

1- المقدمة:

أضحى الطلاء متعدد الطبقات للأغشية البصرية الرقيقة حاجة ملحة وضرورية ، وبات يستخدم حالياً بشكل واسع النطاق في مختلف العناصر البصرية والكهربوبصرية وضمن مدى طيفي عريض ممتد من الأشعة فوق البنفسجية إلى تحت الحمراء البعيدة وذلك للتحكم والسيطرة على قيم كل من انعكاسية الضوء وامتصاصيته ونفاذيته كدالة للطول الموجي [1].

يشمل الطلاء متعدد الطبقات ترسيب المواد العازلة بشكل أغشية خاصة لمنع الانعكاسية (AR) Anti Reflection أو أغشية ذات انعكاسية عالية High Reflection (HR) لمختلف المواد البصرية المختبرية والميدانية كعدسات الكاميرة والتلسكوب [2] ، وفي مجزئات الحزمة ومختلف المرشحات البصرية [3] ، والخلايا الشمسية [4] ، ومرايا الليزر [5]. وغالبا ما تستخدم تقنية التبخير بالشعاع الإلكتروني في عملية الترسيب [6,7] ، او تقنية المرذاذ للشعاع الإلكتروني او مرذاذ البلازما اللولبي [8] .

إن الأهمية في اختيار المواد الخاصة العازلة تكمن بصورة رئيسة في الهدف من استخدامها فقد استخدمت المادة MgF_2 فلورا يد الغنيسيوم لأول مرة (كطبقة واحدة) في الحرب العالمية الثانية من قبل الجيش الألماني وذلك لمنع انعكاسية الضوء المرئي في عدسات التلسكوب [4]. وكما استخدمت للسبب نفسه في الخلايا الشمسية [9] . واستعملت المادة TiO_2 أكسيد التيتانيوم كأول مادة تعمل مع تقنية التبخير بالشعاع الإلكتروني [10] . واستخدمت المادتان معا في صناعة مرآة عالية الانعكاسية للطول الموجي المرئي $460 \mu m$ بعد أن تم حساب السمك المناسب لكل طبقة عند الطول الموجي المذكور من قبل **Macleod** المدرج في المصدر [11] . ويتم اختيار المواد العازلة طبقا لطبيعة الشريحة الأساسية التي يترسب عليها وعلى وظيفة النموذج المترسب والظروف العملية المحيطة به والكلفة الاقتصادية [4] .

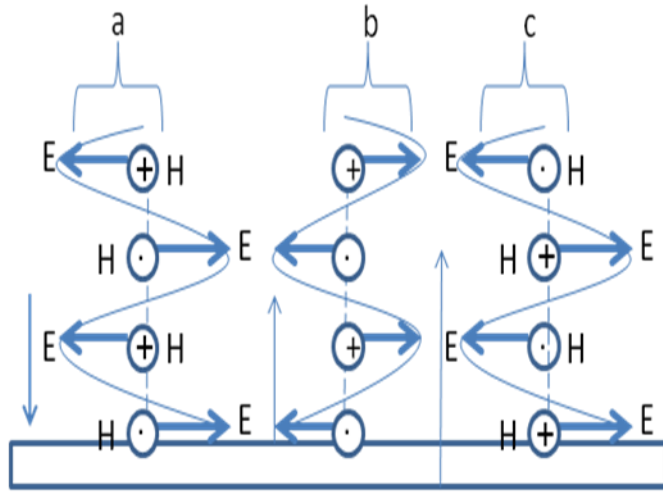
تعتمد انعكاسية الأغشية الرقيقة / المتكونة من مجموعة من المواد العازلة بشكل طبقات متراكمة ذات معاملات انكسار مختلفة / على ظاهرة التداخل البناء (كحالة HR) أو على التداخل الهدام (كحالة AR) للأشعة المنعكسة من على الأسطح الفاصلة بين هذه الطبقات، لذلك ، فان اختيار تسلسل الترسيب التراكمي للطبقات وعدد تلك الطبقات فضلا عن انتقاء المواد العازلة والسمك البصري لها سيؤدي إلى تحقيق الاستجابة الطيفية والانعكاسية المطلوبة [7] .

وكمحاولة عملية لتكوين نموذج لانعكاس البناء قمنا في بحثنا هذا بترسيب المواد العازلة TiO_2 / MgF_2 وبشكل طبقات متناوبة على شريحة زجاجية باستخدام تقنية التبخير بالشعاع الإلكتروني وذلك لصناعة مرآة عالية الانعكاسية لطيف الأشعة تحت الحمراء والمتمركز حول الطول الموجي $1.2 \mu m$ لما لهذا الطيف من أهمية كبيرة وخاصة في المجال التطبيقي لعمليات الكشف والتصوير الليلي وقياس المدى فضلا عن استخداماته المدنية والحربية وبخاصة في مجال الليزر .

2- الجزء النظري

من المعلوم أن الضوء على وفق النظرية الموجية عبارة عن موجات كهرومغناطيسية مستعرضة تتألف من مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متعامدين مع بعضهما ومع اتجاه انتشار الأشعة ويمكن أن تتداخل مع بعضها مكونة نمودجا من الأهداب المضيئة (حالة التداخل البناء) والمظلمة (حالة التداخل الهدام) وخاصة منها المتوافقة مكانا وزمانا كما أن الأشعة تنعكس من على السطوح الفاصلة بين وسطين مختلفين في الكثافة الضوئية أو في معامل الانكسار بحيث ينعكس المتجه الكهربائي بفرق طور قدره π عن الأشعة الساقطة ويبقى المجال المغناطيسي على حاله في كون الانعكاس من وسط معامل انكساره واطئا إلى وسط معامل انكساره عالي (كحالة الانعكاس بين الهواء والزجاج) بينما يبقى المتجه الكهربائي على حاله ويتغير المتجه المغناطيسي بفرق طور قدره π عن الأشعة الساقطة في حالة الانعكاس من وسط معامل انكساره العالي إلى وسط معامل انكساره الواطئ (كحالة الانعكاس بين الزجاج والهواء) [12].

الشكل (1) يوضح هذه الظاهرة من خلال انتقال الموجة الضوئية في الهواء بمعامل انكسار $n = 1$ وانعكاسه من على غشاء رقيق بمعامل انكسار أكبر من واحد، إذ أن E يمثل متجه المجال

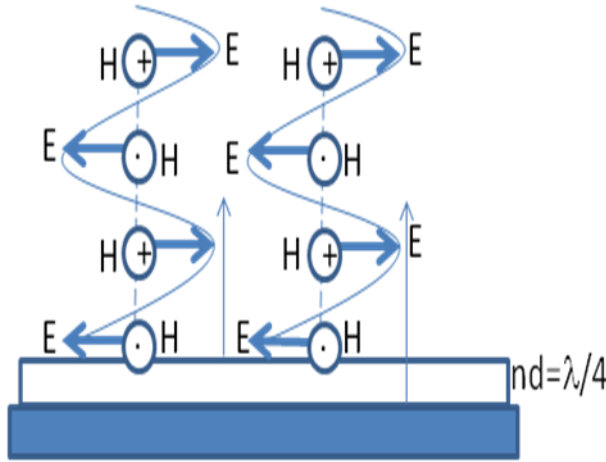


شكل (1) سلسلة المتجهات الكهربائية والمغناطيسية للموجة الكهرومغناطيسية الساقطة، (a) الساقطة، (b) و (c) المنعكسة عن أسطح الأغشية الرقيقة [12].

الكهربائي، ويمثل H متجه المجال المغناطيسي، وللتبسيط نفترض بأن الضوء موجة مستقطبة استقطابا خطيا و E موازيا لمستوى السقوط ممثلا باتجاه رأس السهم على جبهة الموجة، والشكل يبين الموجات المنعكسة من السطح الأول (b) (الانعكاس من وسط واطئ إلى عال) والسطح الثاني (c) (الانعكاس من وسط عال إلى واطئ) وعند مقارنة الأشعة (b,c)

فان كلا المجالين E و H متعاكسان تماما في الحالتين وحين تتراكب هاتين الموجتين وتتداخل فان سعة محصلة المجالين تكون قريبة من الصفر في أي موقع وفي أية لحظة (بمعنى لا يوجد ضوء منعكس من على غشاء بسمك أقل من الطول الموجي للضوء الساقط) [12].

عندما يكون λ الطول الموجي للضوء الساقط في الهواء و n معامل الانكسار للغشاء فان الطول الموجي في الغشاء هو λ/n وحين يكون سمك الغشاء مساويا لربع الطول الموجي $\lambda/4n$



شكل (2) توافق الموجات المنعكسة عن سطحي الغشاء الرقيق بسمك $1/4$ طول موجي [12].

فان الموجة المنعكسة من السطح الثاني ستتخلف عن الموجة الساقطة بنصف طول موجي ، وان سلسلة الموجات المنعكسة يوضحها الشكل (2) ، من ذلك يتبين بأن كلا المتجهين E و H للموجات المنعكسة سيكونان بالاتجاه نفسه وان الطور سيكون في كل المواقع واللحظات وهذا يعني بأنهما سيتداخلان تداخلا بناء وتكون سعة محصلة التراكب ضعفا لأي منهما [12] .

مما سبق يتبين بان الضوء المنعكس تزداد شدته ويقوى في حالة سقوطه عموديا عند استخدام غشاء عاكس بسمك $\lambda/4n$ ويعبر عن شرط حدوث التداخل البناء للأشعة المنعكسة بالمعادلة الآتية [12] :-

$$nd = (2m + 1) \lambda/4 \dots\dots (1)$$

وعن التداخل الهدام بالمعادلة الآتية [13] :-

$$nd = m \lambda/2 \dots\dots\dots(2)$$

فان m عدد صحيح ، d السمك الهندسي للغشاء ، nd السمك البصري للغشاء . إي ان الانعكاس تزداد شدته عندما يكون سمك الغشاء ($\lambda/4n , 3\lambda/4n , 5\lambda/4n , \dots$) بينما ينعدم وتقل شدته عند سمك غشاء ($zero , \lambda/2n , 2 \lambda/2n , 3 \lambda/2n, \dots$) [12] .

ويمكن التعبير عن نسبة انعكاسية الضوء الساقط عموديا والقادم من الهواء بالمعادلة الآتية [12] :

$$R = (n-1)^2 / (n+1)^2 \dots\dots(3)$$

وهذا يعني لأسطح الزجاج العادي ($n=1.5$) سينعكس الضوء الساقط عموديا بحوالي 4% ، بينما تتغير هذه النسبة بتغير زاوية السقوط وتبقى بحدود 4% إلى زاوية سقوط 30° ، ويختفي الاستقطاب الخطي الموازي لمستوى السقوط P-Polarized عن الأشعة المنعكسة عند زاوية سقوط 39° (زاوية بروستر) إذ يتعامد الشعاع المنعكس والمنكسر وتصل نسبة الانعكاسية إلى 15% ويصبح الضوء المنعكس مستقطبا خطيا كليا فقط باتجاه المستوى العمودي على مستوى السقوط S-Polarized [12] .

ويعبر عن نسبة الانعكاسية للضوء الساقط عموديا في حالة استخدام طلاء أغشية رقيقة متعددة الطبقات على شريحة زجاجية أساسية بالمعادلة الآتية [14] :-

$$R = [(n_H)^{i+1} - (n_L)^{i-1}n_s / (n_H)^{i+1} + (n_L)^{i-1}n_s]^2 \dots (4)$$

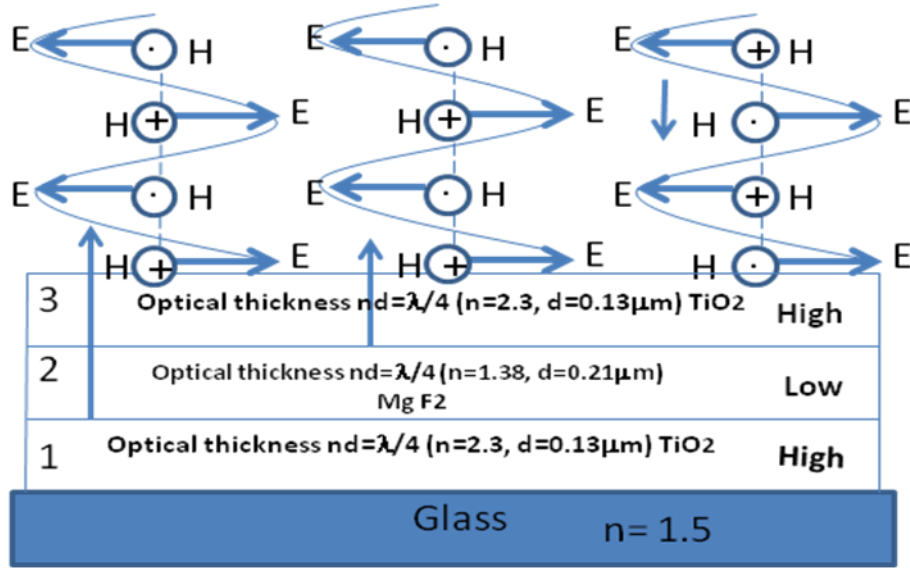
فيعد n_H معامل الانكسار العالي للغشاء ، n_L معامل الانكسار الواطئ للغشاء ، n_s معامل الانكسار للشريحة الأساس ، i عدد الطبقات للأغشية الرقيقة . أو بالمعادلة الآتية [6]:

$$R = [n_s/n_o - (n_L/n_H)^{2i} / n_s/n_o + (n_L/n_H)^{2i}]^2 \dots (5)$$

فان $n_o = 1$ معامل انكسار الهواء .

3- التقنية العملية

تم ترسيب مادة أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنقاوة 99 % ذات معامل الانكسار العالي $n=2.3$ بسمك $0.13 \mu m$ على الشريحة الزجاجية ذات معامل الانكسار $n = 1.5$ ومن ثم ترسيب مادة فلورا يد المغنيسيوم MgF_2 بنقاوة 99% ذات معامل الانكسار الواطئ $n=1.38$ بسمك $0.217 \mu m$ فوق اوكسيد التيتانيوم [15] ، وهكذا تتكرر عملية الترسيب بالتناوب لتحقيق شرط التداخل البناء للأشعة المنعكسة ولتهيئة السمك المكافئ لربع الطول الموجي $1.2 \mu m$ وصولا إلى أعلى انعكاسية ممكنة وكما هو مبين بالمخطط التوضيحي في الشكل (3).



شكل (3) المخطط التوضيحي للشريحة الزجاجية التي قمنا بترسيب الأغشية الرقيقة عليها

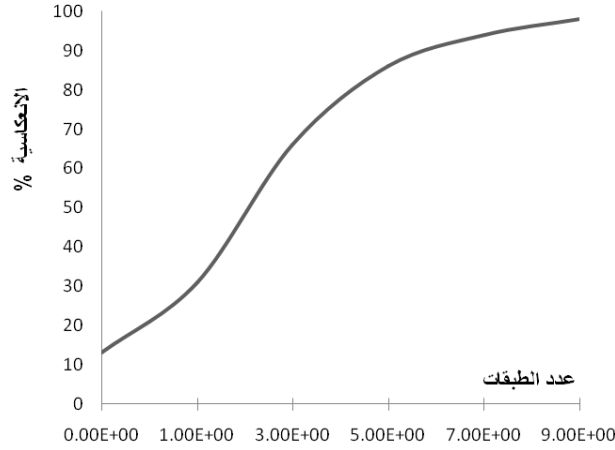
تمت عملية الترسيب في مختبر بحوث الأغشية الرقيقة لشركة الكندي العامة باستعمالنا لمنظومة الطلاء Leybold Heraeus model.A700Q beam تحت ضغط 4×10^{-6} mbar فقد ثبتنا الشريحة الزجاجية في الدوار الخاص بالجهاز وعلى بعد 40.6cm عن مصدر الحزمة الالكترونية التي تعمل على تبخير المواد الخاصة بتكوين الأغشية ، كما استخدمنا جهاز المراقب البصري OMS2000 التابع لمنظومة الطلاء الذي يعمل على التحكم الآلي و السيطرة الذاتية لسلك الغشاء المكافئ لربع الطول الموجي ، ولذلك قمنا بتثبيت السمك الخاص بالطول الموجي $1.2\mu\text{m}$ لكل طبقة يدويا على منظومة الطلاء استنادا على المعادلة الآتية [14] :-

$$n_H d_H = n_L d_L = \lambda/4 \dots\dots(6)$$

وكما موضح في الشكل (3) ولتثبيت عملية التصاق الطلاء بالسطح الزجاجي وتحسينها قمنا بتسخين النموذج البصري داخل جهاز الترسيب لدرجة حرارة تصل إلى 250°C .
ولفحص الطيف الضوئي المنعكس من على النموذج المطلي بالأغشية قمنا بتهيئة منظومة اختبار تتكون من مصدر ضوئي Halogen lamp وجهاز لقياس الشدة الضوئية Photometer ومرشحات بصرية قياسية متعددة Narrow Band pass Interference filters وبعرض طيفي 50nm لكل مرشح ضمن الطيف ($0.7-1\mu\text{m}$) و 100nm ضمن الطيف ($1\mu\text{m}-2.5\mu\text{m}$) .

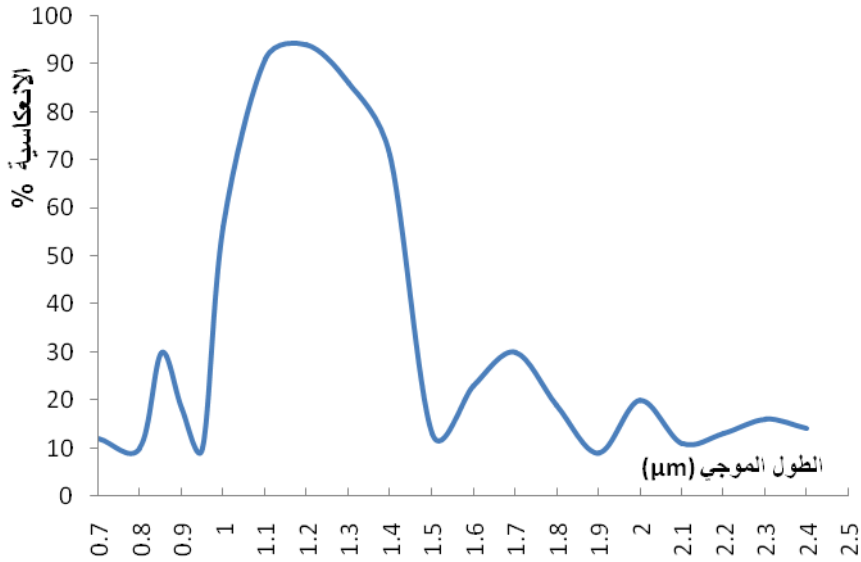
4- النتائج والمناقشة

لتوضيح تأثير عدد طبقات الأغشية الرقيقة على نسبة الانعكاسية قمنا برسم المعادلة (4) عندما تكون قيم معاملات الانكسار $n_L=1.38$, $n_H = 2.3$ للمواد MgF_2 و TiO_2 على التوالي وكما موضح بالشكل (4) ونلاحظ من خلال ذلك زيادة شدة الانعكاسية بزيادة عدد الطبقات.



شكل (4) العلاقة بين عدد الطبقات للأغشية الرقيقة والانعكاسية

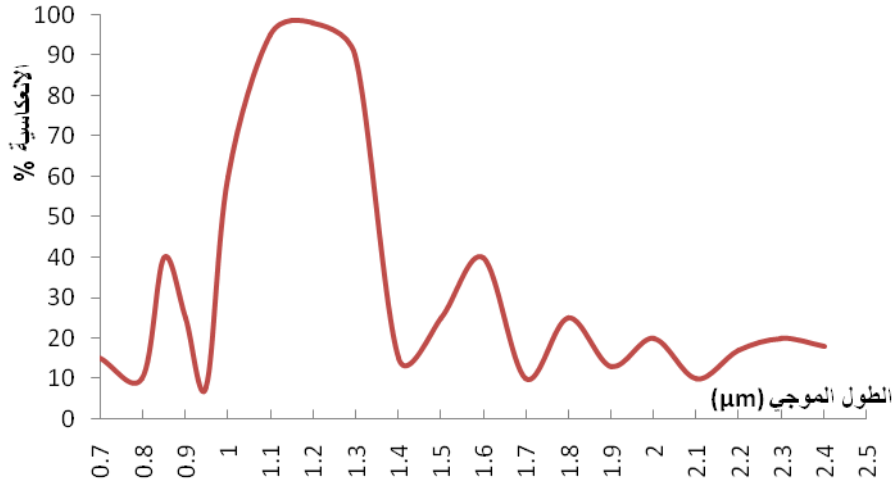
لذلك قمنا بترسيب الأغشية على نموذجين أحدهما بسبع طبقات والآخر بتسع طبقات متتالية بالتناوب للمادتين (TiO_2 / MgF_2) ويوضح الشكلان (5,6) نتائج الفحص المختبري لطيف الانعكاسية للنموذجين .



شكل (5) العلاقة بين الطول الموجي والانعكاسية للنموذج المطلي بسبع طبقات من الاغشية الرقيقة

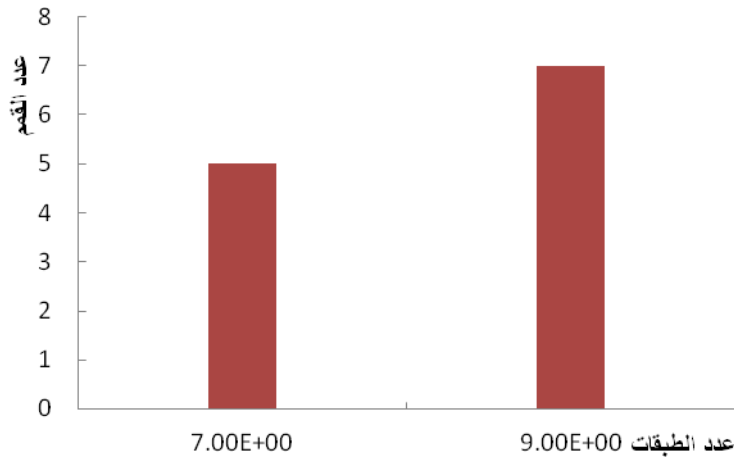
الشكل (5) يعود للنموذج المطلي بسبع طبقات إذ نلاحظ أن نسبة الانعكاسية تصل إلى 94% عند الطول الموجي $1.2\mu m$ بينما تصل الانعكاسية إلى 98% في الشكل (6) للنموذج

المطلي بتسع طبقات وهذا ما يتفق ويتطابق مع التحليلات النظرية الخاصة بإنتاج نماذج ذات انعكاسية عالية عند طول موجي معين .



شكل (6) العلاقة بين الطول الموجي والانعكاسية للنموذج المطلي بتسع طبقات من الاغشية الرقيقة

نلاحظ أن ما يميز طيف الانعكاسية للطبقات الربع موجية لكلا النموذجين الموضحين بالشكلين (5,6) كونه يحوي منطقة رئيسة وسطية ([4] , Stop band) ذات انعكاسية عالية متزايدة مع عدد الطبقات تناظر الطول الموجي المعني بالتصميم (1.2μm) محاطة بعدد من القمم أو الموجات الثانوية ([4] , Pass band) متناقصة الانعكاسية لكلا الجانبين يعتمد عددها وقيم انعكاسيتها على عدد الطبقات المرسبة بحيث تعمل على زيادة عرض طيف الانعكاس وتحد من سمك المنطقة الوسطية وكما هو موضح بالشكل (7) والبيانات العملية المستنتجة من الشكلين (5,6) المدرجة في الجدول الاتي (جدول I) .



شكل (7) العلاقة بين عدد طبقات الاغشية وعدد القمم لتطيف الضوئي المنعكس

الجدول (1) يوضح أهم البيانات العملية المتعلقة بالنموذجين المطليين

9	7	عدد الطبقات
98	94	أقصى انعكاسية % R_{max}
40	30	الانعكاسية لأقرب قمة % R
0.40	0.42	عرض منتصف أقصى انعكاسية (FWHM) (μm)
7	5	عدد القمم

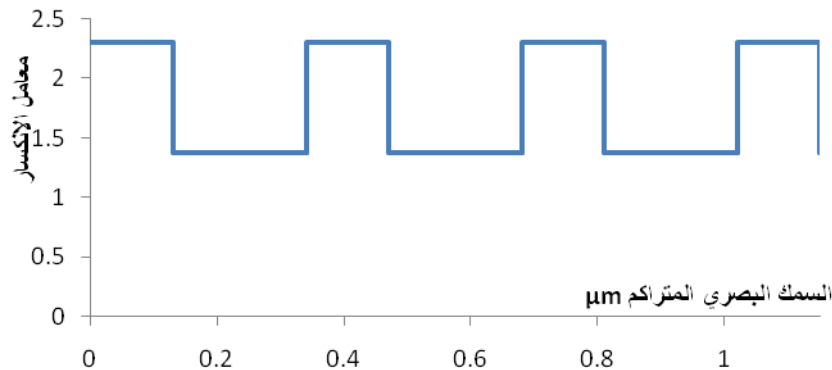
ولحساب العرض الطيفي نظريا للمنطقة الوسطية Stop band ، $\delta\lambda_{HR}$ تستخدم

المعادلة الآتية [16] :

$$\delta\lambda_{HR} = (4 \lambda_0 / \pi) \arcsin (n_H - n_L / n_H + n_L) \dots \dots \dots (7)$$

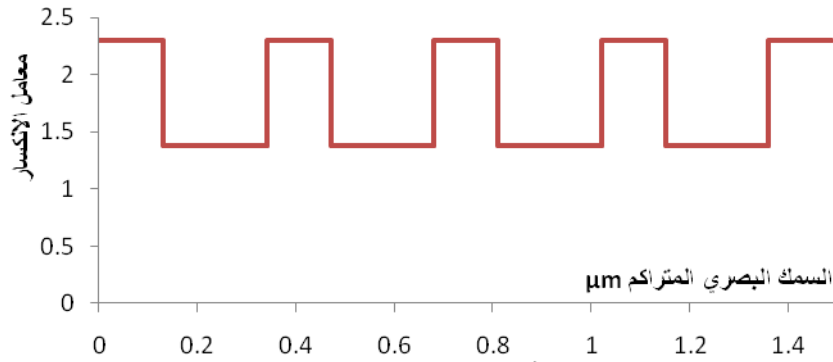
إذ أن λ_0 يعد الطول الموجي المركزي ، من ذلك نستنتج أنه بالإمكان ضبط كل من نسبة الانعكاسية والعرض الطيفي للضوء المنعكس عن النموذج البصري من خلال التحكم بسمك الطبقات المترسبة .

وللتحقق من المعادلة (6) ولمعرفة شكل التغير في معامل الانكسار مع السمك البصري المتراكم، تم رسم الشكلين (8) ، (9) الخاصين بالنموذجين قيد الدراسة .



شكل (8) العلاقة بين معامل الانكسار والسمك البصري

المتراكم للنموذج المطلي بسبع طبقات

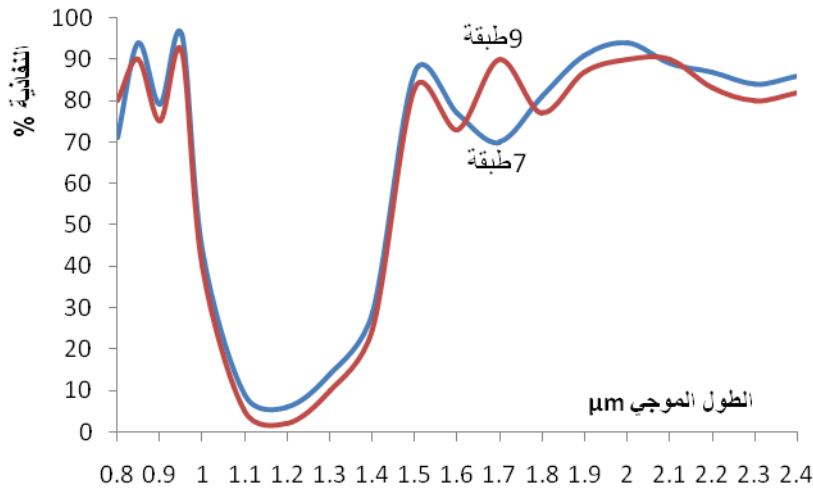


شكل (9) العلاقة بين معامل الانكسار والسلك البصري

المتراكم للنموذج المطلي بتسع طبقات

وقد تبين بان الطول الموجي المناظر لأية قيمة من قيم معامل الانكسار المتكررة هو $0.3\mu\text{m}$ والذي يساوي ربع الطول الموجي $1.2\mu\text{m}$.

ومن وجهة نظر معكوسة لطيف الانعكاسية للنموذجين , في الشكلين (5) و (6) , تم رسم طيف النفاذية لهما وكما هو موضح في الشكل (10) إذ تصل أقصى نفاذية إلى % 96 عند الطول الموجي $0.95\mu\text{m}$ و % 94 عند الطول الموجي $2\mu\text{m}$ و % 44 عند الطول الموجي $1\mu\text{m}$ للنموذج المطلي بسبع طبقات بينما تقل إلى % 92 , % 90 , % 40 عند الأطوال الموجية ذاتها للنموذج المطلي بتسع طبقات .



شكل (10) العلاقة بين الطول الموجي والنفاذية للنموذجين

المطلين بسبع وتسع طبقات من الاغشية الرقيقة

هذه النتائج تتفق مع العديد من البحوث والمقالات المنشورة في هذا المجال وكما في

المصدرين [4] ، [6] .

5- الاستنتاجات

لقد أظهرت هذه الدراسة العديد من النتائج أهمها : إن عملية الترسيب المتعدد الطبقات قد تمت بنجاح تام . وإن نسبة الانعكاسية وعدد التموجات الجانبية تزداد ، بينما يقل العرض الطيفي للموجة الوسطية بزيادة عدد الطبقات المترسبة . وإن التقنية المتبعة في هذه الدراسة لعملية التراكم للأغشية الريع موجية تكون مفيدة في وضع التصاميم الخاصة لإنتاج مرشحات بصرية بعرض طيفي محدد Band pass بحيث تمرر حزم طيفية بنسب مختلفة وعند أطوال موجية معينة فضلا عن كونها مرايا ذات انعكاسية عالية عند الطول الموجي $1.2\mu\text{m}$.

عرفان

نود أن نعبر عن شكرنا وتقديرنا للدكتور مزاحم إبراهيم الأستاذ المساعد في قسم الفيزياء لكلية التربية في جامعة الموصل لدعمه المتواصل لهذه الدراسة .

المصادر

1. D. Ristau, in *Optical interference coatings*, Springer, Springer series in optical sciences, Eds.: Kaiser , N. and Pulker, H.K., Berlin, Vol. 88, pp. 181-205 , 2003.
2. J .T. Rayner and D .Toomey, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 115, 362 , 2003 .
3. L. Li and J .A. Dobrowolski , *Appl. Opt.* 39(16) , 2754 , 2000 .
4. T. Pilvi , "Atomic Layer Deposition For Optical application: metal fluoride thin films and novel devices", Academic Dissertation, Department of Chemistry , Faculty of Science , University of Helsinki, Finland , 2008 .
5. P. V. Bhore , "Effect of coating on laser diode characteristics", *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* ,vol.11, pp.438-440 , 2004.
6. L. Orsila , "Optical thin film Technology For Ultrafast Lasers " , PhD dissertation ,Tampere University of Technology , 2008 .
7. V. A. Kheraj , "Simulation of reflectivity spectrum for non-absorbing multilayer optical thin films", *Pramana journal of physics* , Indian Academy of Sciences Vol. 72, No. 6 , , pp. 1011-1022 . June 2009.
8. M. Frizl and F. Waibel , " Coating Materials for Different Deposition Techniques " , 12June 2003.
9. H. Hun Yang , "A Study on the Properties of MgF₂Antireflection Film for Solar Cells " , *Transactions on Electrical and Electronic Materials* , Vol. 11, No. 1, pp. 33-36, February 25, 2010 .
- 10.J.S. Chen and S. Chao, "Substrate-dependent optical absorption characteristics of titanium dioxide thin films", *Appl. Opt.* 36: 4403-4408 , 1997.
- 11.H. A. Macleod, in *Thin-film optical filters* , 3rd edition, Ed.W.T., Institute of physics publishing, Welford, 2002 , 1.

12. Francis Weston Sears , Optics , Dartmouth College, 3rd edition , London , pp.174-175, 203-205 . 1964 .

13. قصير . فاروق عبودي ، الفيزياء لطلبة علوم الأرض ، جامعة الموصل/ كلية العلوم

قسم الفيزياء (1991) .

14. W.T. Silvast , Laser Fundamentals , Cambridge University Press , 2nd edition , UK , 2003 .

15. J.Q. XI and F. Martin, "Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection " , nature photonics Vol. 1, March 2007.

16. C.J.R. Sheppard, "Approximate calculation of the reflection coefficient from strained medium " , Pure and Applied Optics , Journal of the European Optical Society , part A4,665, 1995 .