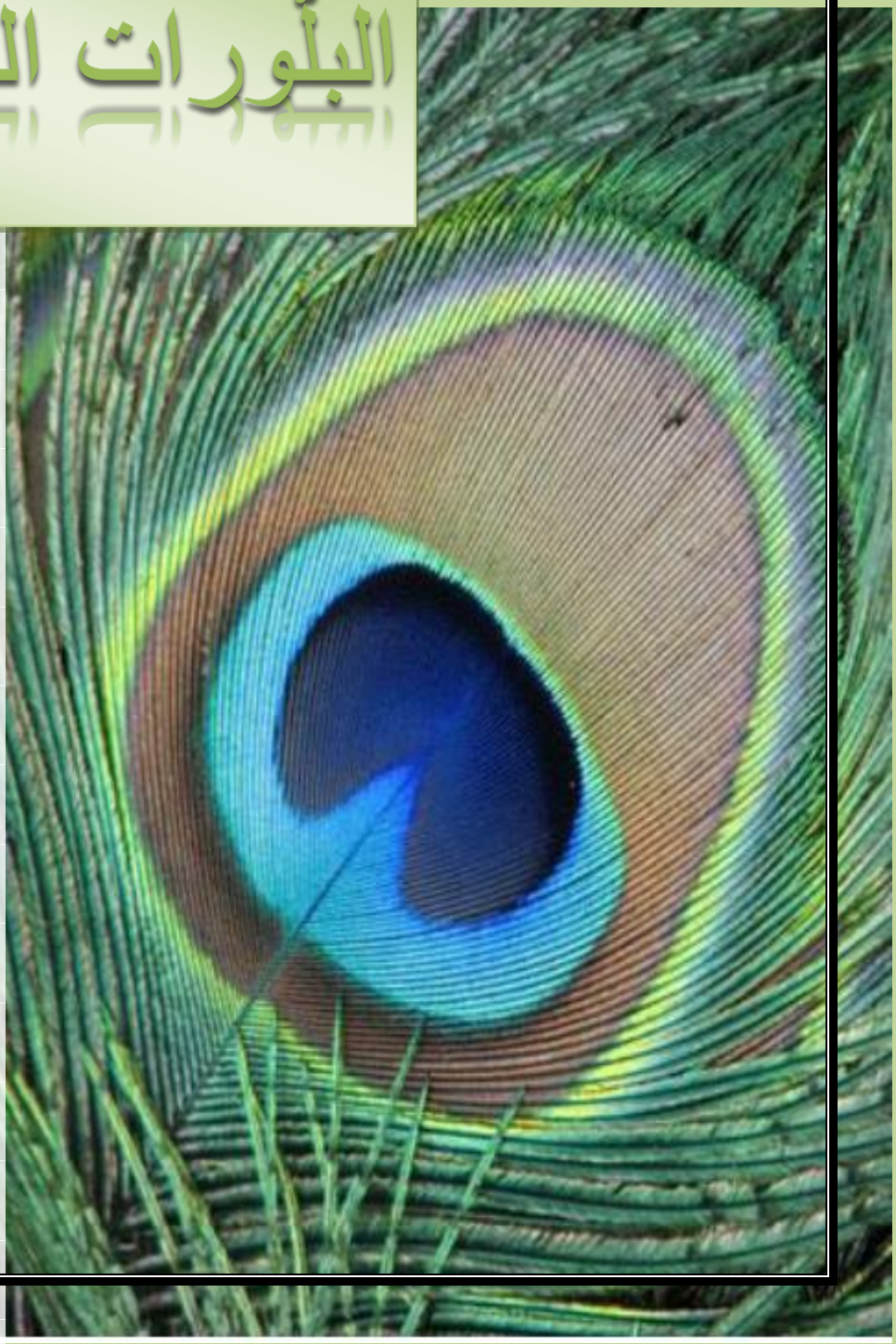
الجمهورية العربية السورية

وزارة التربية

المركز الوطني للمتفوقين

حلقة بحث في مادة الفيزياء بعنوان :

البلّورات الفوتونية



إعداد الطالبة :

رهف عماد الدين حبيب

بإشراف المدرسين:

حسام حاج قاسم

محمود نوح

للعام الدراسي :

٢٠١٤ – ٢٠١٥م

مقدمة

تستند الالكترونات الميكروية وثورة المعلومات إلى التحكم الدقيق في التيارات الكهربائية الذي نتوصل إليه بواسطة أشباه الموصلات مثل السيليكون، ويعتمد ذلك التحكم على ظاهرة تدعى الثغرة العصابية، وهي مجال من الطاقات توقف فيها الالكترونات عن الجريان في شبه الموصل.

أنتج العلماء مواد ذات ثغرة عصابية فوتونية –مجال من الأطوال الموجية الضوئية توقفها المادة– و ذلك بواسطة تشكيل المواد وفق أشكال مصممة بعناية في المقياس النانوي وتعمل هذه البلورات الفوتونية مثل " أشباه موصلات للضوء " وتعد بتطبيقات تقانية لا حصر لها .

استقبل العديد من الباحثين فكرة الثغرة العصابية الفوتونية بالشك وعدم الاهتمام حين اقترحت أول مرة، أما الآن فقد بدأ الباحثون يتداركون الأمر، وقد عدّل البعض منهم برامجهم الحاسوبية الخاصة ببنية العصابات لكي تناسب الضوء. فتحولت البلورات الفوتونية بسرعة إلى أعمال كبيرة . وأصبح لها تطبيقات عدة منها الألياف الضوئية عالية السعة والأصباغ الملونة والدارات المتكاملة الفوتونية التي يمكنها أن تتحكم في الضوء، إضافة إلى كونها تتحكم في التيارات الكهربائية.

إشكالية البحث:

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 المواد بحصر توضع الضوء في مناطق معينة داخل المادة. بدأت هذه التكنولوجيا الجديدة بما يعرف بالبلورات الفوتونية.

فما هي هذه البلورات الفوتونية... ما أشكالها.... وما تطبيقاتها....؟

بدايات الاهتمام بالبلورات:

اهتم الباحثون بشكل كبير بعلم البلّورا ت خلال القرن التاسع عشر، حيث أعطى برافيه A.Bravais (1811-1863) تصوراً ووصفاً دقيقاً للبناء الهندسي للحالة البلّورية قبل تطور الأساليب العلمية لدراسة المادة والذرة.

ومع اكتشاف انعراج الأشعة السينية RX في البلّورات (1912 فون لو M. Von Laüe) وتصنيع أول مقياس لانعراج الأشعة السينية Diffractometre RX من قبل براغ (W.H et W.L Bragg 1913) تم التحقق المباشر للطبيعة الدورية للترتيب البلوري وبذلك أصبحت البنية البلورية للمادة حقيقة ملموسة. ومن الطرق الأخرى التي ساهمت في دراسة البلورات كان المجهر أو الميكروسكوب الالكتروني ومطياف الطنين المغناطيسي RMN ومطياف مورس باور Mossbauer.[1]

تعريف البلّورات الفوتونية:

هي تكرار دوري لأوساط جهرية تتغير فيها قرينة الانكسار، كأن تكون لوسطين قليلي الضياع للطاقة، وتتميز هذه البلورة بأن ثوابت الشبكة من مرتبة الأطوال الموجية الضوئية التي تنتشر فيها، ونظرًا لأن الفوتونات في أثناء حركتها داخل الشبكة الفوتونية سوف تمر خلال مناطق ذات قرائن انكسار متفاوتة[2]، يكون التبعثر عند السطوح البينية الفاصلة مصدرًا لعددٍ من الظواهر الفيزيائية الخاصة بالفوتونات، كالأنماط الضوئية الشبيهة بتلك التي يسببها الكمون الدوري للإلكترونات في البلورات العادية.[3]

دراسة البلورة الفوتونية

تتم دراسة هذه البلورة نظريًا بواسطة معادلات ماكسويل من أجل أنماط توافقية على اعتبار أن إيجاد الحلول العامة لهذه المعادلات تحليليًا هو أمر صعب ولاسيما أننا نتعامل مع متجهات، وليس مع مقادير سلمية كما في معادلة شرودنغر التي تستخدم في إيجاد حلول انتشار الإلكترونات في البلورات العادية، لذلك نلجأ إلى الحلول العددية لهذه المعادلات لحساب العصابة الفوتونية الطاقية ومعامل الانعكاس والنفاذية PBG[4].

---

[1] الهيئة الوطنية للأولمبياد العلمي السوري ، د. اسكندر منيف ،4\9\2013.
[2] حسب نوع المواد الداخلة في تركيب البلورة.
[3] مجلة دمشق للعلوم الأساسية ص133
[4] مجلة دمشق للعلوم الأساسية ص133

منشأ الثغرات العصابية:

تنشأ الثغرة العصابية في البلورات شبه الموصلة الإلكترونية لأن الإلكترونات تسلك جزئيا سلوك الموجات، والموجات تنتشر على طبقات أو صفوف الذرات. وينتشر جزء من الموجة عائدا إلى الخلف من حيث أتى، فإذا كان طول الموجة مساويا تقريبا للبعد بين الطبقات المتتالية جُمعت كل الموجات المنتشرة إلى الخلف مع بعضها بصورة مترابطة coherently. وهكذا تنعكس موجة الإلكترون إلى الخلف كليا مثلها مثل الضوء الساقط على مرآة. أما بالنسبة إلى ثغرة عصابية تامة فيجب أن يحدث هذا الانعكاس الكامل على سلسلة من الأطوال الموجية ومن أجل الموجات المتجهة في أي اتجاه كان داخل البلورة.
ففي حالة الضوء يحدث الانتشار بفضل تغيرات قرينة الانكسار (مثلا بين الهواء والزجاج)، وسوف يتطلب تآثر مماثل مباشرة لذلك الذي يحدث بين الإلكترونات وذرات السيليكون مادة ذات قرينة انكسار غير عادية .
فالثغرة العصابية تتوقف على كيفية تآثر الموجات مع مئات عديدة من الثقوب، وهذه عملية جد معقدة. لقد طوّر النظريون نماذج حاسوبية لإجراء الحسابات المتعلقة بأشباه الموصلات، لكن استخدام هذه البرامج بالنسبة إلى الفوتونات لم يكن ممكنا. فأولا: معادلات الحركة مختلفة . ذلك أن معادلة شرودنغر تتحكم في الإلكترونات، في حين أن معادلات ماكسويل هي التي تصف سلوك الضوء. وثانيا: لا يستطيع المرء أن يهمل الاستقطاب بالنسبة إلى الفوتونات مثلما يستطيع بالنسبة إلى الإلكترونات.

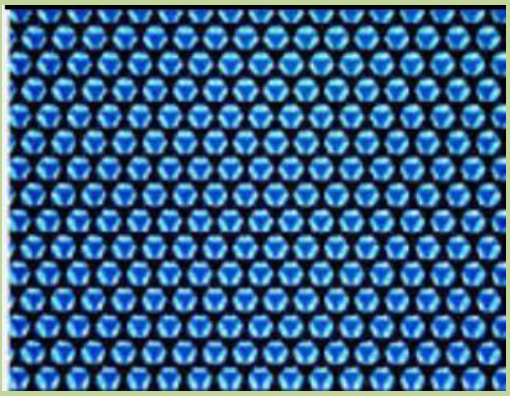
ثغرة العصابة الطاقية الفوتونية :

إن انتشار الأمواج الكهرطيسية يتأثر تأثرًا كبيرًا 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 ولكنها مفصولة بمناطق طاقية فوتونية ممنوعة، وهذا ما يدعى بثغرة العصابة الطاقية الفوتونية (Photonic Band Gap)

أهميتها:

تمكننا ثغرة العصابة الطاقية الفوتونية من التحكم بانتشار الضوء، أي أننا نستطيع الحصول على منظومات تقود الضوء بكل سهولة .ولهذه المنظومات استخدامات متنوعة حيث تستخدم لتقليل الانعكاس أو لزيادته عند تحقق شروط معينة، ويمكن أن تستخدم للتوصل إلى انعكاسية كلية كما تستخدم لتجزئة الحزمة الضوئية الساقطة على السطوح وكمرشحات ضوئية تسمح للجزء المطلوب من الطيف بالنفوذ خلالها وصولاً إلى ما يسمى بالأدلة الضوئية، كما تستخدم هذه البلورات كمرايا عازلة Dielectric Mirrorوجوف تجاوبي Resonant Cavity وكعازل عاكسReflecting Dielectric.

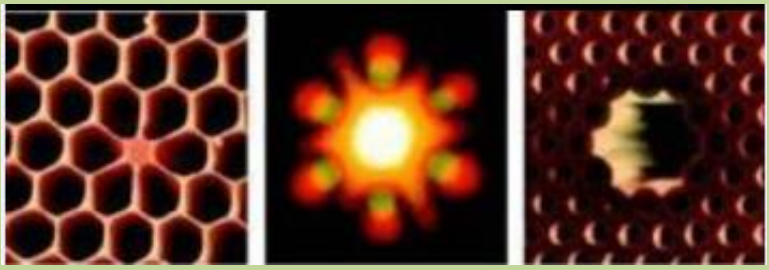
صُنعت أول بلورة فوتونية ناجحة بواسطة حفر ثلاثة صفيفات متقاطعة من الثقوب في قالب من مادة خزفية. يميل كل صفيف بزاوية ٣٥ درجة على المنحى العمودي محدثا بذلك بنية تدعى يابلونوڤايت. يوقِف الشكل المؤلف من ثقوب أقطارها ٦ مليمترات الموجات الراديوية بين ١٣ و ١٦ جيغاهرتز. كما هو مبين في الشكل (١).[٥]



الشكل(١)

الألياف الضوئية والثغرة العصابية الفوتونية[٦]

يمكن أن تَستخدم الألياف الضوئية مبدأ الثغرة العصابية الفوتونية لتوجيه الضوء. إذ يشكل الغلاف المؤلف من عدة مئات من الأنابيب الشعرية من السيليكا مادة ذات ثغرة عصابية ضوئية تحبس الضوء في الثقب المركزي الذي يبلغ قطره نحو ١٥ ميكرونا (في اليمين). وفي التصميم المبين في اليسار الذي يُحبس فيه الضوء في القلب الصلب البالغ ٢ ميكرون يكون الليف لاخطيا إلى حد كبير، وهذا ما يمكن أن يكون مفيدا من أجل تبديل switching وتشكيل shaping النبضات الضوئية. وفي الوسط يوضح نمط من الألوان كيف تتغير خاصة الليف الضوئي ذي الثغرة العصابية في احتباس الضوء بالنسبة إلى الأطوال الموجية المختلفة. وذلك في الشكل (٢).



الشكل (٢)

[٥] مجلة العلوم، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
[٦] مجلة دمشق للعلوم الأساسية ص133

الثغرة العصابية الالكترونية[٧] :

إن الثغرة العصابية الإلكترونية هي منطقة ممنوعة، مجال ضيق من الطاقات التي لا تستطيع الإلكترونات احتلالها. فحين تملأ الإلكترونات في شبه الموصل جميع الحالات المتاحة لها أسفل الثغرة العصابية لا يمكن للتيار الكهربائي أن يجري، لأنه لا يوجد لأي إلكترون مكان يمكن أن ينتقل إليه. ويتطلب رفع إلكترون فوق الثغرة مقدارا كبيرا من الطاقة. في حين أنه لو وجدت بعض الإلكترونات الإضافية لوجب عليها أن تكون فوق الثغرة حتما، وهناك يمكنها أن تجول بسهولة في الفضاءات الواسعة المفتوحة للحالات الفارغة. وبصورة مماثلة فإن نقصا في الإلكترونات يتيح المجال لبعض «الثقوب» المشحونة إيجابا أسفل الثغرة، وهذا يوفر طريقة لجريان التيار كذلك.

يأتي كل سحر أشباه الموصلات . التبديل switching والدوال المنطقية functions logic . من التحكم في وجود الإلكترونات والثقوب فوق الثغرة العصابية وأسفلها.

أسس وجود الثغرة العصابية الإلكترونية

إن وجود الثغرة العصابية الإلكترونية وخواصها يعتمدان، بصورة حاسمة، على نوع الذرات في المادة وعلى بنيتها البلورية. أي على التباعد بين الذرات وعلى نوع الشبكة التي تشكلها. ويستطيع المهندسون، بالاستعاضة عن بعض الذرات في الشبكة بذرات أخرى متنوعة (تدعى عميلات إشابة dopants) أو بإدخالها في مواقع حشوية، أن يحددوا عدد الإلكترونات أو الثقوب في شبه الموصل وأن يكيّفوا بذلك خواصه وفق الحاجة.

في السيليكون وفي أشباه الموصلات الأخرى، تكون الذرات المتجاورة مفصولة عن بعضها بنحو ربع نانومتر. وتتضمن المواد ذات الثغرة العصابية الفوتونية بنى مماثلة إنما في مقياس أكبر.

مثال : يمكن أخذ كتلة من زجاج خاص حفر فيها صفيف من الثقوب الأسطوانية القريب بعضها من بعض، والتي يبلغ قطر كل منها ٤٠٠ نانومتر. هذه الفتحات تماثل الذرات في شبه الموصل. وبصورة عامة يجب أن يكون التباعد بين الصفيفات قريبا، بشكل معقول، من طول موجة الضوء أو الموجات الكهرمغنطيسية[٨] التي يراد التحكم فيها. فالأطوال الموجية للضوء المرئي تمتد من ٤٠٠ حتى ٧٠٠ نانومتر، ويستخدم الكثير من الهواتف الخلوية موجات طولها نحو ٣٥ سنتيمترا.

---

[٧] مجلة العلوم، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

[٨] ربما لا نتوقع أن تكون البلورات ذات الثغرة العصابية الكهرمغنطيسية ذات فائدة كبيرة بالنسبة إلى الموجات الراديوية، لأن الأمر يبدو أنه يتطلب بلورات كبيرة إلى حد بعيد. فالهواتف الخلوية، على سبيل المثال، يمكن أن تستخدم موجات راديوية طولها ٣٥ سنتيمترا في الفضاء الحر أو في الهواء. ولن يكون من السهل أبدا حمل بلورة تحوي العديد من الثقوب أو القضبان لها مثل هذا المقياس

البلورة : ثغرة عصابية إلكترونية أم فوتونية.....؟

حين يدخل الضوء المادة المثقّبة ينكسر فيها وينعكس جزء منه عن الأعداد الهائلة من السطوح الداخلية الفاصلة بين الهواء والزجاج. إن النمط المعقد من الحزم الضوئية المتراكبة سوف يقوي أو يلغي بعضه بعضا تبعا لطول موجة الضوء واتجاه سيره داخل البلورة وقرينة (معامل) انكسار الزجاج وحجم جميع الثقوب وترتيبها. ويشبه الإلغاء الكامل في جميع الاتجاهات لعصابة ضيقة من الأطوال الموجية الثغرةَ العصابية للإلكترونات في أشباه الموصلات: فتلك العصابة من الضوء لا يمكنها أن تنتشر خلال البلورة. ويُحدث تحوير بنية الثغرة العصابية – بواسطة ملء بعض الثقوب مثلا– آثارا أخرى مشابهة لما يمكن عمله لدى إشابة أشباه الموصلات الإلكترونية. وغالبا ما تكون البلورة الفوتونية مصنوعة من مادة شبه موصلة، وبذلك تكون للبلورة ثغرة عصابية إلكترونية وأخرى فوتونية.

الألماس.....

وجدَت مجموعة جامعة أيوا أن بنية الألماس، أي الهندسة البلورية الرباعية الوجوه المرتبطة بالجوهرة النفيسة، يمكن أن تعطي ثغرة عصابية. فأكدت الجامعة أن بنية السيليكون البلورية هي بالضبط بنية الألماس نفسها.

إن كون البنية الرباعية الوجوه هي الأفضل لصنع ثغرة عصابية فوتونية هو أمر مفاجئ وعميق. فقبل اكتشاف البلورات الفوتونية كان التشكيل الألماسي مجرد بنية فلزية mineral أخرى ناشئة عن تفاعل معقد للذرات والروابط الكيميائية وجعل الطاقة في حدها الأدنى تحت شروط ملائمة من درجة الحرارة والضغط. وتُظهر فائدته لتشكيل ثغرة عصابية فوتونية – هذه الثغرة التي تنشأ كلية عن معادلات ماكسويل وحدها (وهي قوانين الكهرباء والمغنطيسية والضوء)– أن لتشكيل الألماس أيضا أهمية أساسية فيما يتعلق بالكهرمغنطيسية وهندسة الفضاء الثلاثي الأبعاد.

تأخذ بنية الألماس الرباعية الوجوه العديد من المظاهر المختلفة تبعا للشكل الذي يوضع في كل عقدة من عقد الشبكة وتبعا للزاوية التي يُنظر منها إلى البلورة. لقد صنعت أول بلورة ذات ثغرة عصابية فوتونية في عام ١٩٩١ باستخدام شكل مختلف من بنية الألماس تدعى الآن يابلونوڤايت yablonovite.[٩]

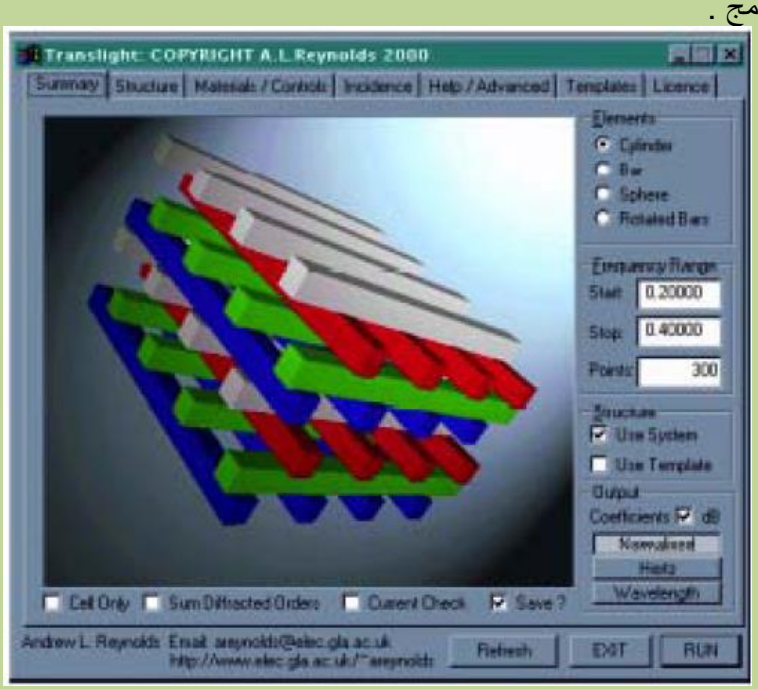
ومتباعدة عن بعضها بهذا القدر. لكن ما ينقذنا هو دارة LC المعروفة في الإلكترونات، والتي تجمع بين محرِّض inductor (وشيعة، "L") ومكثِّف capacitor (صفيحتين متوازيتين، "c"). إذ بإمكان مثل هذه الدارة فعلا حشر موجة كهرمغنطيسية داخل حجم صغير. وبإمكان صفيف من الدارات LC أن يسلك سلوك بلورة فوتونية وأن يتحكم في الموجات الكهرمغنطيسية التي أطوالها الموجية في الفضاء الحر أكبر كثيرا من الصفيف.

[٩] مجلة العلوم، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

حساب عصابة الطاقة الفوتونية[10] :

لإيجاد الحلول العددية لمعادلات ماكسويل من أجل حساب عصابة الطاقة الفوتونية PBG تم التعامل مع البرامج العددية حيث توجد عدة برامج تساعد في هذا الحساب منها :
برنامج phocol code وهو برنامج يعتمد لغة FORTRAN77 لحساب بنية عصابة الطاقة الفوتونية Photonic Band Structure.

وهناك برامج أخرى كثيرة أنتجتها شركات أو جامعات منها مجموعة MIT Photonic–Bands وهذا البرنامج يستخدم لحساب ثغرة العصابة الفوتونية و الأنماط الكهرطيسية لبنى دورية عازلة .
و هناك برنامج Translight Code مبني على أساس حساب توابع غرين الفوتونية و تظهر في الشكل(٣) واجهة هذا البرنامج .



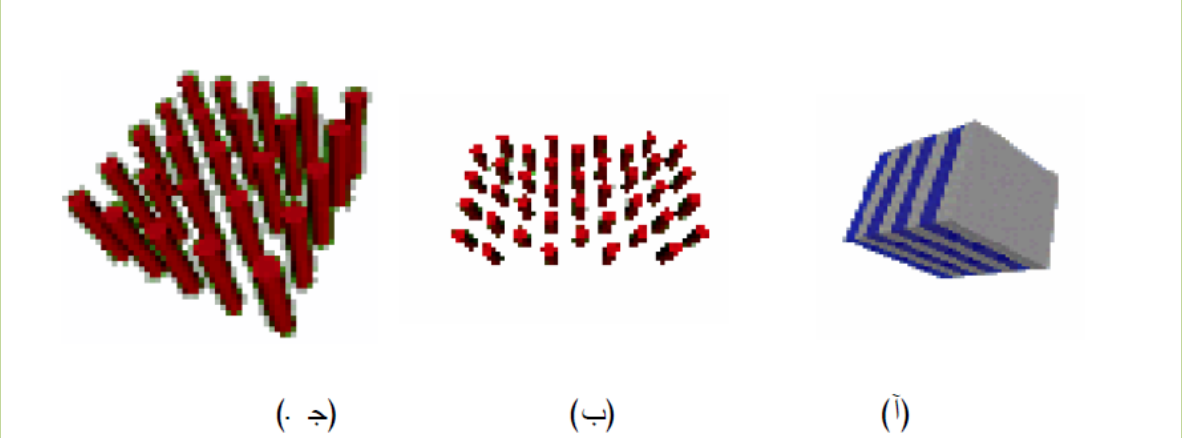
الشكل (٣)

أشكال البلورات الفوتونية[11] :

قياسًا على ما هو معروف بالبلورة العادية التي أساسها الذرات وهي تجمع عدد لا متناهٍ من الوحدات المتماثلة المتكررة بشكل دوري ومنتظم في جميع اتجاهات الفضاء، تشكل العقد الموزعة بانتظام دورية في فضاء الشبكة البلورية.

نستطيع التمييز بين ثلاثة أنواع من البلورات الفوتونية وذلك حسب نوع الدورية.

[10] مجلة دمشق للعلوم الأساسية ص137
[11] مجلة دمشق للعلوم الأساسية ص134



الشكل (٤)

١- البلورة الفوتونية أحادية البعد : One Dimensional Photonic Crystal
تتميز بأن الدورية في اتجاه واحد و هي تبدي ثلاث ظواهر مهمة هي : ثغرة العصابة الفوتونية و توضع الأنماط و الحالات السطحية ، و ذلك لأن اختلاف قرينة الانكسار على طول محور واحد عمودي على المستويات ، كالمحور x مثلاً كما في الشكل (٤،آ).

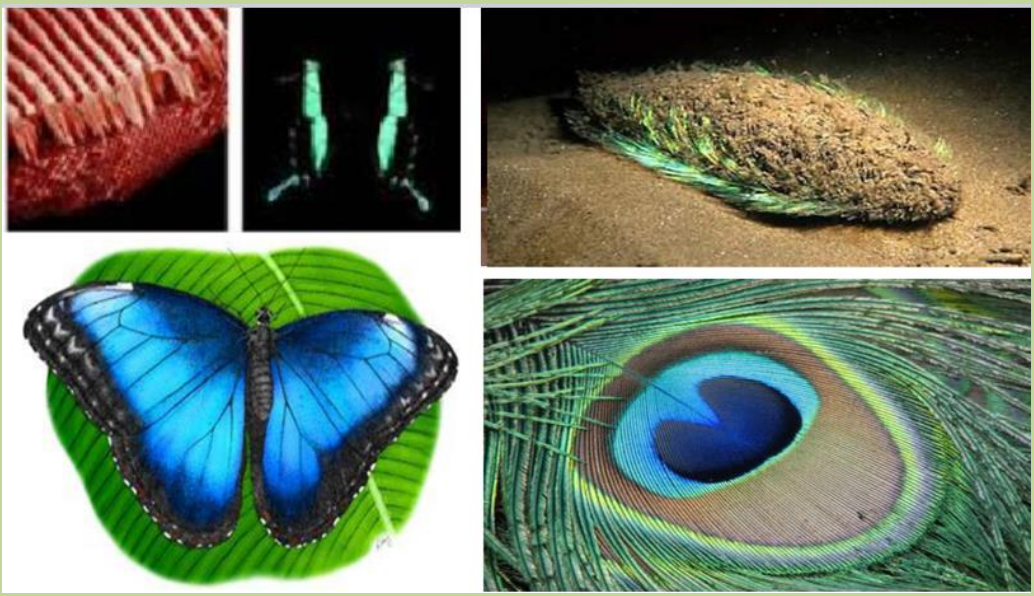
٢- البلورة الفوتونية ثنائية البعد : Two Dimensional Photonic Crystal
تتميز بأن الدورية في اتجاهين وعلى طول محورين (x,y) مثلاً و تكون في الاتجاه الثالث متجانسة . كما في الشكل (٤،ب).

٣- البلورة الفوتونية ثلاثية الأبعاد : Three Dimensional Photonic Crystal
تتميز بأن الدورية تكون في ثلاثة اتجاهات و على طول المحاور الثلاثة (x,y,z) كما في الشكل (٤،ج).
وتعالج هذه البلورة بوساطة التبعثر المتعدد للضوء ، إذ يمكن أن تعد كل عقدة في البلورة الفوتونية والتي تقابل ذرة في البلورة العادية مبعثراً للضوء الذي هو موجة كهرطيسية.

كائنات ميكروية[١٢]:

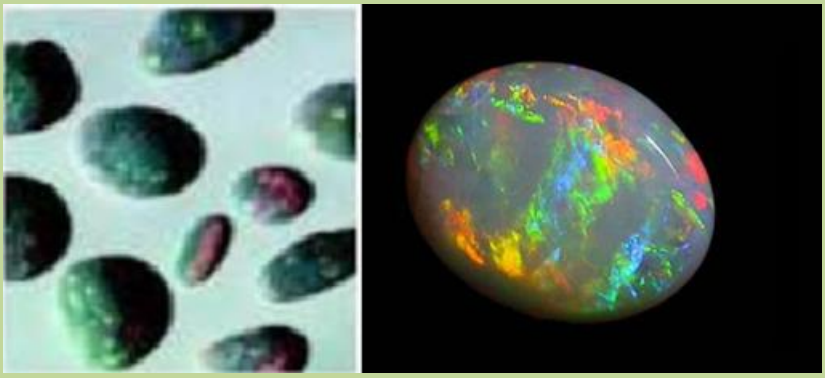
من المعروف أن الطبيعة تصنع بلورات فوتونية في الحجر الكريم المتلألئ أوپال opal، وفي أجنحة الفراشات الملونة، و ريش الطاووس، وفي شعر مخلوق شبيه بالدود يدعى فأر البحر كما نرى في الشكل (٥). وتُظهر صورة مجهرية لحرشفة فراشة مكسورة خضراء قزحية [على اليسار في الشكل] البنية المكعبة المركزية الوجوه دون الميكرون في الداخل. فلكل منها بنية عصابية فوتونية، لكنها ليست ثغرة عصابية كاملة بمعنى أن الضوء يستطيع أن ينتشر في بعض الاتجاهات. أما الثغرة العصابية الكاملة فقد امتنعت على الطبيعة، ربما لأنها تتطلب قرينة انكسار كبيرة جدا.

[١٢] مجلة العلوم، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي



الشكل (٥)

ومع ذلك فإن ثغرة عصابية غير كاملة يمكن أن تكون مفيدة جدا. إذ يمكن جعل جسيمات ثنائي أكسيد التيتانيوم على سبيل المثال، وهي أصغر من الميكرون، يتجمع بعضها مع بعض في بنية أحجار الأوپال حيث تتألف من كريات قياسها دون الميكرون من السيليكا مرتبة في بنية مكعبة مركزية الوجوه [متراصة].الشكل (٦).



الشكل (٦)

إن ثنائي أكسيد التيتانيوم هو الصباغ الأبيض المستخدم بكثرة في الدهانات وفي صناعة الورق الأبيض. ويمكن أن يضفي انتثار الضوء انتثارا مترابطا من بنية ثنائي أكسيد التيتانيوم الحاوية على ثغرة عصابية بياضا أكثر باستخدام كتلة أقل من الأكسيد. وقد يأتي ذلك اليوم الذي نجد فيه البلورات الفوتونية في كل مكان من حولنا، في الجدران المدهونة وفي أكوام الورق المكدسة فوق مكاتبنا.

والنوع الآخر المفيد جدا من المواد ذات الثغرة العصابية غير الكاملة هو تلك البلورات الفوتونية الثنائية البعد التي تستطيع منع الضوء من الانتشار في مستو. مثل هذه البنى يمكن أن تُمدد في البعد الثالث

لتشكل نوعا جديدا من الألياف الضوئية. إن للألياف الضوئية العادية قرينة انكسار عالية في قلبها الذي يحبس الضوء بواسطة الانعكاس الكلي الداخلي. وقد تبيّن [من جامعة باث في إنكلترا] عام ١٩٩٩ كيف تصنع ألياف ذات ثغرة عصابية فوتونية. ففي أحد النماذج يسير الضوء على امتداد ثقب مركزي في الليف محبوسا فيه بواسطة الثغرة العصابية الثنائية البعد للمادة المحيطة. فمن خلال مثل هذا التجويف المركزي يمكن إرسال قدرة power ضوئية أكبر مما يمكن إرساله خلال الزجاج، وهذا يتيح سعة نقل معلومات أكبر ربما ب١٠٠ مرة من تلك التي لألياف الاتصالات العادية.

وبدلا من أن نمدد بنية ثغرة عصابية ثنائية البعد لصنع ليف ضوئي يمكننا أن نلجأ إلى النهاية الحدية الأخرى ونصنع بلورة فوتونية من غشاء رقيق ثنائي البعد، وذلك وفق الحسابات التي أجريت في عام ١٩٩٧ [في معهد ماساتشوستس للتقانة]. يمكن بسهولة إعطاء البلورات الفوتونية المصنوعة من الأغشية الرقيقة الأشكال المرغوبة بواسطة الطرق المعتادة المستخدمة في إنتاج الدارات المتكاملة. ويشبه إدخال عيوب إلى بنية الثغرة العصابية إشابة شبه الموصل الإلكتروني، وهذا يفتح مجالا واسعا من الوظائف المختلفة، وأحد الأمثلة على الإشابة هو الثقب المركزي في البلورة الفوتونية للألياف الضوئية. وبصورة مماثلة يُنتج سد أحد الثقوب في بلورة غشاء رقيق أحد عناصر الليزر الأساسية، وهو بالتحديد «تجويف» صغير يمكنه أن يحتفظ بنمط كهرمغنطيسي موضعي . تخيل موجة ضوئية مستقرة صغيرة محتجزة بين مرايا. وقد استخدمَت مؤخرا [في معهد كاليفورنيا للتقانة] هذه التجاويف الضوئية الدقيقة جدا لصنع ليزرات لا يتجاوز حجمها ٠.٠٣ من الميكرون المكعب، وهذه أصغر ما وجد من الليزرات حتى الآن.

تطبيقات البلورات الفوتونية[١٣]:

الوضع الراهن	الوصف	التطبيق
بوشر في إنتاج النماذج الأولى على المستوى التجاري	مادة ذات ثغرة عصابية ثنائية البعد تمتد على طول البعد الثالث	ألياف ضوئية
عُرضت في المختبر	أصغر تجاويف ضوئية وأصغر ليزرات في العالم، مشكّلة من غشاء رقيق ثنائي البعد من مادة ذات ثغرة عصابية	ليزرات نانوية
عُرضت، ويجري تطوير صناعتها بطريقة قليلة التكلفة	مادة ذات ثغرة عصابية غير كاملة ثلاثية البعد تُعطى عادة شكل بنية الأوپال	صباغ فائق البياض
عُرضت بالنسبة إلى التصوير بواسطة الرنين (التجاوب) المغنطيسي والهوائيات	تَستخدم المحرضات والمكثّفات بدلا من المواد العازلة العادية	هوائيات وعواكس التواتر الراديوي
عُرضت، لكن يجب أن تنافس طرقا أخرى توصل إلى الهدف نفسه	بإمكان بنية الثغرة العصابية الفوتونية أن تستخلص الضوء بكفاءة عالية (أكثر من ٥٠%)	ديودات مُصدرة للضوء
يجري تطويرها	بالإمكان تشكيل أغشية رقيقة ثنائية البعد مثلما تشكّل الدارات المتكاملة العادية لصنع مرشحات قنوات ومعدّلات modulatorsوقارنات couplersوغيرها	دارات فوتونية متكاملة

الخاتمة:

إن إعطاء الأغشية الرقيقة ذات البلورة الفوتونية أشكال الدارات الضوئية قد يمثل النهاية الحدية في نمنمة الإلكترونيات الضوئية. ويعتقد الكثير من الباحثين أن الدارات المتكاملة التي تجمع بين الإلكترونيات المعهودة والفوتونيات أصبحت جاهزة لتوسع ثورة الدارات المتكاملة وتدخلها مجال الإشارات الضوئية العريضة العصابة. ومن المحتمل أن يستحوذ حقل تطور تطبيقات الثغرة العصابية هذا على معظم الاهتمام في السنوات القليلة القادمة، لكن المنتجات التجارية مازالت تحتاج إلى سنتين أو ثلاث.

و هكذا نرى أن الخوض في علم البلورات الفوتونية لهو خطوة شديدة الأهمية في تقدم البشرية و الدخول أكثر وأكثر في علم النانو الذي يمثل مستقبل العلم الحديث.

[١٣] مجلة العلوم، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

المصادر و المراجع:

١- الهيئة الوطنية للأولمبياد العلمي السوري، بنية المادة الكثيفة: البلورات ، د. اسكندر منيف، 4\9\2013.

٢- مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية، المجلد ٢١، العدد الثاني ٢٠٠٥، تصنيع بلورات فوتونية وتوصيفها، مجد حماد وفوزي عوض و فواز سيوف، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق.

٣- مجلة العلوم، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي، آذار ٢٠٠٢، المجلد ١٨.

٤- http://www.phys.ubbcluj.ro/~emil.vinteler/nanofotonica/TTM/Modul1_TTM.pdf

فهرس الصور

رقم الشكل	اسم الشكل	رقم الصفحة
الشكل (١)	أول بلورة فوتونية	4
الشكل (٢)	الألياف الضوئية والثغرة العصابية الفوتونية	5
الشكل (٣)	واجهة برنامج Translight Code	8
الشكل (٤)	أشكال البلورات الفوتونية	9
الشكل (٥)	كائنات ميكروية	10
الشكل (٦)	حجر الأوبال	10

فهرست

العنوان	رقم الصفحة
مقدمة	2
اشكالية البحث	2
بدايات الاهتمام بالبلورات	3
تعريف البلورات الفوتونية	3
منشأ الثغرات العصابية	4
ثغرة العصابة الطاقية الفوتونية	4
الثغرة العصابية الالكترونية	6

الألماس	7
حساب عصابة الطاقة الفوتونية	8
أشكال البلورات الفوتونية	8
كائنات ميكروية	9
تطبيقات البلورات الفوتونية	12
خاتمة	12
المصادر والمراجع	13
فهرس الصور	13
فهرست	13