

تصحيحات مقترحة على علاقات الخواص الفيزيائية λ_0 ، R_{\max} ، $\delta\lambda$ لأغشية رقيقة متعددة الطبقات من مواد عازلة

مجد حماد⁽¹⁾

تاريخ الإيداع 2013/05/13

قبل للنشر في 2013/09/30

الملخص

تحتل الأدوات الضوئية المفيدة في مجال التحكم بمعاملات النفوذ والانعكاس، مثل الأغشية الرقيقة متعددة الطبقات، والبلورات فوتونية، وبني براغ المختلفة على صورة قوالب أو أغشية رقيقة متعددة الطبقات بأهمية كبيرة في مجال العلوم الضوئية الطيفية. تعرض هذه الورقة الخواص الطيفية لأغشية متعددة الطبقات مكونة من ثلاثة أزواج من المواد العازلة ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ، $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ ، $\text{ZrO}_2/\text{MgF}_2$)، صنعت من بلورات فوتونية أحادية البعد مؤلفة من (8, 10, 12, 14, 16) طبقة. وبعدها استخرجت ثلاثة مقادير مهمة هي λ_0 ، R_{\max} ، $\delta\lambda$ من المنحنيات الطيفية التجريبية لكل عينة. تظهر مقارنة قيم المقادير λ_0 ، R_{\max} ، $\delta\lambda$ المستخلصة تجريبياً عدم تطابقها مع القيم النظرية المعروفة لمثل هذه الأدوات لذا يقترح تصحيح للعلاقات الناظمة للمقادير السابقة.

الكلمات المفتاحية: الأغشية، البلورة فوتونية.

⁽¹⁾ مشرفة على الأعمال، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

Proposed Correction of Calculated physical Quantities λ_0 , R_{\max} , $\delta\lambda$ for Multi-Layer Thin Films (One-Dimensional Photonic Crystals)

M. Hammad⁽¹⁾

Received 13/05/2013

Accepted 30/09/2013

ABSTRACT

There has been much interest in photonic and spectroscopic devices that are useful for controlling transmission and reflection coefficients such as multi-layer thin films, photonic crystals, and various Bragg structures in the form of molds or multilayer thin films.

In this paper, the spectral characteristics of multi layer thin films of three couples of dielectric materials $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$, and $\text{ZrO}_2/\text{MgF}_2$. were measured, They were made as one-dimensional photonic crystals, of 8, 10, 12, 14, and 16 layers. Three important quantities λ_0 , $\delta\lambda$ and R_{\max} were extracted from experimental spectra for each sample.

Analysis of the above mentioned quantities revealed that there is discrepancy between experimental and theoretical values for these devices. Correction of the regulating formulae for the above mentioned quantities was suggested.

Key Words: Coating, Photonic crystals.

⁽¹⁾ Lab work supervisor, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

المقدمة

البلورات الفوتونية أحادية البعد هي تكرر دوري على محور واحد لوسطين مختلفين بقرينة انكسارهما لأطوال موجية محددة، يمكن أن يكون التكرار الدوري لغشاءين رقيقين مصنعين من مادتين مختلفتي قرينة الانكسار. وفي بعض الدراسات التجريبية [1] ظهر انزياح ما بين قيم المعاملات الضوئية للبلورة الفوتونية أحادية البعد لعدة مواد مقارنة بالدراسة النظرية باستخدام العلاقات المعروفة [2]، وفي دراسة أخرى [3] ظهر مثل هذا الانزياح واضحاً أيضاً، ويمكن النظر إلى تلك التركيبة من وجهة نظر علوم الأغشية الرقيقة على أنها غشاء متعدد الطبقات [4] وأشهر تطبيقاتها هو استخدامها كأدوات ضوئية مضادة للانعكاس أو معززة للانعكاس [5].

مدخل نظري:

تعتمد دراسة سلوك الضوء في الأغشية الرقيقة متعددة الطبقات وتحديد مسارها الضوئي على تطبيق قانون الانكسار على الحدود الفاصلة المتتالية لطبقات المواد المختلفة بقرائن الانكسار. ابتداءً من طبقة الهواء (إذا كانت العينة في الهواء) إلى الحد الفاصل بين آخر طبقة والركازة. يمكن أن تكون الطبقات شفافة لطول الموجة المطلوب أو غير شفافة، ومثل هذه الدراسة معروفة [6] واستفاض بها كثيرون وتم التوصل إلى صيغ رياضية تربط بين قرائن انكسار مواد الأغشية الرقيقة والركازة والوسط الحاضن ومقادير الانعكاس الكلي للعينات والطول الموجي الموافق لانعكاس أعظمي أو نفاذ [7]. طبقت هذه القوانين في حالات متنوعة كما في [8] الذي طبقها على لدائن مطعمة بأصبغة في حالة ورود ناظمي، يعطى شرط الانعكاس الأعظمي بالعلاقة.

$$n_H d_H + n_L d_L = \frac{I_0}{2} \quad (1)$$

يتعلق طول الموجة الأعظمي λ_0 بالثخانة الضوئية للمادتين المستخدمتين d_H ، d_L ، إذ إن ضعف الثخانة الضوئية لكليهما هو الطول الموجي المنعكس أعظمية، أو المجال الموجي الرئيس الذي لا ينفذ، ومن أجل عدد N من الطبقات يحدد بالعلاقة:

$$N(n_H d_H + n_L d_L) = p \frac{I_0}{2} \quad p = 2,3,4,\dots$$

ويعطى عرض هذا المجال $\delta\lambda$ من أجل زوج واحد من المواد العازلة بالعلاقة [8]:

$$dI = \frac{4I_0}{p} \sin^{-1} \left(\frac{1 - (n_H / n_L)}{1 + (n_H / n_L)} \right) \quad (2)$$

كما أن عدد الطبقات يؤثر أيضاً في المجال الموجي الرئيس للانعكاس الأعظمي R_{\max} الذي تصفه العلاقة [8]:

$$R_{\max} = \left(\frac{\frac{n_{air}}{n_{glass}} - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2N}}{\frac{n_{air}}{n_{glass}} + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2N}} \right)^{2N} \quad (3)$$

إذ: N عدد أزواج الطبقات.

من جهة أخرى، يمكن حساب المقادير السابقة (λ_0 ، R_{\max} ، $\lambda\delta$) باستخدام صيغ فورييه الرياضية انطلاقاً من توابع أسية [9] الأمر الذي أشار إليه بعض الباحثين عند دراستهم لطبقات متعددة من الأغشية الرقيقة العازلة إذ لاحظوا وجود اختلاف واضح لنتائج الحسابات المستخرجة بين الطيف التجريبي والطيف النظري فاقترحوا إجراء بعض التعديلات على المعادلات الرياضية المستخدمة للحصول على التوافق بين هذه الحسابات.

مواد البحث وطرائقه

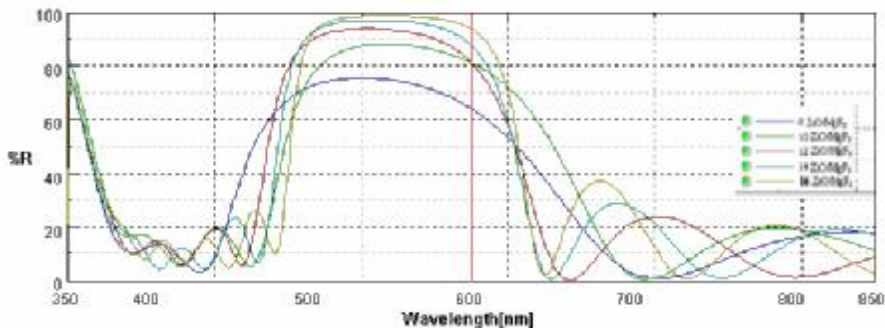
صنعت بلورات فوتونية أحادية البعد على صورة طبقات رقيقة متتالية مغشاة على ركازة زجاجية BK₇، من مادتين عازلتين وفق الجدول (1). وجدنا أن نتائج الدراسة الطيفية لتلك العينات لا تتفق مع النتائج النظرية المحسوبة المعادلات (1,2,3) وكان بعض الباحثين [10,11] قد لاحظ (وجود خلاف واضح بين الطيف التجريبي والطيف النظري لطبقات متعددة من الأغشية الرقيقة).

الجدول (1) أزواج المواد التي صنعت منها العينات وعدد طبقاتها.

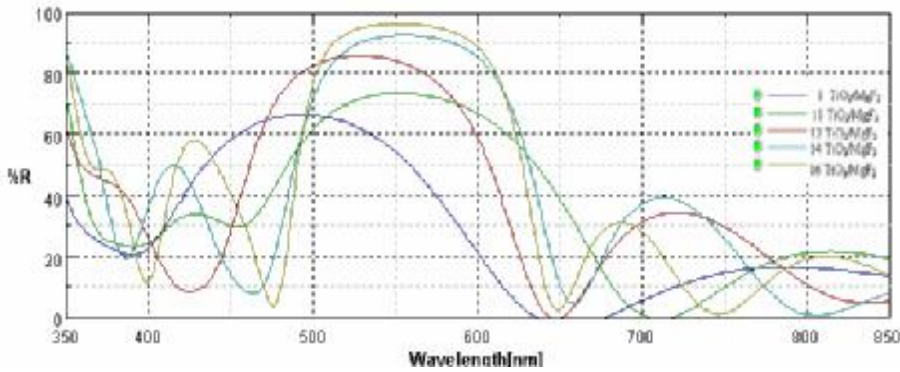
n_H/n_L	عدد الطبقات	مواد الطبقات الدورية
1.45	8,10,12,14,16	ZrO ₂ /MgF ₂
1.52	8,10,12,14,16	TiO ₂ /SiO ₂
1.59	8,10,12,14,16	TiO ₂ /MgF ₂

جرت التغطية بالتبخير تحت الخلاء Pa 10^{-6} . ضبطت ثخانة الغشاء بمقياس الثخانة التقليدي بواسطة بلورة أمواج فوق صوتية (Quartz sensor) وكانت قيمتها 70 nm للطبقات جميعها أي ($d_H = d_H = 70 \text{ nm}$)، وبتطبيق هذه الطريقة على الأزواج الثلاثة السابقة من المواد، ومن أجل عدد طبقات زوجية (8, 10, 12, 14, 16) حُسب عرض المجال الموجي الموافق للانعكاس الأعظمي المبين في الجدول (2)، وذلك بتسجيل أطياف

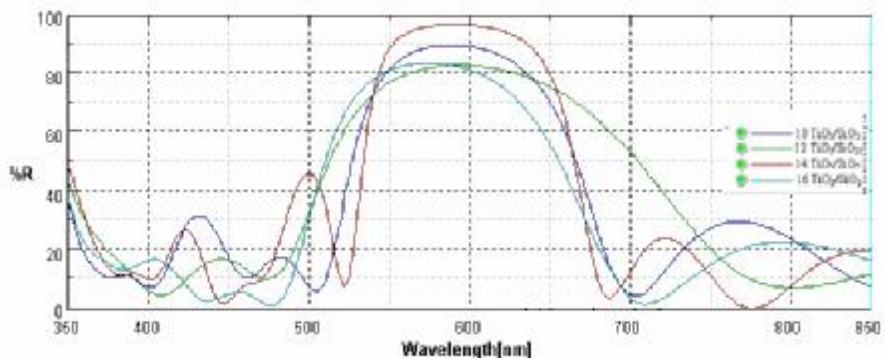
تلك العينات في المجال المرئي ويتضح فيها المجال الموجي الذي تكون فيه الانعكاسية أعظمية، وعرض هذا المجال، كما في الأشكال (1,2,3).



الشكل (1) طيف انعكاس العينات ZrO_2/MgF_2 في الطيف المرئي.



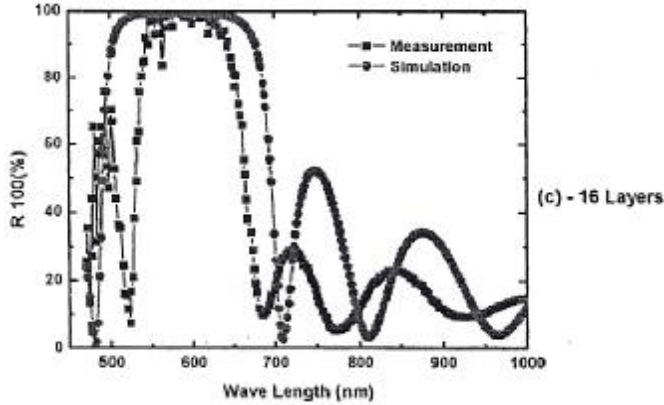
الشكل (2) طيف انعكاس العينات TiO_2/MgF_2 في الطيف المرئي.



الشكل (3) طيف انعكاس العينات TiO_2/SiO_2 في الطيف المرئي.

مناقشة النتائج

1- أمكن تقدير ثخانة الأغشية الرقيقة المبخرة بالخلاء بالطريقة التقليدية ومقارنة النتائج بتلك المقيسة بطريقة حساس الكوارتز داخل جهاز التبخير للثخانة نفسها يوضح الشكل (4) إحدى هذه المقارنات التي تشير إلى أن ثخانة الطبقات المصنعة كانت من مرتبة (75 - 78)، وبهذه الطريقة نستخرج الثخانة d . وتتفق هذه الطريقة مع الطريقة المعروضة في البحث [12] لطول موجة براغ عند تطبيقها من أجل الورود الناظمي المستخدم في البحث الحالي.



الشكل (4) مقارنة بين طيف انعكاس عينة بالمحاكاة الحاسوبية للمعطيات نفسها.

2- جرى حساب الانعكاسية العظمى R_{max} وطول موجة الانعكاس الأعظمي λ_0 وعرض قمة الانعكاس الأعظمي $\delta\lambda$ من الأشكال (1,2,3)، مع العلم أن الانعكاس الأعظمي يوافق نفوذا أصغريا لطول الموجة نفسه. يبين الجدول (2) ملخص المقادير الطيفية المستنتجة من الأشكال (1,2,3).

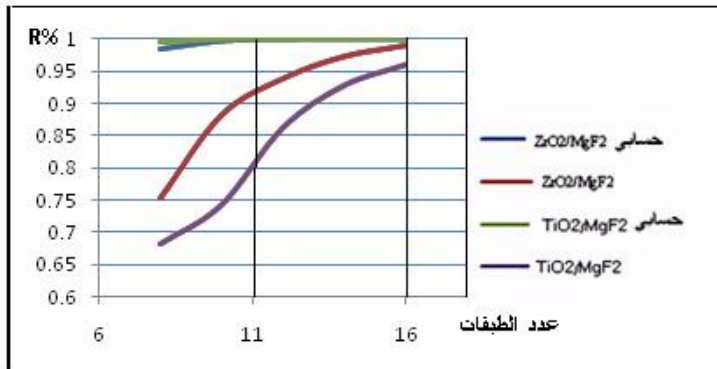
الجدول (2) مقادير $\delta\lambda$ ، R_{max} ، λ_0 مأخوذة من الأطياف المرئية للعينات.

عدد الطبقات للزوج TiO_2/SiO_2	طول موجة الانعكاس العظمى المقيسة λ_0 nm	طول موجة الانعكاس العظمى المحسوبة λ_m nm	عرض القمة $\delta\lambda$ nm	$\frac{dl}{l}$	R % الانعكاس الأعظمي المحسوبة
10	574	558.7	150.0	0.26	81.7
12	588	571.25	129.6	0.22	83.5
14	594	580.7	115.7	0.19	89.3
16	590	583.7	105.3	0.18	96.64

تتمة الجدول (2)..

R % الانعكاس الأعظمي	$\frac{dl}{l}$	عرض القمة $\lambda\delta_m$ nm	طول موجة الانعكاس الأعظمي المحسوبة λ_m nm	طول موجة الانعكاس الأعظمي λ_0 nm	عدد الطبقات للزوج TiO ₂ /MgF ₂
68.2	0.27	139.4	498	520.0	8
74.3	0.26	145.2	505.7	535.7	10
86.3	0.23	126.3	512.3	542.7	12
92.9	0.20	116.0	526.3	556.0	14
96.1	0.19	109.4	533.6	549.0	16
R % الانعكاس الأعظمي	$\frac{dl}{l}$	عرض القمة $\lambda\delta_m$ nm	طول موجة الانعكاس الأعظمي المحسوبة λ_m nm	طول موجة الانعكاس الأعظمي λ_0 nm	عدد الطبقات للزوج ZrO ₂ /MgF ₂
75.4	0.35	176.9	490	500.0	8
88.2	0.30	154.7	498.7	505.7	10
93.8	0.27	136.3	499.6	508.9	12
97.2	0.25	127.5	503.2	510.0	14
98.9	0.24	122.4	507.0	515.0	16

3- برسم المقدار R_{max} بدلالة عدد الطبقات N للزوجين ZrO₂/MgF₂ و TiO₂/MgF₂ المأخوذة من الجدول السابق، سنجد أنه لا ينطبق مع المنحنى R_{max} بدلالة عدد الطبقات مأخوذاً من العلاقة (3)، وبيّن الشكل (5) هذه المقارنة.



الشكل (5) اختلاف منحنى قيم R_{max} (N) الحسابي مع التجريبي للأزواج ZrO₂/MgF₂ و TiO₂/MgF₂.

كما لوحظ من الأشكال (1,2,3) أن قيمة λ_0 تتزايد ببطء من أجل كل زوج من المواد المشكّلة للعينات، وفيها المقدار $(n_H d_H + n_L d_L)$ من العلاقة (1) ثابت، أي إنّ المقدار N/P

يجب أن يتغير ببطء، ولكن $N = 8, 10, 12, 14, 16$ و P عدد صحيح بالتعريف، أي إن مطابقة العلاقة (1) للقيم التجريبية غير منطقية، وتحتاج إلى إعادة نظر، بسبب ازدياد λ_0 بضعة نانومترات وكون النخانة الضوئية المتعلقة بربع طول الموجة لا تساعد في الوصول إلى حل لهذا الاختلاف خاصة من منطلق الحل النظري.

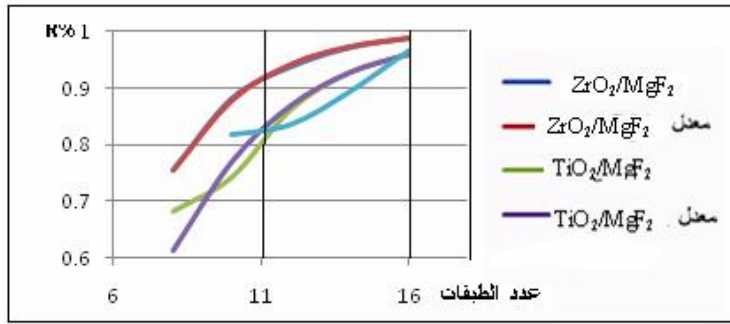
كما يلاحظ وجود اختلاف أيضاً بين النتائج المستخرجة طيفياً لـ $\lambda\delta$ مع تلك المستخرجة حسابياً من العلاقة (2) كما يظهر في الجدول (2)، لأن λ_0 تزداد تجريبياً بزيادة N في حين يتناقص المقدار $\delta\lambda$ تجريبياً بزيادة N إذ من الملاحظ أنه لايزداد عرض قمة الامتصاص أو الانعكاس بازدياد عدد الأزواج، لأن العرض يتعلق بقرائن انكسار المادة المستعملة وطول الموجة فقط ولا تتعلق بنخانة الطبقة. ولكن تجريبياً ظهر أنها تتعلق بعدد الطبقات وفق العلاقات المقترحة.

إن اختلاف منحنى $R_{\max}(N)$ المرسوم من العلاقة (3) مع القيم التجريبية للمقدار R_{\max} الموضح في الشكل (5) يمكن تسويته ببعض التعديلات الرياضية على العلاقة $R_{\max}(N)$.

$$R_{\max} = \left(\frac{\frac{n_{air}}{n_{glass}} - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2N}}{\frac{n_{air}}{n_{glass}} + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2N}} \right)^{2N} \quad (3)$$

$$2N = p \frac{I_0}{n_H d_H + n_L d_L} = p \frac{I_0}{n_L d_L} \frac{1}{1 + \frac{n_H}{n_L} \cdot \frac{d_H}{d_L}} \quad p = 2,3,4,\dots \quad (4)$$

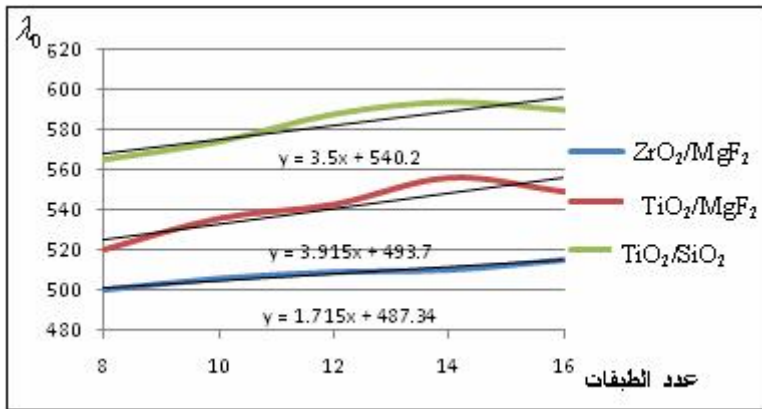
ونظراً إلى أن المقدار $(2N)$ له علاقة بنخانة الطبقات (d_H, d_L) فقد تبين أنه يمكن استبدال المقدار (N) الموجود بالعلاقة (4) بالمقدار (N) وقد اختير هذا التعديل استنتاجاً من المنحنى التجريبي وذلك عند أخذ النخانة بالحسبان فضلاً عن نسبة قرينتي الانكسار (1.45) من أجل البلورة الفوتونية أحادية البعد، أو متعدد الطبقات، من المادتين ZrO_2/MgF_2 . في هذه الحالة يكون التطابق تاماً بين القيم التجريبية والحسابية المعدلة كما في الشكل (6).



الشكل (6) تطابق منحنيات R_{max} (N) الحسابي المعدل مع التجريبي للأزواج ZrO_2/MgF_2 و TiO_2/MgF_2 .

من أجل الزوج TiO_2/MgF_2 فإن استبدال الأس (N) بالمقدار (0.678 N) المستنتج من المنحنى التجريبي، مع أخذ ثخانة الطبقة بالحسبان فضلاً عن نسبي قرينة الانكسار (1.59)، كان الاستبدال ناجحاً جزئياً، ولم ينجح الاستبدال في معادلات الزوج TiO_2/SiO_2 لأن المقدار R_{max} (N) التجريبي لا ينسجم مع طبيعة التغيرات R_{max} (N) النظرية أو التجريبية للزوجين المذكورين.

يمكن وصف λ_0 التجريبية بدلالة عدد الطبقات (N)، الواضحة في الشكل (7)، بعلاقة خطية للزوج ZrO_2/MgF_2 والزوج TiO_2/MgF_2 كما يبين الجدول (3).

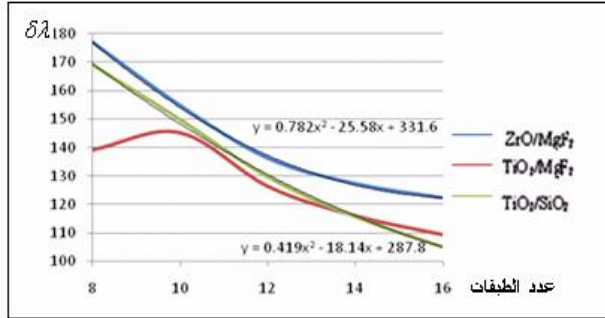


الشكل (7) تغيرات λ_0 بدلالة عدد الطبقات، والعلاقة الخطية التجريبية لها.

الجدول (3) المعادلات الخطية التجريبية التي تصف أثر عدد الطبقات ونوع المادة العازلة في λ_0 لأغشية رقيقة متعددة الطبقات.

المقدار	الزوج ZrO_2/MgF_2	الزوج TiO_2/MgF_2
λ_0	$\lambda_0 = 1.715 N + 487.3$	$\lambda_0 = 3.915 N + 493.7$

كما يمكن وصف $\delta\lambda$ التجريبية بدلالة عدد الطبقات (N)، الواضحة في الشكل (8)، بعلاقة لخطية من المرتبة الأولى للزوج ZrO_2/MgF_2 والزوج TiO_2/MgF_2 كما يبيّن الجدول (4).



الشكل (8) تغيرات $\delta\lambda$ بدلالة عدد الطبقات N (المحور Y يمثل $\lambda\delta$ في حين يمثل المحور X عدد الطبقات N)

الجدول (4) المعادلات الخطية التجريبية التي تصف أثر عدد الطبقات ونوع المادة العازلة في $\delta\lambda$ لأغشية رقيقة متعددة الطبقات.

المقدار	الزوج ZrO_2/MgF_2	الزوج TiO_2/MgF_2
$\delta\lambda$	$\lambda\delta = 0.782 N^2 - 25.58 N + 331.6$	$\delta\lambda = 0.419 N^2 - 18.14 N + 287.8$

وتجدر الإشارة إلى أن العلاقات المستخرجة في كلتا الحالتين للزوج ZrO_2/MgF_2 هي علاقات تقريبية لا يجوز استخدامها بحرية من أجل عدد طبقات بعيد عن المجال المدروس كثيراً.

الخاتمة

لم تتطابق النتائج التجريبية المستخرجة من أطياف انعكاس متعدد طبقات مصنع من تتالي مادتين عازلتين، على طريقة البلورة الفوتونية أحادية البعد، مع العلاقات النظرية التي تصف المقادير $\delta\lambda$ ، R_{max} ، λ_0 لكل منها.

أمكن تعديل علاقة R_{max} مع عدد الطبقات (N) في حالتين فقط، ومن أجل تغيرات N في المجال المدروس (8 - 16) طبقة، وكان انزياح قيم $\delta\lambda$ معاكساً للعلاقة النظرية.

المراجع REFERENCES

1. فوزي عوض؛ فواز سيوف ومجد حمّاد. (2005). تصنيع بلورات فوتونية وتوصيفها، مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية، المجلد 21 - العدد 2 - 2005.
2. فوزي عوض. (2011-2012). فيزياء الجسم الصلب، منشورات جامعة دمشق، كلية العلوم.
3. المواصفات الطيفية للبلورات الفوتونية والثغرة الطاقية. (2005). نيسان 24-26، اللاذقية، سورية.
4. Joannopoulos, J. D, Meade R. D, Winn J. N. (2008). 2nd Ed, Molding the flow of light, Photonic Crystals, Princeton university press.
5. Inou K, Ohtaka K. (2004). Photonic crystals, Physics Fabrication and Application.
6. Ecole de Palmyre, Optical applications of thin films, Bruno PALPANT, Laboratoire d'Optique des Solides, (CNRS, February 2003) - Université Pierre et Marie Curie Paris.
7. Sedrakian D. M., Gevorgyan A. H., Khachatryan A. Zh, Badalian V. D.. (2007). Photonic band gap in 1D Photonic crystals with gradient profile of pitch and amplitude of modulation, Optics Communications 451-456.
8. Katouf R., Komikado T., Itoh M., Yatagai T. and Umegaki S. (2005). Ultra-fast optical switches using 1D polymeric photonic crystals, Photonics and nanostructures -Fundamentals and Applications, Volume 3, Issues 2-3, Pages 116-119
9. Tim K. L. Wong, Lukasz Brzozowski, and Edward H. Sargent. (2002). Analysis of non-quarter-wave grating by a modified Fourier-transform method, APPLIED OPTICS, 10-Vol. 41, No. 32- p. 6763- 6767.
10. Francis O'Sullivan, Ivan Celanovic, a Natalija Jovanovic, and John Kassakian, Shoji Akiyama and Kazumi Wada. (2005d). Optical characteristics of one-dimensional Si/SiO₂ photonic crystals for thermophotovoltaic applications, journal of applied physics 97, 033529.
11. Chigrin D. N., Lavrinenko A. V., Yarotsky D. A., Gaponenko. S. V. (1999). Observation of total omnidirectional reflection from a one-dimensional dielectric lattice, Appl. Phy s. A 68, pp. 25-28.
12. Martina Gerken and David A. B. Miller, 2003. Multilayer thin-film structures with high spatial dispersion, APPLIED OPTICS-Vol. 42, No. 7-1, 1330-1345.