

تصميم مرشح متعدد الحزم في مجال ترددات التيرا هرتز باستخدام التوزيع التجزيئي لشرائح الغرافين ضمن دليل الموجة

م.رنا حسن**

د.تغريد حداد**

د.السموعل صالح*

□ الملخص □

كان مجال ترددات THZ، المحدد عادةً بالمجال [0.1-10] THZ، لعقود من الزمن أحد أقل المناطق استكشافاً في الطيف الكهرومغناطيسي، ويرجع ذلك إلى نقص المواد والأجهزة التي تستجيب لهذه الترددات بطريقة يمكن التحكم بها. في هذا السياق، ظهر مؤخرًا الغرافين كمادة مهمة لأجهزة THZ نظرًا لخصائصها غير العادية، حيث تعد إمكانية ضبط الخصائص الفيزيائية / الكيميائية للغرافين باستخدام المعاملات الخارجية خاصية مميزة لهذه المادة والمسبب الرئيس لاستخدامها في تطوير الأجهزة الإلكترونية العاملة في مجال ترددات التيرا هرتز. تم في هذه البحث بناء نموذج رياضي لبنية تحتوي على طبقات متناوبة من الغرافين وطبقات من مادة عازلة ضمن دليل الموجة والتي تعتبر بمثابة بلورة مثالية ومن ثم نمذجته باستخدام برنامج MATLAB، وتم استكشاف تبعية فجوات النطاق الفوتوني (PBGs) لعدد الطبقات العازلة وسماكتها. ثم تم دراسة بنية مؤلفة من توزيع تجزيئي لطبقات الغرافين /عازل ضمن دليل الموجة وحساب معامل الإرسال والانعكاس ودراسة تأثير معاملات الجسم التجزيئي مثل درجة التجزيء، والبعد التجزيئي ونوع المادة المدروسة على معامل الإرسال والانعكاس، بهدف الحصول على مرشح تمرير حزمة يعمل في مجال ترددات التيرا هرتز.

الكلمات المفتاحية: ترددات التيرا هرتز، التوزيع التجزيئي، معاملات الجسم التجزيئي.

* 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

Design Multiband Terahertz Filter Based on fractal distribution of graphene layers in a waveguide

Dr .Alsamowal Saleh* Dr .Taghred Hadad** Eng. Rna Hasan ***

□ ABSTRACT □

The THz frequency band, usually defined in the 0.1–10 THz range, was for decades one of the least explored regions of the electromagnetic spectrum, mainly due to the lack of materials and devices responding to these frequencies in a controllable manner. Even today, there exists a need for devices that can efficiently manipulate THz waves.

Characteristics of two new graphene based photonic crystals are studied in detail. A structure containing alternating layers of graphene and dielectric slabs is considered as the ideal crystal.

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

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

*** Postgraduate Student ,Department of Communications Engineering ,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University ,Lattakia, Syria

The dependency of the photonic band gaps (PBGs) to the dielectric layer thickness and the period number is explored at first step. Then a fractal structure containing Cantor distribution of graphene layers/ dielectric layers are studied and calculated transmission and reflection coefficient, and study of the effect of fractal factors such as stage of growth, fractal dimension and the type of material studied on the transmission and reflection coefficient. In order to obtain a terahertz filter.

Keywords: Graphene , Thz Frequencies, Cantor Distribution, Transmission Coefficient

1- مقدمة

يقدم مجال الـ Terahertz حزمًا¹ ترددية أعلى بكثير من ترددات الموجات المليمترية الحالية (mmWave)، ولكن نظرًا لخصائص هذه الترددات هناك العديد من التحديات فيما يتعلق بتصميم نظام الاتصالات العامل في هذا المجال منها ضياع الامتصاص العالي وضياع الانتشار بالإضافة إلى أنه من الضروري تصميم أجهزة (مثل أجهزة الإرسال والاستقبال، والهوائيات، والمرشحات) من أجل توليد واكتشاف الإشارات عالية التردد [2,1]، حيث تنشأ صعوبة توليد الإشارات عند ترددات THz (أو ما يعرف باسم فجوة THz) من أن المجال الترددي مرتفع جدًا بالنسبة للمذبذبات التقليدية ومنخفض جدًا بالنسبة لبواعث الفوتونات الضوئية). هذه التحديات كان من الصعب للغاية التغلب عليها حتى وقت قريب ، لكن أصبح من الممكن حلها مع التقدم في أبحاث الغرافين، حيث إن قابلية توليف الخصائص الفيزيائية / الكيميائية للغرافين باستخدام بعض المعاملات جعلت منه مادة واعدة للاستخدام في مجال ترددات التيراهرتز [3,4,5]. على سبيل المثال ، من الممكن ضبط الناقلية السطحية للغرافين عن طريق تحيز خارجي ، ومجالات مغناطيسية أو حتى إضافة إشابة مناسبة [6,7,8]. علاوة على ذلك ، فقد ثبت أن الخصائص البصرية لشريحة الغرافين مثل امتصاصها تعتمد بشدة على درجة الحرارة التي تغير بدورها السماحية الكهربائية الفعالة . للاستفادة من هذه المزايا ، تم اقتراح العديد من البنى والأجهزة القائمة على الغرافين مع تطبيقات في الإلكترونيات الضوئية والإلكترونيات النانوية في السنوات الأخيرة [5,9].

2- هدف البحث:

يعتبر الغرافين مادة مهمة في مجال ترددات التيراهرتز بسبب خصائصه المميزة وقد تم استخدامه في تصميم المرشحات والهوائيات والمبدلات والعديد من البنى الأخرى. تستخدم مصفوفة النقل (Transfer matrix method) في دراسة معاملات الإرسال

والانعكاس وتتميز ببساطتها ودقتها وإمكانية استخدامها في البنى المختلفة بما في ذلك البلورات المثالية والتي فيها خلل والبنى غير متماثلة الخواص.

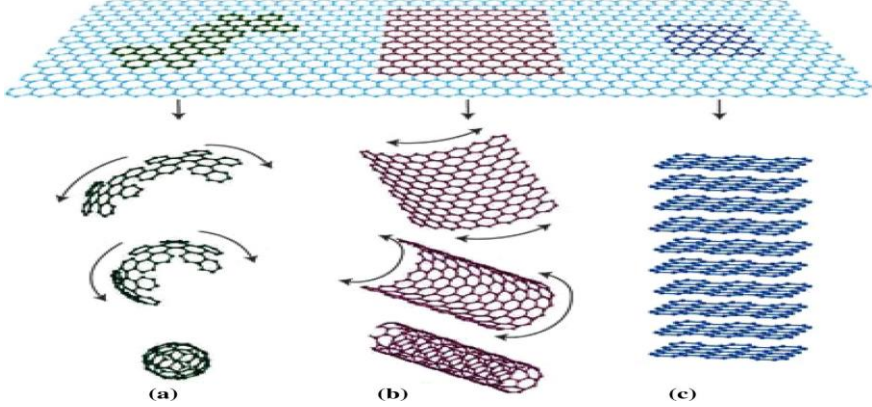
يتناول البحث دراسة خصائص الغرافين في مجال ترددات التيراهرتز ودراسة وتحليل معاملي الانعكاس والارسال للتوزع الدوري لشرائح الغرافين/عازل ضمن دليل الموجة كمرحلة أولى ثم التوزع التجزيئي كمرحلة ثانية ضمن دليل الموجة وذلك من خلال تطوير العلاقات الرياضية الخاصة بالتوزع التجزيئي لشرائح الغرافين /عازل ضمن دليل الموجة وتحليل النتائج للوصول إلى تصميم مرشح بمعاملات وخصائص جديدة والاستفادة منها في تطبيقات مجال ترددات التيراهرتز

3- طرائق البحث وأدواته :

3-1 الغرافين (Graphene):

تم عزل الغرافين لأول مرة عام (2004) على يد الباحثين من جامعة مانشستر اندريه جيم ونوفوسيلوف [10] وقد حصلوا على جائزة نوبل في الفيزياء عن أبحاثهما الرائدة في مادة الغرافين ثنائية البعد. يشكل الغرافين مادة واعدة للبحث والتطوير لما يقدمه من خصائص ومزايا رائعة ويعتبر أحد الأشكال المختلفة لعنصر الكربون (0D,1D,2D,3D) كالفحم والغرافيت والألماس، وهو عبارة عن مادة ثنائية البعد على هيئة طبقة رقيقة جدا" يبلغ سُمكها ذرة كربون واحدة، حيث تتوضع ذرات الكربون في هذه الطبقة بأشكال سداسية مترابطة تشبه قرص العسل. طبيعة الروابط التكافؤية بين ذرات الكربون تمنحه العديد من الخصائص كالقوة والمرونة والشفافية وخفة الوزن والناقلية الكهربائية العالية [11,10] يضاف إلى ذلك أنه يتميز بفجوة طاقة مساوية للصفر مع إمكانية التحكم بهذه الفجوة عن طريق تطبيق جهد خارجي وبالتالي تغيير طاقة فيرمي وهذا ما يعطي إمكانية للتحكم بهذه المادة لتعمل كناقل أو عازل.

تصميم مرشح متعدد الحزم في مجال ترددات التيرا هرتز باستخدام التوزيع التجزيبي لشرايح الغرافين
ضمن دليل الموجة

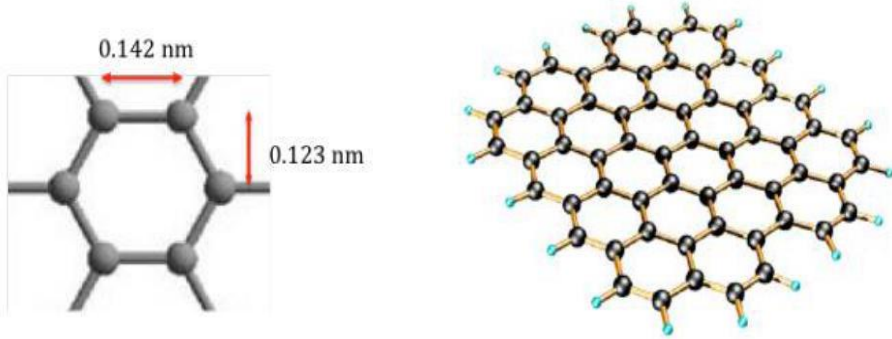


الشكل (1): أشكال الكربون، a: الفلورين (0D)، b: أنابيب الكربون (1D)، c: الغرافيت (3D)

3-1-1 خواص الغرافين:

يقع عنصر الكربون في الجدول الدوري فوق السيلكون فهو يمتلك أربع إلكترونات تكافؤ ويوجد بعدة أشكال صفر البعد (الفلورين) وأحادي البعد (أنابيب الكربون) ثنائي البعد (الغرافين) ثلاثي البعد (الغرافيت والألماس). الغرافيت هو عبارة عن مادة تتكون من عدة طبقات من الغرافين المتباعدة عن بعضها البعض بـ 0.3nm ومرتبطة معا بقوى فان دير والس والضعيفة، هذا الارتباط الضعيف يسمح لهذه الطبقات بالانزلاق عن بعضها البعض بسهولة وهذا ما يعطي أقلام الرصاص قدرتها على الكتابة. أما الغرافين فهو عبارة عن شريحة ثنائية البعد ذات هيكل سداسي من ذرات كربون بمسافة فاصلة 0.142nm وتشبه قرص العسل، كما هو موضح في الشكل (2)، تشكل كل ذرة كربون 3 روابط مع الذرات المجاورة الأقرب إليها تعرف هذه الروابط بـ σ وهي موجهة نحو الذرات المجاورة وتتكون من ثلاث إلكترونات تكافؤ $[11,10]$ ، روابط الكربون-كربون التشاركية تكافئ الروابط التي تجمع الذرات في الألماس، مما يعطي الغرافين خصائص ميكانيكية وحرارية مماثلة للألماس، لا يشارك الإلكترون التكافؤ الرابع بهذه الرابطة التشاركية، فهو في المدار الطاقى p والمستوي z أي في المدار $2Pz$ المرتبط عمودياً على شريحة الغرافين مشكلة نطاقاً "موصلاً". يتمتع الغرافين بحركية عالية، شفافية ومرونة عالية، قوة ميكانيكية عالية واستقرار بيئي عالٍ مناسب تماماً لاستخدام هذه المادة

لتطبيقات الهوائي. تم الحصول على الغرافين أحادي الطبقة من الجرافيت متعدد الطبقات لأول مرة باستخدام تقنية التقشير الميكانيكي وقد تم البحث و دراسة العديد من التقنيات الأخرى مثل التقشير الكيميائي، والطور السائل والتقشير الحراري، وترسيب البخار الكيميائي، والتوليف على SiC، وغيرها من التقنيات الأخرى للحصول على الغرافين.



الشكل (2): بنية الغرافين

2-3 الناقلية الكهربائية للغرافين:

يتم استخدام معادلة كوبو للتعبير عن ناقلية الغرافين [14,13,12] كتابع للتردد وتتكون ناقلية الغرافين من جزأين

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

intraband: ترتبط بالتشنت الناتج عن الشوائب، العيوب والفرونات والالكترونات وتعتبر عن الانتقال الداخلي للاكترونات ويمثل الجزء الحقيقي والذي يساهم في امتصاص الطاقة أو تبديدها بسبب الإلكترونات البينية. ويعبر عنه بالمعادلة (2):

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

interband: تعبر عن انتقال الالكترون بين السويات الطاقية أو المجالات وقيمتها صغيرة جدا عندما يكون جداء التردد الزاوي بثابت بلانك $\hbar\omega$ أصغر بكثير من الكمون الكيميائي للغرافين ويعبر عنها بالمعادلة (3):

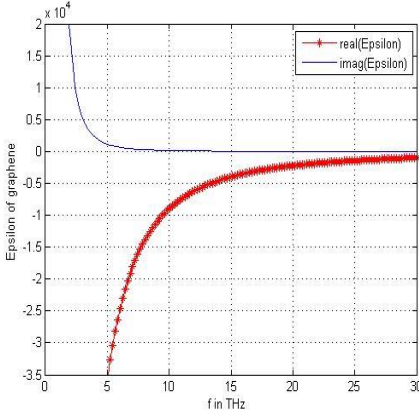
$$\sigma_{inter} = \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \left(\frac{2\mu_c - (\omega + i\tau^{-1})}{2\mu_c + (\omega + i\tau^{-1})} \right) \quad (3)$$

T : على درجة الحرارة و μ_c : الكمون الكيميائي و W : تردد الاشعاع و τ زمن الاسترخاء للاكترونات وتختلف قيمته حسب المجال الترددي ويعطى بـ (10^{-12} و 10^{-13} ps) من أجل ترددات [14,13] THz وفي الترددات الميكروبية [14] يأخذ قيمة 20 ps، K_B : ثابت بولتزمان ، h : ثابت بلانك ، e : شحنة الالكترون.

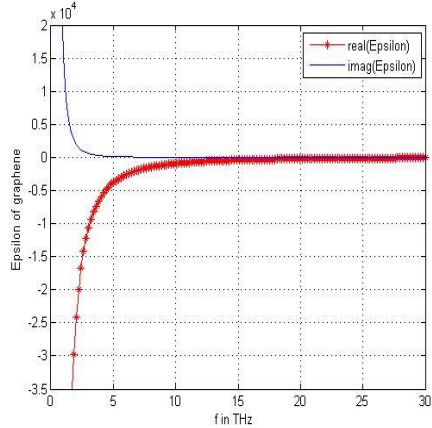
تعطى السماحية الكهربائية لطبقة مفردة من الغرافين [15]

$$\epsilon_g = \epsilon_0 + i \frac{\sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega d_g} \quad (4)$$

وتصبح علاقة السماحية الكهربائية (5) $\epsilon_g = \epsilon_m + i \frac{\sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega d_g}$ [17,16] في حال وجود طبقة الغرافين مرسبة على طبقة مضيئة (SIO₂, CSI, EO). يوضح الشكل (4,3) الجزء الحقيقي والجزء التخيلي للسماحية الكهربائية للغرافين في مجال ترددات التيرا هرتز عند قيم مختلفة للكمون الكيميائي للغرافين.



الشكل (4): الجزء الحقيقي والتخيلي
للسماحية الكهربائية للغرافين عند
 $\mu_c = 0.9 e.v$

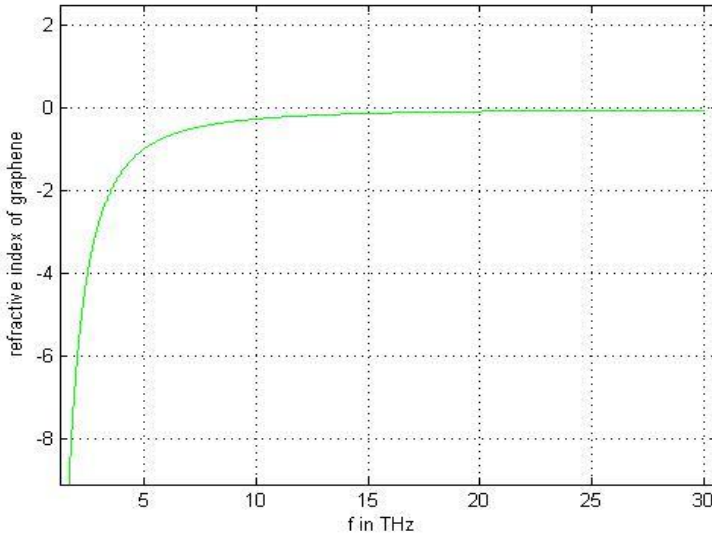


الشكل (3): الجزء الحقيقي والتخيلي
للسماحية الكهربائية للغرافين عند
 $\mu_c = 0.1 e.v$

تعطى قرينة الانكسار لشريحة الغرافين بالعلاقة $n_g = \sqrt{\epsilon_g}$ حسب المراجع [19,18] وتعطى قرينة الانكسار للغرافين حسب المراجع [21,20] بالعلاقة:

$$n_g = \sqrt{\frac{\text{real}(\epsilon_g(\omega)) + \sqrt{[\text{real}(\epsilon_g(\omega))]^2 + [\text{imag}(\epsilon_g(\omega))]^2}}{2}} \quad (6)$$

ويبين الشكل (5) علاقة قرينة الانكسار للغرافين كتابع للتردد ضمن المجال الترددي [0.1,30] THz وهنا يسلك الغرافين سلوك المواد سالبة قرينة الانكسار أو LHM (Left Hand Material).



الشكل (5): قرينة انكسار الغرافين في مجال ترددات [0-30]THz

3-3 الهندسة التجزئية (الفراكتالية):

اقترح ماندلبروت في عام 1975، كلمة فراكتال (fractal) للدلالة على منظومات ذات تشابه ذاتي والتي تمتلك بعداً غير محدد وغير قابلة للقياس، حيث يكون الجسم أو السطح متشابهاً ذاتياً ويمكن تحليله إلى نسخ أصغر من نفسه وتشبه الجسم الاساسي، وقد اشتقت كلمة فراكتال من الكلمة اللاتينية (fractus) والتي تعني كسرة أو جزء وقد استخدمت لتوصيف وشرح العديد من الظواهر الطبيعية فمثلا اعتبر ماندلبروت - Mandelbrot -

أن السحب ليست كرات وأن الجبال ليست مخاريط والسواحل ليست أنصاف دوائر وبالتالي ساهم باكتشاف نوع جديد من التركيب الهندسي أطلق عليه الهندسة التجزيئية أو الفركتال (Geometry Fractal) حيث تعنى بالبحث في المكونات الجزئية للأشكال الرياضية والأشكال الهندسية غير النظامية وغير قابلة للوصف أو القياس باستخدام الهندسة الإقليدية ومن أهم الأمثلة عليها (سبيرينسكي - فان كوخ - شريط كانتور) والتي تتمتع بمجموعة من الخصائص الرياضية [22] وهي :

- خاصية التشابه الذاتي self-similarity
- خاصية البعد التجزيئي أو الفركتالي fractal dimension

3-3-1 الجسم التجزيئي أو التكميري :

هو جسم غير منتظم يمكن أن يكون محدد ولكنه غير منته [23]، يمتلك خاصية التشابه الذاتي الداخلي ويتولد بالتجزئ، أي بتجزئة الشكل الأساسي إلى أصغر فأصغر وبشكل مشابه للجسم الأساسي ويوصف الجسم التجزيئي عن طريق مجموعة من المعاملات:

- البعد التجزيئي (Fractal dimension D): هو معامل أساسي للجسم التجزيئي

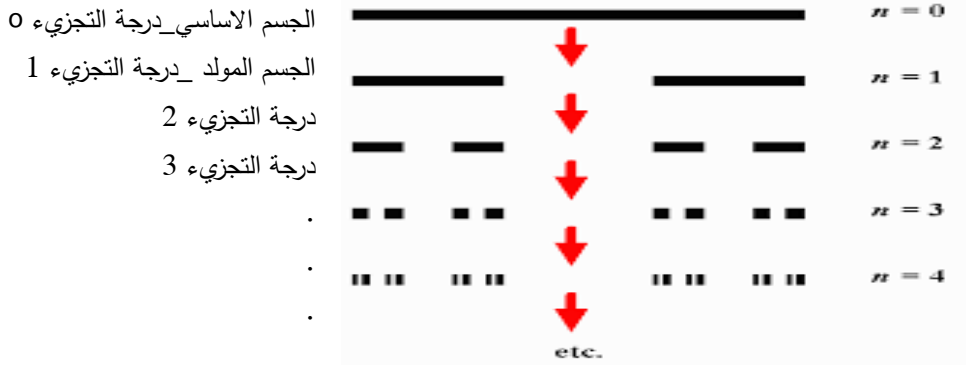
$$D = \ln(N) / \ln\left(1/\rho\right) \quad (7) \quad \text{ونعبر عنه بالقانون:}$$

ρ : تمثل درجة التجزيء و N : عدد القطع الموجودة في الجسم

التجزيئي

- مرحلة التجزيء (Stag of growth S): تتم العملية التكرارية المستخدمة في الحصول على الجسم التجزيئي على عدة مراحل، كل مرحلة تدعى درجة تجزيء 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 توزع الفراغات أو الفجوات في الجسم التجزيئي، وهذا المعامل 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.



الشكل (6): شريط كانتور

4-النتائج و المناقشة :

يوجد عدة طرائق لدراسة ومحاكاة المسائل الهندسية الكهرومغناطيسية منها طريقة الفروق المحدودة في المجال الزمني (FDTD/FDFD) [24] ، مصفوفة النقل (Transfer matrix method/TMM) [25] وطريقة Green Function Method GFM) لقد جذبت طريقة مصفوفة النقل مزيداً من الاهتمام وتم تطبيقها على نطاق واسع لدراسة البنى المختلفة بسبب بساطتها ودقتها وإمكانية استخدامها في البنى المختلفة بما في ذلك البلورات المثالية والتي فيها خلل والبنى غير متماثلة الخواص، حيث تأخذ في الاعتبار العديد من الظواهر الفيزيائية الهامة مثل الانعكاسات من الواجهات وحالة الاستقطاب للموجة المنتشرة. يمكن توسيع TMM بسهولة إلى أي بنية معقدة متعددة الطبقات مع تعقيد حسابي أقل بكثير مقارنة بالطرق الأخرى مثل طرق العناصر المحدودة أو طريقة الفروق المحدودة في المجال الزمني (FDFD) [27]. في هذا البحث تم اقتراح هياكل جديدة ذات استجابة في

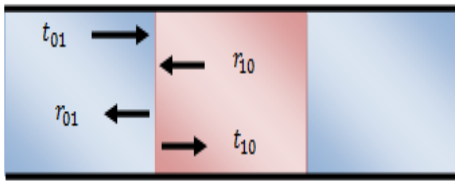
مجال ترددات THZ. تم اختيار طبقة من الغرافين المرسبة على ثاني أكسيد السيلكون كأحد المكونات الأساسية للبلورة وثاني أكسيد السيلكون (SiO_2) هو الطبقة الرئيسية الأخرى ويمكن اختيار البوليمر (بدلاً من ثاني أكسيد السيلكون). استخدمنا الطريقة التكرارية لدراسة وتحليل كل من معامل الإرسال والانعكاس الناتجين عن البنية الدورية والبنية التجزيئية المقترحة وذلك بالاعتماد على العلاقات الرياضية الخاصة بتوزيع شرائح (الغرافين / عازل) ضمن دليل الموجة والتي تعتمد آلية التشابه الداخلي في حساب كل من علاقة الانعكاس R والارسال (النقل) T حيث يتم حساب معاملي الإرسال (النقل) والانعكاس لكل نمط من أنماط الأمواج المنتشرة ضمن دليل الموجة بتكرار الحل الرياضي بناءً على التكرار في الجسم التجزيئي ويتم ذلك على خطوتين :

1. يتم الحساب بالإعتماد على مرحلة التجزيء S :حيث تعتبر البداية عند

$$S=0$$

2. يتم الحساب بالإعتماد على عدد المقاطع المتكررة N في المرحلة S

قمنا بالبداية بتطوير علاقات معاملي الارسال (النقل) والانعكاس عند الحدود الفاصلة بين الطبقات :



$$t_{01} = \frac{2n_d}{n_d - n_g} = t \quad (8)$$

$$t_{10} = \frac{-2n_g}{n_d - n_g} = t' \quad (9)$$

$$r_{01} = \frac{n_g + n_d}{n_d - n_g} = r \quad (10)$$

$$r_{10} = \frac{-n_g - n_d}{n_d - n_g} = -r \quad (11)$$

ثم نقوم بإيجاد المعادلات الخاصة بحساب معاملي الإرسال والانعكاس للشريط الكانتوري وبالاعتماد على مرحلة التجزيء S:

$$R_{(0,\rho^S L)} = \frac{r_{01} + (t_{10} t_{01} - r_{01} r_{10}) r_{10} e^{j\gamma_{1M} \rho^S L}}{1 - r_{10} r_{01} e^{j2\gamma_{1M} \rho^S L}} \quad (12) \quad \text{معامل الانعكاس:}$$

$$T_{(0,\rho^S L)} = \frac{t_{10} t_{01} e^{j\gamma_{1M} \rho^S L}}{1 - r_{10} r_{01} e^{j2\gamma_{1M} \rho^S L}} \quad (13) \quad \text{معامل الارسال:}$$

a : معامل تغير أبعاد الفجوات أو الفراغات (lacunarity) ، γ : معامل الانتشار

وتصبح المعادلات الخاصة بحساب معاملات الإرسال والانعكاس للشريط الكانتوري والمعتمدة على عدد المقاطع المكررة N ضمن المرحلة S:

معامل الانعكاس :

$$R_N[x, y, \alpha_N] = x + \frac{y^2 R_{N-1}[x, y, \alpha_{N-1}] e^{j2\gamma_{0M} \alpha_N L}}{1 - x R_{N-1}[x, y, \alpha_{N-1}] e^{j2\gamma_{0M} \alpha_N L}} \quad (14)$$

معامل الارسال (النقل):

$$T_N[x, y, \alpha_N] = \frac{y T_{N-1}[x, y, \alpha_{N-1}] e^{j2\gamma_{0M} \alpha_N L}}{1 - x R_{N-1}[x, y, \alpha_{N-1}] e^{j2\gamma_{0M} \alpha_N L}} \quad (15)$$

وتعطى الشروط الابتدائية عندما N=0 :

$$T_0[x, y, 0] = y$$

$$R_0[x, y, 0] = x$$

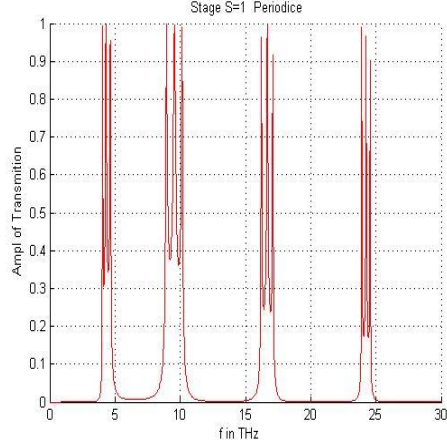
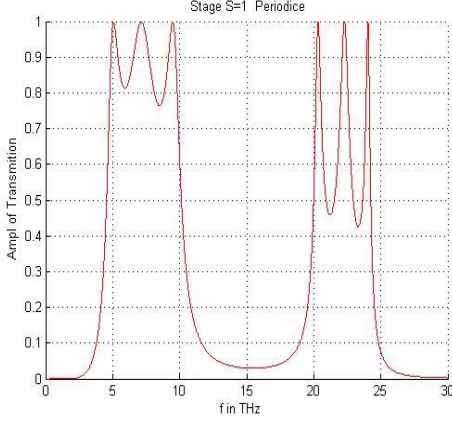
- المرحلة الأولى (البنية الدورية) : قمنا بدراسة معامل الارسال للبنية الدورية المؤلفة من شرائح من الغرافين واوكسيد السيلكون الموزعة بشكل دوري ضمن دليل الموجة في المجال الترددي [0-30]THz.



الشكل (8): البنية الدورية من شرائح الغرافين /عازل (أوكسيد السيلكون)

تصميم مرشح متعدد الحزم في مجال ترددات التيرا هرتز باستخدام التوزيع التجزيبي لشرائح الغرافين
ضمن دليل الموجة

أولاً: قمنا بدراسة تأثير عدد الشرائح المتوضعة ضمن دليل الموجة على معامل الإرسال فكانت النتائج كالآتي:

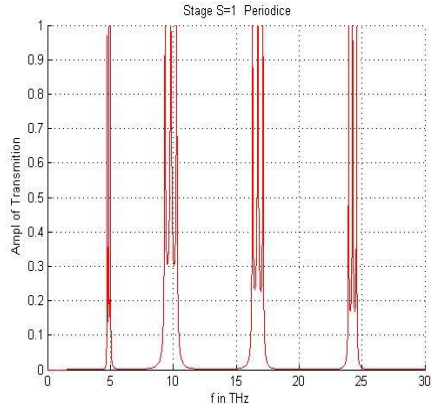
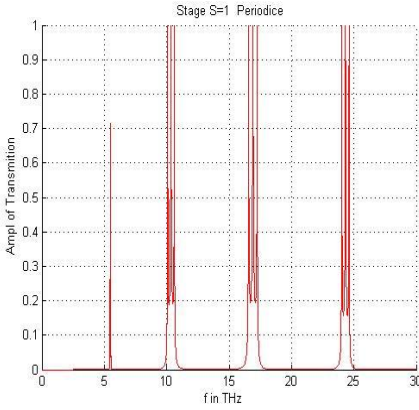


الشكل (10): معامل الإرسال لبنية مؤلفة من (17) طبقات من الغرافين /أكسيد السيلكون وعند $\mu_c = 0.1 e.v$

الشكل (9): معامل الإرسال لبنية مؤلفة من (7) طبقات من الغرافين /أكسيد السيلكون وعند $\mu_c = 0.1 e.v$

نلاحظ انه بزيادة عدد الشرائح يزداد عرض حزم الإرسال وتنتزح نحو الترددات الأعلى وذلك عند أخذ نفس البارامترات .

ثانياً: قمنا بدراسة تأثير الكمون الكيميائي μ_c على معامل الإرسال للبنية الدورية السابقة المؤلفة من 7 شرائح من الغرافين /أكسيد السيلكون فكانت النتائج على الشكل التالي:

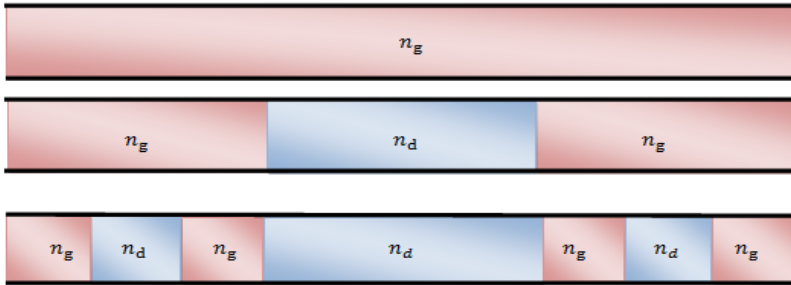


الشكل (11) معامل الارسال لبنية مؤلفة من 7 طبقات من الغرافين /أوكسيد السيلكون وعند $\mu_c = 0.3e.v$

الشكل (12)معامل الارسال لبنية مؤلفة من 7 طبقات من الغرافين /أوكسيد السيلكون وعند $\mu_c = 0.9e.v$

من خلال ماسبق نلاحظ أنه بزيادة الكمون الكيميائي للغرافين ينقص معامل الارسال وتضيق حزم التمرير ويظهر هذا الاثر بشكل أوضح في الترددات الدنيا من المجال الترددي المدروس.

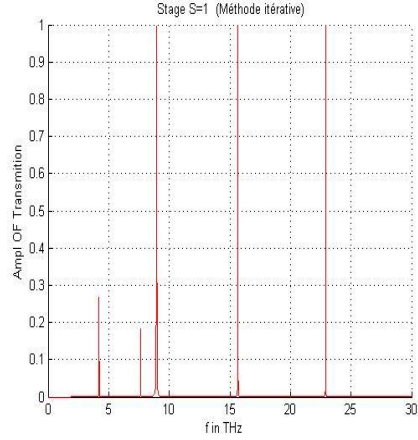
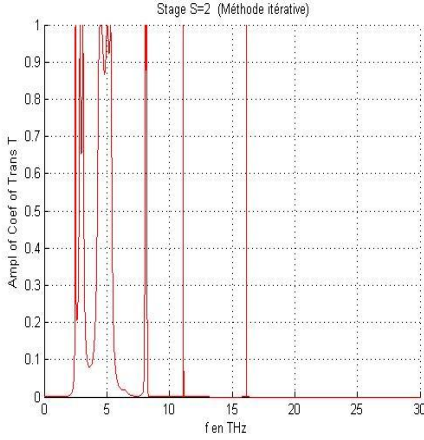
- المرحلة الثانية (البنية التجزئية): قمنا بدراسة معامل الارسال لشريط كانتور $D = \frac{\ln 2}{\ln 3}$ المؤلف من شرائح من الغرافين ذات قرينة الانكسار n_g /أوكسيد السيلكون قرينة انكساره n_d .



الشكل(13):توزيع شريط كانتور ذوالبعد $D = \ln(2)/\ln(3)$ ضمن دليل الموجة من اجل المراحل التجزئية الثلاث الأولى

تصميم مرشح متعدد الحزم في مجال ترددات التيرا هرتز باستخدام التوزيع التجزيئي لشرائح الغرافين
ضمن دليل الموجة

أولاً: قمنا بدراسة تأثير مراحل التجزيء على معامل الإرسال عند نفس البارامترات التصميمية والتجزئية وكانت النتائج بالشكل الآتي:



الشكل (15): معامل الإرسال لشريط

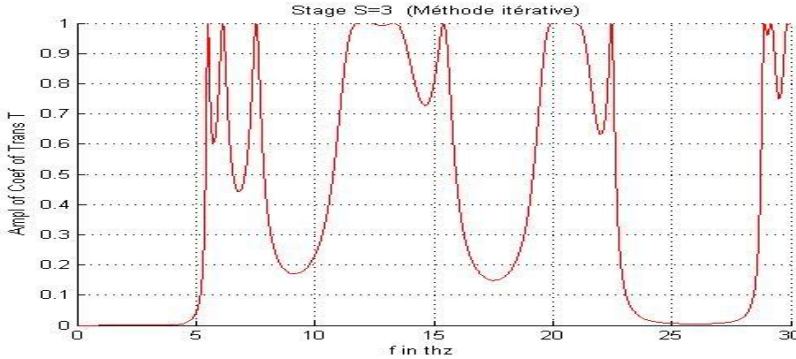
الشكل (14): معامل الإرسال لشريط

كانتور $D = \frac{\ln 2}{\ln 3}$ عند مرحلة $S=2$ وعند

كانتور $D = \frac{\ln 2}{\ln 3}$ عند مرحلة $S=1$ وعند

$$\mu_c = 0.1 e.v$$

$$\mu_c = 0.1 e.v$$



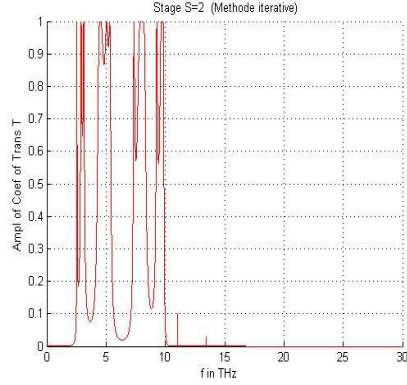
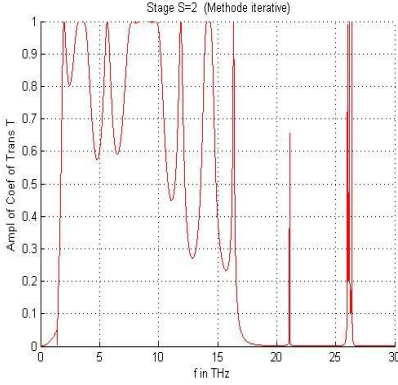
الشكل (16): معامل الإرسال لشريط كانتور $D = \frac{\ln 2}{\ln 3}$ عند مرحلة $S=3$ وعند كمون كيميائي

للغرافين $\mu_c = 0.1 e.v$

من خلال ما سبق نلاحظ أنه بزيادة عدد مراحل التجزيء يزداد عرض حزم الإرسال وتتزاح نحو الترددات الأعلى في المجال الترددي المدروس وهذا يتوافق مع انه بزيادة عدد المراحل يزداد عدد الشرائح الموزعة ضمن نفس البنية ويزداد عرض حزم الإرسال وهذا يوافق النتيجة التي توصلنا إليها بالبنية الدورية.

ثانياً: سنقوم بدراسة تأثير البعد التجزيئي على معامل الارسال لذلك لنموذجين من شريط كانتور

$$D = \frac{\ln 2}{\ln 3} \text{ وشريط كانتور ذو البعد التجزيئي } D = \frac{\ln 4}{\ln 7}$$



الشكل (18):معامل الارسال لشريط

الشكل (17):معامل الارسال لشريط

كانتور $D = \frac{\ln 4}{\ln 7}$ عند مرحلة $S=2$ وعند

كانتور $D = \frac{\ln 2}{\ln 3}$ عند مرحلة $S=2$ وعند

$$\mu_c = 0.5e.v$$

$$\mu_c = 0.5e.v$$

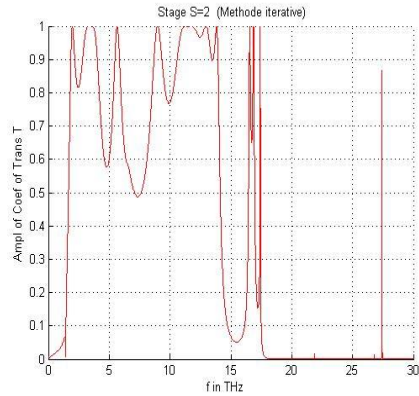
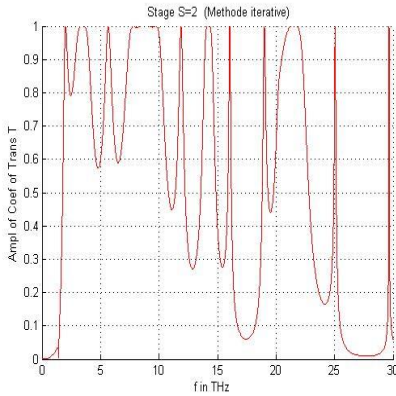
نلاحظ انه بزيادة البعد التجزيئي يزداد عرض حزم الارسال وتنتزح نحو الترددات الاعلى ويقفل عمق حزم المنع وتظهر لدينا حزمة تمرير ضيقة جدا" ضمن حزمة المنع الواسعة.

ثالثاً: قمنا بدراسة تأثير طاقة فيرمي على نموذج شريط كانتور $D = \frac{\ln 4}{\ln 7}$ عند مرحلة من

مراحل التجزيء وهنا أخذنا عندالمرحلة $s=2$ من أجل قيمتين مختلفتين للكمون الكيميائي

للغرافين:

تصميم مرشح متعدد الحزم في مجال ترددات التيرا هرتز باستخدام التوزيع التجزيئي لشرائح الغرافين
ضمن دليل الموجة



الشكل (20): معامل الإرسال لشريط

الشكل (19): معامل الإرسال لشريط

كانتور $D = \frac{\ln 4}{\ln 7}$ عند مرحلة $S=2$ وعند

كانتور $D = \frac{\ln 4}{\ln 7}$ عند مرحلة $S=2$ وعند

$$\mu_c = 0.9e.v$$

$$\mu_c = 0.1e.v$$

نلاحظ أنه بزيادة الكمون الكيميائي للغرافين وعند نفس مرحلة التجزيء $S=2$ يزداد عدد حزم التمرير (الإرسال) ويزداد عرضها وتتراوح نحو الترددات الأعلى.

5- الاستنتاجات والتوصيات:

بينت هذه الدراسة إمكانية تصميم مرشح تمرير يعمل في مجال ترددات التيرا هرتز وأنه يمكن التحكم بعدد حزم التمرير ومواقعها وازاحتها ضمن المجال الترددي وذلك من خلال التحكم بعدد الشرائح المتوضعة ضمن دليل الموجة، والتي يمكن التحكم بها من خلال عدة بارامترات مثل البعد التجزيئي، وعدد المراحل التجزيئية، وذلك ضمن شريط كانتور مما يعطي درجة أكبر من الحرية في تصميم المرشح المطلوب، أما بالنسبة للبنية الدورية فيتم اختيار عدد الطبقات بشكل مباشر عند التصميم. قدم استخدام الغرافين بارامتر تصميمي جديد في تصميم المرشح المطلوب وهو الكمون الكيميائي للغرافين والذي يمكن من خلاله التحكم بقيمة معامل الإرسال (النقل) وعدد حزم التمرير ضمن المجال الترددي المطلوب. تمكنا من الوصول إلى تصميم مرشح تمرير متعدد الحزم يعمل في مجال ترددات التيرا هرتز باختيار التوزيع التجزيئي المناسب لشرائح الغرافين/ أكسيد السيلكون ضمن دليل الموجة واختيار مرحلة التجزيء المناسبة والذي يمكن استخدامه في العديد

من التطبيقات مثل الحساسات الطبية والكيميائية ومعالجة إشارات THz وفي مجال الاتصالات ويمكننا تطوير العمل السابق من خلال تغيير نوع العازل المستخدم أو باختيار بنية تجزئية مختلفة متوضعة على طبقة أساس من الغرافين .

6- المراجع

- [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, 130-135.
- [2] SIEGEL, P. H. 2002, Terahertz technology. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 50, No. 3, 910-928.
- [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] 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, 5264-5269.
- [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, 2871-2879.
- [6] COSTA, C. H; PEREIRA, L. F; BEZERRA, C. G. 2017, Light propagation in quasiperiodic dielectric multilayers separated by graphene, Physical Review B, Vol. 96, No. 12, 125412.
- [7] ANDRYIEUSKI, A; LAVRINENKO, A. V. 2013, Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach. Optics express, Vol. 21, No. 7, 9144-9155.
- [8] NING, R; LIU, S; ZHANG, H.; KONG, X; BIAN, B; BAO, J. 2014, Wideband absorption in fibonacci quasi-periodic

graphene-based hyperbolic metamaterials, Journal of Optics, Vol. 16, No. 12, 125108.

[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, 385–388.

[10] WANG, J; MA, F; SUN, M. 2017, Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and application, RSC advances, Vol. 7, No. 27, 16801–16822.

[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, 318.

[12] JABLAN, M; BULJAN, H; SOLJAČIĆ, M. 2009, Plasmonics in graphene at infrared frequencies, Physical review B, Vol. 80, No. 24, 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, 246803.

[14] FALKOVSKY, L. A; PERSHOGUBA, S. S. 2007, Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer. Physical Review B, Vol. 76, No. 15, 153410.

[15] ZHANG, R. Z; ZHANG, Z. M. 2015, Tunable positive and negative refraction of infrared radiation in graphene-dielectric multilayers. Applied Physics Letters, Vol. 107, No. 19, 191112.

- [16] OTHMAN, M. A; GUCLU, C; CAPOLINO, F. 2013, Graphene-based tunable hyperbolic metamaterials and enhanced near-field absorption. Optics express, Vol. 21, No. 6, 7614-7632.
- [17] GOSCINIAK, J; TAN, D. T. 2013, Theoretical investigation of graphene-based photonic modulators. Scientific reports, Vol. 3, No. 1, 1-6.
- [18] JABBARZADEH, F; HEYDARI, M; HABIBZADEH-SHARIF, A. 2019, A comparative analysis of the accuracy of Kubo formulations for graphene plasmonics. Materials Research Express, Vol. 6, No. 8, 086209.
- [19] AREFINIA, Z; ASGARI, A. 2013, Performance considerations of a photonic crystal based on graphene multilayer system. In: 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE, 1-4.
- [20] CHUANG, S. L. 2012- **Physics of photonic devices**, John Wiley & Sons, Vol. 80.
- [21] TIWARI, A. 2012, Fractal applications in electrical and electronics engineering. International Journal of Engineering Science & Advanced Technology, Vol. 2, No. 3, 406-411.
- [22] GAO, Y. J; YANG, H. W; WANG, G. B. 2016, A research on the electromagnetic properties of plasma photonic crystal based on the symplectic finite-difference time-domain method. Optik, Vol. 127, No. 4, 1838-1841.

[23] LI, Y; QI, L., YU, J; CHEN, Z; YAO, Y; LIU, X. 2017, One-dimensional multiband terahertz graphene photonic crystal filters. Optical Materials Express, Vol. 7, No. 4, 1228–1239.

[24] CHANG, Y. H; LIU, C. C; YANG, T. J; WU, C. J. 2009, Angular dependence of a narrowband reflection–and–transmission filter containing an ultrathin metallic film. JOSA B, Vol. 26, No. 5, 1141–1145.

[25] OUCHANI, N; EL MOUSSAOUY, A; AYNAOU, H., EL HASSOUANI, Y; DJAFARI–ROUHANI, B. 2018, Optical transmission properties of an anisotropic defect cavity in one-dimensional photonic crystal. Physics Letters A, Vol. 382, No. 4, 231–240.

