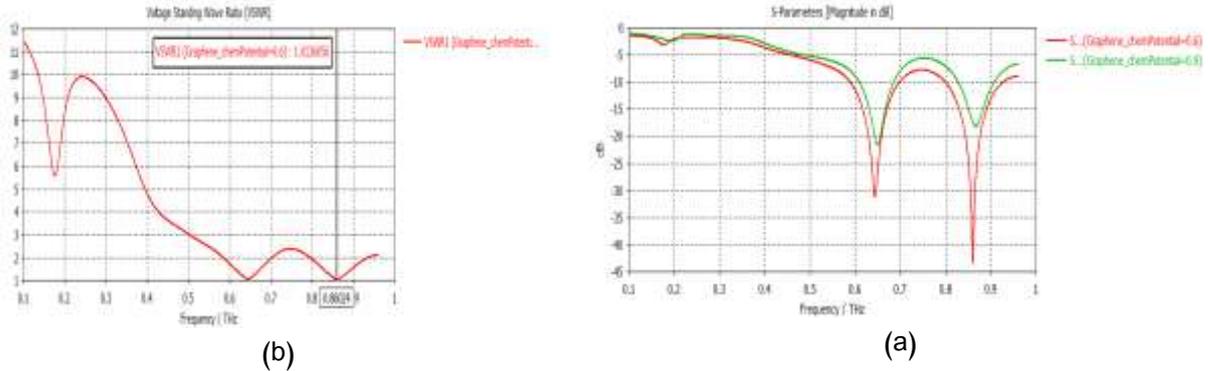
الشكل (6) -a المخطط الإشعاعي ثلاثي البعد، b المخطط الإشعاعي ثنائي الأبعاد

في المرحلة الثانية نزيد عدد الفجوات ضمن الهوائي وبأبعاد مختلفة وذلك بالانتقال إلى المرحلة التجزئية $S=2$ مع المحافظة كل كافة البارامترات الأخرى نفسها فيصبح لدينا ثلاث فتحات طنينية مختلفة الأبعاد كما هو موضح في الشكل (7)



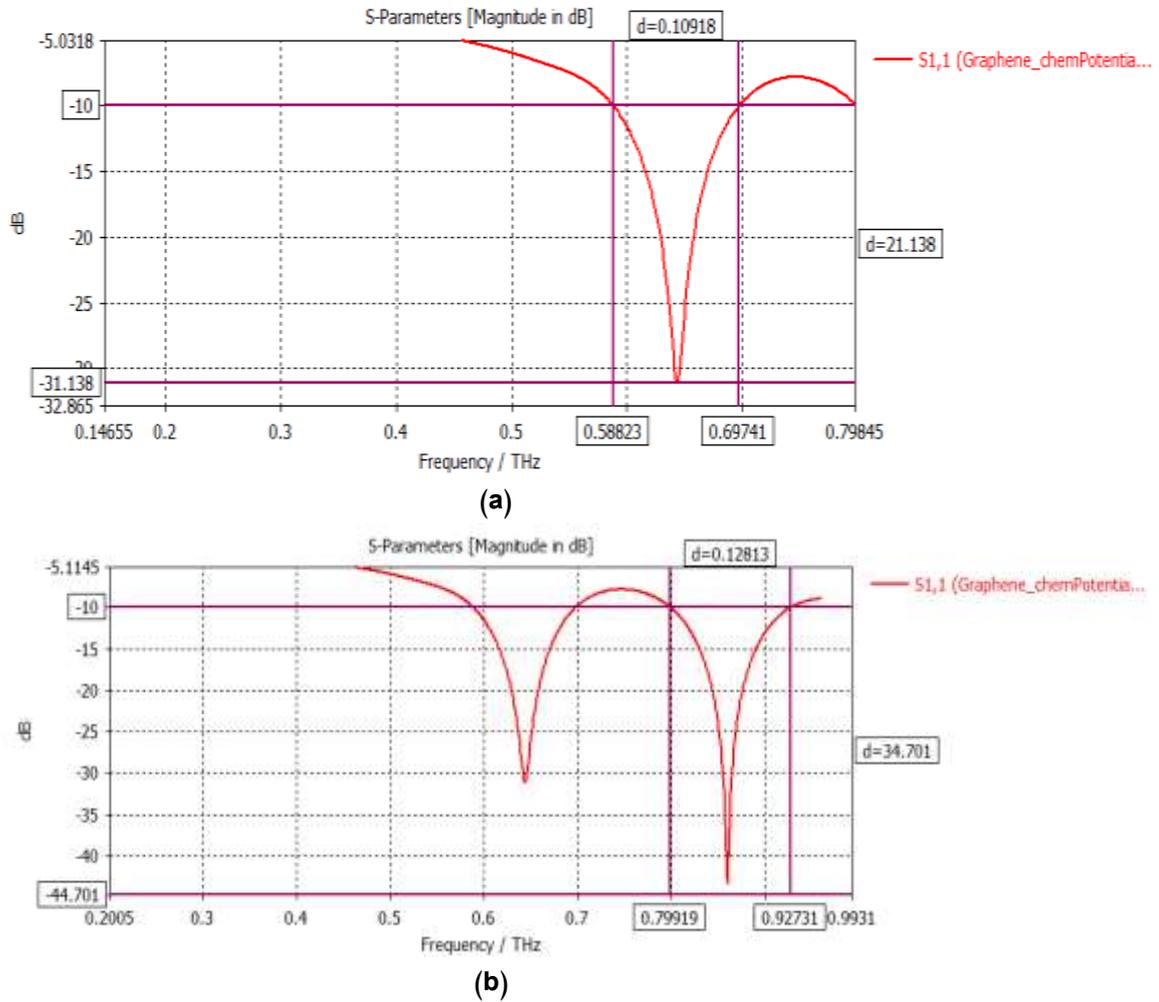
الشكل (7) الهوائي التجزئي في المرحلة التجزئية $S=2$

يظهر معامل الانعكاس لهذا الهوائي الموضح في الشكل (8) تغييرا ملحوظا في تردد الرنين بالإضافة إلى ظهور تردد رنين آخر وبالنتيجة زيادة عرض الحزمة الترددية للهوائي دون تغيير أبعاده الأساسية.



الشكل (8) a معامل الانعكاس للهوائي التجزيئي عند المرحلة $S=2$ عند $\mu_c = 0.6$ b $VSWR_b$

نلاحظ ظهور تردد رنين جديد وإزاحة ترددية نحو الترددات الأعلى وبين الشكل (9) معامل الانعكاس والحزمة الترددية عند نقاط نصف الاستطاعة ومعامل الجودة حيث يظهر حزمتين تردديتين



الشكل (9) a الحزمة الترددية الأولى b الحزمة الترددية الثانية عند نقاط نصف الاستطاعة

الحزمة الترددية الأولى:

$$f_0 = \sqrt{f_H * f_L} = \sqrt{0.58823 * 0.69741} = 0.64048 \text{ THz}, S_{11} = -31.138 \text{ dB}$$

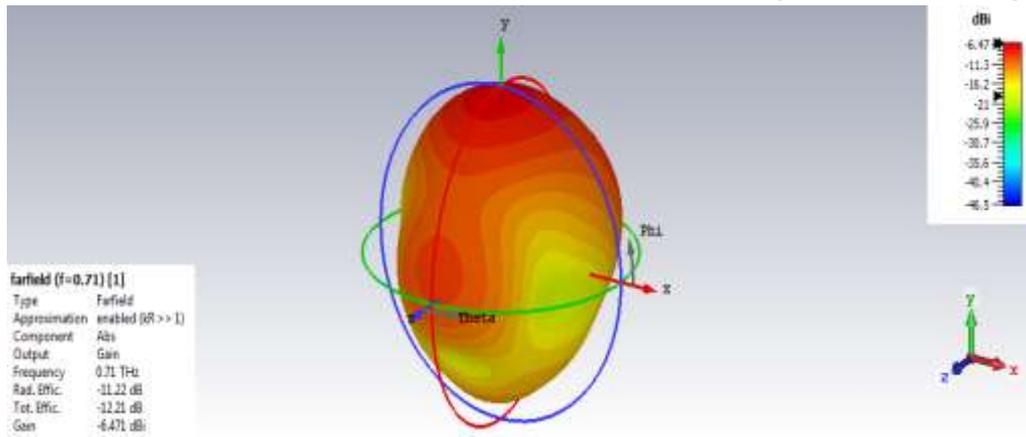
$$(band \ width \ عرض \ الحزمة) \ BW = f_H - f_L = 0.10918 \text{ THz} = 109.18 \text{ GHz}$$

$$Q = \frac{\sqrt{f_L * f_H}}{\Delta f} = \frac{f_0}{BW} = 5.87 \text{ (معامل الجودة)}$$

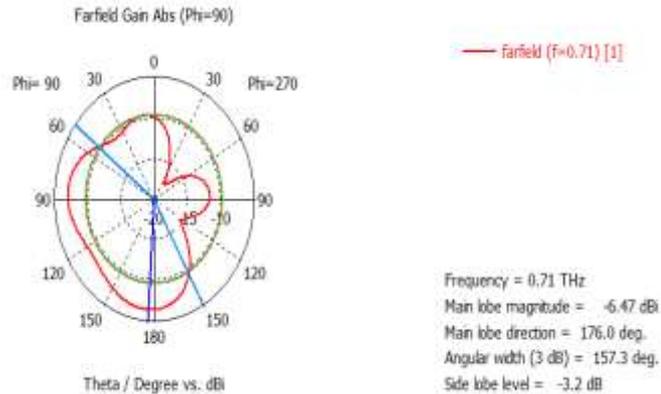
$$f_1 = \sqrt{0.79919 * 0.92731} = 0.86087 \text{ THz}, S_{11} = -43.405 \text{ dB}, BW = \text{الحزمة الثانية}:$$

0.1283 THz $Q = 6.7$ ونلاحظ أيضا تغير مخطط الاشعاع بما يتوافق مع ظهور ترددات رنين جديدة وتبلغ قيمة

الريج 6.4 كما هو موضح في الشكل (10)



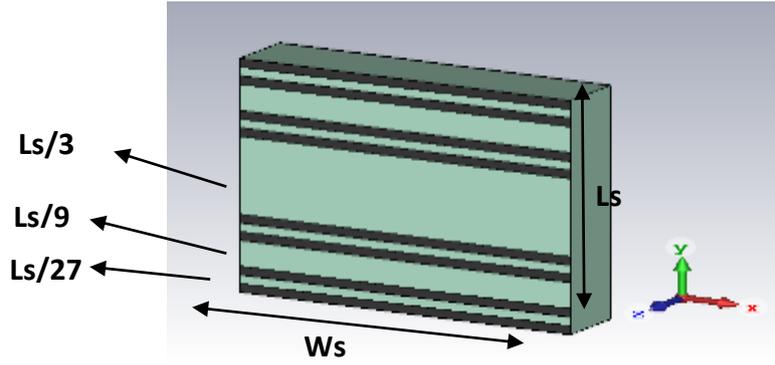
(a)



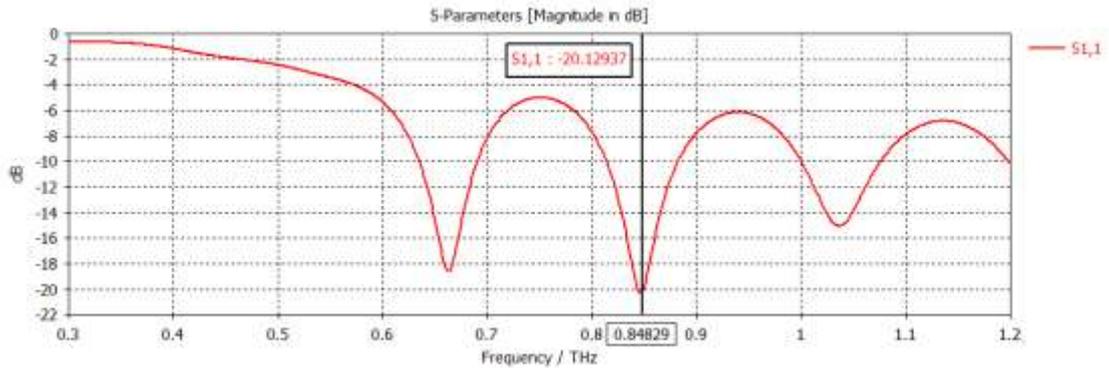
(b)

الشكل (10) a - المخطط الإشعاعي ثلاثي الأبعاد b -ثنائي الأبعاد للهوائي التجزيئي في المرحلة $S=2$

أما بالانتقال إلى المرحلة الثالثة نلاحظ زيادة عدد الفجوات المختلفة الأبعاد كما هو موضح في الشكل (11)

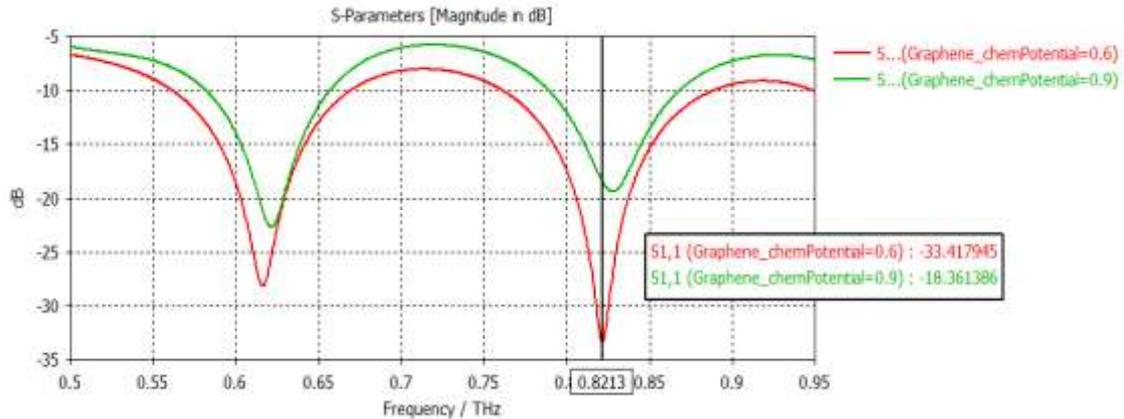
الشكل (11) الهوائي التجزيئي عند المرحلة $S=3$

نلاحظ زيادة عدد الفجوات الطنينية وأبعاد جديدة أصغر من الفجوات السابقة وهذا يؤثر على ترددات الرنين كما هو موضح في الشكل (12)

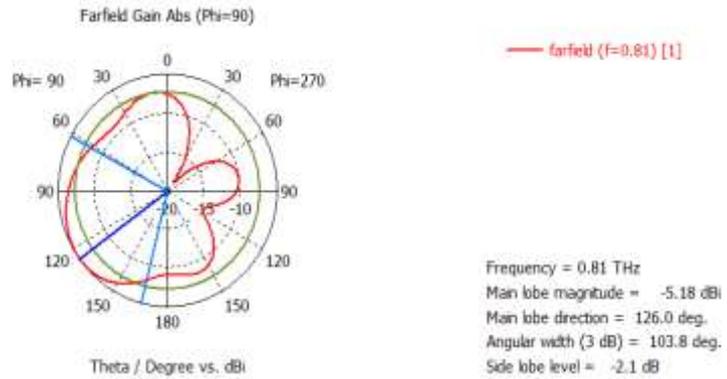
الشكل (12) معامل الانعكاس للهوائي التجزيئي عند المرحلة $S=3$

أدت الفجوات الرنينية في هذه المرحلة إلى توزيع جديد للطاقة وبالنتيجة ظهور ثلاث ترددات الرنين وتتجاوز فيها خسارة العودة حاجز -10dB وبالتالي زيادة عرض حزمة الهوائي.

قمنا بدراسة تأثير مادة طبقة الأساس على بارامترات الهوائي وذلك باستخدام مادة السيلكون وفيه ثابت العازلية الكهربائية $\epsilon_r = 11.9$ وهي من المواد الملائمة للاستخدام في مجال ترددات التيرا هرتز ويوضح الشكل (13) معامل الانعكاس للهوائي التجزيئي عند المرحلة $S=2$ وعند نفس البارامترات السابقة التي استخدمناها في التصميم .



(a)



(b)

الشكل (13) a_معامل الانعكاس للهوائي التجزيئي b_المخطط الاشعاعي ثنائي الأبعاد للهوائي التجزيئي

نلاحظ من الشكل (12) وجود نفس الحزم الترددية لكن مع إزاحة ترددية حيث نلاحظ الحزم عند تردد $f_1=0.61612\text{THz}$, $f_2=0.8213\text{THz}$ كما نلاحظ نفس المخطط الاشعاعي مع تغير قيمة الريح للهوائي ليصبح $G = 5.18\text{dB}$ وبالنتيجة يمكن توليف تردد الرنين للحصول على التردد المطلوب من خلال تغيير ثابت العازلية الفعال لطبقة الأساس.

الاستنتاجات والتوصيات:

بينت هذه الدراسة إمكانية تصميم هوائي متعدد الأبعاد باستخدام التوزيع التجزيئي لشرائح الغرافين وهذا ما أعطى عدد من الفجوات الطنينية مختلفة الأبعاد وبالتالي تغير الدارة الكهربائية المكافئة للهوائي نتج عنها عدة ترددات رنين وبالتالي زيادة عرض حزمة الهوائي بالإضافة إلى إمكانية توليف هذه الترددات عن طريق تغيير الكمون الكيميائي لمادة الغرافين والذي يؤثر بدوره على الناقلية الكهربائية للغرافين وبالتالي إزاحة تردد الرنين أو بتغيير ثابت العازلية الكهربائية الفعال لطبقة الأساس ودرسنا معاملاته الأساسية عن طريق المحاكاة CST وبالتالي إمكانية الوصول إلى التصميم المناسب للتطبيق المطلوب والخاصية الأهم التي يضيفها استخدام مادة الغرافين هو إمكانية التوليف الخارجي بعد التصميم النهائي عن طريق التحكم بالكمون الكيميائي للغرافين عن طريق جهد تحييز خارجي وهذا يمكننا من توليف الهوائي ليلائم التطبيق المطلوب بعد التصنيع ويمكن استخدام الهوائي المقترح في تطبيقات الاتصالات الفضائية والتطبيقات الطبية اللاسلكية وفي تطوير أنظمة الاتصالات اللاسلكية في مجال ترددات التيرا هرتز.

References:

- [1] Akyildiz, I. F; Jornet, J. M; & Han, C. 2014. *TeraNets: Ultra-broadband communication networks in the terahertz band*. IEEE Wireless Communications, Vol.21,No.(4), pp.130-135.
- [2] Akyildiz, I. F; Jornet, J. M; & Han, C. 2014. *Terahertz band: Next frontier for wireless communications*. Physical communication, Vol.12,pp. 16-32.
- [3] Jamshidnejad, M; Vaezzadeh, M; Soleimani, H. R; & Asadpour, S. H. 2016. *Polarized control of probe absorption in a single-layer graphene nanostructure system*. Laser Physics, Vol.26,No. 2, 025205.
- [4] Siegel, P. H. 2002. *Terahertz technology*. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol.50,No. 3,pp. 910-928.

- [5] Ghasemi, F., Razi, S., & Madanipour, K. 2018. *Single-step laser-assisted graphene oxide reduction and nonlinear optical properties exploration via CW laser excitation*. Journal of Electronic Materials, Vol. 47, No. 5, pp. 2871-2879.
- [6] Wang, J., Ma, F; & Sun, M. 2017. *Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications*. RSC advances, Vol. 7, No. 27, pp. 16801-16822.
- [7] Bandt, C. 1999. *Self-similarity and probability: Parameters describing the geometry of Cantor sets*. Bulletin of the London Mathematical Society, Vol. 31, No. 2, pp. 181-190.
- [8] TIWARI, T. 2012. *Fractal application in electrical and electronics engineering*. International Journal of engineering science & advanced technology U.S.A . Vol. 2, No. 3, pp. 406 – 411.
- [9] Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene*. science, Vol. 321, No. 5887, pp. 385-388.
- [10] Lee, C. C.; Suzuki, S; Xie, W; & Schibli, T. R.; 2012. *Broadband graphene electro-optic modulators with sub-wavelength thickness*. Optics express, Vol. 20, No. 5, pp. 5264-5269.
- [11] Wunsch, B; Stauber, T., Sols, F; & Guinea, F. 2006. *Dynamical polarization of graphene at finite doping*. New Journal of Physics, Vol. 8, No. 12, pp. 318.
- [12] Jablan. M; Hrvoje. B; and Marin. S; 2009. "Plasmonics in graphene at infrared frequencies." Physical review Vol. 80, No. 24, pp. 245435
- [13] Tan, Y. W; Zhang, Y; Bolotin, K; Zhao, Y; Adam, S; Hwang, E. H., ... & Kim, P. 2007. *Measurement of scattering rate and minimum conductivity in graphene*. Physical review letters, Vol. 99, No. 24, pp. 246803.
- [14] He, Y; Chen, Y; Zhang, L; Wong, S. W; & Chen, Z. N. 2020. *An overview of terahertz antennas*. China Communications, Vol. 17, No. 7, PP. 124-165.
- [15] Moradi, K; Pourziad, A; & Nikmehr, S. 2021. *A frequency reconfigurable microstrip antenna based on graphene in Terahertz Regime*. Optik, vol. 228, 166201.
- [16] Nissiyah, G. J; & Madhan, M. G; 2021. *Graphene based microstrip antenna for triple and quad band operation at terahertz frequencies*. Optik, vol. 231, 166360.
- [17] Davoudabadifarahani, H; & Ghalamkari, B. 2019. *High efficiency miniaturized microstrip patch antenna for wideband terahertz communications applications*. Optik, vol. 194, 163118.