تصنيع بلورات فـوتـونيـة وتـوصيفـها

مجد حماد و فوزي عوض و فواز سيوف

قسم الفيزياء ـ كلية العلوم ـ جامعة دمشق ـ سورية

تاريـخ الإيداع 2004/07/27

قبل للنشـر في 2005/02/28

الملخص

البلورات الفوتونية هي أوساط دورية قليلة الضياع للطاقة تستخدم للتحكم بالضوء يرتكـز عملهـا على دورية قرائن انكسار الأوساط الجهرية المكونة لها.

وتستخدم لدراسة هذه البلورة نظرياً معادلات ماكسويل، غير أن إيجاد الحلول العامة لهذه المعادلات تحليلياً أمر صعب لأننا نتعامل مع متجهات، لذلك نلجأ إلى الحلول العددية عند حساب العصابة الفوتونيـة الطاقية PBG ومعاملي الانعكاس والنفاذية.

تم صنع نوعين من البلورات الفوتونيـة علـى شـكل طبقـات متتاليـة عازلـة مثـل $SiO_2\backslash TiO_2$ و$ZrO\backslash MgF_2$ وعينات معدنية $Cr\backslash SiO_2$.

أظهرت المجموعة الأولى من هذه العينات انتقائية في النفاذية وتصرفت كمرشحات ضوئية، وكانـت النفاذية تتعلق بعدد الطبقات المتتالية في عينات المواد العازلة. أما المجموعة الثانية فقد أظهرت نفاذيـة عندما يكون عدد الطبقات صغيراً، وانعكاسية كاملة عندما ازداد عدد الطبقات. وتظهر النتائج اتفاقاً مقبولاً مع نتائج الحسابات النظرية التي يقدمها برنامج محاكاة جاهز Translight لدراسة البلورات الفوتونية.

حفرت عينات البلورات الفوتونية وحيدة البعد السابقة بواسطة ليزر ماركر CO_2، وبذلك حصلنا على بلورات فوتونية ثلاثية البعد، وقد أظهرت النتائج وجود بعض الاختلافات ما بين خواص البلورات أحادية البعد وثلاثية البعد، لكنها لم تكن ملموسة بسبب كبر حجم الثقوب μ 100 بالمقارنة مع طول موجة النفاذ μ 0.5 . أما عينات الطبقات المعدنية فقد أظهرت إمكان استخدامها كمرشحات حيادية.

الكلمات المفتاحية: التغشية، البلورة الفوتونية، ثغرة العـصابة الفوتونيـة، الأنمـاط التوافقية، البرنامج Translight Code

Fabricating Photonic Crystals and Their Characterization

M.Hammad, F.Awad and F.Saiof

Department of Physics-Faculty of Sciences-Damascus University

Received 27/07/2004
Accepted 28/02/2005

ABSTRACT

Photonic crystals is a low-loss periodic medium with periodic changes of refractive index, which is used to control the light.

Theoretically, Photonic crystals can be studied using Maxwell equations, but it's difficult to find a general analytical solution for these equations, since we are dealing with vectors. So we resort to the numerical solutions for Maxwell's equations to calculate the reflection and transmission coefficients and the Photonic band gap.

Two types of samples were made: the first type is in the form of successive dielectric layers (SiO_2\\$TiO_2$, ZrO\\$MgF_2$) and the second is in the form of successive metallic-dielectric layers (Cr\\$SiO_2$).

The first set of samples showed selectivity in transmissitivity whose depth related to the number of layers and act as a filter.

The second set of samples exhibited tranmissitivity when the number of layers is small and reflectivity when the number of layers grew larger. The empirically obtained results are in acceptable agreement with the results obtained by Translight cod which is written to simulate these photonic crystal.

These samples, which are one-dimensional Photonic crystal, are drilled by means of CO_2 laser marker to become three-dimensional samples. The results showed some differences compared to the one-dimensional samples, but these differences were not tangible because the hole diameters were very big ~100 μ in comparison with the laser wavelength ~0.5 μ. The metallic samples showed the possibility of using them as neutral filters.

Key Words: Coating, Photonic Crystals, Photonic Band Gap, Harmonic Modes, and Translight Code

المقـدمـة

ظهرت في العقود الأخيرة آفاق جديدة للتحكم بالخواص الضوئية لأدوات تمنع انتشار الضوء أو تسمح له بالمرور في اتجاهات محددة وبتواترات محددة، أو تقوم هذه المـواد بحصر توضع الضوء في مناطق معينة داخل المادة. بدأت هذه التكنولوجيا الجديـدة بمـا يعرف بالبلورات الفوتونية Photonic Crystals: وهي تكرار دوري لأوسـاط جهريـة تتغير فيها قرينة الانكسار، كأن تكون لوسطين قليلي الضياع للطاقة، وتتميز هذه البلـورة بأن ثوابت الشبكة من مرتبة الأطوال الموجية الضوئية التي تنتـشر فيهـا، ونظـراً لأن الفوتونات في أثناء حركتها داخل الشبكة الفوتونية سوف تمر خلال منـاطق ذات قـرائن انكسار متفاوتة (حسب نوع المواد الداخلة في تركيب البلورة)، يكون التبعثر عند السطوح البينية الفاصلة مصدراً لعددٍ من الظواهر الفيزيائية الخاصة بالفوتونات، كالأنماط الضوئية الشبيهة بتلك التي يسببها الكمون الدوري للإلكترونات في البلورات العادية [1,8].

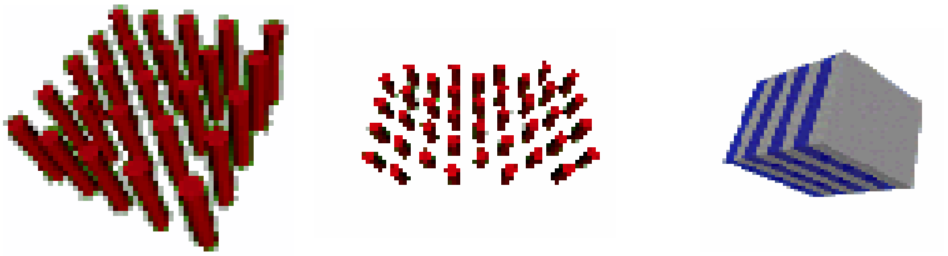
إن انتشار الأمواج الكهرطيسية يتأثر تأثراً كبيراً بدورية المواد الداخلة في تركيب هذه البلورة وقرائن انكسارها فنحصل من ذلك على اختلاف في تواترات الضوء المسموح به والقابل للانتشار داخل البلورة لتشكيل مناطق طاقية فوتونية مسموحة ولكنهـا مفـصولة بمناطق طاقية فوتونية ممنوعة، وهذا ما يـدعى بثغـرة العـصابة الطاقيـة الفوتونيـة (Photonic Band Gap) وهذه الميزة تمكننا من التحكم بانتـشار الـضوء [2]، أي أننـا نستطيع الحصول على منظومات تقود الضوء بكل سهولة. ولهذه منظومات اسـتخدامات متنوعة حيث تستخدم لتقليل الانعكاس أو لزيادته عند تحقق شروط معينـة، ويمكـن أن تستخدم للتوصل إلى انعكاسية كلية كما تستخدم لتجزئة الحزمة الضوئية الـساقطة علـى السطوح وكمرشحات ضوئية تسمح للجزء المطلوب من الطيف بالنفوذ خلالها وصولاً إلى ما يسمى بالأدلة الضوئية، كما تستخدم هذه البلورات كمرايا عازلـة Dielectric Mirror وكعازل عاكس Reflecting Dielectric وجوف تجاوبي Resonant Cavity.

تتم دراسة هذه البلورة نظرياً بواسطة معادلات ماكسويل من أجل أنماط توافقية علـى اعتبار أن إيجاد الحلول العامة لهذه المعادلات تحليلياً هو أمر صعب ولاسيما أننا نتعامـل مع متجهات، وليس مع مقادير سلمية كما في معادلة شرودنغر التي تستخدم فـي إيجـاد حلول انتشار الإلكترونات في البلورات العادية، لذلك نلجأ إلـى الحلـول العدديـة لهـذه المعادلات لحساب العصابة الفوتونية الطاقية PBG ومعامل الانعكاس والنفاذية.

قياساً على ما هو معروف بالبلورة العادية التي أساسها الذرات وهي تجمـع عـدد لا متناهٍ من الوحدات المتماثلة المتكررة بشكل دوري ومنتظم في جميع اتجاهـات الفـضاء، تشكل العقد الموزعة بانتظام دورية في فضاء الشبكة البلورية [3] نستطيع التمييـز بـين ثلاثة أنواع من البلورات الفوتونية وذلك حسب نوع الدورية كما في الشكل(1) .

1- البلورة الفوتونية أحادية البعد One Dimensional Photonic Crystal

تتميز بأن الدورية في اتجاه واحد وهي تبدي ثلاث ظواهر مهمة هي: ثغرة العـصابة الفوتونية وتوضع الأنماط والحالات السطحية، وذلك لأن اختلاف قرينة الانكـسار علـى طول محور واحد عمودي على المستويات، كالمحور X مثلاً، كما في الشكل (1-آ) [4].



(جـ) (ب) (آ)

الشكل (1) أشكال البلورات الفوتونية (أحادية البعد وثنائية البعد وثلاثية البعد)

2- البلورة الفوتونية ثنائية البعد Two Dimensional Photonic Crystal

تتميز بأن الدورية في اتجاهين وعلى طول محورين (X,Y) مثلاً وتكون في الاتجـاه الثالث متجانسة كما في الشكل (1- ب).

3- البلورة الفوتونية ثلاثية الأبعاد Three Dimensional Photonic Crystal

وتتميز بأن الدورية تكون في ثلاثة اتجاهات وعلى طول المحاور الثلاثـة (X,Y,Z) كما في الشكل (1- جـ).

وتعالج هذه البلورة الفوتونية بواسطة التبعثر المتعدد للضوء، إذ يمكن أن تُعد كل عقدة في البلورة الفوتونية والتي تقابل ذرة في البلورة الحقيقية مبعثـراً لـلـضوء الـذي هـو موجة كهرطيسية.

الدراسة الرياضية لانتشار الأمواج الكهرطيسية

لدراسة انتشار الضوء في البلورات الفوتونية كما ذكرنا نعود لمعـادلات ماكـسويل الأربع التي تحكم هذا الانتشار:

$$
\begin{aligned}
&\nabla.\vec{B}(\vec{r},t)=0\\
&\nabla.\vec{D}(\vec{r},t)=4\pi\rho\\
&\nabla X\vec{E}(\vec{r},t)+\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}=0\\
&\nabla X\vec{H}(\vec{r},t)-\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{D}(\vec{r},t)}{\partial t}=\frac{4\pi}{c}\vec{J}
\end{aligned}
\qquad (1.1)
$$

حيث $\vec{E}$ و $\vec{H}$ هما الحقلان الجهريان الكهربائي والمغنطيـسي علـى التـوالي فـي حين $\vec{D}$ و $\vec{B}$ هما حقل الانزياح وحقل التحريض المغنطيسي على التوالي، J هي كثافـة التيار، ρ هي كثافة الشحنات الحجمية الحرة،t الزمن.

ونظراً لأننا نهتم بدراسة توزع الحقول الكهرطيسية في الأوساط الدوريـة (عازلـة، معدنية)، وهذه الأوساط تتميز بكونها جهرية والمواد المستخدمة مكونة من عوازل حقيقية قليلة الضياع للطاقة و$\varepsilon(r)$ حقيقية نهمل أي تبعية لـ ε بالتواتر ω ويكون [5].

$$
\begin{aligned}
&\vec{D}(\vec{r})\left(=\varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})\right)\\
&\vec{B}=\vec{H}\\
&\mu=1\\
&n=\sqrt{\varepsilon}
\end{aligned}
\qquad (1.2)
$$

حيث إن $\vec{E},\vec{H}$ هي توابع للزمن والموضع تعطى بالمعادلة الآتية:

$$\vec{H}(\vec{r},t)=\sum_{\omega}C_{\omega}\vec{H}_{\omega}(\vec{r})e^{i\omega t}$$

ونظراً لأننا في النظام الخطي يمكننا فصل تبعية الزمن وذلك بنشر الحقل الـشعاعي إلى مجموعة من الأنماط التوافقية المهتزة جيبياً [6]

$$
\begin{aligned}
&\vec{H}(\vec{r},t)=\vec{H}(\vec{r})e^{i\omega t}\\
&\vec{E}(\vec{r},t)=\vec{E}(\vec{r},t)e^{i\omega t}
\end{aligned}
\qquad (1.3)
$$

وبالتعويض في معادلات ماكسويل وحذف $\vec{E}(\vec{r})$ نحصل على المعادلة

$$\nabla X\left[\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})}\nabla X\vec{H}(\vec{r})\right]=\left[\frac{\omega}{c}\right]^2\vec{H}(\vec{r}) \qquad (1.4)$$

إن هذه المعادلة إضافة إلى المعادلة $\nabla.\vec{H}(\vec{r})=0$

تمكننا من إيجاد $\vec{H}(\vec{r})$ كنمط توافقي وبملاحظة أن المعادلة (1.4) هي مـسألة قـيم ذاتية عندها يمكننا أن نكتب ما يأتي:

$$\theta\vec{H}(\vec{r})=\left[\frac{\omega}{c}\right]^2\vec{H}(\vec{r}) \qquad (1.5)$$

$$\theta=\nabla X\left[\frac{1}{\varepsilon}\nabla X\right] \qquad (1.6)$$

حيث إن القيم الذاتية هي $\left[\frac{\omega}{c}\right]^2$ وأما الأشعة الذاتية فهي $\vec{H}(\vec{r})$، والمؤثر θ هو مؤثر هرميتي خطي (حقيقي).

إن حل معادلة ماكسويل (1.4) في الأوساط الدورية العازلـة شـبيه بحـل معادلـة شرودنغر في مكانيك الكم، ومنها يتم استخراج الأنماط الطبيعية الخاصة بالجملـة وذلـك عندما تقترن موجة واردة من خارج تنضيد براغ إلى داخله. وبسبب القيد على الأنمـاط التي يمكن تحريضها بواسطة الأمواج الواردة خارجياً على الجملة يمكن الوصـول إلـى انعكاسية كلية[8]. ومن الملاحظ أن هذه الأنماط تميل إلى تركيز طاقتها في المناطق ذات ثابت العزل الكبير $\varepsilon(\vec{r})$، وتبقى متعامدة مع الأنماط التي دونها فـي التـواترات وهـذه الأنماط قابلة للتصنيف اعتماداً على خصائصها التناظرية، كما أنها قابلة للقياس[1]. وفي الأوساط الدورية يمكن كتابة الحقل باستخدام صيغة بلوخ بالشكل الآتي:

$$\begin{aligned}\vec{H}_k(\vec{r})&=e^{i\vec{k}.\vec{r}}\vec{u}_k(\vec{r})\\ \vec{u}_k(\vec{r}+\vec{R})&=\vec{u}_k(\vec{r})\end{aligned} \qquad (1.7)$$

لإيجاد الحلول العامة تحليلياً لهذه المتجهات نلجأ إلى الحلول العددية لحساب عـصابة الطاقة الفوتونية PBG ومعامل الانعكاس. ونجد الحلول عادة في حالتين: الحقل الكهربائي TE عمودي على مستوي الورود، والحالة الثانية الحقل المغنطيسيTM عمـودي علـى مستوي الورود.

حساب عصابة الطاقة الفوتونية PBG

لإيجاد الحلول العددية لمعادلات ماكسويل من أجل حساب عصابة الطاقـة الفوتونيـة PBG تم التعامل مع البرامج العددية حيث توجد عدة برامج تساعد في هذا الحساب منها:

برنامج phocol code وهو برنامج يعتمد لغة FORTRAN 77 لحساب بنية عـصابة الطاقة الفوتونية Photonic Band Structure.

وهناك برامج أخرى كثيرة أنتجتهـا شـركات أو جامعـات منهـا مجموعـة MIT Photonic-Bands وهذا البرنامج يستخدم لحـساب ثغـرة عـصابة الطاقـة الفوتونيـة والأنماط الكهرطيسية لبنى دورية عازلة.

تم اعتماد التعامل مع برنامج Translight Code المبني على أساس حـساب توابـع غرين الفوتونية وذلك من أجل تنضيد براغ في البعد الواحد باسـتخدام طريقـة الفـروق المنتهية اللامتعامدة في المجـال الزمنـي Calculating Photonic Green s Function Using a Non -Orthogonal Finite Difference Time Domain Method وذلـك باستخدام طريقة مصفوفة الانتقال Transfer matrix method.

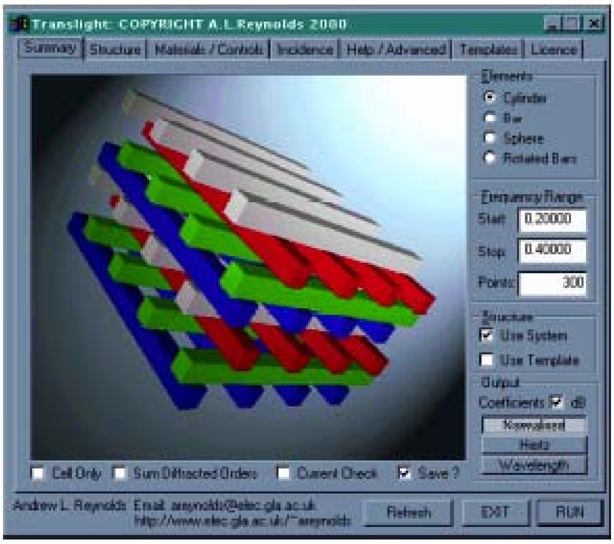


Figure 1.4 Summary / Start Up Screen.

الشكل (2) واجهة البرنامج المعتمد Translight.

يظهر في الشكل (2) واجهة البرنامج الذي تم اعتماد التعامل معه، وهو يستعمل قيمتي $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ للمادة المستخدمة وهما قيمتان حقيقيتان موجبتان توافقان نوع البلورة التي نريـد تصنيعها. كما يعتمد أيضاً على قيمة ثابت الشبكة للنموذج الذي نريد، وتم اختيار تنـضيد براغ تشيغرن الموافق للبلورات الفوتونية أحادية البعد، والمخرجات المتولدة إما أن تكون معطاة بطول الموجة أو تكون مقيسة بنسبة إلى ثابت الشبكة.

العمل التجريبي

تصنيع أغشية للبلورات أحادية البعد

استُخدمت صفائح زجاجية تشبه في خصائصها الضوئية BK7 أجريت عليها عمليات التنظيف السطحي، حيث تم استخدام ماءات الصوديوم ثم محلول حمـض الآزوت يليهـا الغسل بالماء المقطر ثم الكحول الإيتيلي ورصفت الصفائح في حوامل خاصة بها لإجراء عملية التبخير للمواد التي نريد استخدامها.

استخدم جهاز التبخير لإجراء ترسيب الغشاء المراد حيث تم استخدام جهـاز تغـشية نوع Balzer، وتتم عملية التغشية بواسطة برنامج تحدد فيه المعطيات الآتية:

- مواد التبخير
- نوع التبخير
- معدل الترسيب

يتم البدء بتنفيذ البرنامج وذلك بعد تفريغ حجرة الترسيب والحصول على خلاء بضغط لا يزيد على10^{-5}mbar. ويتم إيقاف البرنامج عند الحصول على السماكة المطلوبة للطبقة التي لدينا وهي من مرتبة الطول الموجي للضوء المستخدم.

يتم تحديد السماكة بطريقتين:

ـ طريقة المقياس الضوئي: تستخدم عندما تكون السماكة الضوئية المرسـبة توافـق عدداً صحيحاً من ربع طول الموجة المستخدمة.

ـ طريقة مقياس السماكة: التي تعتمد على خاصية تغير تردد بلورة الكريستال بشكل خطي مع وزن المادة المرسبة المتوافقة مع السماكة المرسبة على العينات.

الطول الموجي المستخدم هوμ 550 والسماكة الضوئية المرسبة هي من رتبة الطول الموجي المستخدم. يبين الجدول (1) العينات المحضرة التي تختلف بعدد الطبقات.

الجدول (1) نماذج العينات المصنعة لتجربة البلورات الفوتونية.

الأزواج	عدد الطبقات
$MgF_2\backslash ZrO_2$	8، 10 ،12، 14، 16
$MgF_2\backslash TiO_2$	8، 10 ،12، 14، 16
$SiO_2\backslash TiO_2$	8، 10 ،12، 14، 16
$Cr \backslash SiO_2$	4، 8، 10

وهذه العينات على نوعين:

1- عينات عازلة $MgF_2\backslash ZrO_2$، $MgF_2\backslash TiO_2$، $SiO_2\backslash TiO_2$ وهي أغشية لمواد عازلة مكونة من عدة طبقات تتميز هذه الطبقات باختلاف قرائن انكسار المواد المستخدمة وعدد الطبقات في كل عينة (الجدول 2).

الجدول (2) قرائن انكسار و ε_r للمواد المستخدمة في أغشية العينات

المادة	قرينة الانكسار	ε_r
ZrO_2	2	4
MgF_2	1.38	1.90
TiO_2	2.2	4.4
SiO_2	1.45	2.10

مثلاً: لو أخذنا عينة $SiO_2\backslash TiO_2$ فهي تنضيد لطبقة SiO_2 تليها طبقة TiO_2 ثم طبقة SiO_2 تليها طبقة TiO_2 وهكذا ....فنموذج $TiO_2 \backslash SiO_2$ مع 8 طبقات هو تتالٍ لأربع طبقات مزدوجة من SiO_2 وTiO_2 ....

2- عينات معدنية $Cr\backslash SiO_2$ وهي عبارة عن تتالي طبقات مكونة من مواد ذات قرائن انكسار مختلفة.

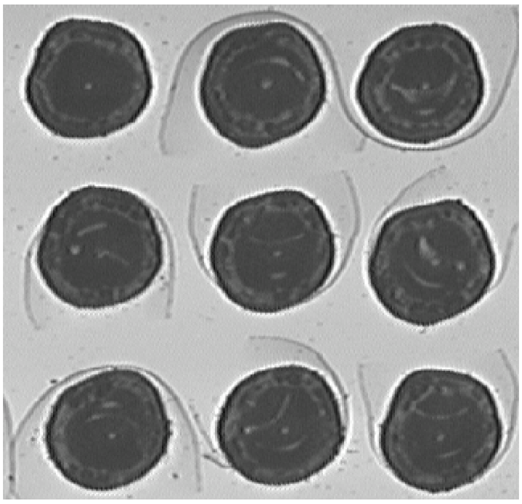
تصنيع عينات ثلاثية الأبعاد

هي مرحلة الحفر على العينات المطلية للوصول إلى الهدف وهو الحصول على ثقوب من مرتبة الطول الموجي المستخدم لذلك تم الحفر بواسطة جهاز ليزري CO_2 ماركر Marker نوعLegend Ex 35W استطاعته 35w مزود بنظام كمبيوتري من أجل الزخرفة على السطوح وهو مخصص للعمليات الصناعية. وللحصول على دقة أعلى من حيث نصف قطر الثقب تستخدم تقانات ضوئية أكثر تعقيداً [7]. تم حفر شبكة

باستخدام النمط الليزري المركزي $TEM_{0.0}$ (شكل 3) وهذه الشبكة المطلية لها الـصفات الفيزيائية الآتية:

- طول الخط 22mm
- الاستطاعة 35 W
- عدد الاعمدة 8 طوليا
- عدد الأسطر 22

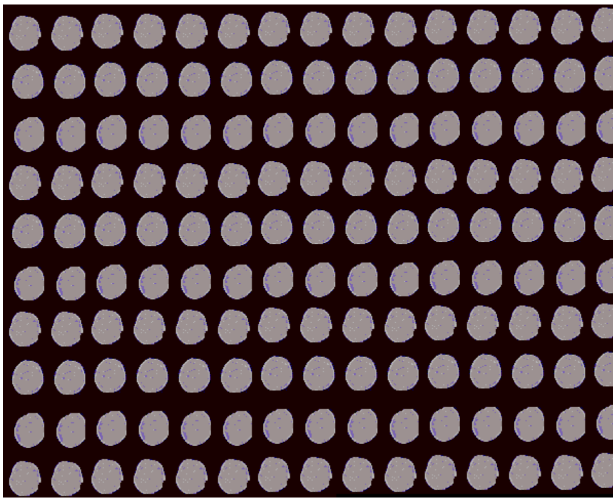
تم تصوير الشبكة ثلاثية الأبعاد التي حصلنا عليها بعد الحفر بواسطة مجهر ضوئي مزود بكاميرا لقياس أقطار الثقوب التي تراوحت بين (120-240µm) .



الشكل (3) شكل الثقوب المشغّلة بواسطة ليزر CO_2 على العينات المصنعة.

ومقارنة مع العمل التجريبي الذي تم في مخبر الليزر التابع للجامعة تم تجريب لـصق الألمنيوم على الزجاج بواسطة مادة عازلة هي الراتنج، وقد تم تجريب الحفـر بواسـطة ليزر ماركر Marker نوع Nd-YAG مزخرف استطاعته 50w بطول موجـة $1.06\,\mu$ ميكرومتر مزود بنظام كمبيوتري من أجل الزخرفة على سطوح المواد وصـقلها علـى غشاء وحيد من الألمنيوم، ومن ثم عدة أغشية من الألمنيوم متوضعة فوق بعضها بعـضاً بالتناوب مع الراتنج اللاصق للوصول إلى أفضل الشروط التجريبية (شـكل 4). الـنمط المستخدم هو النمط الليزري المركزي $TEM_{0,0}$ والهدف الحصول على أخفض اسـتطاعة

قادرة على إحداث ثقب جيد للوصول إلى أقرب مسافة يمكن إحداثها بين الثقوب مع بقائها منفصلة ومنتظمة بحيث تكون الثقوب التي نريدها من مرتبة الطول الموجي المستخدم ولكن لم نستطع الوصول إلى ثقوب بأقطار تقل عن $50\,\mu$ وتم التوصل تجريبياً إلى صنع شبكة مربعة تحقق الشروط التجريبية الابتدائية المرادة وكان لها الشكل الآتي حيث تم الحفر على 16 طبقة متناوبة بين الراتنج والألمنيوم .



الشكل (4) شكل الثقوب المصنعة بواسطة ليزرNd-YAG .

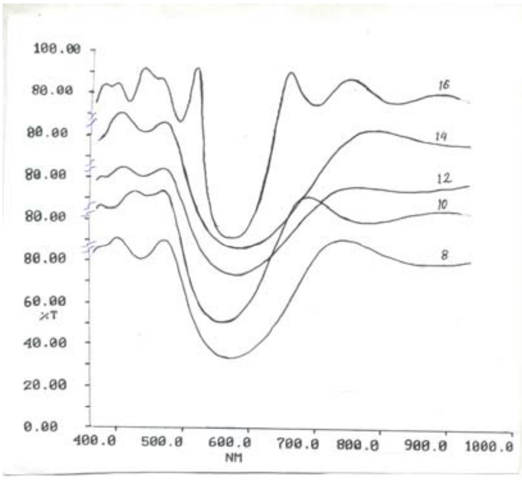
ومن مقارنة الشكلين 3 و4 نجد أن الشبكة المشغولة ذات البعدين بواسطة ليزر Nd-YAG استطاعته 50w لها ثقوب منتظمة دورية ومتجانسة وذات أبعاد متساوية، أما الشبكة المشغولة بواسطة الليزر CO_2 ذي الاستطاعة الكبيرة فقد استطعنا الوصول إلى شكل شبكة منتظمة ذات ثقوب دورية من أجل المستويXY ولكنها غير متجانسة من أجل المحور Z وهذه الشبكة ثلاثية الأبعاد وتتراوح أقطار الثقوب فيها بين μ 120-240.

النتائج والمناقشة

البلورات الفوتونية أحادية البعد

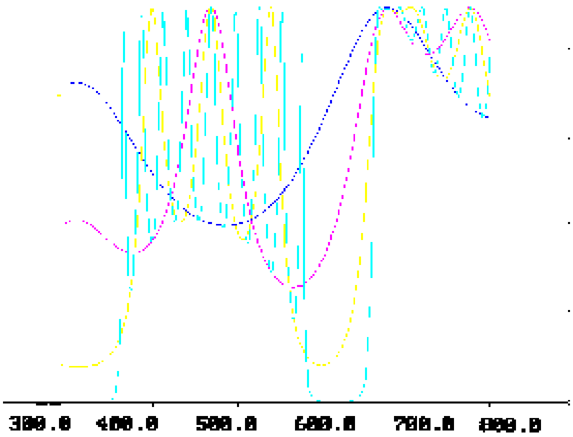
أجريت الدراسة الطيفية للزجاج المستخدم كقاعدة تم الترسيب عليها.

تمت دراسة الخواص الطيفية والفيزيائية بعد الحصول على العينات المطلوبة وهـي أطياف النفوذ: حيث قيست نفوذية العينة المطلية Transmission بواسطة المقياس الطيفي الفوتوني نوع Per kin Elmer مـن فـوق البنفـسجي إلـى تحـت الأحمـر القريـب 1100nm-190nm. وقد وضعت العينة عند القناة الأولى لمقياس الطيف أما القناة الثانيـة فكانت إما هواء وإما زجاجاً، وعندما تكون القناة الثانية هواء ومن أجل المقارنة النظريـة للنتائج التي لدينا تمت دراسة جميع الأطياف ابتداء من الطول الموجي الموافق لـ 400 nm لأنه يظهر قبل 400nm أثر امتصاص الزجاج، وسنهتم بالنهايات الصغرى الرئيسية لجميع المنحنيات وموقعها وإزاحتها قبل الحفر وبعده، فمن أجل عينة عازلـة مـن نـوع $SiO_2\backslash TiO_2$ يبين الشكل (5) المنحنيات التجريبية الطيفية الخاصة بها (القناة الثانية هواء) مرتبة ابتداء من 8 طبقة يليها 10 ثم 12 و14 وأخيراً 16 ومن الواضح أنه كلما زاد عدد الطبقات زاد عمق النفاذية للمنحنيات الطيفية.



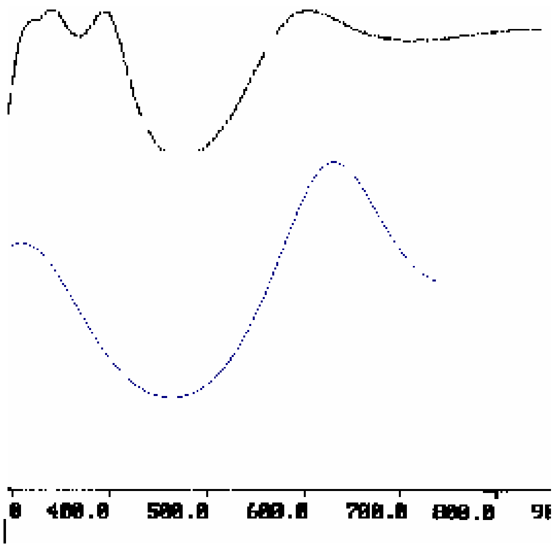
الشكل (5) المنحنيات الطيفية لـ $SiO_2\backslash TiO_2$ من مقياس الطيف مرتبة على الشكل 16-14-12-10-

من الملاحظ وجود انزياح عن النهاية الصغرى الرئيسية في الشكل (5) وكذلك نلاحظ تغيراً في عرض قمة النفاذ مع ازدياد عدد الطبقات. والشيء نفسه يلاحظ من المنحنيـات النظرية التي حصلنا عليها من برنامج المحاكاة Translight والمبينة في الشكل (6) .



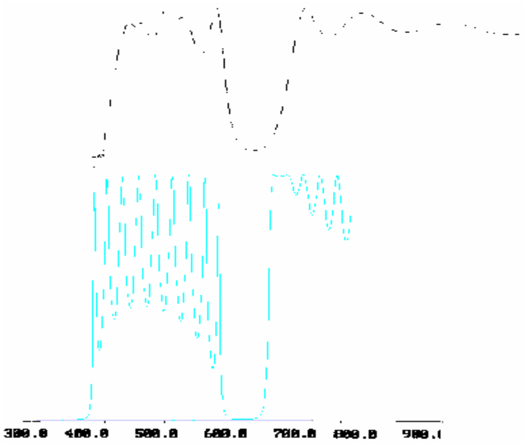
الشكل (6) المنحنيات الطيفيةلـ $SiO_2\backslash TiO_2$ من البرنامج Translight.

نستطيع من الشكلين (5) و(6) أن نقارن ما بين طيف العينـة ذات الثمـاني طبقـات المأخوذ على مقياس الطيف وبين ما حصلنا عليه من البرنـامج علـى سـبيل المثـال، والمقارنة موضحة في الشكل (7).



الشكل (7) مقارنة بين المنحنى الطيفي $SiO_2\backslash TiO_2$ من مقياس الطيف للعينـة ذات 8 طبقـات والمنحنى المستخرج من البرنامج.

نستطيع كذلك أن نقارن ما بين طيف العينة ذات 16 طبقة المأخوذ على مقياس الطيف مع المأخوذ من البرنامج كما في الشكل (8) .



الشكل (8) مقارنة بين المنحنى الطيفي $SiO_2\backslash TiO_2$ من مقياس الطيـف للعينـة ذات 16 طبقـة والمنحنى المستخرج من البرنامج.

يبين الجدول (3) المميزات المستخرجة مما سبق لعينات $SiO_2\backslash TiO_2$

الجدول (3) المقارنة بين المنحنيات الطيفية من المقياس والمنحنيات الطيفيـة مـن البرنـامج لـ $SiO_2\backslash TiO_2$.

عدد الطبقات	طول موجة النفاذ للنهاية الصغرى الرئيسة nm	T % عند النهاية الصغرى الرئيسة	عرض القمة nm	القيمة النظرية لطول موجة النفاذ nm	T % للبرنامج	عرض القمة النظرية للبرنامج nm
8	574	30.74	163.08	491.5	42.28	84.8
16	596	13	106	615	0	77.2

ومن المقارنة نجد ما يأتي:

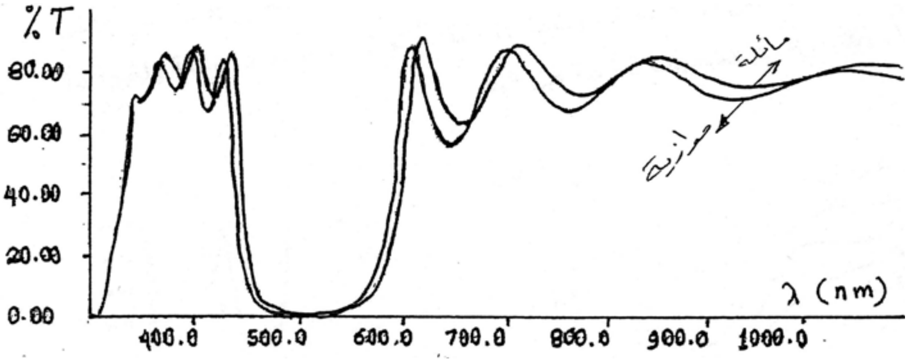
1-طول موجة النفاذ الرئيسة للمنحنيات الطيفية الخاصة بـ 16 طبقة 596nm تتوافق مع القيمة المستنتجة من البرنامج 615nm، أما من أجل 8 طبقات فإن طول موجة النفـاذ المأخوذة من المنحنيات الطيفية هي 574nm والموافقة للبرنامج هي 491nm، أي يوجـد

انزياح بين هاتين القيمتين وهذا ماتمت ملاحظته بشكل عام بين جميع المنحنيـات. وقـد يعود ذلك إلى اختلاف سماكة الطبقة المصنعة المقروءة عند التبخير عن القيمة المدخلة في البرنامج ويكون تأثير ذلك أوضح عندما يكون عدد الطبقات قليلاً.

2- تتناقص النفاذية % T نظرياً مع زيادة عدد الطبقات وهذا متوافق مع المنحنيـات الطيفية التجريبية والمنحنيات المأخوذة من البرنامج.

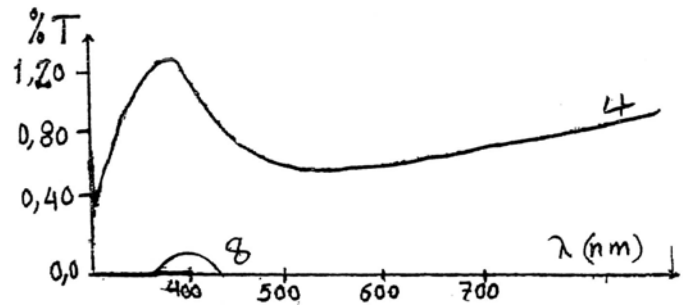
3- يتناقص عرض قمة النفاذ نظرياً مع زيادة عدد الطبقـات وهـذا متوافـق مـع المنحنيات الطيفية التجريبية والمنحنيات المأخوذة من البرنامج.

4- يوجد سبب آخر لعدم التوافق وهو أن معطيـات برنـامج Translight تتعلـق بمركبات الاستقطاب TM(Transverse magnetic) TE (Transverse Electric)، وعلى الأغلب فإن النتائج التجريبية التي حصلنا عليها مستقطبة جزئياً وللتأكد من ذلك تـم أخـذ طيف عينات المادة $ZrO_2\backslash MgF_2$ بوضعين (العينة مرة تكـون موازيـة للقنـاة الأولـى لمقياس الطيف، ومرة تكون مائلة عنها) (الشكل 9).



الشكل (9) مقارنة بين المنحنيات الطيفية الخاصة بـ $ZrO\backslash 2MgF_2$ العينة موازية ومائلة للقناة الأولى لمقياس الطيف.

أما من أجل العينات المعدنية $Cr\backslash SiO_2$ فإن طيف نفوذها مختلف وضعيف جداً بالنسبة للعينات العازلة، يبين الشكل (10) طيف النفوذ قبل الحفر لعينتين منها الأولى تتألف مـن 4 طبقات والثانية من 8 طبقات .



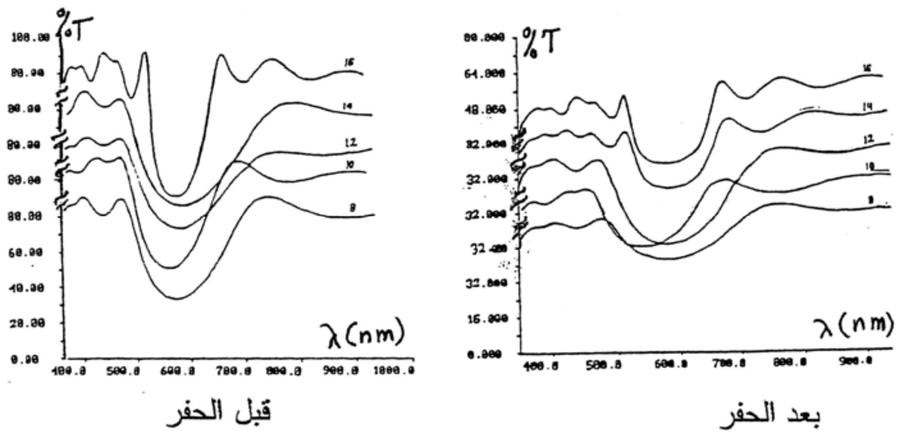
الشكل (10) المنحنيات الطيفية الخاصة بـ $Cr\backslash siO_2$ من أجل 4 و8 طبقات.

وفي حالة العينات المؤلفة من أكثر من 8 طبقات فإن طيف النفوذ معدوم أي أنه مـع زيادة عدد الطبقات تقل النفاذية T%، وهذا يوافق الحصول على انعكاسية كبيرة وصـلت حتى 100 % (مرآة عاكسة).

البلورات الفوتونية ثلاثية الأبعاد

الدراسة الطيفية للعينات العازلة(عازل / عازل)

تمت الدراسة الطيفية لهذه العينات على المقياس الطيفي الفوتوني بعد الحفـر، فمـن أجل عينة عازلة ثلاثية الأبعاد نوع $SiO_2\backslash TiO_2$ تمت دراسة الأطياف بعد الحفر وكانـت كما يوضح الشكل (11) والجدول (5) الطيف الخاص بـ 8 طبقات ويليها 10 طبقات ثـم 12 طبقة ثم 14 طبقة وأخيراً 16 طبقة. ومقارنتها مع المنحنيات الطيفية قبل الحفر



الشكل (11) مقارنة بين المنحنيات الطيفية بعد الحفر لعينات $SiO_2\backslash TiO_2$ وقبل الحفـر مرتبـة 16-14-12-10-8

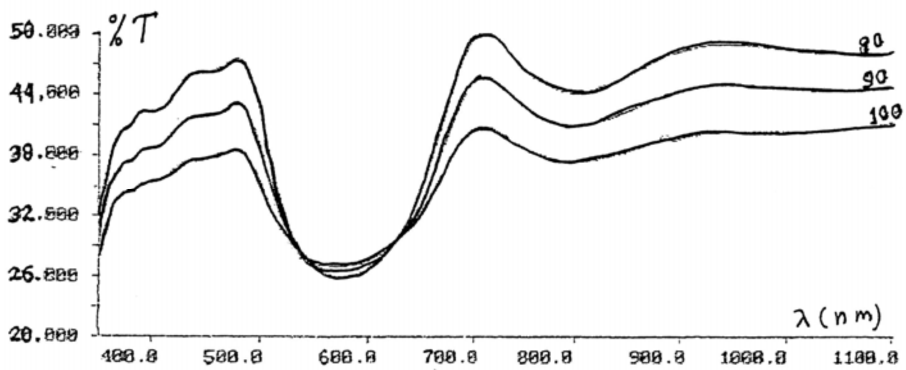
الجدول (5) المقارنة بين المنحنيات االطيفية من المقياس وذلك بعد الحفرلـ $SiO_2\backslash TiO_2$ وقبل الحفر من المقياس.

عدد الطبقات	طول موجة النفاذ للنهاية الصغرى الرئيسة nm	عند النهاية الصغرى الرئيسة% T	عرض القمة nm	طول موجة النفاذ للنهاية الصغرى الرئيسة nm	عرض القمة nm	عند النهاية الصغرى الرئيسة %T
8	596.28	42.66	67.8	574	163.08	30.74
10	558	32	133.86	566	145	22.57
12	579.68	17.33	183	574	.128	30.86
14	583.	27.11	125.56	580	183.	25.25
16	561.22	22.22	118.92	596	106	13

نلاحظ وجود سمات مشتركة عامة بين هاتين المرحلتين، فمثلاً تناقص النفاذيـة مـع زيادة عدد الطبقات في المرحلتين، في حين ازداد عرض قمة النفاذ مـع عـدد الطبقـات بشكل عام قبل الحفر أما بعد الحفر فإن عرض القمة قد تناقص.

دراسة تأثير طاقة الحزمة الليزرية في الزجاج لعينات $SiO_2\backslash TiO_2$

تمت دراسة تأثير طاقة الليزر المستخدم في العينات. ولهذا تم حفر أجزاء من عينـة واحدة (لها العدد نفسه من الطبقات) نوع $SiO_2\backslash TiO_2$ بطاقات مختلفة كنسبة من الطاقـة العملية: (100%-90%-80%)، ونظراً لأن الشبكة التي حصلنا عليها هي شـبكة دوريـة غير متجانسة والأقطار التي حصلنا عليها غير متساوية وكبيرة ليست من مرتبة الطـول الموجي المستخدم لم نصل لأقطار مؤثرة تأثيراً كبيراً على الرغم من تغيير الاسـتطاعة ونجد في الشكل (12) الفروقات الطيفية بين الحالات الثلاث (جدول 7).



الشكل (12) مقارنة بين المنحنيات الطيفية الخاصة بـ $CrSiO_2$ من أجل طاقات 80-90-100.

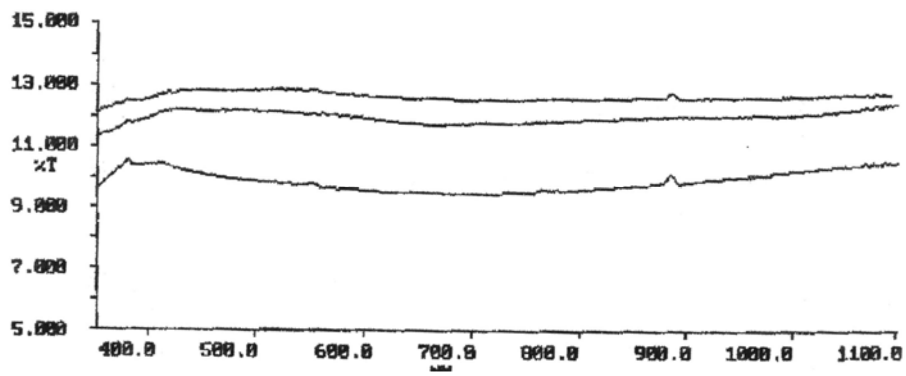
الجدول (7) المقارنة بين المنحنيات الطيفية من المقياس وذلك بعد الحفر لـ SiO_2TiO_2 لطاقات80-90-100 .

الطاقة المستخدمة	طول موجة النفاذ الرئيسة	T %	عرض القمة
0	600	21.77	145
80	573.24	29.77	128.82
90	573.04	27.88	108
100	576.36	28.44	153.12

والتغيير الملاحظ هو تغيير طفيف في قيم T وفي عرض القمة وطول موجـة النفـاذ الرئيسة، أما الاختلاف الملاحظ فهو مابعد القمة الأساسية حيث نلاحظ وجود تدرج لهـذه المنحنيات يمكن أن يستخدم هذا التدرج كمجزئ حزمة وقد يكون هذا الأمر تعديلاً في بنية الزجاج نفسه.

الدراسة الطيفية للعينات المعدنية (معدن / عازل)

تمت دراسة المنحنيات الطيفية للعينات المعدنية $Cr\backslash SiO_2$ بعد الحفر لعينـات 4,8,10 طبقات (الشكل 14).



الشكل (14) مقارنة بين المنحنيات الطيفية الخاصة بـ $CrSiO_2$ من أجل 4-8-10 طبقات.

والملاحظ من الشكل (14) أن المنحنيات الطيفية للعينات بعد الحفرقد زادت نفاذيتهـا كما هو متوقع، وقد تكون هذه آثار البنية الثلاثية الأبعاد ولم نـتمكن مـن الـدخول فـي التفاصيل بسبب ابتعاد أبعاد الحفر عن الأطوال الموجية المدروسة وقد تستخدم كمرشحات حيادية. ومن المفيد دراسة الضوء الوارد إلى البلورة الفوتونية من جانبها [8]، غيـر أن هذا سيكون موضوع دراسة لاحقة عن استخدامات تلك البلورات فـي الـتحكم بـالحزم الضوئية.

الخـلاصة

صنعت بلورات فوتونية أحادية البعد على شكل طبقات سماكتها مـن رتبـة الطـول الموجي المرئي، وهي تختلف في عددها والمواد التي صنعت منها. فقد صنعت من مواد عازلة مختلفة وكذلك من مواد عازلة\معدنية. تظهر النتائج التجريبية للنفاذية توافقاً مقبولاً مع الحسابات النظرية.

جرت محاولة صنع بلورات ثلاثية الأبعاد بواسطة الحفر بالليزر إلا أن أبعاد الحفـر التي أمكن الحصول عليها كانت أكبر كثيراً من الطول الموجي المرئي، مـع ذلـك فقـد أظهرت النتائج بعض التعديل ولاسيما بالنسبة للعينات المعدنية التي يقتـرح اسـتخدامها كمجزئات حزمة ومرشحات حيادية.

REFRENCES

1- Joannpoulos, J. D., Meade, D .R., Winn, N. J. (1997), "Molding the flow of light", Internet source.
2- Shumpert, D. J. (2004), "modeling of periodic dielectric structures electromagnetic crystals", Internt source.
3- د.قسام ، د. عوض، د.حمود "فيزياء المواد" 1991 , جامعة دمشق.
4- Reynolds, A. L. (2000), Optoelectronics Research Group, Department of Electronics & Electrical Engineering, the University of Glasgow. "the transfer matrix method, T. M. M. computer program", Special Corsoponding.
5- Massachusetts Institute of Technology, "Study of EM Waves in Periodic Structure (2004)", Internt source.
6- Shepherd, T. J., Roberts, P. J. MAY. (1995) "Scattering in Tow-dimensional Photonic crystal: An analytical model", Physical Review B, Vol 51, Number 5, pp.5158-5159,
7- karalis, A., Johnson, G. S., Jonmoponlos., J. D. (2004). "Discrete-mode cancellation mechanism for high - Q integrated optical cavities with small volume", Optical Letters, Vol. 29, Issue 19, pp. 2309 – 2311,
8- Povinell, M. L., Mihai, I., S. (2004). "light enhancement of radiation pressure in an omni- directional – reflector waveguide", Applied Physics letters, Vol. 85, Issue 9 , pp. 1466 – 1468.

كلمة شكر

الشكر للدكتور عصام الجغامي الذي أسهم إسهاماً كبيراً في هذا البحث، وإلى مركز البحوث العلمية لتعاونهم معنا وكذلك إلى السيد المهندس وليد وتار للإسهامات القيمة.