

نمذجة وتصميم مرشح امرار الحزم في المنطقة تحت الحمراء المتوسطة

الاء نزار عبد الغفار* هيفاء غازي رشيد** أنسام قاسم غضبان*

استلام البحث 15، كانون الاول، 2013
قبول النشر 17، اذار، 2014

الخلاصة:

في هذه الدراسة تم تصميم مرشح امرار الحزم الضيقة ضمن النافذة ($3_5\mu\text{m}$) مايكرومتر معتمدين طريقة توليفية مثلى في التصميم تدعى الابرة، واجراء مقارنة بالتصاميم العالمية المنشورة فضلا عن ذلك تمت دراسة تأثير تغير معاملات بناء مرشح امرار الحزم الضيقة في الاداء البصري لتصميم المرشح والمتمثل بالنافذية بوصفها دالة للطول الموجي والتمكن من التغلب على صعوبات التصميم .
في هذه الدراسة تم اعتماد مواد متجانسة الخواص البصرية بشكل أغشية رقيقة مرسية على ركيزة الجرمانيوم (Germanium) وبطول موجة تصميم ($\lambda = 4\mu\text{m}$)، لتصميم مثل هذا النوع من المرشحات استعملنا برنامج حاسوبي متطور (Matlab) في بناء أنموذج التصميم، معتمدين كلا من المصفوفة المميزة المعدلة وتقانة الابرة وكذلك تمت الاشارة الى نوع الدالة المميزة المستعملة في الدراسة الحالية بما لها من مميزات وخواص في تصحيح السلوك البصري والوصول الى الهدف في وقت حسابي قصير.

الكلمات المفتاحية: طلاء متعدد الطبقات، الطرائق المثلى في التصميم، مرشحات امرار الحزمة

المقدمة:

البناء على الاداء البصري للمرشح فضلا عن ذلك سنشير هذه الفقرة الى انموذج المواد الجديد المستعمل في بناء المرشح، والفقرة الرابعة ستعرض الاستنتاجات.

المواد وطرائق العمل: الجزء النظري

يعتمد مبدأ عمل مرشحات امرار الحزمة على ظاهرة التداخل بين الأشعة الضوئية النافذة من الترتيب متعدد الطبقات بعد أن تعاني من الانعكاسات الداخلية المتكررة بين السطوح العاكسة [4]. ان تصميم اي مرشح بصري يتضمن معاملات البنية الأساسية للتصميم (Construction Parameters) كمعامل أنكسار المواد، وسمكها البصري، وعدد الطبقات، ومعامل التوهين (Extinction Coefficient) [7,8,9] إذ تعد مرحلة التصميم لأي اداء بصري مرحلة أساسية نظرا لترايط هذه المتغيرات، ويمثل التصميم اللبنة الاولى في بناء المرشح البصري.

تصنف طرائق التصميم الى [2,8]:

- 1- طرائق الرسم (Graphical Methods)
 - 2- الطرائق التحليلية (Analytical Methods)
 - 3- الطرائق العددية (الرقمية) (Numerical Methods(Digital))
- تقسم الطرائق العددية الى طرائق تهذيب (Refinement Methods) وطرائق توليف (synthesis Methods) [2,10,11].

يعد اي نظام بصري أو جهاز (Device) يعمل على تغيير توزيع الشدة الطيفية (Spectral Intensity Distribution) أو حالة الاستقطاب (State of Polarization) للأشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه بالمرشح البصري [1,2]، تصنف هذه المرشحات اعتمادا على أدائها البصري (Optical performance) الذي يعرف على أنه (الانعكاسية، والنافذية، والامتصاصية، بوصفها دالة للطول الموجي او التردد) [1,3].

في هذا البحث سندرس تصميم (مرشح امرار الحزمة الضيقة) Narrow Band-pass filters. يتصف هذا النوع من المرشحات بقابليته على امرار حزمة محددة من الأطوال الموجية واهمال (Reject) الأطوال الموجية على الجانبين [4]. لهذا النوع من المرشحات تطبيقات كثيرة في مجال البصريات الحديثة التي تحدد في كثير من الاحيان الكفاءة العامة للمعدات [5] ويدخل ضمن تكنولوجيا الطائرات النفاثة [6].

في هذا البحث اعتمدنا الجرمانيوم بوصفه مادة أساس في تصميم مرشح امرار الحزمة لنطاق محدد من المنطقة الحرارية تحت الحمراء ضمن مدى الطول الموجي ($3_5\mu\text{m}$). يستند هذا التصميم في بنائه الى موديل يعتمد على المصفوفة المميزة المعدلة وطريقة توليفية مثلى في التصميم تدعى الابرة (Needle)، هذا الموديل سيوضح في الفقرة الثانية من البحث اما الفقرة الثالثة فستعرض نتائج التصميم التي تم التوصل اليها ومقارنتها بالتصاميم العالمية المنشورة ودراسة تغير معاملات

$$r = \frac{y_0 - y}{y_0 + y}$$

$$R = rr^* = |r|^2$$

$$R = \left[\frac{y_0 B - C}{y_0 B + C} \right]^2 \dots \dots \dots (3)$$

إذ r تمثل معامل الانعكاس و R تمثل الانعكاسية و y_0 تمثل سماحية وسط السقوط.
ان نفاذية المنظومة هي نسبة الشدة الخارجة (Output intensity) من الاغشية الرقيقة والشدة الداخلة (Input intensity) (intensity).

$$T = \frac{4n_0 \text{Re}(n_s)}{(n_0 B + C)(n_0 B + C)^*} \dots \dots \dots (4)$$

$\text{Re}(n_s)$ يمثل الجزء الحقيقي لمعامل انكسار الارضية الاساس ، و n_0 يمثل معامل الانكسار للهواء وبالتعبير عن سمك الطور لكل طبقة في المعادلة (1) بدلالة الدالة الاسية العقدية:

$$\sin \delta_j = \frac{e^{i\delta_j} - e^{-i\delta_j}}{2i}$$

$$\cos \delta_j = \frac{e^{i\delta_j} + e^{-i\delta_j}}{2}$$

فان المعادلة (1) تعرف عندئذ بالمصفوفة المميزة المعدلة [3].

توليفية الابريرة

ان الفكرة الاساسية لتوليفية الابريرة بوصفها طريقة مثلى والتي ولدت لأول مرة في عام 1980 من قبل العالمين الروسيين (Sh.A.Furman and Alexander V.Tichonravov) والتي تستند اجراءاتها الى السيطرة على معالم بناء التصميم للتوصل الى التصميم المطلوب إذ تعتمد على أقسام طبقة أو عدة طبقات متتالية رقيقة بسمك بصري قريب من الصفر داخل تركيب متعدد الطبقات [15].

أن جوهر هذه التقنية يكمن في أن خوارزميةها تتوصل الى الاماكن الملائمة لأقسام طبقات جديدة ، فإذا أقحمت الطبقات الجديدة في المكان الصحيح سوف تحدث تأثيرات تداخلية جديدة تنسجم (sociated) مع تلك الطبقات والتي سوف تحسن التطابق (Correspondence) بين خصائص الطيف الفعلية والمطلوب الوصول اليها .فضلا عن قابليتها على تشخيص مادة الطبقة الملائمة للاقسام من مجموعة مواد محددة مسبقا [16].

تتمثل العناصر الاساسية للعملية في أحراز أدنى قيمة للدالة المميزة (merit function) الموضحة

و غالبا ما تتبع طرائق التوليف بطرائق التهذيب إذ يستعمل التوليف اولا للحصول على تصميم ابتدائي مقبول ثم تليها طريقة التهذيب التي تقدم حلا امثل لمسألة التصميم [12].

تعد طرائق التوليف من المواضيع البحثية المهمة إذ تكمن الصعوبة في إيجاد طريقة توليفية تعطي حولا مثلى لكل المشاكل التي تظهر بتقدم العلم والتطبيقات [13,7] لذلك ظهرت افكار لطرائق توليفية تتميز بمميزات خاصة وفي المدة الاخيرة اعتمدت طريقة الابريرة (Needle) بوصفها توليفية مثلى في تصاميم المرشحات البصرية وتعد من الطرائق التوليفية الواعدة (Promising Synthesis Method) في التصميم.

المصفوفة المميزة:

أعتمدت في الدراسة الحالية لتصميم مرشح امرار الحزمة والتي تقدم وصفا " دقيقا" لمنظومة الاغشية الرقيقة والارضية الاساس .
أن تعبير المصفوفة لمنظومة الاغشية الرقيقة يكون [14]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^M \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / y_j \\ i \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ y_{sub} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

$$\delta_j = 2\pi n_j d_j / \lambda \dots \dots \dots (2)$$

إذ B و C يمثلان ساعات المجال الكهربائي والمغناطيسي للضوء المنتشر خلال الوسط عند تردد معين M ، تمثل عدد طبقات الطلاء λ ، يمثل طول موجة التصميم وأن $d_j, n_j, \delta_j, y_{sub}$ ، تمثل السمك الفيزيائي ومعامل الانكسار وسمك الطور والسماحية البصرية للركيزة على التوالي .
وأن السماحية البصرية تعطى بالعلاقة الاتية :

$$y = C / B$$

إذ $\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix}$ تعرف المصفوفة المميزة للنظام.

وبأيجاد السماحية (y=B/C) منها وتعويضها في المعادلة:

, L مرسية على ارضية اساس الجرمانيوم المتمثلة بمعامل الانكسار n_s ووسط السقوط هو الهواء. وفي هذا الانموذج في بناء التصميم تم اعتماد الفجوة مادة ذات معامل الانكسار العالي H وايضا بسمك ربع طول موجي. وعلى وفق هذا الانموذج للتصميم التقليدي لفابري بيرو اعتمدنا ولأول مرة مواد طلاء اعتمدت في تصميم مرشح الطلاء المضاد للانعكاس [19] وضمن المنطقة الطيفية الحمراء $(3-5)\mu m$ إذ نلاحظ ما يأتي :

1- عندما تكون رتبة العواكس $S=1$ و $S=2$ لا نحصل على مرشح امرار حزمة ضيقة كما مبين في الشكل (1).

2- وعند رتبة العاكس $S=3,4,5$ نحصل على مرشح امرار الحزمة الضيقة بطول موجة تصميم $(\lambda = 4 \mu m)$ ونلاحظ تغير منحنى النفاذية للمرشح كما في الشكل (2) تبعا لتغير رتبة العاكس عند القيمة $S=3$ يكون عرض حزمة المرور للمرشح عريضا قليلا (μm) (تقريبا 0.1) وعند الرتبة $S=4$ يصبح عرض حزمة المرور اضيق $(0.05)\mu m$ وتصبح اضيق $(0.02)\mu m$ عند جعل الرتبة $S=5$. بصورة عامة ولجميع الحالات تكون النفاذية للمرشح عند الطول الموجي المطلوب تساوي $(T=0,6376)$ وان الية عمل مرشح امرار الحزمة يعتمد على التداخل البناء والهدام إذ كلما ازداد سمك الطور δ كلما ازداد التداخل الهدام وبزيادة عدد الطبقات في تصميم المرشح يزداد السمك البصري d وحينئذ سيزداد سمك الطور δ ويزداد التداخل الهدام بحسب العلاقة (2) إذ عند طول موجة التصميم نحصل على حزمة ضيقة للمرشح وتزداد الحزمة ضيقا كلما زاد عدد الطبقات سوف يزداد السمك البصري d مما يؤدي الى زيادة سمك الطور δ وهذا يقود الى تداخل هدام.

المرحلة الثانية : اعلاه هو ما تم التوصل اليه بالطريقة التحليلية الكلاسيكية ودراسة تغير رتبة العواكس عليها اما في هذه المرحلة وبأستعمال الطريقة العددية التوليفية تم الحصول على نتائج نفاذية افضل لمرشح امرار الحزمة الضيقة وبطبقات اقل وبسمك اقل إذ تم الوصول الى نفاذية مثلى تقريبا $(T=100)$ وبطول موجة التصميم المطلوبة كما مبين في الشكل (3a,b,c).

2-دراسة تأثير تباين رتب العواكس $(HL)^S$ في نفاذية المرشح

من خلال البحث والدراسة توصلنا الى البناء $n | (HL)^{S-1} | (HL)^S | \text{Air}$ الذي يعطي نتائج جيدة وهذا يعني تباينا في رتبة العواكس وذلك يجعل العاكس الذي يسبق الطبقة الوسطى برتبة اقل من العاكس الذي يتبع الطبقة الوسطى ونلاحظ من التصميم انه تتكون الفجوة ضمنا وبهذا نحصل

في المعادلة رقم (4) وصولا الى الحصول على أقرب تطابق ما بين الخصائص الفعلية للطييف (Actual Spectr Characteristics) (al) وخصائص الطيفية المطلوبة (Desired Characteristics Spectr) [17] والتي تتضمن تحسينا في السمك أو معامل الانكسار أو كليهما لطبقة واحدة أو عدة طبقات وفقا لاعتبارات التصميم.

$$MF = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{Q_i^T - Q_i}{\delta Q_i} \right\}^k \right]^{\frac{1}{k}} \dots \dots \dots (4)$$

when $k = 1, 2, 4, \text{ or } 16$

$1 \leq i \leq m$

إذ MF تمثل الدالة المميزة ، و m عدد الكميات التي تحدد وظيفة الدالة المميزة.

النتائج والمناقشة:

في هذه الدراسة تم بناء انموذج يستند الى المصفوفة المميزة المعدلة وطريقة الأبرة لتصميم مرشح امرار الحزمة الامثل ودراسة تأثير تغير رتبة العواكس في خصائصه البصرية معتمدين مادة الجرمانيوم بوصفها ركيزة اساس $(ns=4.025)$ [18] ومتخذين لأول مرة مواد طلاء اعتمدت من قبل الباحثين [19] (Asghar et.al.) في تصميم الطلاء المضاد للانعكاس وضمن النفاذة $(3-5)\mu m$ وعند طول موجة تصميم $(\lambda = 4 \mu m)$ ووفقا للخصائص البصرية والميكانيكية والكيميائية التي تتسجم مع مواد الاساس تم اعتماد مادة CdTe بوصفها مادة عالية معامل الانكسار $(n_H=2.6)$ ومادة SiO بوصفها مادة واطئة معامل الانكسار $(n_L=1.6)$.

1- دراسة تأثير تغيير رتبة العواكس $(LH)^S$ في نفاذية المرشح

تمت دراسة تأثير تغير رتبة العواكس في الاداء البصري لمرشح امرار الحزمة وفي مرحلتين معتمدين في المرحلة الاولى على بناء تصميم مرشح فابري بيرو التقليدي على وفق الانموذج $n_s | (HL)^S | 2H | (LH)^S | \text{Air}$ والذي يستند في بنائه الى اعتماد سمك ربع الطول الموجي لطبقات الطلاء ، اما في المرحلة الثانية تم بناء المرشح على وفق الطريقة غير التقليدية طريقة الأبرة التوليفية المثلى .

المرحلة الاولى: إذ نلاحظ من البناء $n_s | (HL)^S | 2H | (LH)^S | \text{Air}$ أن المرشح يتشكل من العواكس $(LH)^S$ وهي اغشية رقيقة مواد طلاء ذات معامل انكسار عالي H وواطي

من التوصل الى انموذج مواد جديد لبناء مرشح امراز الحزم الضيقة إذ استعملنا مادتين في تصميم وبناء مرشح امراز الحزمة الضيقة وبسمك ربع طول موجي وبطبقات اقل مما كان يستعمل (Macleod).

يشير البحث الى انشاء تصاميم جديدة معتمدين الطرائق غير التقليدية في التصميم والمتمثلة بالطريقة العددية (الابرة) ومن خلال مقارنة النتائج المستحصلة بالطريقة التحليلية الكلاسيكية بالنتائج المستحصلة بطريقة الابرة تبين من خلال النتائج بأنه يمكن الحصول على اداء بصري افضل باستعمال الطريقة العددية وبعدد طبقات اقل وبسمك اقل وهذا يوفر حلا الى كثير من مشاكل التصنيع. الدراسة اوضحت تاثير تباين رتبة العواكس والفجوة ضمنا وهذا يقود الى تقليل عدد الطبقات والسمك والحصول على نفاذية افضل من التي تم الحصول عليها من التصميم التقليدي لمرشح فابري بيرو.

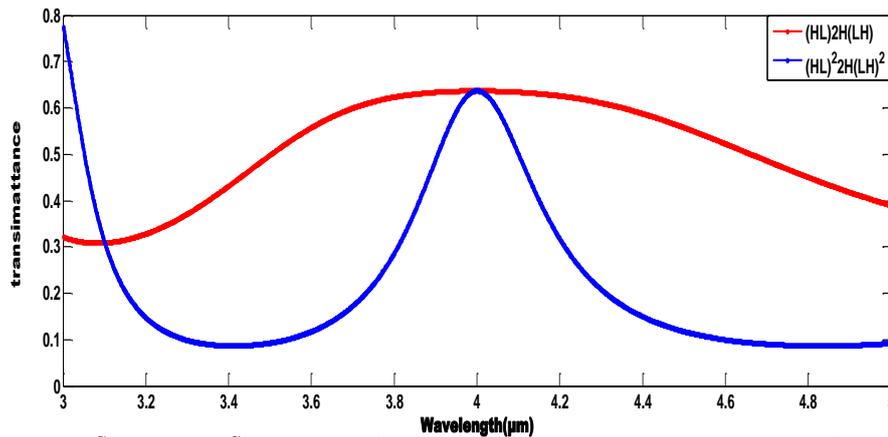
على مرشح امراز حزمة بأقل عدد من الطبقات وبسمك ربع طول الموجي وبأداء بصري (نفاذية) تقترب من 99% كما مبين في الشكل (4) إذ اعتمدنا رتبة العاكس $S=5$.

و بتطبيق موديل تقانة الابرة تمكنا من الحصول على نتاج نفاذية افضل من الطريقة الكلاسيكية فضلا عن تقليل السمك كما نلاحظ في الشكل (5) النفاذية ($T=100$) وبطول موجة التصميم المطلوبة.

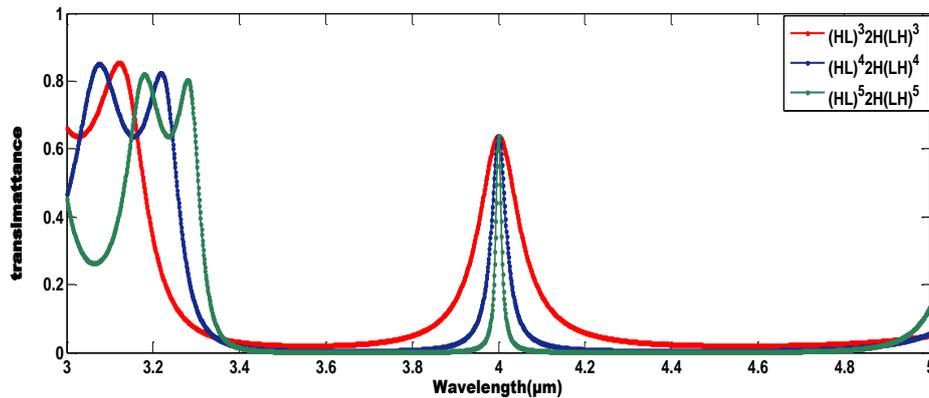
ومن جانب اخر عند مقارنة النتائج الكلاسيكية لاداء مرشح امراز الحزمة بالنتائج المستحصلة بالطريقة التوليفية المثلى سنلاحظ الحصول على نتائج افضل بالطريقة التوليفية كما ملاحظ من الشكل (6a,b,c).

الاستنتاجات:

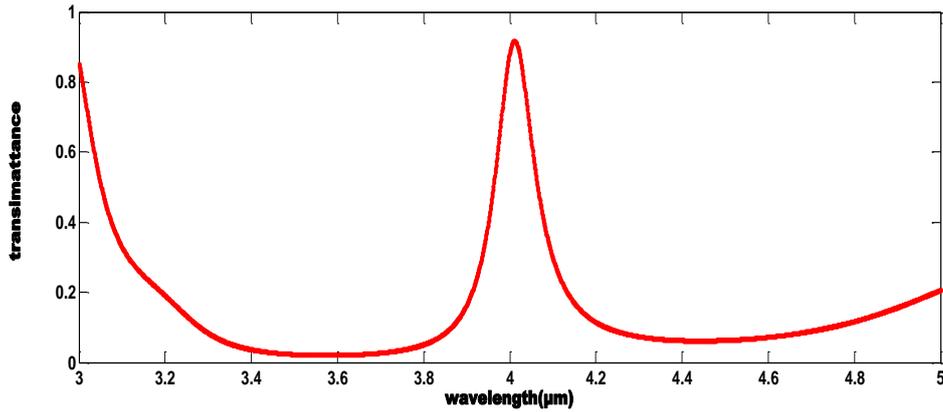
في الدراسة الحالية تم الاعتماد على جزء من المواد المستعملة في تصميم مرشح مضاد للانعكاس (ARC) من قبل (Asghar et.at.) وبذلك تمكنا



شكل (1): النفاذية دالة للطول الموجي لمرشح امراز الحزمة الضيقة ذي التصميم $S=1,2$ (HL)^S 2H (LH)^S

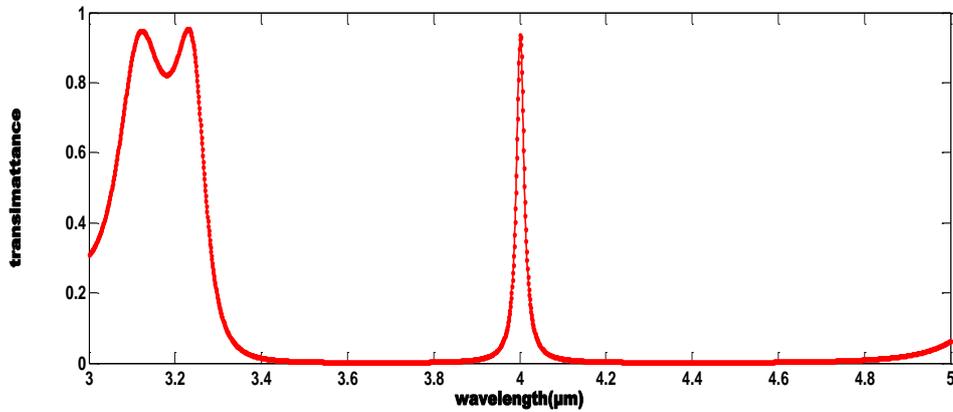


شكل (2): النفاذية دالة للطول الموجي لمرشح امراز الحزمة الضيقة ذي التصميم $(HL)^S$ 2H (LH)^S $S=3,4,5$



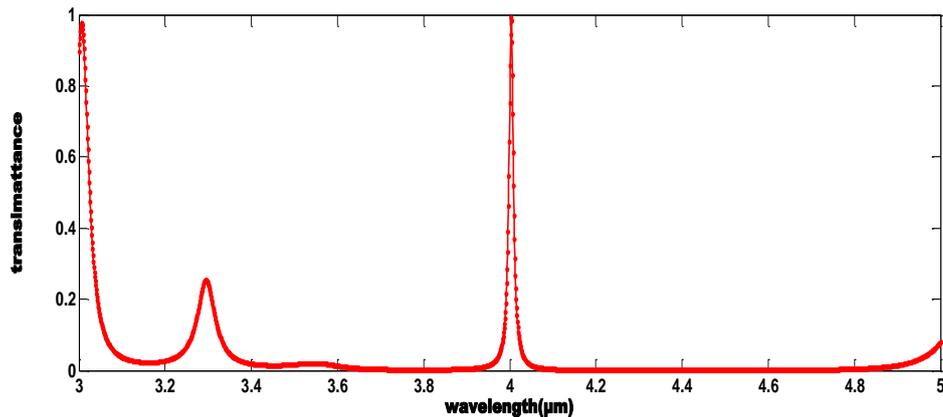
شكل (3a): الاداء البصري لمرشح أمرار الحزمة على وفق الطريقة العددية ذي التصميم

0.622792H0.803408L0.99514H1.019036L1.014896H1.009736L
2.006084H1.00994L1.016568H1.029236L1.061712H1.44L 1.184976H



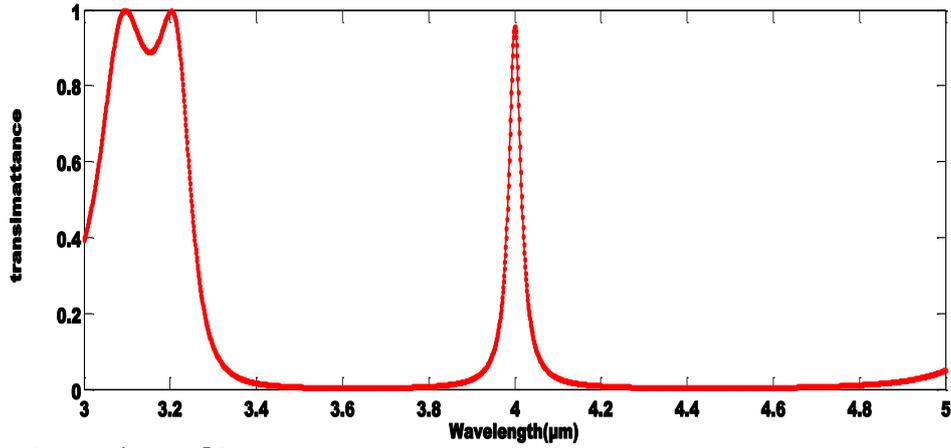
شكل (3b): الاداء البصري لمرشح أمرار الحزمة على وفق الطريقة العددية ذي التصميم

0.999568H1.000508L0.996748H1.005088L0.994892H1.003316L
0.998028H1.001452L1.999296H1.00142L1.002072H1.002916L
0.994332H1.003164L0.998916H1.000012L

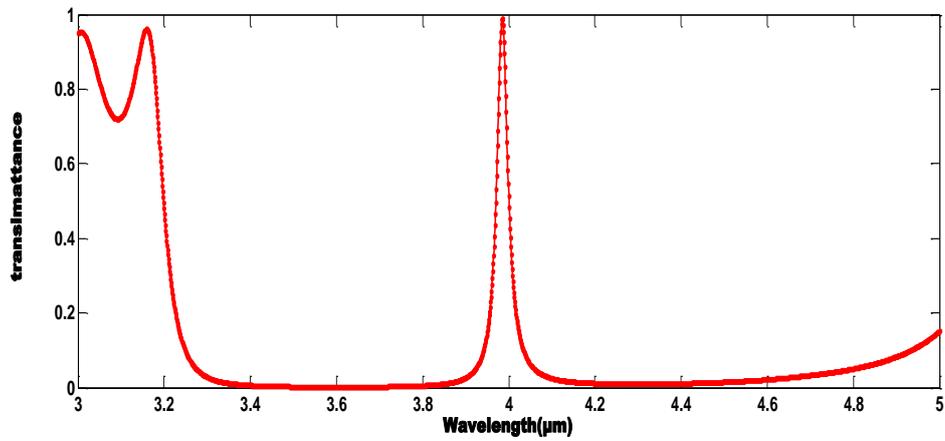


شكل (3c): الاداء البصري لمرشح أمرار الحزمة على وفق الطريقة العددية ذي التصميم

0.94336H0.969664L1.47766H1.108756L0.967688H0.916828L0.924196H0.959612
L0.987712H1.000012L2.003008H1.002376L1.001736H1.009608L1.046368H1.109
984L1.061224H0.916316L0.915224H0.911192L

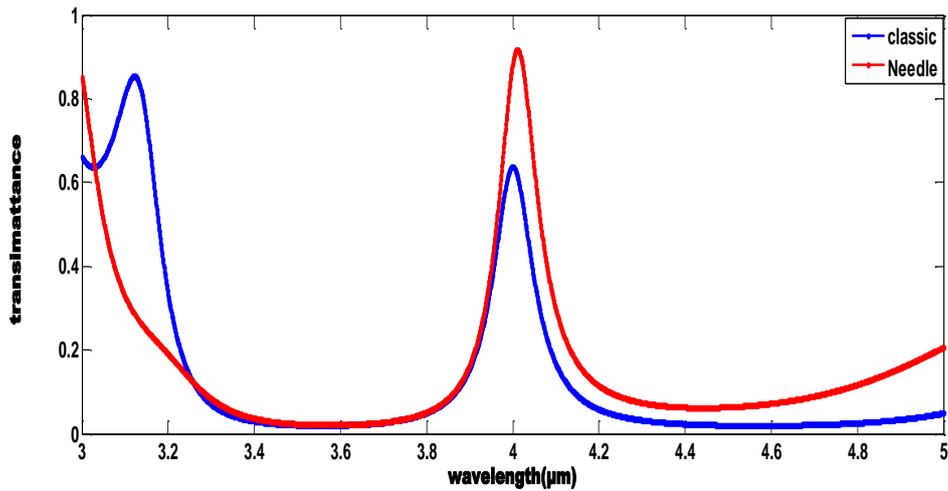


شكل (4): النفاذية دالة للطول الموجي لمرشح أمرار الحزمة ذي التصميم $\text{Air} | (\text{LH})^4 (\text{HL})^5 | \text{Ge}$



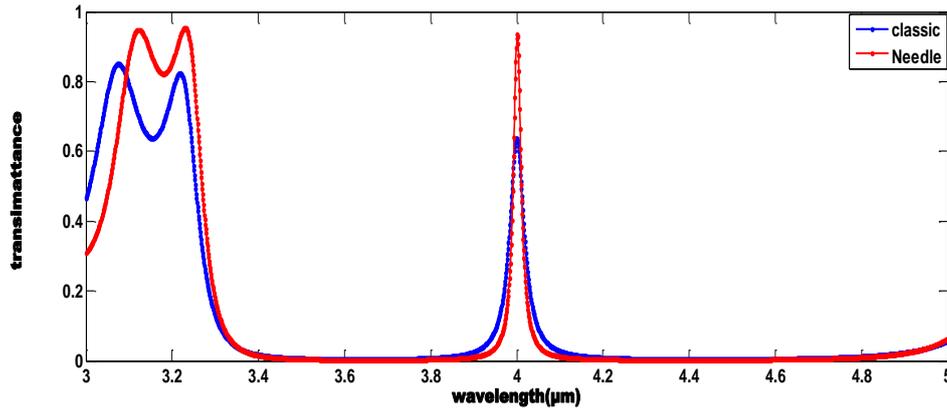
شكل (5): تأثير تباين رتبة العواكس لمرشح أمرار الحزمة بالطريقة العددية ذي التصميم

0.657264L2.34H0.94772L0.923672H0.95844L0.985868H0.999256L1.00346H1.00366L2.002744H1.00362L1.003184H0.998092L0.982332H0.95126L0.919628H0.955696L

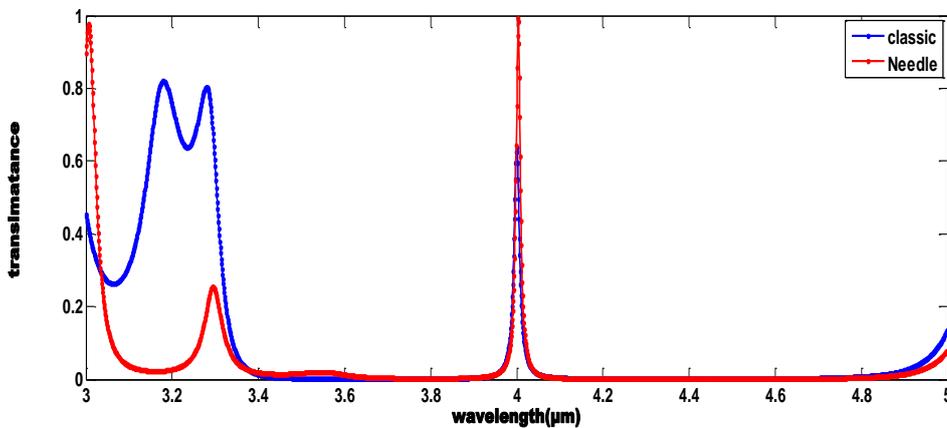


شكل (6a): مقارنة الطريقة الكلاسيكية بالطريقة العددية لنفاذية مرشح أمرار الحزمة عندما تكون رتبة العاكس

S=3



شكل (6b): مقارنة الطريقة الكلاسيكية بالطريقة العددية لنفاذية مرشح أمرار الحزمة عندما تكون رتبة العاكس $S=4$



شكل (6c): مقارنة الطريقة الكلاسيكية بالطريقة العددية لنفاذية مرشح أمرار الحزمة عندما تكون رتبة العاكس $S=5$

- band-pass infrared filter", OPTO-ELECTRONICS Review 19(2),193-197.
- [6] Hariyadi Soetedjo^{1*} and Gunawan Setyo Prabow². 2013." Insertion Layer in a Mid-Ir Band-pass filter structure to Improve Optical Transmittance", J.Nat.Sci.Res. 3(7):24-29.
- [7] Dobrowolski J.A.1997. Numerical methods for optical thin films .Optical and photonics News, 8(6): 24-33.
- [8] Yang J. M. and Kao C-Y.2000. A robust evolutionary algorithm for optical thin- film designs. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, (CEC00). La Jolla, California, USA. 978-985.

المصادر:

- [1] Jerzy A. Dobrowolski. 2010. "Optical properties of films and coatings",in Handbook of optics, chapter7. McGraw-Hill. New York
- [2] Jinn-Moon Yang and Cheng-Yan Kao.2001. Efficient evolutionary algorithm for the thin-film synthesis of inhomogeneous optical coatings ,Appl.op 40(19) :3256-3267.
- [3] Rashid H. Gh.1996. Design and optimization of thin-film optical filters with applications in the visible and infrared regions, ph.D. Thesis Al-Mustansiryiah University.
- [4] Born M. and Wolf E.1986. Principle of Optics, 6th ed. (Pergamon, London).
- [5] YAREMCHUK^{*1} I.Ya., FITIO¹ V.M. and BOBITSKI^{1,2} Ya.V. 2011"New design of Interference

- [15] Tikhonravov A.V. 1996 Trubetskov M.K. and G.W. DeBell, "Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings", Appl. Opt. 35(28): 5493–5508 .
- [16] Rancourt J.D. 1994. Optical Thin Films IV: New Developments ,SPIE.2262 :25-27 .
- [17] Dobrowolski J. A, M. K. Tikhonravov A.V. Trubetskov M., Sullivan .B, and Verly P.G., 1996 "Optimal single-band normal-incidence antireflection coatings." Appl. Opt. 35(4) :644-658.
- [18] Kruse P.W ,L. D. Meglauchlin ,Richmond B. Mequistan .1962. Elements Infrared Technology :Generation ,Transmission ,and Detection, New York. London.
- [19] Asghar M.H, Khan M.B, and Naseem S. 2003. Modeling high performance multilayer antireflection coatings for visible and infrared (3.5mm) substrates, Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 6(4): 508-513.
- [9] Lei Li Qiong-Hua Wang, Da-Hai Li and Hua-Rong Peng. 2009. Jump method for optical thin film design ,Op. Soc. of Amer. 17(19):16920-16926
- [10] Baedi ¹ J., Arabshahi ² H., Gordi Armaki ¹ M. and Hosseini ¹ E. 2010 . " Optical Design of Multilayer Filter by using PSO Algorithm", Research J. App. Sci. Eng. and Tech. 2(1):56-59.
- [11] Dobrowolski J. A. and Lowe D. 1978. Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms ,Appl. Opt, 17(191).
- [12] Jinn-Moon Yang and Cheng-Yan Kao. 2001. An Evolutionary Algorithm for the synthesis of Multilayer Coatings at Oblique Light Incidence, J. of .Light Wave Technology. 19(4).
- [13] Mary G. Turner & Kevin J. Garcia, 2008. Optimization using rational Bézier control points and weighting factors, SPIE 7061 (1):1-10.
- [14] Macleod H. A. 2001. Thin-film optical filters, 3rd edition, Ed. W .T., Institute of physics publishing, Welford.

Modeling and optimum design band pass filter for mid IR region

Alaa N. Abed Al-Gaffer Haifa G. Rashid** Ansam Q. gahdban**

* College of Science for women_ University of Baghdad

** College of Education_ AL-Mustansiriya University

Abstract:

In this study, we design narrow band pass filter for window (3_5) μm dependent on the needle optimization method , and a comparison with global designs published - Also, the effect of change parameter design on the optical performance of filter was studied and being able to overcome the difficulties of the design. In this study, the adoption of homogeneous optical properties materials as thin film depositing on a substrate of germanium at wavelength design ($\lambda = 4 \mu\text{m}$).

For design this kind of filters we used advanced computer program (Matlab)to build a model design dependent both matrix characteristic and Needle technique. In this paper we refer to the type of Mert function , which is used for correct optical performance access to the target in very short time.