

محاكاة لتصميم مرايا متعدد الطبقات للمنطقة المرئية باستعمال لغة الماتلاب

فؤاد عبد الكريم أسماعيل

قسم الفيزياء /كلية التربية/الجامعة المستنصرية

Fouadd.1956@gmail.com

حركات محسن رومي

قسم الفيزياء /كلية العلوم للبنات / جامعة بغداد

أستلم في : 21 نيسان 2014 قبل في : 2 حزيران 2014

الخلاصة

قدم هذا البحث دراسة نظرية تم فيها تصميم مرايا ذات انعكاس عالٍ في المنطقة المرئية من الطيف الكهرومغناطيسي بين (400-700 nm) وأستقصاء خصائص الأداء البصري المتمثلة بالانعكاسية بوصفها دالةً للطول الموجي لحالة السقوط العمودي للضوء لمواد مهملة الامتصاص، والتشتت بشكل أغشية رقيقة على ركيزة زجاج باستعمال نظم المصفوفات وبعتماد برنامج الماتلاب .

أستعملت المواد العازلة (AlAs) ، (TiO₂) ، (SiC) ، (Si₃N₄) في تصميم المرايا باعتماد التناوب في معاملات الانكسار وبشكل سلاسل مرتبة في أكوام ربع موجة ذات ترتيب العالي والواطي للحصول على مرايا ذي خسائر منخفضة ذات عكس عالٍ. أوضحت النتائج أن الاختلاف العالي في دليل معامل الانعكاس يعطي انعكاسية عالية وبأقل عدد في الطبقات .

الكلمات المفتاحية : طلاء متعدد الطبقات , المصفوفة المميزة ، مراياعازلة ، برنامج الماتلاب.

المقدمة

ان من اهم المرشحات التداخلية التي تم انتاجها بتقنية الطلاء البصري للاغشية الرقيقة، مايعرف مرشحات الانعكاس العالي كونها أداة تعمل على زيادة أنعكاسية السطوح لمدى محدد من الطول الموجي لما لها أهمية وبشكل واسع في التطبيقات الليزرية بأقل أمتصاصية ونشتت [1].

تصنف مرشحات الأنعكاسية العالية الى نوعين، الاول مرايا معدنية تكون الاغشية الرقيقة فيها من الفضة (Ag)، والذهب (Au)، والالمنيوم (Al)، هذا النوع ذات مشاكل تقيد في التطبيق بسبب الامتصاصية العالية الملازمة لأغلب المعادن وحساسيتها للأكسدة فضلاً عن أن أغلب المرايا المعدنية تتميز بنعومة (softer) قد يسبب ضرراً للمرايا في أثناء التنظيف الدوري لها مقارنة بالنوع الثاني مرايا المواد عازلة [2] أو ماتسمى بأنعكاسية براك (Bragg reflector) ذات التركيب المتعدد من الطبقات العازلة تعرف بالكومة (stack) التي لها اهمية متزايدة في عالمنا اليوم لما لها من تطبيقات واسعة في العديد من فروع العلم والتكنولوجيا لاستعمالها الناجح في الكثير من أنظمة الليزر البصرية [3]. من الممكن أن تدعم (boosting) طبقات المواد العازلة بطبقة معدن لزيادة الأنعكاسية [1].

مرشحات الانعكاسية العالية تكون بتـركيب طبقات الكومة ذات ترتيب دوري متناوب (periodic structures of alternately) بسمك ربع طول موجة ($\lambda/4$) للطبقة التي تتضمن تناوب معاملات الانكسار العالية (n_H) والواطنة (n_L) (Highest and Lowest Refractive Indices) للطبقات وبشكل دوري حيث يرمز للصيغة العامة للكومة [4]:

الاساس $[HL]^S$ ووسط السقوط

الزوج المترتب والمتمثل $[HL]$ يمثل السمك البصري بربع طول موجة للمادة ذي الدليل العالي والواطي على التوالي التي تتكرر (S) من المرات بين وسط السقوط والركيزة كما في شكل (1).

ان تصميم مرشح الانعكاسية العالية يتضمن علومات البناء الاساسية للتصميم (Construction Parameters) بوصفها معامل أنكسار المواد ، وسمكها البصري ، وعدد الطبقات، ومعامل التوهين (Extinction Coefficient)، إذ تعد مرحلة التصميم لاي اداء بصري مرحلة أساسية نظرا لترابط هذه المتغيرات، ويمثل التصميم للبناء الاولي في بناء المرشح البصري [5].

يعتمد الأداء البصري المتمثل بالانعكاسية العالية في الأغشية الرقيقة ذات ترتيب متراكب من طبقات مواد عازلة ذات معاملات أنكسار مختلفة على التداخل البناء للأشعة المنعكسة عند السطوح الفاصلة بين هذه الطبقات، لذلك أختيار تسلسل الترسيب التراكمي للطبقات وعددها، وأختيار المواد العازلة وسمكها البصري شرط ضروري في تحقق الاستجابة الطيفية المطلوبة [6].

الجزء النظري

إن الطلاءات البصرية متعددة الطبقات تراكيب تداخلية. يعتمد أساس عمل طلاءات الاغشية الرقيقة على مبدأ التداخل البناء (Constructive Interference) والأتلافي (Destructive Interference) بين الاشعة الضوئية الخارجة من طبقات الطلاء الرقيقة بعد أن تعاني أنعكاسات داخلية متكررة على السطوح الداخلية (Interfaces) لهذه الطبقات [1].

ينجز حساب تأثيرات التداخل فيما يتعلق بنظام الاغشية الرقيقة ببساطة من خلال تحديد مسار الشعاع في الحزمة التي تنعكس ذهاباً وأياباً بين مختلف السطوح الداخلية لطبقات الطلاء. ففي الحالة الثابتة (Steady state) هذه الاشعة توحد (Combine) لتنتج محصلة بشكل شعاع نافذ أو منعكس التي تكون مبسطة جداً" في الحسابات العددية [7].

يوظف هذا الأسلوب في المعالجة عادة ليتضمن عملية بمرحلتين (two-stage process) فعند سقوط الشعاع الكهرومغناطيسي على كل غشاء رقيق يختزل (reduced) الى موجتين جزئية الاولي ذهاب إيجابياً (Positive-going) والآخرى ذهاب سلبياً (negative-going) هذه الامواج الجزئية تنقل (transfer) مجموع المجال الكهربائي والمغناطيسي عند السطح الخلفي لكل طبقة الى السطح الامامي، التي تعالج رياضياً بمصفوفة مربعية نوع 2×2 لكل طبقة تصف خواص تلك الطبقة وحساب خواص متعدد الطبقات يمكن أن يمثل بضرب سلسلة من المصفوفات [1].

إن أسلوب المصفوفة البصرية أعتمد في الدراسة الحالية لتصميم عدد من طبقات الطلاء ذات الأنعكاس العالي التي تقدم وصفاً دقيقاً لمنظومة الاغشية الرقيقة والارضية الاساس، إذ تستند الفكرة الاساسية لهذه الطريقة الى إنسجام (matching)

المجال الكهربائي \vec{E} والمجال المغناطيسي \vec{H} للضوء الساقط عند مختلف الحدود الفاصلة بين الطبقات للطلاءات البصرية [8]. يوضح الشكل (2) تركيب طبقي (Layered Structure) من الاغشية الرقيقة مرسية على أرضية أساس. إذ كل طبقة بمعامل انكسار تختلف عن الطبقة المجاورة. وأن السمك البصري (Optical Thickness) للطبقات يكون من مرتبة ربع موجة الضوء الساقط، بحيث أن الموجات المنعكسة والنافذة من طبقات الطلاء الرقيقة تتداخل بعضها مع البعض وتكون عادة متشاكهة. إن تعبير المصفوفة لمنظومة الاغشية الرقيقة يكون كما يأتي [1]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y_{sub} \end{bmatrix} \dots\dots(1)$$

where

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^M \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / y_i \\ i \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \dots\dots(2)$$

$$i = \sqrt{-1}$$

$$\delta_j = 2\pi n_j d_j / \lambda \dots\dots\dots(3)$$

إذ B و C يمثلان سعات المجال الكهربائي والمغناطيسي للضوء المنتشر خلال الوسط عند تردد معين، 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 الاتي:

$$Y = B/C \dots\dots (4)$$

ويمكن التعبير عن معامل الانعكاسية r والانعكاسية R :

$$r = \frac{n_o - Y}{n_o + Y}$$

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

إذ r^* المرافق العقدي لمعامل الانعكاسية r

$$R = \left(\frac{n_o - Y}{n_o + Y} \right) \left(\frac{n_o - Y}{n_o + Y} \right) \dots\dots\dots(5)$$

إن نفاذية المنظومة هي نسبة الشدة الخارجة (Output Intensity) من الاغشية الرقيقة الى الشدة الداخلة (Input Intensity):

$$T = \frac{4n_o \text{Re}(n_s)}{(n_o B + C)(n_o B + C)^*} \dots\dots\dots(6)$$

$\text{Re}(n_s)$ يمثل الجزء الحقيقي لمعامل انكسار الارضية الاساس، وبالتعبير عن سمك الطور لكل طبقة في المعادلة (2) بدلالة الدالة الاسية العقدية كمايأتي:

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

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

لحساب العرض الطيفي نظرياً للمنطقة الوسطية (Stop band)، $\delta\lambda$ [9] نستعمل العلاقة الآتية :

$$\delta\lambda = \frac{4\lambda_0}{\pi} \sin^{-1} \left| \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right| \dots\dots (7)$$

النتائج والمناقشة

في الدراسة الحالية صُممت ثلاثة نماذج لمرايا عازلة أعتمدت مادة الطبقة العالية معامل الانكسار ثابتة وهي (AIAs) الثلاث مرايا، أما الطبقة الواطئة معامل الانكسار ولمواد متغايرة بين تصميم وآخر فكانت (TiO₂)، (SiC)، (Si₃N₄)، للنماذج الأول والثاني والثالث على التوالي، حسب قيم الانعكاسية البصرية باستخدام الحاسب باستخدام برنامج (MATLAB) مع الأخذ بنظر الاعتبار أن السمك الفيزيائي الكلي لمجموع مواد الطلاء لا يتجاوز (1μm).

تم تهيئة البرنامج الخاص بتصميم المرايا ذي الترتيب المتناوب في معاملات الانكسار لمواد الطلاء بتغذية بيانات معامل انكسار أرضية الأساس ووسط السقوط للأشعة ومواد الطلاء فضلاً عن الأطوال الموجية التي تحدد المنطقة الطيفية المطلوبة مع تحديد طول موجة التصميم ($\lambda_0 = 550 \text{ nm}$) الذي يكون مركز المنطقة البصرية المرئية المحددة ضمن الدراسة الحالية لما له من أهمية في تحديد الموقع وأتساع منطقة التصميم دون التأثير في قيمة الانعكاسية في تلك المنطقة.

أعتمد برنامج الاستكمال الرياضي (interpolation) في حساب قيم معاملات الانكسار لمواد الطلاء عند طول موجة التصميم وكما موضح في جدول رقم (1).

إن النماذج التي صممت منها المرايا العازلة كانت: الأول (AIAs / TiO₂) ، الثاني (AIAs / SiC) ، الثالث (AIAs / Si₃N₄) على التوالي . كانت نتائج التصميم جيدة ، ويوضح الجدول (2) الانموذج ، مواد ، مقدار الإنعكاسية ، عدد الطبقات ، السمك البصري للطبقات لمقدار الإنعكاسية المحسوبة للتصميم فضلاً عن مقدار عرض طيف الإنعكاسية لكل تصميم.

يمثل الشكل (3) الإنعكاسية دالةً الى الطول الموجي للتداخلات البصرية الى (19) طبقة على شكل يمثل كل مراحل التداخلات للانموذج الأول، يمثل الشكل (4) الإنعكاسية دالةً الى الطول الموجي الى (19) طبقة بشكل مرحلة واحدة لكل الطبقات وهو يمثل المحصلة النهائية لكل التداخلات الناتجة عن طبقات النموذج الأول. يمثل الشكل (5) الإنعكاسية كدالةً الى الطول الموجي للتداخلات البصرية الى (21) طبقة على شكل يمثل كل مراحل التداخلات للانموذج الثاني ، يمثل الشكل (6) الإنعكاسية دالةً الى الطول الموجي الى (21) طبقة بشكل مرحلة واحدة لكل الطبقات وهو يمثل المحصلة النهائية لكل التداخلات الناتجة من طبقات الانموذج الثاني.

يمثل الشكل (7) الانعكاسية دالةً الى الطول الموجي للتداخلات البصرية الى (18) طبقة على شكل يمثل كل مراحل التداخلات للانموذج الثالث، يمثل الشكل (8) الإنعكاسية دالةً للطول الموجي الى (18) طبقة بشكل مرحلة واحدة لكل الطبقات وهو يمثل المحصلة النهائية لكل التداخلات الناتجة من طبقات الانموذج الثالث. نلاحظ من النماذج الثلاث لتصاميم المرايا أن ما يميز طيف الإنعكاسية لتداخل كل الطبقات ذات السمك البصري ربع طول موجة يحوي منطقة وسطية رئيسية (Stop Band) ذات انعكاسية متزايدة مع زيادة عدد الطبقات كون الحزم المنعكسة والمتداخلة بين مختلف السطوح الداخلية تكون بالطور نفسه ، فعندما تصل السطح الأمامي توحد الأشعة المنعكسة بشكل تداخل بناء التي تناظر طول موجة التصميم .

تحاط منطقة الإنعكاسية العالية بعدد من القمم أو الأطياف الثانوية متناقصة الإنعكاسية على جانبي منطقة الإنعكاسية العالية يعتمد عددها وقيم انعكاسيتها على عدد الطبقات للطلاء التي تعمل على تضيق وتحديد عرض طيف الانعكاس . وتحليل الأشكال نلاحظ أن الانموذج الأول ذو حزمة ضيقة ، بينما الانموذج الثاني ذو حزمة أعرض نوعاً ما من حزمة الانموذج الأول ، أما الانموذج الثالث فكان ذو حزمة عريضة جداً مقارنةً بالنماذج الأخرى ، والسبب في ذلك يعزى الى القيم العددية لمعامل إنكسار الطبقة الثانية ، ومن منحنيات الأشكال نستنتج أنه كلما كان معامل الإنكسار للطبقة الثانية أقل حصلنا على حزمة عريضة من الإنعكاسية للأطوال الموجية حول طول موجة التصميم للمرأة العازلة . كذلك أن القيمة العددية لمعامل الإنكسار للطبقة الثانية تؤثر في مقدار السمك البصري وهو ما يؤثر في مقدار عدد الطبقات ومن ثم سيؤثر في مقدار الإنعكاسية لمتعدد الطبقات إذ الطلاءات البصرية ذات الإنعكاسية العالية تركيب تداخلي يتحدد أداءه البصري بتأثيرات التداخل للامواج المنعكسة المتعددة بين مختلف حدود الطبقات وتكون أغلب المعلمات الفيزيائية المهمة هي الاطوار والسعات لتلك الامواج وهذه بدورها معتمدة على معامل الانكسار لمادة الطبقة وسمكها ، كذلك فإن القيمة

العددية لمعامل الانكسار للطبقة الأولى له تأثير في مقدار الانعكاسية لمتعدد الطبقات ولكننا في هذا البحث لم نلاحظها لإننا قد ثبتنا مادة الطبقة الأولى لكل النماذج المصممة .

الاستنتاجات

- 1- إن اختيار عدد الطبقات وتثبيت الطول الموجي المركزي تبعاً لمتطلبات التصميم وسياق الحل وصولاً إلى تحقيق الاستجابة الطيفية المطلوبة وبدقة عالية.
- 2- إن الأداء البصري الأمثل في بناء المرايا يتأثر جداً بأي تغيير في السمك البصري الكلي للطبقات فضلاً عن اختيار تسلسل الترسيب التراكمي للطبقات، عدد تلك الطبقات، انتقاء المواد العازلة.
- 3 - في بناء مرشحات الانعكاسية العالية يمكن الحصول على حلول للمسائل المطروحة مستندة إلى مواد عدة بمعاملات انكسار مختلفة يمكن الوصول إلى تصميم طلاءات بصرية معقدة تلتقي ومواصفات الامتلية للاداء البصري بأقل عدد من المواد وبأقل كلفة وبمواد متاحة مختارة تبعاً لخصائصها البصرية والفيزيائية.
- 4- من الممكن تصميم طلاءات بصرية معقدة التي تلتقي مع مواصفات الاداء البصري الامثل بأعتماد مادتين بصرية ذات معاملات انكسار متناوبة ($n_L \cdot n_H$) والتي تعرض تغيير حاد في معاملات انكسارهما. فكلما كانت نسبة التغيير في معاملات الانكسار (n_H / n_L) كبير وللمجموع سمك بصري قليل لطبقات الطلاء لا يتجاوز سمك الغشاء حصلنا على أداء بصري أمثل يمتد لمدى عريض من الطيف المختار.
- 5- عند إضافة طبقات جديدة لا يؤثر في عرض منطقة الانعكاسية، لكن الانعكاسية تزداد داخلها وتزداد عدد الذبذبات على جانبي التصميم.
- 6- من الممكن الحصول على مرشحات بصرية تمرر حزم طيفية بنسب معينة (Band Pass) فضلاً عن كونها مرايا وعند طول موجة التصميم المختار.

المصادر

- 1- Macleod, H.A. (2001), Thin -film optical filters, (3rd ed.). Bristol and Philadelphia Institute of Physics Publication.
- 2- Dobrowliski, J.A. (1976), Modern Computational Methods for Optical Thin Film Systems, thin solid films, 34, 313.
- 3- Dobrowolski, J. A. (2010), Optical properties of films and coatings, Handbook of Optics, chapter 7. McGraw-Hill. New York.
- 4- Ozlem Duyar, and Huseyin Zafer Durusoy (2004), Design and Preparation of Antireflection and Reflection Optical Coatings, Turk J Phys, 28, 139 -144.
- 5- Dobrowolski, J. A. (1997), Numerical methods for optical thin films, Opt. and Phot. News, 72(6), 24-33.
- 6- Kheraj, V. A. (2009), Simulation of reflectivity spectrum for non-absorbing multilayer optical thin films, Pramana journal of physics, Indian Academy of Sciences, 72(6), 1011-1022.
- 7- 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.
- 8- 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.
- 9- Sheppard. C.J.R, (1995), Approximate calculation of the reflection coefficient from strained medium", Pure and Applied Optics, Journal of the European Optical Society, part A4, 665,
- 10- Tropf. W. J., Thomas. M. E., and Harris T. J. (1995), Handbook of Optics, Volume II Devices, Measurements, and Properties, 2nd Ed. Edited by M. Bass, McGraw- Hill, New York.
- 11- Nasser Mahmud Ahmed (2006), Design and experimental studies of Multilayer Coatings for Applications in Gallium nitride Emitting Devices, Ph.D. Thesis, Universiti Sains Malaysia.

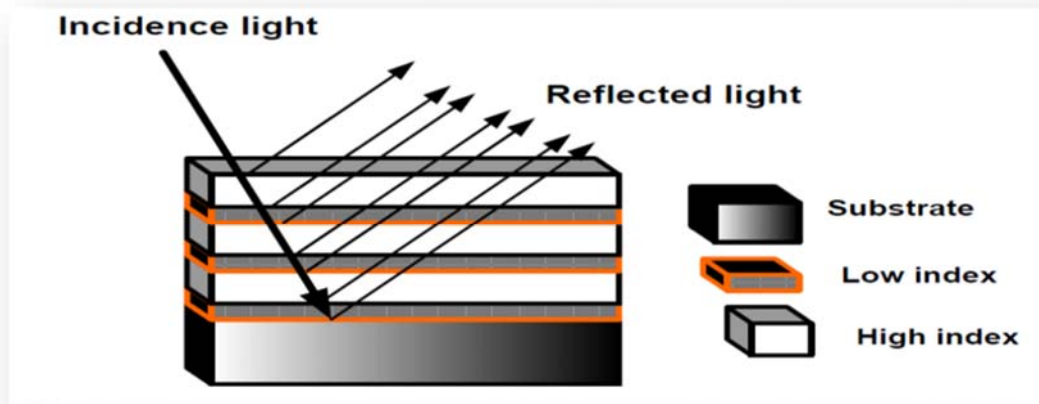


جدول رقم (1) : قيم معاملات الإنكسار لمواد التصميم [10]

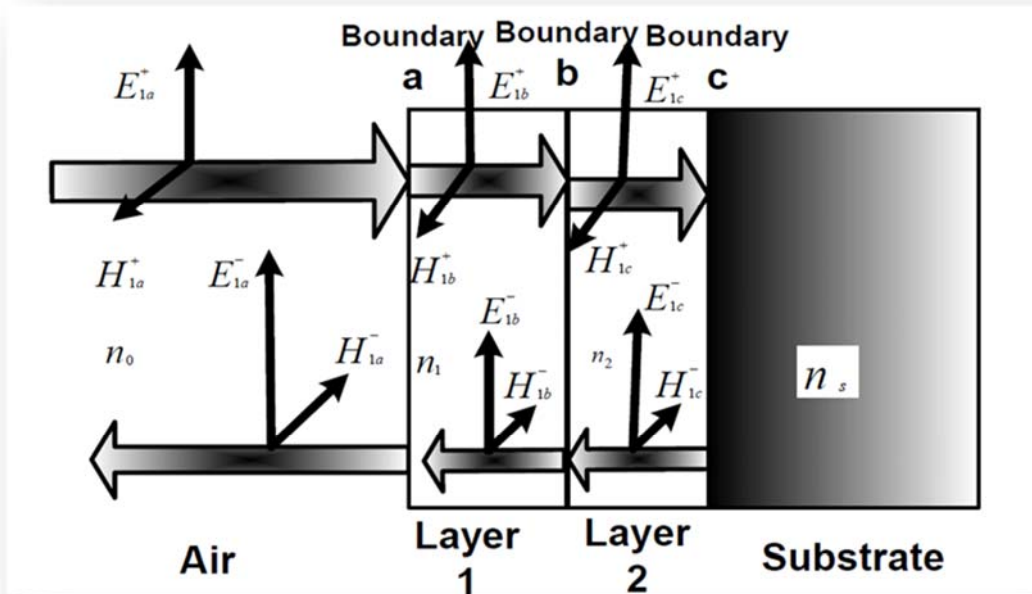
المادة	AlAs	TiO ₂	SiC	Si ₃ N ₄
معامل الإنكسار	3.252	2.803627	2.663	2.0327122

جدول رقم (2) : يمثل نتائج الحسابات لنماذج المرايا العازلة المصممة

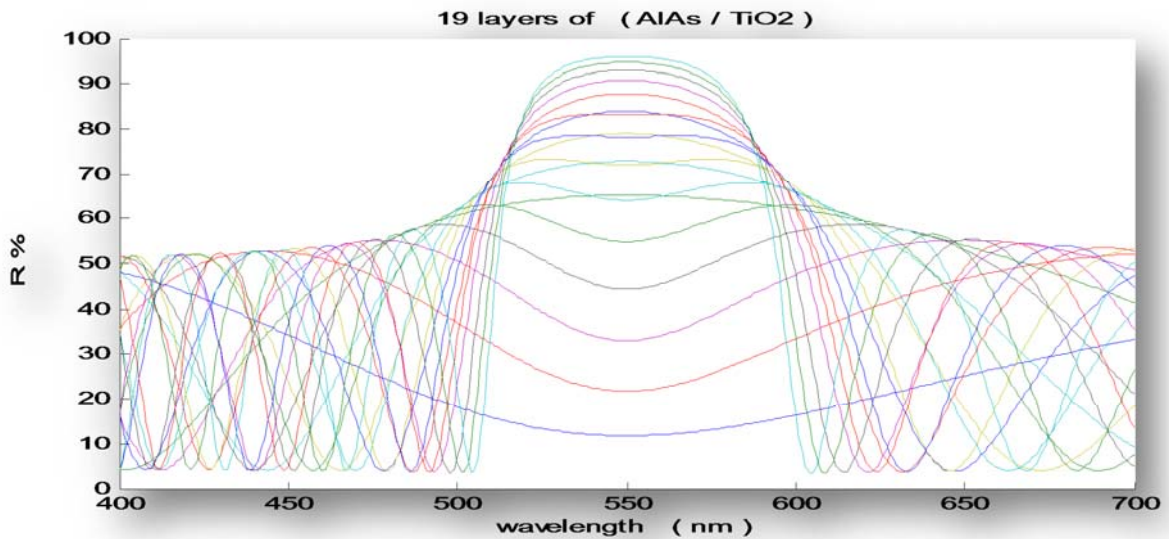
الانموذج	المواد	الإنعكاسية (R%)	عدد الطبقات	السمك (nm)	العرض الطيفي ($\delta\lambda$)
الأول	AlAs /TiO ₂	96.09	19	864	0.51
الثاني	AlAs / SiC	98.94	21	981	0.54
الثالث	AlAs /Si ₃ N ₄	99.94	18	989	1.63



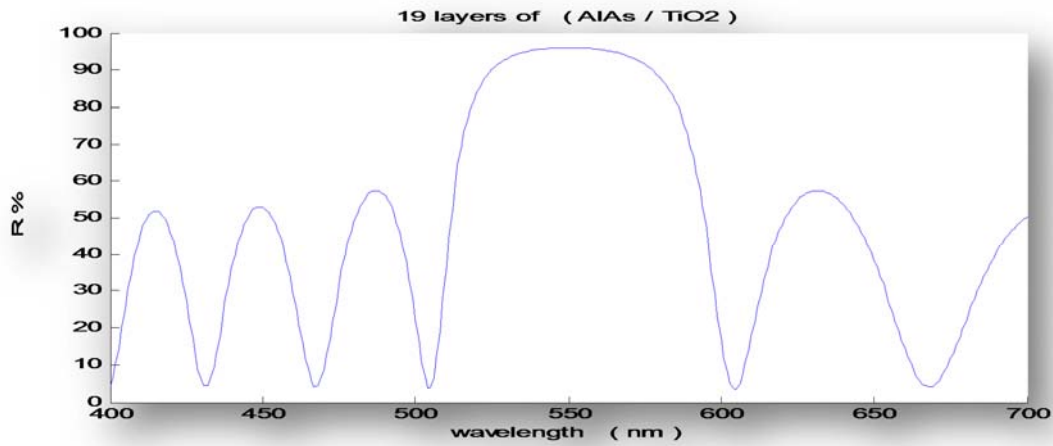
شكل رقم (1) : يوضح تركيب طبقات الكومة ذات ترتيب دوري متناوب [11]



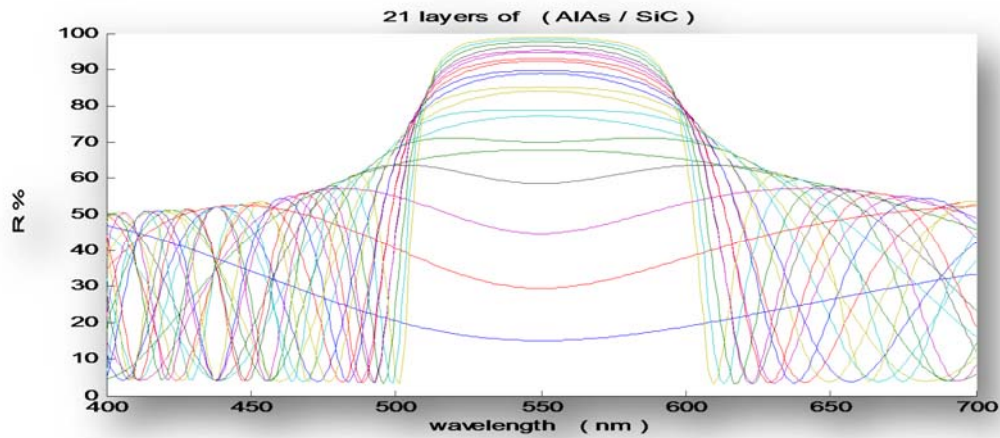
شكل رقم (2) : ترتيب منظومة من غشائين مرصبين على أرضية أساس [11]



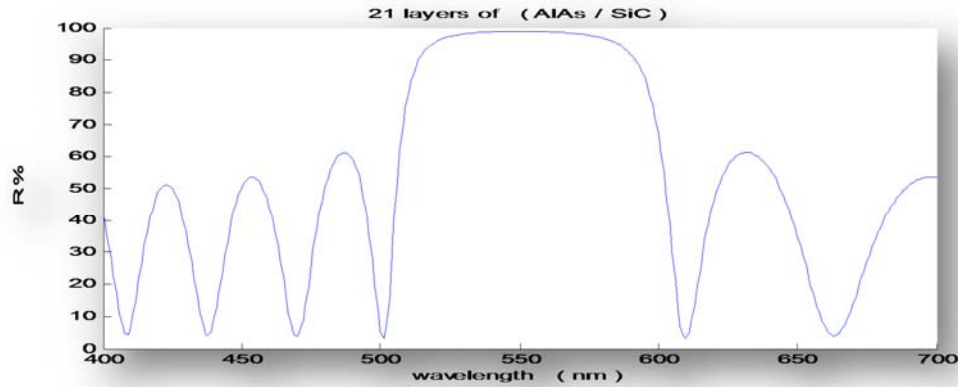
شكل رقم (3) : طيف الانعكاسية للأنموذج الأول لتداخل كل الطبقات بشكل يمثل كل المراحل الى (19) طبقة



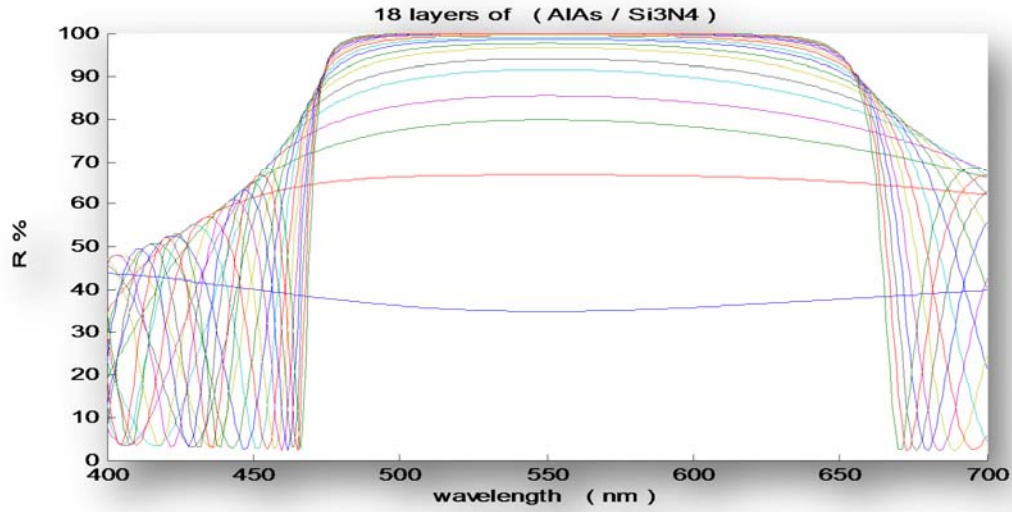
شكل رقم (4) : طيف الانعكاسية للأنموذج الأول لتداخل كل الطبقات بشكل بمرحلة واحدة الى (19) طبقة



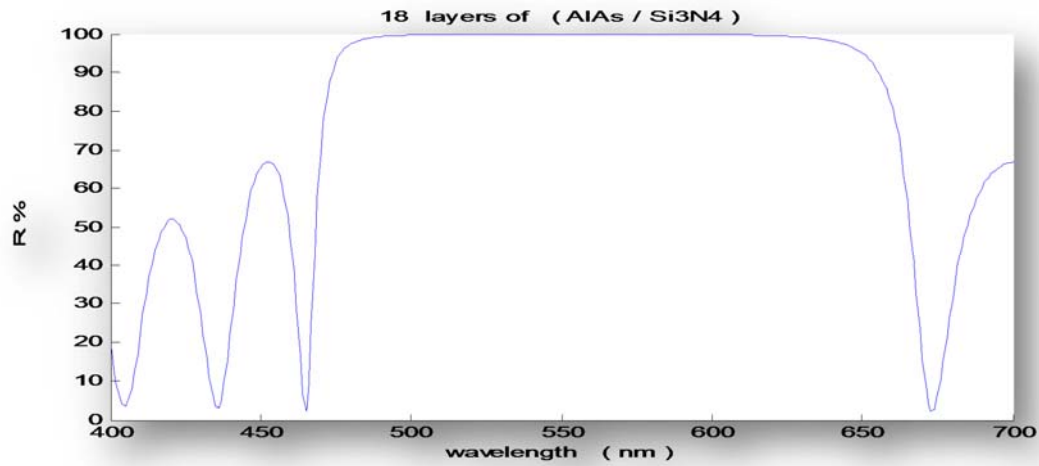
شكل رقم (5) : طيف الانعكاسية للأنموذج الثاني لتداخل كل الطبقات بشكل يمثل كل المراحل الى (21) طبقة



شكل رقم (6) : طيف الانعكاسية للأنموذج الثاني لتداخل كل الطبقات بشكل بمرحلة واحدة الى (21) طبقة



شكل رقم (7) : طيف الانعكاسية للأنموذج الثالث لتداخل كل الطبقات بشكل يمثل كل المراحل الى (18) طبقة



شكل رقم (8) : طيف الانعكاسية للأنموذج الثاني لتداخل كل الطبقات بشكل بمرحلة واحدة الى (18) طبقة

Simulation of Multilayer Mirror Design for Visible region Using MATLAB Language

Fouad A.Asmail

Dept. of Physics / College of Education / University of Mustansiriyah

Fouadd.1956@gmail.com

Harkat M. Roomy

Dept. of Physics / College of Science for Women / University of Baghdad

Received in:12 April 2014 Accepted in:2June 2014

Abstract

In this work, the theoretical study for designing of dielectric mirrors of high reflectance in the visible region of electromagnetic spectrum between wavelength of 400-700 nm is presented, and searching on the performance properties of the design, like there reflectance as a function to the wavelength, as beam incident in a normal form, for the materials of neglected absorbance, and scattering, in the form of thin film deposition, which are deposited on glass substrate, and by using matrix system in the study, which are used as computer simulation in MATLAB code.

The materials which are used in this study are represented by (AlAs), (TiO₂),(SiC), and (Si₃N₄), which used in the designing mirrors alternating on the refractive index in the form of stacks series of quarter wavelength with high and low refractive index to get dielectric mirrors of low losses and high reflectance.

From the results, the high difference of refractive index gave high reflectance with lower number of layers.

Key words: multilayer optical coating, matrix system, dielectric mirrors, MATLAB Program