



# بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها

تأليف

الدكتور طالب زيدان الموسوي

اصدارات كلية الكوت الجامعة  
مركز البحوث والدراسات والنشر

الطبعة الاولى

٢٠١٨ م

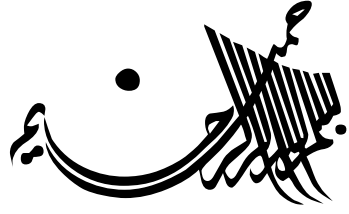
حقوق الطبع محفوظة الى

كلية الكوت الجامعة

مركز البحوث والدراسات والنشر

مكتب زاكي

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق ببغداد ( ) لسنة ٢٠١٨



(قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا  
عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ).

بِسْمِ اللَّهِ  
الْعَظِيمِ

(سورة البقرة/ الآية ٣٢)



# الاوراء

إلى الأسوة الحسنة التي أرسلها الله رحمةً للعالمين صاحب الخلق  
العظيم والمقام الكريم سيد الكائنات الرسول النبي الأمي محمد (ﷺ)  
أيماناً وأتباعاً وآل البيت الكرام (عليهم السلام)  
وإلى أرض الأنبياء والمرسلين الطاهرين وطني العراق العظيم  
تعظيماً وتبجيلاً.  
وإليكم يا شهداء العراق يا من قدمتم دماءكم الزكية بصدور  
ملؤها الأيمان بالله وحب الوطن ثمناً للمجد وفاءً وعرفاناً.  
وإلى والديّ العزيزين (رحمهما الله) وأخوتي وأخواتي وزوجاتي  
وأطفالي .  
وإلى كل من يفيد من هذا البحث ، أقدم جهدي المتواضع هذا .

# المؤلف



# الفصل الأول





## المقدمة:

تعتبر عملية توليد التوافق الثاني ظاهرة مفيدة إذا تتم بوساطتها عملية تغير الطول الموجي لأشعة الليزر من طول موجي إلى آخر وعملية تغير الطول الموجي تختلف تماما عما يحدث عندما نستعمل زجاجة خضراء لتغيير لون الضوء الأبيض المار من خلالها إلى اللون الأخضر ، إذ أن الضوء الأخضر الناتج موجود أساسا ضمن الضوء الأبيض الساقط على الزجاج الخضراء إذ لم تقم الزجاج إلا بعملية ترشيح للألوان الأخرى التي يحتويها اللون الأبيض والإبقاء على اللون الأخضر فقط. أي إن الزجاج الخضراء هذه لا تولد لونا جديدا كما يحدث في عملية التوافق الثاني أن ما نحتاجه هنا هو مصدر ضوئي عالي الشدة والتشاكه وهذا ما يوفره لنا الليزر .

إن دراسة البصريات اللاخطية مهمة في بعض استعمالات الليزر إذ بوساطتها يمكننا تغير الطول الموجي لأشعة الليزر وبذلك نزيد من مزايا هذه الأشعة فيمكن بوساطة هذه التقنية الحصول على أطوال موجية أطول أو أقصر من الطول الموجي لليزر الضاخ وبذلك نكون قد وفرنا في الجهد والوقت والثمن في تصنيع أجهزة ليزر بأطوال موجية مختلفة ومتنوعة.

إن عملية توليد التوافقية الثانية (SHG) جزء مهم من البصريات اللاخطية و قد فتح مجالات جديدة وبحثاً مستمراً للحصول على أعلى نسبة تحويل (الكفاءة) وأقصى طاقة ممكن الحصول عليها بالطول الموجي الجديد للضوء المتشاكه أو حسب الاستعمال المطلوب. في هذا البحث سوف نحصل على الطول الموجي الأخضر (532nm) من الطول الموجي (1064nm) بوساطة بلورة (KTP) والضخ بليزر (Nd:YAG) النبضي. والطول الموجي الأخضر مهم في عدة تطبيقات منها:

- (1) الاتصالات تحت الماء (يمتاز الطول الموجي الاخضر بنفاذية عالية في الماء).
- (2) القياسات البصرية.
- (3) عمليات تنقيب المواد<sup>[1]</sup> .
- (4) العمليات الكيميائية (التفاعلات الكيميائية -الضوئية) -Photo- Chemistry .
- (5) الدراسات الطيفية.
- (6) ضخ اوساط لاختية اخرى<sup>[2]</sup>.
- (7) التفاعلات البايولوجية-الضوئية (Photo-Biology).
- (8) تشخيص البلازما (Plasma Diagnostics) .
- (9) الاندماج النووي بالليزر (Laser Fusion)<sup>[3]</sup> .
- (10) يتمكن الجراح بواسطة الطول الموجي الاخضر من التمييز بين الانسجة المملوءة بالدم والتي تكون شديدة الامتصاص وبين الانسجة الشفافة غير الممتصة لهذا اللون<sup>[3,4]</sup> .
- (11) في الاتصالات ومعالجة المعلومات إذ إن لهذا الطول الموجي قابلية اختراق الحاجز الغازي المتأين الذي يحيط بالمركبات الفضائية اثناء دخولها المجال الارضي<sup>[5]</sup> .
- (12) قياس نسبة التلوث في الجو<sup>[6]</sup> .

### الانظمة البلورية Crystal Systems :

إن الخاصية المميزة للمادة المتبلورة هي تكرار مكوناتها من الذرات او الايونات بفواصل منتظمة في الابعاد الثلاثة وعند تمثيل الترتيب الذري على شكل مجموعة من النقاط في الفراغ فإن الشكل الحاصل من توزيع النقاط عبارة عن بنية فراغية وعلى هذا تعرف البنية الفراغية بأنها



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

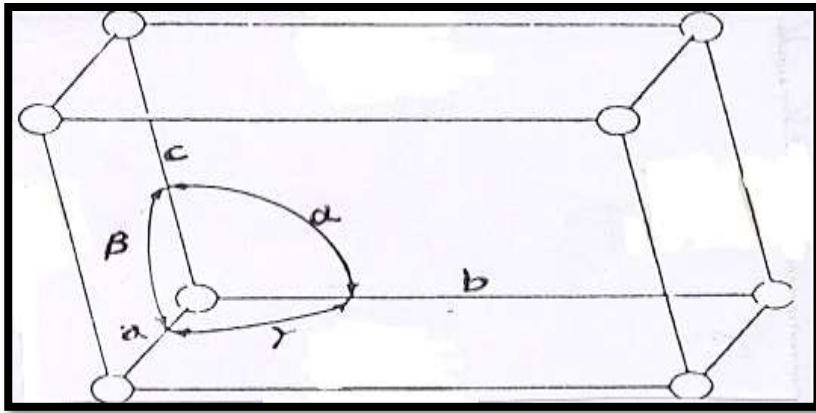
عبارة عن صفوف غير محددة الطول للنقاط في الابعاد الثلاثة بمتجهات اطوالها (c,b,a) في الاتجاهات (z,y,x) على التوالي ويمكن تحديد موقع اي نقطة في البنية من خلال العلاقة الآتية<sup>[7]</sup>:

$$\mathbf{r}_{uvw} = u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c} \dots\dots\dots(1-1)$$

حيث ان w,v,u اعداد صحيحة تمثل مضاعفات وحدات c,b,a

على التوالي.

الشكل (1-1) يبين ان وحدة الازاحة (c) ستضع مستوى البنية (Lattice Plane) الحاوي على b,a فوق مستوى آخر مواز له وان متجهات الازاحة الاساسية c,b,a يمكن اعتبارها محاور مرجعية (Reference Axes) وفي البلورات عادة ما تسمى بالمحاور البلورية (Crystallographic Axes) التي تكون الزوايا بين محورية (Interaxial) فيها هي  $\alpha, \beta, \gamma$ .



الشكل (1-1) يبين اطوال وحدات التكرار والزوايا بين المحورية<sup>[7]</sup>.

تصنف المواد المتبلورة الى سبعة انظمة بلورية اعتماداً على الشكل الهندسي لوحدة الخلية (unit-cell) من ناحية أطول ابعادها (c,b,a) والزوايا بين المحورية  $\alpha, \beta, \gamma$  فيها والشكل (2-1) يبين الانظمة البلورية السبعة.

### النظام الثلاثي المائل (Triclinic System) :

a- تختلف الزوايا البين محورية (Interaxial Angle)  $\alpha$  ,  $\beta$  ,  $\gamma$  عن بعضها البعض ولا تساوي اي منها زاوية قائمة ( $90^\circ$ ).  
b- تكون اطوال وحدات التكرار (Repeat Units) في اتجاه المحاور البلورية غير متساوية ( $a \neq b \neq c$ ).

### النظام الاحادي المائل (Monoclinic System):

a- المحور البلوري b عمودي على المستوى الذي يحوي المحوران c, a ويؤدي هذا الى العلاقات الآتية  $\alpha = \gamma = 90^\circ$  ,  $\beta \neq 90^\circ$ .  
b- تختلف اطوال وحدات التكرار repeat units في الاتجاهات البلورية الثلاث اي ان ( $a \neq b \neq c$ ).

### النظام الثلاثي أو المعيني الواجه (Trigonal or Rhombohedral):

a- تميل المحاور البلورية عن بعضها البعض بزوايا غير قائمة ولكن متساوية أي ان:

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

b- تكون أطوال وحدات التكرار (repeat units) لوحدة الخلية مساوية لبعضها البعض ( $a = b = c$ ).

### النظام السداسي Hexagonal System:

a- تتميز وحدة الخلية في البلورات التابعة الى هذا النظام بوجود ثلاثة محاور أفقية وهي  $a_1, a_2, a_3$  تعمل زاوية مقدارها ( $120^\circ$ ) مع بعضها البعض ويكون المحور البلوري c عمودياً على المستوى الذي يحوي المحاور الأفقية.

b- تكون وحدات التكرار (repeat units) باتجاه المحاور الافقية الثلاث متساوية وتختلف عن تلك في اتجاه المحور الرابع اي ان :

$$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$$



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

### **النظام المعيني القائم Orthorhombic System :**

a- تكون المحاور البلورية فيها متعامدة على بعضها البعض أي أن:

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

b- تتباين اطوال وحدات التكرار في الاتجاهات البلورية أي:

$$(a \neq b \neq c)$$

### **النظام الرباعي Tetragonal System :**

a- تكون المحاور البلورية الثلاث متعامدة على بعضها البعض وهذا

يؤدي إلى:

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

b - تتساوى وحدتا التكرار (repeat units) في اتجاهين بلوريين فقط

وتختلفان عن وحدة الاعداد في الاتجاه الثالث اي أن:

$$(a = b \neq c)$$

### **النظام المكعي Cubic System :**

a- تتعامد المحاور البلورية عن بعضها البعض اي ان

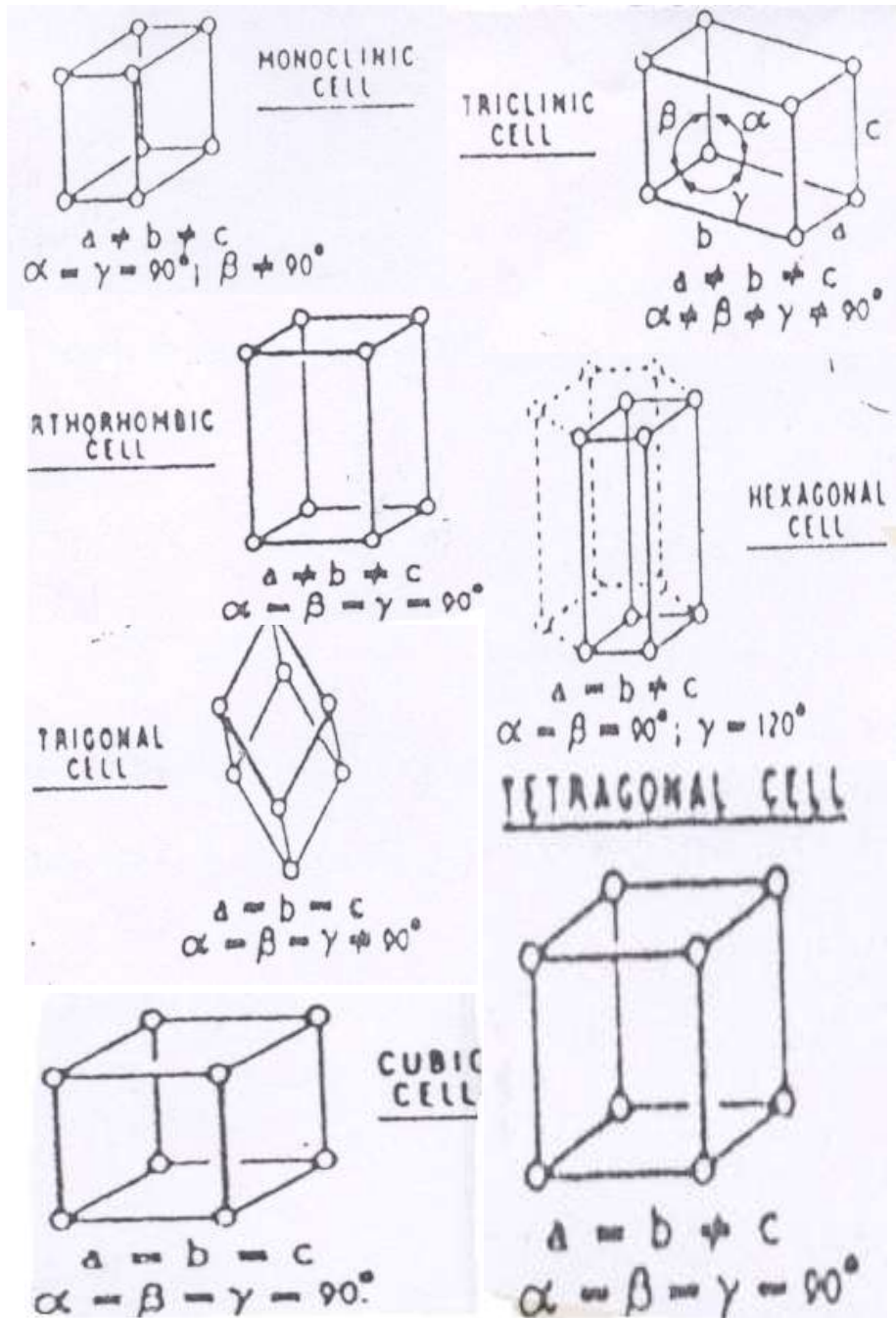
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

b- تكون اطوال وحدات التكرار repeat units في الاتجاهات البلورية

الثلاثة متساوية

$$(a = b = c)$$



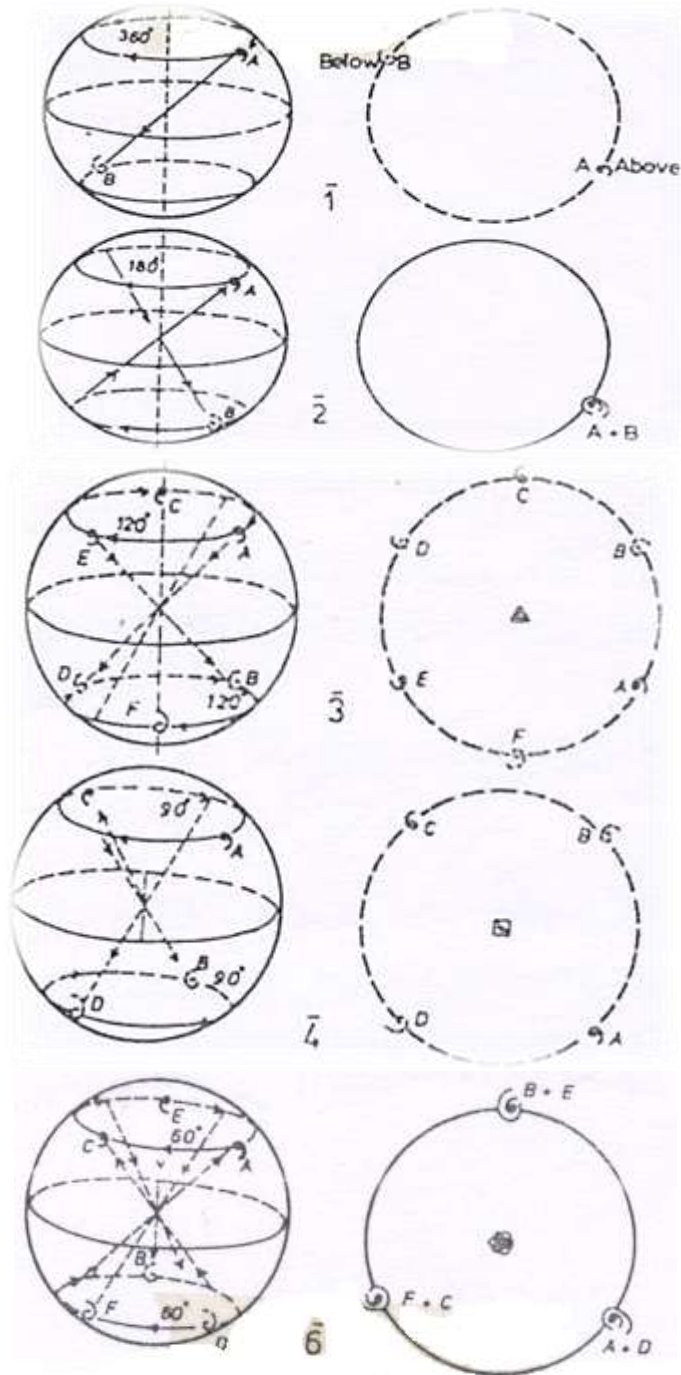


الشكل (2-1) يبين الانظمة البلورية السبعة [7].

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

### التناظر في الانظمة البلورية Symmetry in Crystal Systems:

تتولد البنية البلورية (Crystal Lattice) نتيجة تكرار وحدة الخلية (Unit-Cell) في الابعاد الثلاثة وفي اتجاهات موازية لحافات الخلية الاساسية وتتمو البلورات الكبيرة (Macroscopic Crystal) عند توفر الظروف الفيزيائية والكيميائية المناسبة. تتميز المواد البلورية المتبلورة بترتيب داخلي منتظم لمكوناتها من الذرات أو الأيونات أو الجزيئات ويؤدي الترتيب المنتظم هذا الى تكوين وحدة الخلية (Unit Cell) تكون ممثلة للبنية البلورية الكاملة. يسبب الترتيب المنتظم لمكونات المادة المتبلورة ظهور خاصية التناظر التي تصف عملية اعادة الذرات او الجزيئات المتشابهة في التركيب ، والحجم، والشكل على جانبي مستوى (Plane) ، أو محور (Axis) أو نقطة (Point) واحيانا تنعكس حالة التناظر الموجودة بين الذرات في ترتيب الأوجه والحافات للبلورات الكاملة النمو. أن محاور التناظر (2,3,4,6) ومستويات التناظر (m) ومركز التناظر او مركز الانقلاب (i) التي تعكس التناظر الداخلي بين مكونات البنية تنعكس أيضاً في الاشكال الخارجية للبلورات الكاملة النمو من خلال التوزيع المنتظم لعناصرها من الالوجه والحافات والزوايا. تظهر في البلورات محاور تناظر من النوع الدوراني -الانقلابي (Rotooinverion) وهي محاور تناظر تجلب عناصر البلورة المتكافئة الى حالة تتطابق مع نفسها عند تدوير البلورة حولها بحيث يرافق الدوران انقلاب حول نقطة في مركز البلورة (1', 2', 3', 4', 6') وتوضع علامة السالب فوقها لتميزها عن محاور الدوران الاعتيادية. كما موضح في الشكل (1-3). اما التناظر المميز للانظمة البلورية المختلفة موضح في الجدول (1-1) وذلك بالاستناد على النظام العالمي الذي وضعه هرمان -موجين للتدوين. (Hermann-Mouguin System of Notation).<sup>[7]</sup>



الشكل (3-1) يبين التناظر في الانظمة البلورية [7].



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

جدول (1-1) يبين التناظر المميز للأنظمة البلورية المختلفة [7]

التناظر المميز Characteristic Symmetry	Crystal System	النظام البلوري	ت
لا يوجد تناظر	Triclinic	الثلاثي الميل	1
محور دوران ثنائي (2) واحد $1A_2$	Monoclinic	الاحادي الميل	2
محور دوران ثلاثي (3) او $(3^-)$ $1A_3(3^-)$ واحد	Trigonal or Rhombohedral	الثلاثي او المعيني	3
محور دوران سداسي (6) او $(6^-)$ $1A_6(6^-)$ واحد	Hexagonal	السداسي	4
ثلاثة محاور دوران ثنائية (2) $3A_2$	Orthorhombic	المعيني القائم	5
محور دوران رباعي (4) او $(4^-)$ $1A_4(4^-)$ واحد	Tetragonal	الرباعي	6
اربعة محاور دوران ثلاثية (3) او $(3^-)$ $4A_3(3^-)$	Cubic	المكعبي	7

الأصناف البلورية (Crystal Class's) والمجاميع النقطية (Point Groups) إن عدد المجاميع النقطية (Point Groups) التي تنتج من عمليات التناظر (Symmetry Operation) منفردة أو من خلال تألفاتها مع بعضها البعض ليست غير محددة بل انها تساوي فقط اثنتين وثلاثين (32) مجموعة نقطية (Point Groups) تتميز كل واحدة منها بتناظر خاص تختلف بها عن غيرها. ان المجاميع النقطية هذه والتي اشتقت اعتماداً على فرضيات وضعها الالمانى (Hessel) 1830 مكافئة لأثنتين وثلاثين (32) فصيلة بلورية (Crystal Classes) رغم ان المجاميع النقطية (Point Groups) تصف التناظر التي تؤدي الى النسق المنتظم للبلورات كما موضح في الجدول (1-2).

الجدول (2-1) يوضح بالتفصيل توزيع الأصناف البلورية على الأنظمة البلورية

السبعة مع ذكر اسم الصنف والتناظر الكلي فيه. [7]

ت	النظام البلوري	الصنف البلوري	اسم الصنف	التناظر الموجود
1	ثلاثي الميل	$11^-$	السطوح الوحي	لا يوجد
2	احادي الميل	2m 2/m	اسفيني سنامي موشوري	1A <sub>2</sub> 1m i,1A <sub>2</sub> ,1m
3	معيني قائم	222 mm2 2/m 2/m 2/m	معيني اسفيني مزدوج معيني هرمي معيني مزدوج	3A <sub>2</sub> 1A <sub>2</sub> ,2m i,3A <sub>2</sub> ,3m
4	رباعي	4 4 <sup>-</sup> 4/m 422 4mm 4 <sup>-</sup> 2m 4/m 2/m 2/m	رباعي مزدوج رباعي اسفيني مزدوج رباعي هرمي مزدوج رباعي منحرف الاوجة رباعي مزدوج الاوجة سكالينوهيدريالي رباعي مزدوج هرمي	1A <sub>4</sub> 1A <sup>-</sup> <sub>4</sub> i,1A <sub>4</sub> ,1m 1A <sub>4</sub> ,4A <sub>2</sub> 1A <sub>4</sub> ,4m 1A <sup>-</sup> <sub>4</sub> ,2A <sub>2</sub> ,2m i,1A <sub>4</sub> ,4A <sub>2</sub> ,5m
5	ثلاثي او معيني	3 3 <sup>-</sup> 32 3m 3 <sup>-</sup> 2m	ثلاثي هرمي معيني الاوجة ثلاثي منحرف الاوجة ثلاثي مزدوج هرمي سداسي سكالينوهيدريالي	1A <sub>3</sub> 1A <sup>-</sup> <sub>3</sub> 1A <sub>3</sub> ,3A <sub>2</sub> 1A <sub>3</sub> ,3m 1A <sup>-</sup> <sub>3</sub> ,3A <sub>2</sub> ,3m 1A <sup>-</sup> <sub>3</sub>
6	سداسي	6 6 <sup>-</sup> 6/m 622 6mm 6 <sup>-</sup> m2 6/m 2/m 2/m	سداسي هرمي سداسي هرمي مزدوج سداسي منحرف الاوجة سداسي مزدوج هرمي ثلاثي مزدوج هرمي مزدوج سداسي مزدوج هرمي مزدوج	1A <sub>6</sub> 1A <sup>-</sup> <sub>6</sub> i,1A <sub>6</sub> ,1m 1A <sub>6</sub> ,6m 1A <sup>-</sup> <sub>6</sub> ,3A <sub>2</sub> ,3m 1A <sup>-</sup> <sub>6</sub> i,1A <sub>6</sub> ,6A <sub>2</sub> ,7m
7	مكعبي	23 2/m 3 <sup>-</sup> 432 4 <sup>-</sup> 3m 4/m 3 <sup>-</sup> 2/m	التيتارتوبي الايبلويدي الجبرويدي سداسي رباعي الاوجة سداسي ثماني الاوجة	3A <sub>2</sub> ,4A <sub>3</sub> 3A <sub>2</sub> ,3m,4A <sup>-</sup> <sub>3</sub> 1A <sup>-</sup> <sub>3</sub> 3A <sub>4</sub> ,4A <sub>3</sub> ,6A <sub>2</sub> 3A <sub>4</sub> ,4A <sub>3</sub> ,6m 3A <sub>4</sub> ,4A <sup>-</sup> 3,6A <sub>2</sub> ,9m1A <sup>-</sup> <sub>3</sub>

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

## البلورات اللاخطية Nonlinear Optic Crystals

نتيجة لوجود خاصية دوران مستوى الاهتزاز (الاستقطاب) لبعض البلورات والمواد ، والمادة التي تمتلك تلك الخاصية تسمى بالمادة النشطة ضوئياً مثل الكوارتز ومقدار الدوران يعتمد على سمك المادة والطول الموجي للضوء المستعمل<sup>[8]</sup> . يسبب المجال الكهرومغناطيسي الذي يصاحب مرور موجة ضوئية خلال مادة معينة استقطاب تلك المادة ، وعندما تكون شدة الشعاع الضوئي صغيرة يرتبط هذا الاستقطاب بعلاقة خطية مع المجال الكهربائي (اخذ المجال الكهربائي فقط بعين الاعتبار ) ولكن شدة الاشعة الضوئية عندما تتخطى العلاقة الخطية تصبح العلاقة التي تربط بين الاستقطاب وشدة المجال غير خطية . وكما يأتي<sup>[9]</sup>:

$$p = \chi E(1 + a_2 E + a_3 E^2 + \dots \dots \dots (1 - 2))$$

a يمثل المعامل غير الخطي (قيمته اقل بكثير من 1).

$\chi$  يمثل الاستقطابية الخطية.

وعندما يكون المجال الكهربائي صغيراً فان تغير (P) مع (E) يكون  $(P_0 \cos \omega t)$  لكن القيم الكبيرة للمجال تؤدي الى اقتراب قيمة المقدار  $(a_2 E)$  من ( 1 ) والذي يساهم في الاستقطابية بموجب<sup>[9]</sup> :

$$P_2 = a_2 \chi E_o^2 \cos(\omega t) \text{ ----- (1-3)}$$

$$P_2 = \frac{1}{2} [a_2 \chi E_o^2 (1 + \cos 2\omega t)] \text{ ----- (1-4)}$$

يمثل الحد  $(2\omega)$  في المقدار داخل الاقواس الصغيرة في المعادلة (1-4) يعبر عن عملية التوافق الثاني . ان الانكسار الثنائي صفة ملازمة الى (20) نوعاً من مجموع (32) نوعاً من البلورات

والاوساط اللابلورية تحصل على صفة الانكسار الثنائي عندما تتعرض لشد داخلي وهو التغير الذي يحدث بسبب تغير في معامل الانكسار للمادة في اتجاه واحد أو اكثر . تستقطب الحزمة المارة خلال مادة ثنائية الانكسار حيث تعتمد قيمة او درجة الاستقطاب على اتجاه محور المادة نسبة الى اتجاه متجهة المجال الكهربائي لحزمة الاشعة الكهرومغناطيسية. ومن الممكن ان تحدث انواع كثيرة من الاستقطاب حيث يكون الاستقطاب الدائري والبيضوي أكثرها شيوعاً. يطلق على الشعاع في المستوى الذي يحدث فيه استقطاب يخضع لقانون سنيل في الانكسار بالشعاع الاعتيادي . كما يطلق على الشعاع في المستوى الذي لا يخضع لقانون سنيل بالشعاع فوق الاعتيادي.

أول من لاحظ صفة الانكسار المزدوج هو العالم بارنولنيوس عام(1665)<sup>[4]</sup> الشكل (1-4) يبين الشعاع الاعتيادي (Ordinary) والشعاع غير الاعتيادي(Extraordinary). يعتمد معامل انكسار المواد ثنائية الانكسار على المحور الذي يقاس حوله. وبما ان سرعة الضوء في المادة تتناسب عكسياً مع معامل الانكسار :-

$$v_n = c/n \dots\dots\dots(1-5)$$

$v_n$  : سرعة الضوء في المادة.

$c$  : سرعة الضوء في الفراغ.

$n$ : معامل الانكسار

لذلك يطلق على المحور ذي معامل الانكسار القليل بالمحور السريع والمحور ذي معامل الانكسار الاعلى بالمحور البطيء . يتم حث الانكسارية الثنائية في بعض المواد بمجال كهربائي كما ان عدداً من المواد البصرية تظهر بعضاً من درجات الانكسارية الثنائية الكهرو- ضوئية المحتثة حيث يمكن استعمال الانكسارية الثنائية المحتثة



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

كهروبصرياً في طريقة تحويل الترددات ( مضاعفة التردد) لنواتج انواع الليزرات وكذلك في طريقة التحويل النوعي والتضمين.

ويمكن تقسيم خصائص المواد ثنائية الانكسار البصرية المهمة الى [5] :-  
(1) الجودة البصرية للمادة.

(2) درجة الانكسارية الثنائية المحتثة بالتأثير الكهروضوئي.

(3) الامتصاص الضوئي الذي حد من النفوذية.

(4) معامل الانكسار الذي يحكم سرعة الضوء في المادة و الانعكاسية على السطح.

(5) عتبة التلف البصرية (Optical damage threshold).

الجدول (1-3) يحوي بعض المواد ثنائية الانكسار الشائعة الاستعمال مع معاملات انكسارها ونوع البلورة ونطاق النفاذيه .بعد فهم الظروف الفيزيائية والكيميائية التي تتحكم في عملية التبلور اصبح من الممكن الحصول على بلورات صناعية ممتازة مختبرياً لاغلب المعادن. ان الطرق التي تستعمل في هذا المجال تشكل التبريد البطيء أو تبخير محاليل مشبعة بالملح مثل ملح الطعام حاوية على بلورات ناعمة جداً تعمل على التتوي (Nucleation) التي تعد شرطاً أساسياً وعاملاً مساعداً لعملية التبلور (Crystallization). ان عملية تبريد المحلول بشكل تدريجي وبطيء يؤدي الى نمو بلورات كبيرة محاطة بأوجه ملساء، شريطة المحافظة على معدل التبريد (Cooling rate) وتركيز المحلول (Concentration) المناسبين. ويمكن تصنيف البلورات اللاخطية الى مجموعتين طبقاً الى الخواص الفيزيائية وهي:

(1) البلورات التي تنمى من محاليل مائية (Water Solutions) :

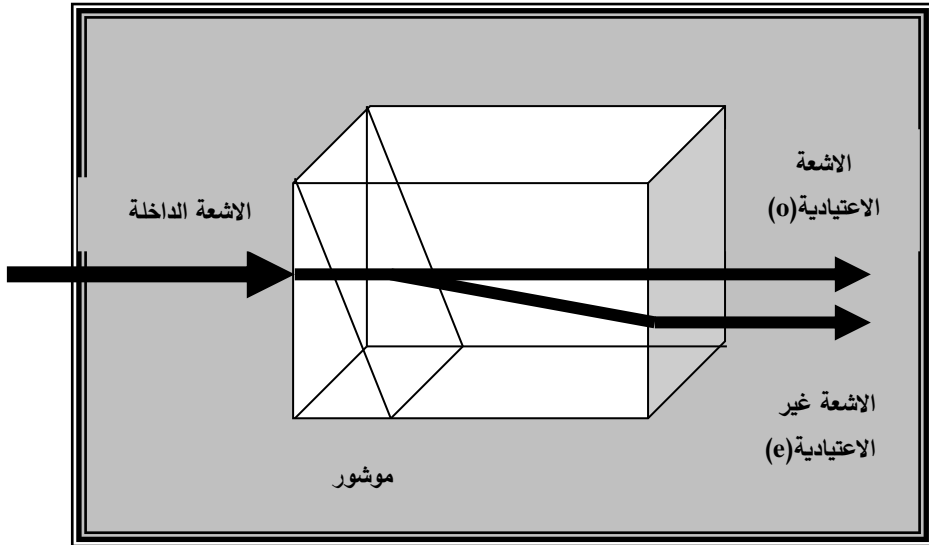
تكون سهلة الانكسار وهشة (Fragile) حساسة للرطوبة من الهواء

(Hygroscopic) حساسة الى الصدمات الحرارية (Thermal Shock)

ومن ناحية اخرى تكون سهلة الانماء ويمكن الحصول على احجام كبيرة منها وبنوعية بصرية ممتازة (Excellent Optical Quality) كمثال لهذه البلورات مجموعة (KDP) .

(2) البلورات التي تنمى من الذوبان أو الانصهار:

تكون اكثر صلابة من المجموعة الاولى واقل حساسية للصدمات الحرارية واقل نوعية بصرية. وكمثال لهذه البلورات بلورة ليثيوم نيوبايت ( $\text{LiNbO}_3$ ) وبلورة صوديوم نيوبايت ( $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ) .



الشكل (4-1) يبين الشعاع الاعتيادي والشعاع غير الاعتيادي . [4]

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

الجدول (3-1) يبين بعض المواد ثنائية الانكسار الشائعة الاستخدام

ومعاملات انكسارها ونوع البلورة ونطاق النفاذية. [5,10,11,12]

نطاق النفاذية (nm)	نوع البلورة ( $\Delta n$ )	معاملات الانكسار	المادة
350-4500	موجبة	$n_x=1.377, n_y=1.7453, n_z=1.8297 @ 1064nm$ $n_x=1.778, n_y=1.7886, n_z=1.8887 @ 532nm$	KTP
200-1600	سالبة	$n_o=1.4938, n_e=1.4599$	KDP
300-5000	سالبة	$n_o=1.8571, n_e=1.7165$	LiIO <sub>3</sub>
189-3500	سالبة	$n_o=1.6551, n_e=1.5424 @ 1064nm$ $n_o=1.6749, n_e=1.5555 @ 532nm$	BBO
160-2600	-----	$n_x=1.5658, n_y=1.5905, n_z=1.6055 @ 1064nm$ $n_x=1.5785, n_y=1.6065, n_z=1.6212 @ 532nm$	LBO
420-5200	سالبة	$n_o=2.322, n_e=2.156 @ 1064nm$	LiNbO <sub>3</sub>
200-1500	سالبة	$n_o=1.4948, n_e=1.4554$	KD*P
200-2000	سالبة	$n_o=1.658, n_e=1.486$	CaCo <sub>3</sub>
160-4500	موجبة	$n_o=1.544, n_e=1.553$	SiO <sub>2</sub>
600-14000	موجبة	$n_o=2.334, n_e=2.352$	CdS
170-6000	سالبة	$n_o=1.768, n_e=1.760$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

خصائص وتطبيقات البلورات اللاخطية شائعة الاستخدام:-

بلورة KTP (KTiOPO<sub>4</sub>)

Potassium Titanium Oxide Phosphate Crystal

بلورة بصرية لاخطية كفوءة في المنطقة ( المرئية ، وتحت

الحمراء المتوسطة) ، ذات كلفة منخفضة مقارنة مع بلوريتي

(BBO, LBO) ، تمتلك معاملًا لاخطيًا عالٍ، المعامل البصري اللاخطي

الفعال ( $d_{eff}$ ) في بلورة (KTP) للطول الموجي (1064nm) اكبر (1.5)

مرة من بلورة (BBO) و(10) مرات من (KDP) ،لها عتبة تلف بمقدار  $(1\text{GW}/\text{cm}^2)$  عند الليزر النبضي ذي الطول الموجي (1064nm) . كفاءة التحويل لتوليد التوافق الثاني (SHG) للطول الموجي (1064nm) يساوي تقريباً (80%) ،زاوية (Wolk-off) صغيرة،زاوية قبول كبيرة، تشتغل بدرجة حرارة الغرفة،ذات توصيل عالٍ (2) مرتين اكبر من بلورة (BNN)،عدم تطابق الطور (Mismatch) قليل وتتأثر سلبا في الجو الرطب ومستقرة ميكانيكياً وكيمياوياً وتستعمل في مضاعفة التردد (Frequency Doubling) في ليزرات (Nd) المطعمة للخرج أخضر او احمر ومزج الترددات في ليزرات (Nd) او ليزرات اشباه الموصلات لخرج ازرق وتستعمل كمصادر بارامترية (OPG, OPA,OPO) وكذلك تستعمل كمضمنات بصرية-كهربائية (E-O) وفي مفتاح عامل النوعية ولانشاء منظومة ليزر اخضر مضغوطة. الجدول (4-1) يبين الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبصرية واللاخطية لبلورة (KTP) <sup>[10,11,12]</sup> والشكل (5-1) يبين نفاذية بلورة (KTP) .

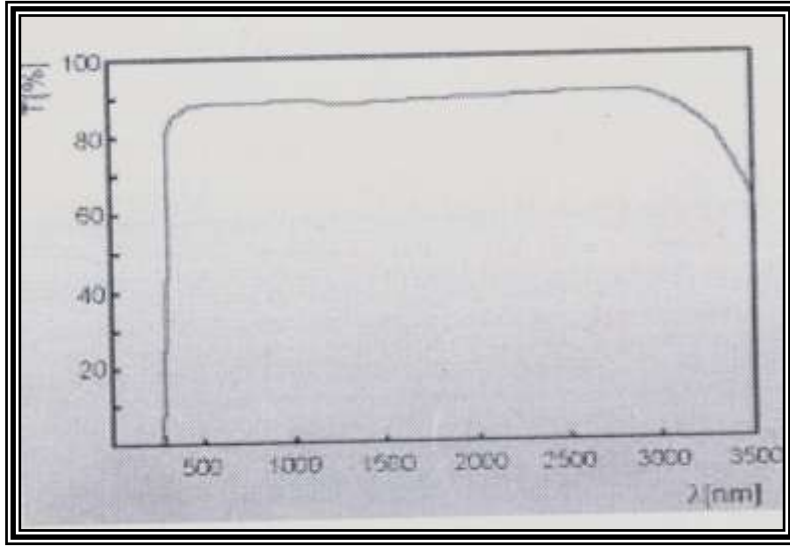




بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

الجدول (4-1) يبين الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبصرية  
واللاخطية لبلورة (KTP) [10,11,12]

الكمية/الوحدة/الرمز	الخاصية	ت
<b>KTiOPO4</b>	الصيغة الكيميائية	1
معيني قائم	النظام البلوري	2
<b>mm<sup>2</sup></b>	المجموعة النقطية	3
<b>(a=6.404,b=10.616,c=12.814)AO</b>	معاملات الشبكة	4
<b>1172°C</b>	نقطة الانصهار	5
<b>5 Mohs</b>	الصلابة	6
بلالون	اللون	7
<b>0.1643 cal/g.°c</b>	الحرارة النوعية	8
<b>0.13 W/cm<sup>0</sup>K</b>	التوصيلية الحرارية	9
<b>3.5*10<sup>-8</sup> s/cm</b>	التوصيلية الكهربائية	10
<b><math>\alpha &lt; 1\% \text{ cm}^{-1} @ 1064\text{nm} \&amp; 532\text{nm}</math></b>	معامل الامتصاص	11
<b>2.945 g/cm<sup>3</sup></b>	الكثافة	12
<b><math>d_{\text{eff}}(\text{II})=8.3*d_{36}(\text{KTP})</math></b>	المعامل اللاخطي الفعال	13
<b><math>\Theta=90^0, \varphi=23.5^0 @ \text{SHG}</math></b>	زاوية تطابق الطور	14
<b>25<sup>0</sup> c-80<sup>0</sup> c</b>	درجة حرارة الاشتغال	15
<b>4.5 mrad</b>	زاوية Walk-off	16
<b><math>n_e &gt; n_o</math></b>	بلورة موجبة	17
<b>ODT &gt; 1.5-2MW/cm<sup>2</sup></b>	عتبة التلف البصرية	18



الشكل ( 1-5 ) يبين نفاذية بلورة ( KDP ) للطول الموجي من  
[10,11] ( 450nm ) الى ( 3500nm ) .

بلورة  $(KD_2PO_4, KH_2PO_4)$  KDP,  $KD^*P$

Potassium Dihydrogen Phosphate, Potassium Dideutium Phosphate

من اكثر البلورات التجارية المستعملة في البصريات  
اللاخطية وتستعمل لمضاعفة التردد او ثلاث او اربع مرات مضاعفة،  
تستعمل كمضمنات (Modulators) واسعة وفي مفتاح عامل النوعية  
(Q-Switches) وفي خلايا بوكسل (Pakels Cells)، لها معامل  
كهربوصري عالٍ (Electro-Optic) ، السطح الصقيل لها يمكن ان  
يتأثر بالرطوبة بشكل سهل لذلك تحفظ في مكان جاف تكون فيه الرطوبة  
اقل من (50%)، لها انبعاث جيد في منطقة (u.v.)، عتبة تلف بصرية  
عالية وانكسار ثنائي عالٍ، ولها معاملات لاخطية عالية. التردد التوافقي  
الثاني والثالث والرابع ممكن في ليزر الصبغة، وتستعمل في تحويل ليزر

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

قدرات عالية. الجدول (5-1) الملحق (1) يبين الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبصرية واللاخطية لبلورتي (KDP, KD\*P).<sup>[10,11]</sup>

### بلورة BBO ( $\text{Beta-BaB}_2\text{O}_4$ )

Beta Barium Borate Crystal

مدى انبعاث طيفي عريض بحدود (190-3500) nm، المعامل اللاخطي الفعال في (SHG) اكبر من (6) مرات من بلورة (KDP)، عتبة تلف عالية بمقدار ( $10\text{GW}/\text{cm}^2$ ) في الطول الموجي (1064nm)، ولها تجانس بصري (Optical Homogeneity) عالٍ ومدى واسع لدرجات الحرارة عند ( $55^\circ\text{C}$ )، توليد التوافق الثاني، الثالث، الرابع، الخامس في ليزر (Nd:YAG) وليزر (Nd:YLF) وفي ليزر الصبغة (Dye Laser) ممكن توليد التوافق الثاني، الثالث. مزج الترددات في ليزر (تيتانيوم سفير) (Ti:sapphire) والكسندرايت (Alexandrit). تستعمل في تذبذب المعاملات البصرية (OPO) وتضخيم المعاملات البصرية (OPA) ممكن في هذه البلورة مضاعفة التردد في ليزر ايون الاركون (Argon-Ion) ليزر بخار النحاس (Cu-Vapor) وليزر الياقوت (Ruby Laser). الجدول (6-1) الملحق (1) يبين الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبصرية واللاخطية لبلورة (BBO).<sup>[10,11]</sup>

### بلورة LBO ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ ) Lithium Triborate Crystal

بلورة لاخطية مطورة حديثاً، مدى الشفافية لها واسع من ( ) 160nm الى (2600nm)، ولها تجانس بصري عالٍ، المعامل اللاخطي الفعال ( $d_{\text{eff}}$ ) اكبر (3) مرات من بلورة (KDP)، عتبة تلف عالية ( $18.9\text{GW}/\text{cm}^2$ ) للطول الموجي (1053nm) ولها زاوية قبول كبيرة و

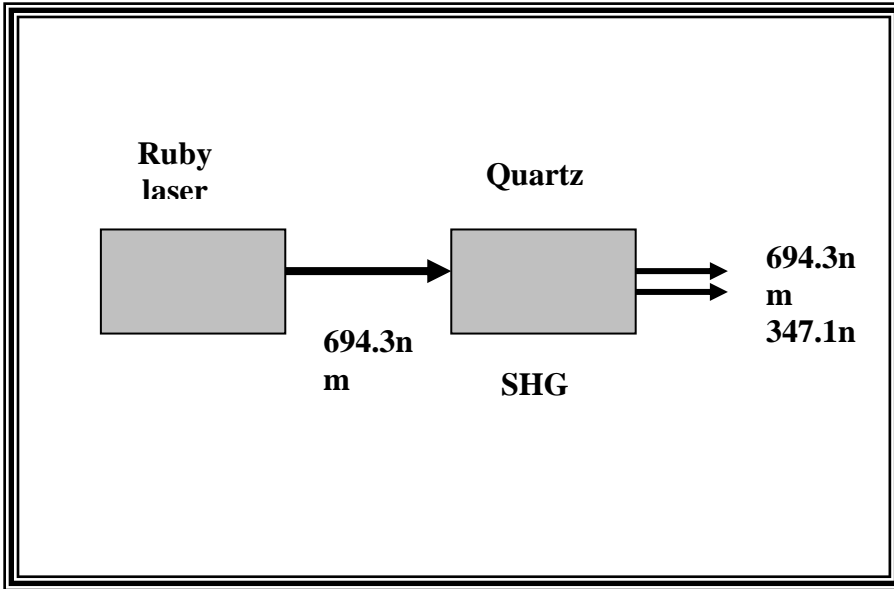
زاوية (Walk-off) صغيرة ذات صفات كيميائية وميكانيكية جيدة، موثمة الطور غير الحرج ممكن السيطرة عليه بالحرارة. تطابق الطور النوع الاول (Type I) في (SHG) ممكن لحدود (1-1.3  $\mu\text{m}$ ) والنوع الثاني وفي درجات حرارة الغرفة ممكن لحدود (0.8-1.1  $\mu\text{m}$ )، يستعمل في تضخيم المعاملات البصرية (OPA) وتذبذب المعاملات البصرية (OPO) وتوليد التوافق الثالث (Tripling)، ليزر اشباه المصنات يضح ليزر (Nd:YAG) و (Nd:YLF) و (Alexandrite) و (Ti-sappher) او ليزر الصبغة (Dye laser) ممكنة لتوليد التوافق الثاني. الجدول (7-1) الملحق (1) يبين الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبصرية واللاخطية. [10,11]

### مقدمة عن توليد التوافق الثاني:-

توليد التوافق الثاني (SHG) يعرف بأنه حزمة ليزرية ترددها ( $\omega$ ) تتحول جزئياً في مادة غير خطية (Nonlinear Material) الى حزمة متشاكهة ترددها ( $2\omega$ ) وقد اعلن هذا لأول مرة من قبل (Franken) وزملائه عام (1961) [6,13,14] عند اسقاط ليزر الياقوت (Ruby Laser) النبضي في المنطقة المرئية (احمر) بطول موجي (694.3nm) والحصول على الطول الموجي (347.1nm) في منطقة الاشعة فوق البنفسجية (u.v) ومن هذه الملاحظة التجريبية كانت بداية للدراسات والبحوث حول البصريات اللاخطية والتي تسمى مضاعفة التردد او توليد التوافق الثاني (SHG) كما في الشكل (6-1) الذي يبين رسم توضيحي لعملية توليد التوافق الثاني من ليزر الياقوت باستعمال بلورة الكوارتز .

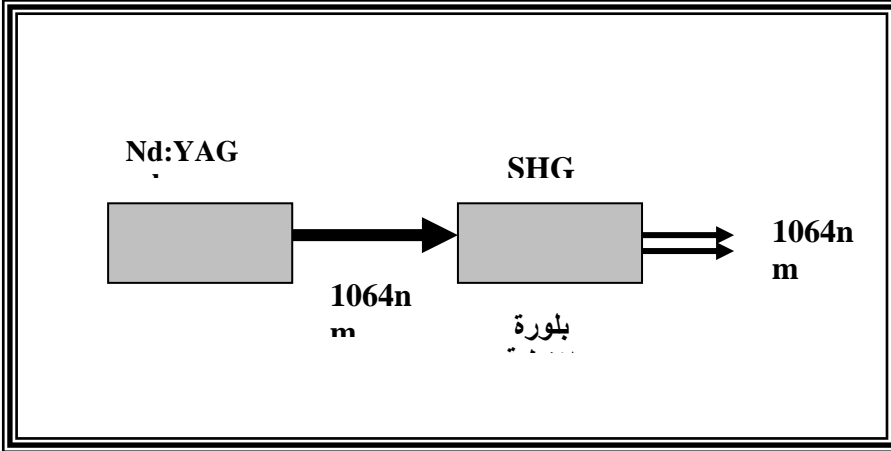


بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....



شكل (6-1) يبين رسم توضيحي لعملية توليد التوافق الثاني من ليزر الياقوت باستخدام بلورة الكوارتز.

في البصريات اللاخطية يتولد لون جديد مختلف عن اللون الساقط ونشاهد في الشكل (7-1) مثلاً يوضح ذلك حيث نحصل على شعاع اخضر اللون ذي طول موجي (532nm) من شعاع غير مرئي ذي طول موجي (1064nm) صادر من ليزر (Nd:YAG) باستعمال بلورة لاختية . نلاحظ ان جزءاً فقط من الاشعة ذات الطول الموجي (1064nm) قد تحول الى اللون الاخضر (532nm) وخرج الجزء الاخر من المنظومة كما كان . وفي كثير من الأحيان يتطلب زيادة كفاءة التحويل الى طرق سوف نتطرق اليها لاحقاً، وهي العوامل المؤثرة على كفاءة التحويل.



شكل (1-7) يلاحظ في عملية توليد التوافقيات الثانوية يتغير الطول الموجي لقسم من الضوء المار عبر الوسط ليصبح مساوياً لنصف الطول الموجي للضوء الساقط.

التفسير الفيزيائي لهذه الظاهرة يعود الى الالكترونات في البلورة المكونة للوسط غير الخطي (ويمكن ان نحصل على الظاهرة غير الخطية في الغازات والسوائل ) لكن الحصول عليها من البلورات اكثر شيوعاً. الالكترونات في البلورات مرتبطة ضمن ما يسمى (جدار الجهد Potential Wells) والذي يعمل عمل النوايض التي تربط الالكترونات بزوايا البلورة<sup>[15]</sup>. فاذا ما سحب الكترون نحو الخارج بعيداً عن موقع التوازن يعيده النابض الى مكانه بقوة تتناسب مع طول المسافة التي سحب اليها ، حيث تزداد قوة النابض مع زيادة المسافة التي سحب اليها الالكترون عن موقع اتزانها.

يؤثر المجال الكهربائي للموجة الضوئية المارة خلال بلورة على الالكترونات فيها حيث يسحبها بعيداً عن موقع اتزانها ، ففي المواد البصرية الخطية تنذب هذه الالكترونات حول موقع اتزانها بتردد المجال الكهربائي وحسب قوانين الفيزياء تطلق هذه الالكترونات المتذبذبة اشعة

## بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

بتردد مساو للتردد الذي تتذبذب فيه. وبذلك تطلق هذه الالكترونات ضوءاً بالتردد نفسه للضوء الساقط عليها.

إن سرعة الضوء في البلورات والمواد الأخرى ابطأ من سرعته في الفراغ ويعود ذلك إلى طبيعة تفاعل المجال الكهربائي للأشعة مع المادة ويعبر عنه بمعامل الانكسار وفي حالة التفاعل اللاخطي للأشعة عالية الشدة فإن هذا التغير في معامل الانكسار يؤدي إلى ظهور عملية مضاعفة التردد. يمكن تصور المواد غير الخطية بتلك المواد التي تكون الكترونات مرتبطة بنوابض قصيرة فإذا ما مر ضوء من خلالها وكان ذا شدة كافية بحيث يمكن لمجاله الكهربائي سحب الالكترونات بعيداً بحيث تصل إلى نهاية النابض، بذلك تكون علاقة الطاقة المخزونة غير خطية مع المسافة التي سحبها النابض، بذلك تسحب الالكترونات إلى الخلف قليلاً وبسرعة وليس إلى أمكنتها الطبيعية ويطء وبذلك تتذبذب بترددات غير تردد الضوء الساقط عليها.

### تطبيقات توليد التوافق الثاني:-

يستخدم توليد التوافق الثاني في الوقت الحاضر كمصادر متشاكهة عند أطوال موجية جديدة ويمكن وضع البلورة خارج أو داخل تجويف الليزر المنتج للحزمة الأساسية في الحالة الأخيرة يستفاد من قوة المجال الأعظم للموجة الكهرومغناطيسية داخل التجويف لزيادة كفاءة التحويل لقد تم الحصول على كفاءات تحويل عالية جداً وتقترب من (100%) في كلا الترتيبين ومن بين أكثر التطبيقات المألوفة للتوافق الثاني (SHG) هي مضاعفة التردد (Frequency Doubling) لخارج ليزر (Nd:YAG) ومن ثم إنتاج الأشعة الخضراء ذات الطول الموجي (λ=532nm) من الأشعة تحت الحمراء القريبة ذات الطول الموجي



( $\lambda=1064\text{nm}$ ) وتوليد اشعة (u.v) موالفة الى حد ( $\lambda=210\text{nm}$ ) بمضاعفة التردد لليزر الصبغة<sup>[3]</sup>. في كل من هاتين الحالتين يستعمل اما ليزر الاشعة المستمرة (CW) او الليزر النبضي، ومن اكثر البلورات اللاخطية الشائعة الاستعمال في التوافق الثاني تعود الى زمرة التناظر النقطي ( $4^2m$ )<sup>[6]</sup>. فقد تم الحصول على الجيل التوافقي الثاني (التردد المضاعف) عند ( $347\text{nm}$ ) من خارج ليزر الياقوت بكفاءة قدرها (40%) بأستخدام ( $\text{LiIO}_3$ ) و ( $\text{LiNbO}_3$ ) كما استعمل كل من ( $\text{LiIO}_3$ ) و ( $\text{LiNbO}_3$ ) لاجل الحصول على الجيل التوافقي الثاني داخل الحجرة عند ( $532\text{nm}$ ) من خارج ليزر (Nd:YAG)<sup>[5]</sup> لقد نشر ان ( $\text{LiIO}_3$ ) هو الافضل لعمليات التحويل النوعي وذلك لمقاومته العالية للتلف السطحي لكن ( $\text{LiNbO}_3$ ) يكون مفضلاً عند اشتغال الليزرات المستمرة لكون الخاصية غير الخطية له تكون كبيرة وكذلك غير حساس عند حصول التوافق الزاوي للطور<sup>[5]</sup>. كما استعملت (فورمات الليثيوم الاحادية الماء) لمضاعفة الخرج لليزر الياقوت والياك عند كثافات القدرة العالية. الجدول (1-8) يبين بعض الانظمة الليزرية لمضاعفة التردد خارج وداخل الحاوية مع البلورات اللاخطية المستعملة والاطوال الموجية الاساسية والتوافقية وكفاءات التحويل في كل حالة<sup>[5,6,38]</sup>.





بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

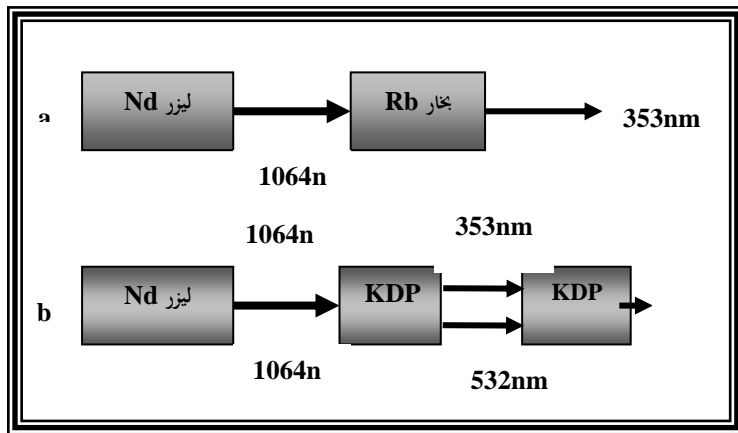
الجدول (١-٨) بعض الانظمة الليزرية لمضاعفة التردد خارج وداخل الحاوية مع البلورات اللاخطية المستعملة وكفاءات التحويل [5,6,38].

كفاءة التحويل (%)	نوع الضخ	الطول الموجي الاساس والتوافقي (nm)	طول البلورة (mm)	البلورة اللاخطية	الليزر
٨٠	نبضي	٥٣٢&١٠٦٤	٥	KTP	Nd:YAG
١٩.٥	مستمر	٥٣٢&١٠٦٤	٥	KTP	LDP Nd:YVO <sub>4</sub>
٣٥	نبضي	٥٣٢&١٠٦٤	٥	Ba <sub>2</sub> Na Nb <sub>5</sub> O <sub>15</sub>	Nd:YAG
٩.٢	نبضي	٥٣٢&١٠٦٤	١٥	LiNbO <sub>3</sub>	Nd:YAG
٥١	نبضي	٥٣٢&١٠٦٤	٢٥	KDP	Nd:glass
٣٠	نبضي	٢٦٦&٥٣٢	٢٥	ADP	Nd:glass
١٨	مستمر	٣٤٧&٦٩٤	١١	LiIO <sub>3</sub>	Ruby
١٨	مستمر	٣٤٧&٦٩٤	١٦	ADP	Ruby
٤٥	مستمر	٥٣٢&١٠٦٤	٢٠	CDA	Nd:YAG
٥٧	نبضي	٥٣٢&١٠٦٤	١٤	CD*A	Nd:YAG

### التوافقيات الاعلى (Higher Harmonics)

بالإمكان الحصول على توافقيات اعلى باستعمال اكثر من مرحلة واحدة للجيل التوافقي الثاني اي يمكن الحصول على التوافقية الثالثة بالطريقة السابقة نفسها التي حصلنا منها على الضوء ذي التوافقية الثانية وبسبب تطابق الطور الذي يجعل عملية الحصول على الضوء ذي التوافقية الثالثة من بلورة واحدة وبمرحلة واحدة صعبة جداً لذلك تستعمل مرحلتان إذ يتم الحصول على التوافقية الثانية من البلورة الاولى ومن ثم يتم دمجها مع التوافقية الثانية للبلورة للحصول على التوافقية الثالثة إذ تكون اكثر تعقيداً بسبب عمليات التشتت العالي التي تحصل في البلورة اللاخطية [3,15]. فضلاً عن هذا فأن معامل اللاخطية للمرتبة الثالثة

يكون صغيراً جداً بالمقارنة مع معاملة للمرتبة الثانية لان معاملاتها (Conflicts) تتناقص بسرعة حسب المتواليات المتمثلة في العلاقة (1-2) وبالتالي فإن كفاءة التحويل تكون صغيرة<sup>[9]</sup>. ويمكن بالأسلوب نفسه الحصول على التوافقية الرابعة ، والخامسة ، والسادسة وهكذا إلى التوافقية الخامسة عشرة<sup>[10]</sup> لكن كفاءة هذه العمليات قليلة جداً وتم عملياً الحصول على هذه التوافقيات لغرض البرهنة على خصائص الاوساط غير الخطية فقط وليس لاجل الحصول على ضوء بهذه الصفات، حيث تكون القدرة الخارجة ضعيفة جداً ولا يمكن الاستفادة منها. فقد تم الحصول على التوافقية الخامسة من ليزر (Nd:YAG) وباستعمال بلورة (LBO ذات كفاءة تحويل بنسبة (20%) بوساطة المنظومة ( LG105 )<sup>[16]</sup> وذلك من خلال دمج التوافق الثاني مع التوافق الثالث. كما تم استعمال التوافق الثالث (THG) في قياسات النبضات البصرية فوق القصيرة، الشكل (8-1) يبين توليد التوافق الثالث بمرحلة واحدة من بخار الربيديوم وبمرحلتين باستخدام بلورتي (KDP).



الشكل (8-1) a : توليد التوافقية الثالثة بمرحلة واحدة b : توليد

التوافقية الثالثة بمرحلتين<sup>[15]</sup>.

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

## نبذة تاريخية.

في عام 1961 لاحظ (P.A.Franken) وزملاؤه<sup>[6,13,14]</sup> عند إسقاط ليزر الياقوت (Ruby laser) النبضي في المنطقة المرئية بطول موجي (694.3nm) على بلورة الكوارتز وتوليد الطول الموجي (347.1nm) في منطقة الأشعة فوق البنفسجية . ومن هذه الملاحظة التجريبية كانت بداية للدراسات والبحوث حول موضوع توليد التوافق الثاني. قام الباحث (W.F. Hagen)<sup>[17]</sup> في عام 1969 بدراسة تأثير عرض الطيف والمدى الزاوي عند منتصف الشدة (FWHM) على كفاءة التحويل لبلورتي (KDP, LiNbO<sub>3</sub>) باستعمال ليزر (Nd:Glass). درس (C. Kennedy & J. Barry)<sup>[18]</sup> في عام 1974 تقنية مضاعفة التردد باستعمال ليزر (Nd:YAG) بالاعتماد على كاشف ضوئي ومقياس التداخل (Fabry-Perot) للحصول على الطول الموجي (0.53 μm). في السنة نفسها نشر كل من الباحثين (J. E. Murry, R. J. Pressley)<sup>[19]</sup> تقريراً حول استعمال بلورة (Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>) مع ليزر (Nd:YAG) لتوليد قدرة توافقية بمقدار (550mW) للطول الموجي (0.532 μm) ، كذلك قام (J. Kannelaud و W. Cushaw)<sup>[20]</sup> في السنة نفسها بتوليد التوافقي الثاني (0.532 μm) من ليزر (Nd:YAG) باستعمال بلورة (Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>) وبقدرة خرج حوالي (0.3-0.5 W) ، كما وفي التاريخ نفسه استعمل (Y. Sasaki و Y. Suematsu)<sup>[21]</sup> بلورة الكوارتز المطلية بغشاء من الزجاج في ليزر (Nd:YAG) لتوليد التوافق الثاني (0.53 μm) . في عام 1977 نشر (A. Alippi و A. Palma و L. Palmier)<sup>[22]</sup> بحثاً تضمن دراسة

علاقة الطور والسعة للموجات التوافقية والاساسية باستعمال بلورتي  $(\text{LiNbO}_3, \text{SiO}_3)$ . في السنة نفسها قام (J. Barry & C. Kennedy)<sup>[23]</sup> بدراسة توليد التوافق الثاني بداخل الحجرة باستعمال ليزر (Nd:YAG) وبلورة  $\text{Ba}_2\text{Na}(\text{NbO}_3)_5$  للحصول على الطول الموجي (532nm) وبطاقة (150-180mW). عام 1982 حاول (N.Nayak)<sup>[24]</sup> دراسة إمكانية توليد توافق ثالث (THG) لفوتونات ممتصة في وسطين ذريين. في السنة نفسها تناول (G.C.Gohosh & G.C.Bahar)<sup>[25]</sup> موضوع دراسة توزيع الحرارة في بلورات (ADP, KDP, KD\*P). نشر (C.D.Nabors و William J.Kozlovsky)<sup>[26]</sup> عام 1988 تقريراً حول توليد التوافق الثاني بكفاءة من ليزر (Nd:YAG) المستمر باستعمال بلورة  $(\text{Mg}:\text{LiNbO}_3)$  خارج المرنان . وفي التاريخ نفسه قام الباحث (K.Kato)<sup>[27]</sup> بتوليد التوافق الثاني للأطوال الموجية ( $4950-4589 \text{ } ^0\text{A}$ ) من ليزر (Nd:YAG) باستعمال بلورة (KTP) . عام 1989 قام (S. Das و G.C Bhar و U.Chatterjee)<sup>[28]</sup> بتوليد التوافق الثاني من ليزر (Nd:YAG) باستعمال بلورة  $(\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4)$  خارج المرنان. في سنة 1992 نشر الباحث (K.Kato)<sup>[29]</sup> تقريراً حول توليد التوافق الثاني من بلورة (KTP) من ليزر (Nd:YAG) للحصول على الطول الموجي ( $0.5321 \mu\text{m}$ ). في التاريخ نفسه تناول الباحثان (R.S. Craxton و M. D.Shelden)<sup>[30]</sup> موضوع توليد التوافق الثاني بكفاءة من ليزر الحزم العريضة . عام (1995) قام الباحث مهند موسى عزاوي<sup>[31]</sup> ببناء منظومة توليد التوافق الثاني لغرض فحص وتقويم خصائص بلورتي (KDP) و  $(\text{LiNbO}_3)$  باستعمال ليزر



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

(Nd:YAG) النبضي ودراسة تأثير المعلمات المتغيرة المتعلقة بالبلورات اللاخطية.

في عام 1996 درس (M. Murtz و O. Pfister) [32] إمكانية توليد التوافق الثاني باستعمال بلورة  $(AgGaSe_2)$  للحصول على الطول الموجي (3192 nm). نشر (Y.Barad و D.Meshulach و Y.Silberberg) [33] عام 1997 تقريراً حول توليد التوافق الثالث (THG) وقياسات النبضة السريعة المتولدة باستعمال عدة ليزرات وشريحة زجاج اعتيادية.

مما لاشك فيه إن توليد التوافق الثاني ودراسة البصريات اللاخطية استأثرت باهتمام الباحثين على مدى السنوات الأربعين الماضية من تاريخ اكتشاف الليزر لذا فأن مراجعة المقدمة لاحقاً للبحوث السابقة لاتمثل إلا جزءاً ضئيلاً جداً من مجمل الأعمال والبحوث والدراسات التي اهتمت بموضوع توليد التوافق الثاني ودراسة الأوساط اللاخطية.

نشر (W. Kweon و J.Lim و J.Eichenholz) حول خصائص بلورة جديدة  $(YCa_4O(BO_3)_3)$  حيث إن لها عدة خصائص مميزة مقارنة بالبلورات اللاخطية الأخرى مثل انها تمتلك معاملات لاخطية اعلى من بلورة (KTP) وامكانية تصنيعها بأحجام كبيرة واثبات كفاءتها لتوليد التوافق الثاني. نشر (U.StroBner و

J.P.Meyn و A.Arie و R.Wallenstein) [35] في سنة 2000 بحثاً عن توليد التوافق الثاني باستعمال بلورة (KTP) بداخل الحجرة للطول الموجي يمتد من المنطقة الخضراء إلى منتصف تحت الحمراء لقدرة تصل الى (500 mW). بعد ذلك قام الباحثون



[36] (R.Wang وY.H.Xu وM.H.LI) في عام 2001 بتوليد التوافق الثاني من بلورة (LiNbO<sub>3</sub>) المطعمة، حيث اظهرت التجارب العملية ان حرارة تطابق الطور للبلورة تزداد خطياً مع ازدياد نسبة التشويب. في التاريخ نفسه نشر (S. S.Brook وA.M.March) [37] نتائج عملية لتوليد التوافق الثاني ومضاعفة التردد باستعمال بلورة (LBO) خارج الحجرة ، حيث تم الحصول على الضوء الأزرق من ليزر (Ti:Sapphire) المستمر عند الطول الموجي (778nm) للحصول على الطول الموجي (389nm) . عام (2001) قام الباحث حيدر هادي سهيل [38] بتوليد التوافق الثاني داخل فجوة ليزر (Nd:YVO<sub>4</sub>) الذي يضح طولياً باستعمال ليزر أشباه الموصلات أقصى طاقة تم الحصول عليها بالطول الموجي (1064nm) هي (239mW) عند طاقة ضخ (800mW) وأقصى طاقة تم الحصول عليها بالطول الموجي (532nm) كانت (51.5mW) أعلى نسبة تحويل (19.5%) باستعمال بلورة (KTP) .

نشر (J.Von وE.Peik وH.Walther و Ch.Schwedes) تقريراً [39] يتضمن توليد الطول الموجي الأزرق (461nm) باستعمال ليزر شبه موصل (922nm) وبلورة (KTP) بقدرة ضخ (0.5W) وكذلك توليد الطول الموجي فوق البنفسجي بوضع بلورة ثانية (BBO) بطول موجي (231nm) وبقدرة (1Mw) .في عام 2003 نشر (O. Tadanaga و M. Asobe) [40] تقريراً حول استعمال بعض من البلورات مثل بلورة (LiNbO<sub>3</sub>) ذات شبه تطابق الطور كوسيلة لتحويل الطول الموجي.في السنة نفسها قام (P.F.Maulton وR. A.Shwarz وG. A.Rines) [41] بتوليد التوافق الثاني بداخل



## بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

الحجرة باستعمال بلورة (Nd:YLF) وضخها طويلاً باستخدام ليزر دايود بقدرة (10W) عند الطول الموجي (1047nm) وتم استعمال بلورة (KTP) النوع الثاني وبلورة (LBO) النوع الاول ، حيث تم الحصول على اعلى طاقة (1.6W) عند الطول الموجي (523.5nm) باستعمال بلورة (LBO) لتوليد التوافق الثاني.

نشر (B. S. Shi & A. Tomita) [42] عام 2004 تقريراً صادراً عن معهد العلوم والتكنولوجيا -اليابان يوضح الحصول على اعلى كفاءة تحويل باستعمال بلورة (KTP) للحصول على توليد التوافق الثاني (400.194nm) من ليزر (Ti:Sapphire) بقدرة ضخ (150 MW) . يهدف الى دراسة وبناء منظومة توليد التوافق الثاني (SHG) ، ودراسة خواص بلورة (KTP) لضخ ليزر (Nd:YAG) النبضي ذات النافذة الضوئية المناسبة للطول الموجي (1064nm) ودراسة الخرج الليزري للمنظومة المذكورة اعلاه من حيث اعلى نسبة تحويل ، وأعلى استقرارية، وأقصى طاقة ممكن الحصول عليها بالطول الموجي الجديد وتأثير كل من طاقة الضخ، ودرجة الحرارة ، و زاوية سقوط الشعاع في أداء وكفاءة المنظومة من خلال التجربة العملية والبرنامج الحسابي الخاص لحساب قدرة التوافق الثاني وكفاءة التحويل والطول المتشاكه.

تضمن هذا البحث خمسة فصول ، الفصل الاول يشرح البلورات بشكل عام والانظمة البلورية واصنافها والبلورات اللاخطية واهم البلورات اللاخطية وصولاً الى بلورة (KTP) (الجاري البحث عنها ومقدمة عن توليد التوافق الثاني وتطبيقاته والتوافقيات الاعلى واهم البحوث المنشورة عن توليد التوافق الثاني في مقدمة تاريخية واستعراض البحوث السابقة . الفصل الثاني احتوى على المعادلات النظري والصورة الفيزيائية لتوليد



التوافق الثاني والمعالجة التحليلية والوصول الى العوامل المؤثرة في توليد التوافق الثاني. الفصل الثالث تضمن تصميم وبناء منظومة توليد التوافق الثاني بتغيير درجة حرارة البلورة وحساب المدى الحراري للاشتغال (FWHM) وترصيف زاوية سقوط الشعاع والحصول على افضل استقرارية لتوليد التوافق الثاني وتصنيع الفرن الكهربائي الخاص لرفع درجة حرارة بلورة (KTP) وتصنيع دائرة الكاشف. الفصل الرابع تضمن النتائج العملية والنظرية المستخلصة من البحث والبرنامج الحسابي المصمم لقياس قدرة التوافق الثاني وكفاءة التحويل والطول المتشاكه وصولاً إلى الأسس التي تم اختيار بلورة (KTP) عليها لتوليد التوافق الثاني من ليزر (Nd:YAG) النبضي، الاستنتاجات والتوصيات والعمل المستقبلي تم استعراضها في الفصل الخامس من هذا البحث.





بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

# الفصل الثاني



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

## المقدمة :-

ان معظم الاصناف الشائعة لتحويل الاشعة هي تلك التي تحدث عندما تنتشر حزمة الاشعة في الفراغ او خلال نظام بصري ملائم .ومن تحولات اشعة الليزر<sup>[3]</sup> :

- (1) التحويل المكاني (Spatial Transformation).
- (2) تحويل السعة (Amplitude Transformation).
- (3) التحويل الزمني (Time Transformation).
- (4) تحويل الطول الموجي (Wavelength Transformation)<sup>[3]</sup>.

يحدث تحويل الطول الموجي عندما يتغير طول موجة الحزمة نتيجة لانتشارها خلال مادة بصرية غير خطية ( Nonlinear Optical Material ) ملائمة وقد يدعى تحويل الطول الموجي بتحويل التردد ، ويتضمن العمليات المهمة الآتية<sup>[3,6,14]</sup> :

- (1) توليد التوافق الثاني ( Second Harmonic Generation ).
- (2) تذبذب المعاملات البصرية (Optical Parametric Oscillation).
- (3) مزج الترددات (Frequency Mixing).
- (4) التوافقيات الاعلى (Higher Harmonics)<sup>[3,6,14]</sup>.

والذي نسعى الى دراسته في هذا البحث هو توليد التوافق الثاني وهو من اكثر التقنيات المفيدة التي طورت حتى الان لتوليد مصادر جديدة للضوء المتشاكه .

## توليد التوافق الثاني Second Harmonic Generation :

هو استعمال المواد الضوئية ذات السلوك اللاخطي لتحويل الموجات الضوئية بطول موجي معين الى اخر مساو الى نصف الطول الموجي الاصلي.

### الصورة الفيزيائية Physical Picture:

في البصريات الخطية يفترض ان العلاقة بين الاستقطاب المحتث للوسط العازل والمجال الكهربائي المسلط خطية اي ان<sup>[3]</sup>:-

$$P = \varepsilon_o \chi E \text{ -----(2-1)}$$

$\chi$  : استقطابية خطية .

وفي حالة حزم ليزيرية حيث يكون المجال الكهربائي عالياً فان العلاقة بين المجال الكهربائي (E) والاستقطاب الكهربائي (P) تتخطى العلاقة الخطية وتصبح العلاقة بين الاستقطاب اللاخطي المحتث ( $P^{NL}$ ) والمجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية يتمثل بالمعادلة العددية (Scalar Equation) الآتية<sup>[3]</sup> :

$$P^{NL} = 2\varepsilon_o \chi d E^2 \text{ -----(2-2)}$$

d : معامل وحدته معكوس وحدة المجال الكهربائي (m/v).

إن الأصل الفيزيائي للمعادلة (2-2) ناشئ عن التشوهات (Deformation) اللاخطية للالكترونات الخارجية الضعيفة الارتباط بذرة او بنظام ذري عندما تتعرض لمجالات كهربائية عالية. وهذا مشابه لانهييار قانون هوك للنايبيض الممتد اي ان القوة المعيدة لم تعد تعتمد اعتماداً خطياً على الازاحة من حالة التوازن. من الموازنة بين المعادلتين (2-1),(2-2) يظهر ان حد الاستقطاب اللاخطي يصبح قابلاً للموازنة بالحد الخطي للمجال الكهربائي و نحصل على<sup>[3]</sup>:-

$$E \approx \chi / d \text{ -----( 2-3)}$$

وبما ان ( $\chi \approx 1$ ) فإن:-

$$E \approx 1/d \text{ -----( 2-4)}$$

من المعادلة (2-4) نلاحظ ان (1/d) يجب ان تساوي قيمة شدة المجال الذي يصبح عنده الحد الخطي واللاخطي متقاربين ، اي شدة

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

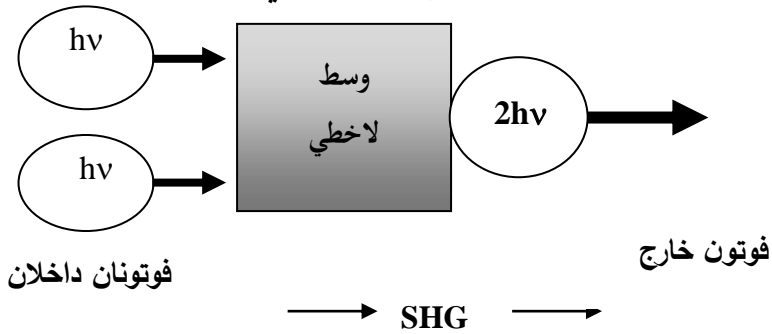
المجال الذي يصبح عنده تشوه كبير للالكترونات الخارجية . وهكذا (1/d) يتوقع ان تكون مقاربة للمجال الكهربائي المتولد من شحنة الكترونية عند مسافة تساوي تقريباً البعد الذري الأ نموذجي (a) أي أن [3]:

$$\frac{1}{d} \approx \frac{e}{4\pi\epsilon_0 a^2} \text{-----} (2-5)$$

نلاحظ انه بسبب التناظر فأن (d) يجب ان تساوي صفراً في المواد المتناظرة مركزياً (Centro symmetric) ، والواضح انه بسبب التناظر اذا عكست إشارة (E) فيجب ان تعكس ايضاً اشارة الاستقطاب الكلي (P<sub>T</sub>):

$$P_T = P + P^{NL} \text{-----} (2-6)$$

يتم حساب الطول الموجي للضوء الجديد بدقة بتطبيق مبدأ حفظ الطاقة اذا يجب ان تكون طاقة الفوتونات الخارجة مساوية الى تردد الفوتونات الداخلة. الشكل (1-2) يوضح عملية توليد التوافق الثاني (SHG) اذ تتم فيها مزج فوتونين ضوئيين مختلفي الطول الموجي للحصول على فوتون ثالث ذي طول موجي اقصر .



الشكل (1-2) يوضح اعتبار توليد التوافقيات الثانوية عملية لحام لفوتونين سوية لانتاج فوتون واحد ذي طاقة مساوية لطاقة الفوتونين سوية [15].

بما ان الطاقة للفوتون تساوي:-

$$E = h\omega = \frac{hc}{\lambda} \text{-----( 2-7-a)}$$

$$c = \lambda\omega \text{-----(2-7-b)}$$

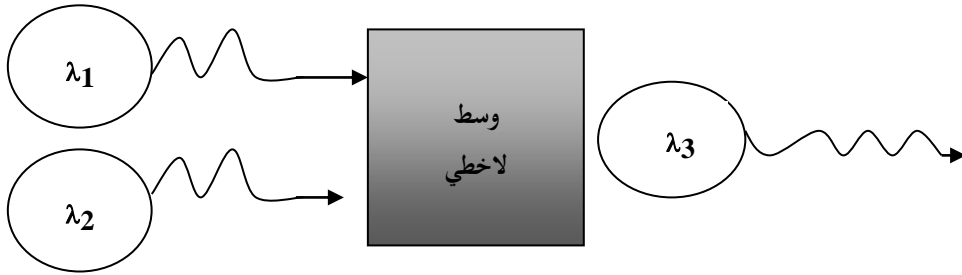
استنادا الى مبدأ حفظ الطاقة فسنحصل على:

$$\frac{hc}{\lambda_1} + \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{hc}{\lambda_3} \text{-----(2-8)}$$

وبذلك يكون لدينا:-

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \text{-----(2-9)}$$

كما موضح في شكل (2-2) وبذلك قد تطرقنا الى مطلبين من ثلاثة مطالب أساسية لحصول العملية غير الخطية وهما وجود المصدر الضوئي ذي الشدة العالية وهو الليزر ومبدأ حفظ الطاقة واما المطلب الثالث فهو مبدأ حفظ الزخم وهذا يعتمد على عملية مطابقة الطور (Phase Matching).



الشكل (2-2) عملية الجمع الضوئي تشابه عملية توليد التوافقيات الثانوية فيما عدا ان الفوتونين الداخلين طولين موجيين (طاقة) مختلفان!<sup>[15]</sup>

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

المتجه الموجي للتردد ( $\omega$ ) هو <sup>[3]</sup>:

$$K_{\omega} = \frac{\omega}{c_{\omega}} = \frac{n_{\omega}\omega}{c} \quad \text{---(2-10)}$$

إذ إن:  $c_{\omega}$  سرعة الضوء في البلورة.

$n_{\omega}$  معامل الانكسار عند التردد  $\omega$ .

$c$  سرعة الضوء في الفراغ.

والمتجه الموجي للتردد ( $2\omega$ ) هو :-

$$k_{2\omega} = \frac{2\omega}{c_{2\omega}} = \frac{2n_{2\omega}\omega}{c} \quad \text{-----(2-11)}$$

إن الأصل الفيزيائي لتوليد التوافق الثاني (SHG) يمكن ارجاعه الى العلاقة اللاخطية (2-2) في الحركة الموجية تتولد الضربات (Beats) عند حركة سلسلتين من الامواج لهما نفس السعة والتردد وفي نفس المنطقة وباتجاهين متعاكسين ومحصلة موجتين من هذا النوع بتطبيق مبداء التراكب يكون مرة ضعف التردد واخرى فرق التردد <sup>[8]</sup>. فالموجة الكهرومغناطيسية ذات التردد الأساس ( $\omega$ ) تكون ضربات (Beats) مع نفسها لانتاج استقطاب تردده ( $2\omega$ ) ولحصول هذه العملية بكفاءة هناك شرط يجب استيفائه وهو إن سرعة الطور لموجة الاستقطاب ( $2\omega/2K_{\omega}$ ) تكون مساوية لسرعة الطور للموجة الكهرومغناطيسية المتولدة ( $V_p = V_E = 2\omega/K_{2\omega}$ ). ويمكن كتابة هذا الشرط كالآتي <sup>[3]</sup>:

$$k_{2\omega} = 2k_{\omega} \quad \text{-----(2-12)}$$

إذا لم يستوف هذا الشرط فإن طور موجة الاستقطاب عند نقطة ما وعلى مسافة داخل البلورة سيختلف عن طور الموجة المتولدة وهذا

الاختلاف في الطور والمتزايد مع المسافة (1) يعني ان الموجة المتولدة سوف لا تنمو تراكمياً مع المسافة (1) نظراً لأنها لا تكون متولدة باستقطاب ذي طور ملائم (Phase-Matching) وحسب (2-11),(2-10) فان المعادلة (2-12) تختصر إلى<sup>[3]</sup>:

$$n_{2\omega} = n_{\omega} \text{-----} (2-13)$$

ولنتصور عملية (SHG) بدلالة الفوتونات ونشير أولاً الى العلاقة بين تردد الموجة الأساس ( $\omega$ ) والموجة التوافقية الثانية ( $\omega_{SH}$ ) اي ان<sup>[3]</sup> :

$$\omega_{SH} = 2\omega \text{-----} (2-14)$$

نضرب كلاً من طرفي المعادلة (2-12) و (2-14) ب  $\hbar$  نحصل على:

$$\hbar\omega_{SH} = 2\hbar\omega \text{-----} (2-15)$$

$$\hbar k_{2\omega} = 2\hbar k_{\omega} \text{-----} (2-16)$$

حيث ان ( $\hbar k$ ) يمثل زخم الفوتون.  
وحسب قانون حفظ الطاقة يجب ان يكون<sup>[3]</sup>:-

$$\frac{dI_{2\omega}}{dz} = -\frac{dI_{\omega}}{dz} \text{-----} (2-17)$$

حيث ان  $I_{\omega}$ ,  $I_{2\omega}$  تمثل شدة الموجة عند التردد  $\omega$ ,  $2\omega$  على التوالي وبتطبيق المعادلة (2-15) نحصل على :

$$\frac{dF_{2\omega}}{dz} = -\frac{2dF_{\omega}}{dz} \text{-----} (2-18)$$

وذلك ان  $F_{\omega}$ ,  $F_{2\omega}$  فيض الفوتونات لكل من الموجتين.



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

من المعادلة (2-18) في عملية (SHG) ينتج فوتون تردده  $2\omega$  كلما اختفى فوتونان ترددهما  $\omega$  والمعادلة (2-15) تعبير عن حفظ الطاقة والمعادلة (2-16) تبين ان زخم الفوتون يحفظ ايضاً في هذه العملية.

### المعالجة التحليلية Analytical Treatment

عند سقوط موجة مستوية احادية الطول الموجي ترددها  $\omega_1$  تنتشر في الاتجاه Z خلال بلورة لاختية والموجة ذات شدة عالية إذ إن شدة مجالها الكهربائي يكون بقيمة لايمكن اهمالها قياسياً الى مجال الشبكة، يصبح معامل الانكسار دالة الى شدة الشعاع الساقط. علينا ان نوضح ان الاستقطاب اللاخطي المعادلة (2-2) يشكل مصدر الموجات في المعادلات الموجية الآتية، أن الموجات ضمن المادة تخضع لمعادلات ماكسويل<sup>[3]</sup>:

$$\nabla \cdot D = \rho \text{-----( 2-19)}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \text{-----( 2-20)}$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \text{-----(2-21)}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \text{-----(2-22)}$$

حيث ان D : الازاحة الكهربائية.

ρ : كثافة الشحنة الحرة .

B : الفيض المغناطيسي.

H : المجال المغناطيسي.

j : كثافة التيار.

E : المجال الكهربائي

والمعادلات (2-19) و(2-20) و(2-21) و(2-22) هي قانون كاوس في الكهربائية وقانون كاوس في المغناطيسية وقانون امبير وقانون فراداي على التوالي قام بجمعها ماكسويل لتفسير النظرية الكهرومغناطيسية فسميت باسمه<sup>[9]</sup> ، يمكن تعريف D بالعلاقة الآتية<sup>[3]</sup>:

$$D = \epsilon_0 E + P \text{-----}(2-23)$$

حيث ان  $\epsilon_0$  يمثل السماحية الكهربائية للفراغ  
P متجه الاستقطاب يرتبط بشدة المجال الكهربائي للموجة الساقطة  
بالعلاقة الآتية<sup>[3]</sup>:

$$P = aE + bE^2 + cE^3 + \dots \text{-----}(2-24)$$

حيث إن (c,b,a) تمثل المعامل غير الخطي وحسب هذه المتواليات  
بالامكان توليد التوافقيات الاعلى (Higher Harmonic) من الحدود  
ذات المراتب العليا لكن بصورة عامة تعتبر هذه الحدود صغيرة لان  
معاملاتها (Coefficient) تتناقص بسرعة حسب العلاقة (2-24) .  
في المعادلة (2-24) تعتمد قيمة الاستقطاب (p) في العملية الخطية على  
الحد الاول حيث العلاقة بين الاستقطاب والمجال الكهربائي للموجة  
الساقطة علاقة خطية بتعويض (2-1) في (2-23) نحصل على:

$$\text{-----}(2-25)$$

$$D = \epsilon_0 E + \chi \epsilon_0 E = \epsilon E$$

حيث ان  $\epsilon = (1+\chi)$  يمثل ثابت العزل في حالة الاستقطاب  
اللاخطي .



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

بالنسبة للاوساط التي تهنا هنا نستطيع افتراض ان الممغنطة  
(Magnetization) (M) تساوي صفراً<sup>[3]</sup>.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \text{ -----(2-26)}$$

$$B = \mu_0 H \text{ -----(2-27)}$$

الخسائر ضمن المادة (خسارة التشتت) يمكن تمثيلها هنا بإدخال  
توصيلية خيالية (Fanciful ion Conductivity)  $\sigma$  ذلك ان<sup>[3]</sup> :-

$$j = \sigma E \text{ -----(2-28)}$$

واخيراً نستطيع كتابة :-

$$D = \epsilon_0 E + P + P^{NL} \text{ -----(2-29)}$$

$$D = \epsilon_0 E + X \epsilon_0 E + P^{NL}$$

$$D = \epsilon_0 E (1+X) + P^{NL} , \quad \epsilon = (1+X)$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon E + P^{NL} \text{ -----(2-30)}$$

(P) يمثل الاستقطاب الخطي للوسط الذي يؤخذ عادة بنظر  
الاعتبار بادخال ثابت العزل ( $\epsilon$ ) وعند تعريف (D) في معادلات  
ماكسويل يظهر حد الاستقطاب اللاخطي ( $P^{NL}$ ) في معادلة  
الموجة. وعند تطبيق العامل ( $\nabla \times$ ) لكل من طرفي المعادلة (2-22)  
وتبديل ترتيب المعاملات ( $\nabla \times$ ) ، ( $\delta/\delta t$ ) على الطرف الايمن من  
المعادلة (2-22) وباستعمال المعادلات (2-21,2-27,2-28,2-30)  
نحصل على :-

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu_0 \left( \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 P^{NL}}{\partial t^2} \right) \text{ -----(2-31)}$$

باستعمال المتطابقة [  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$  ] وبفرض ان ( $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ ). ومن المعادلة (2-31). نحصل على:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{P}^{NL}}{\epsilon c^2 \partial t^2} \text{----- (2-32)}$$

بما ان [  $c = (\epsilon \mu_0)^{-1/2}$  ] تمثل سرعة الطور في المادة فان معادلة (2-32) تصبح:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mu_0 \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}^{NL}}{\partial t^2} \text{----- (2-33)}$$

هي المعادلة الموجية المتضمنة حد الاستقطاب اللاخطي ( $\mathbf{P}^{NL}$ ) وحد الاستقطاب الخطي الموجود ضمناً في ثابت العزل ( $\epsilon$ ) القسم اللاخطي يعمل بمثابة حد المصدر (Source Term) للموجات التي تتولد عند ترددات جديدة. فضلاً عن انه يمثل حد الخسارة (Loss Term) للموجة القادمة. ومن معادلة الموجة<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_o \exp i(\omega t - kz) \text{----- (2-34)}$$

واخذ ممتدة الحد اللاخطي ( $\mathbf{P}^{NL}$ ) وكما يأتي:-

$$(\mathbf{P}^{NL})_i = d_{ijk} E_j E_k \text{----- (2-35)}$$

إذ إن d : ممتدة المعامل اللاخطية.

ويمكن التعامل مع الترددات اللاخطية المتولدة في الوسط اللاخطي بالعلاقات الآتية<sup>[3]</sup>:

$$E_{1i(z't')} = \frac{1}{2} \{ E_{1i(z)} \exp [i(\omega_1 t - k_{1z})] + c.c. \} \text{----- (2-36)}$$

$$E_{2k(z't')} = \frac{1}{2} \{ E_{2k(z)} \exp [i(\omega_2 t - k_{2z})] + c.c. \} \text{----- (2-37)}$$

$$E_{3j(z,t)} = \frac{1}{2} \{ E_{3j(z)} \exp [i(\omega_3 t - k_{3z})] + c.c. \} \text{----- (2-38)}$$



## بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

حيث (c.c.) المرافق المعقد و الترددات ( $\omega_1 \ll \omega_2 \ll \omega_3$ ) و ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ).

من المعادلات (2-29), (2-34) وافترض ان شدة الترددين ( $\omega_1$ ), ( $\omega_2$ ) لاتتأثر كثيراً عند مرورها خلال الوسط اللاخطي فسوف تهمل اي ( $E_{1i}/dz = dE_{2k}/dz = 0$ ) اي سوف تتغير بالصيغة العددية البسيطة الموجة المستوية تنتشر على طول اتجاه المحور (z)<sup>[3]</sup>:-

$$\frac{dE_{3j}}{dz} = -\frac{\sigma_3}{2} \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon_0}} E_{3j} - \frac{i\omega_3}{2} \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\omega\omega_0}} d_{ijk} E_{1i} E_{2k} \exp - [i(k_1 + k_2 + k_3)z] \quad (2-39)$$

وعندما يكون الوسط نفاذاً للتردد ( $\omega_3$ ) عندئذ تكون قيمة ( $\delta_3 = 0$ ) لذا يمكن كتابة المعادلة (2-34) بالشكل الآتي:

$$\frac{dE_{3j}}{dz} = -\frac{i\omega_3}{2} \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon_0}} d_{ijk} E_{1i} E_{2k} \exp - i\Delta k z \quad (2-40)$$

إذ إن ( $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$ ) بأخذ التكامل نسبة الى طول الوسط اللاخطي على المعادلة اعلاه سوف تكون سعة المجال عند التردد ( $\omega_3$ ) هو:

$$E_{3i} = -\frac{i\omega_3}{2} \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon_0}} d_{ijk} E_{1i} E_{2k} \int_0^L \exp - i\Delta k z dz \quad (2-41)$$

$$E_{3j} = \frac{\omega_3}{2} \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon_0}} d_{ijk} E_{1i} E_{2k} \left( \frac{\exp - i\Delta k L - 1}{\Delta k} \right) \quad (2-42)$$

وشدة الضوء ترتبط بشدة المجال الكهربائي بالعلاقة الآتية<sup>[3]</sup>:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E E^* \quad (2-43)$$

يمكن كتابة (2-39) كما يأتي:

$$I_{3i} = \left( \frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \right)^{1/2} \frac{\omega_3^2}{\varepsilon} d_{ijk}^2 E_{li} E_{li}^* E_{2k} E_{2k}^* \frac{(e^{-i\Delta kL} - 1)(e^{+i\Delta kL} - 1)}{(\Delta k)^2} \quad \text{--- (2-44)}$$

$$I_{3i} = \left( \frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \right)^{3/2} \frac{L^2 \omega_3^2}{2} d_{eff}^2 I_1 I_2 \left[ \frac{\sin\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)} \right] \quad \text{--- (2-45)}$$

في حالة التوافق الثاني فإن  $(\omega + \omega = 2\omega)$  عندئذ يمكن كتابة المعادلة (2-45) بالصيغة الآتية:

$$P_{2\omega} = \left( \frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \right)^{3/2} \frac{\omega^2 L^2 d_{eff}^2 (P_\omega)^2}{2A} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)} \right]^2 \quad \text{----- (2-46)}$$

المعادلة (2-42) هي الأساس التي سوف تستعمل في الفقرات التالية، ومما تجدر الإشارة إليه انه قد تم الحصول على المعادلة اعلاه بشرط ان تكون العلاقة بين  $(P^{NL})$  و  $(E)$  علاقة عددية (2-2) ان هذه الفرضية غير صحيحة والحقيقة هي انه يجب استعمال علاقة ممتدة ومع ذلك من الممكن استعمال هذه المعادلة العددية على شرط ان  $(E_{3j})$  الان يمثل مركبة المجال على طول المحور المناسب ويعوض عن  $(d)$  في المعادلة (2-2) بالمعامل الفعال  $(d_{eff})$  وعلى العموم هو مكون من معامل او اعداد من معاملات  $(dim)$  و  $(m)$  تمتد من (1) الى (6) .  
 نلاحظ بدلالة المصفوفة (Matrix) يمثل  $(dim)$  مصفوفة  $(3 \times 6)$  والرموز (1),(2),(3) هي  $(x),(y),(z)$  على التوالي . واعتماداً على تناظر البلورة فإن بعض قيم المصفوفة  $(dim)$  يمكن ان تكون متساوية وبعضاً منها يمكن ان يساوي صفراً وعلى هذا نحتاج الى تعيين معامل واحد مثلاً  $(d_{36})$  في بلورة (KDP) للمعاملات المتساوية وعلى هذا

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها.....

نستطيع كتابة الاستقطاب بالاتجاهات (Px), (Py), (Pz) كما يأتي<sup>[3]</sup>:

$$P_x = 2\varepsilon_0 d_{36} E_y E_z \text{-----} (2-47)$$

$$P_y = 2\varepsilon_0 d_{36} E_z E_x \text{-----} (2-48)$$

$$P_z = 2\varepsilon_0 d_{36} E_x E_y \text{-----} (2-49)$$

### كثافة الطاقة وكفاءة التحويل:-

#### Power Density And Conversion Efficiency

إن عمليات توليد التوافق الثاني بواسطة الموجات الضوئية الساقطة بتردد قيمته ( $\omega_1$ ) توصف بمرحلتين:<sup>[6]</sup>

##### المرحلة الاولى:

يكون لموجة الاستقطاب الناتجة في التوافق الثاني تردد قيمته ( $2\omega_1$ ) ويمكن حساب الطول الموجي وسرعة طور هذه الموجة في الوسط من خلال معامل انكسار الموجة الاساس ( $n_1$ ) وحسب العلاقة<sup>[6]</sup>:

$$\lambda_p = \frac{c}{2\omega_1 n_1} \text{-----} (2-50)$$

حيث ان (c) سرعة الضوء .

( $\lambda_p$ ) الطول الموجي للموجة الاساس .

##### المرحلة الثانية:

تنتقل الطاقة من موجة الاستقطاب الى الموجة الكهرومغناطيسية بتردد قيمته ( $2\omega_1$ ) ويمكن حساب الطول الموجي وسرعة الطور للموجة الكهرومغناطيسية المتولدة من خلال معامل انكسار موجة التوافق الثاني ( $n_2$ ) وحسب العلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$\lambda_2 = \frac{c}{2\omega_1 n_2} \text{-----(2-51)}$$

حيث إن  $\lambda_2$  الطول الموجي للتردد المضاعف ( التوافق الثاني) .  
 يصاحب هذا التفاعل كفاءة تحويل عالية نسبياً ولكي نحصل  
 على انتقال كفوء بالطاقة يجب الإبقاء على الموجتين بالطور نفسه وهذا  
 يقود الى مفهوم ضمني هو ( $n_1=n_2$ ). ان عدم تطابق الطور (Phase  
 Mismatch) بين الموجة المستقطبة والموجة الكهرومغناطيسية لحزمة  
 الشعاع عادة ما يعبر عنها بوساطة الفرق في العدد الموجي ( $\Delta k$ ) وكما  
 يأتي<sup>[6]</sup>:

$$\Delta k = \frac{4\pi}{\lambda_1} (n_1 - n_2) \text{-----(2-52)}$$

ويمكن كتابة المعادلة (2-46) بالصيغة الآتية<sup>[6]</sup> :

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \tanh^2 \left[ ik^{1/2} \left( \frac{P_\omega}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin\left(\frac{\Delta kl}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kl}{2}\right)} \right] \text{-----(2-53)}$$

وهي تعبر عن كفاءة التحويل وهي النسبة بين القدرة المتولدة من  
 توليد التوافق الثاني ( $P_{2\omega}$ ) الى القدرة الاساسية ( $P_\omega$ ). بما ان ( $k$ ) هي  
 معامل المادة ويعطى بالعلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$K = 2\eta^3 \omega_1^2 d_{eff}^2 \text{-----(2-54)}$$

حيث ان ( $\eta$ ) ممانعة الموجة المستوية وتعطى بالعلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$\eta = \left( \frac{\mu_o}{\epsilon_o \epsilon_r} \right)^{1/2} \text{-----(2-55)}$$



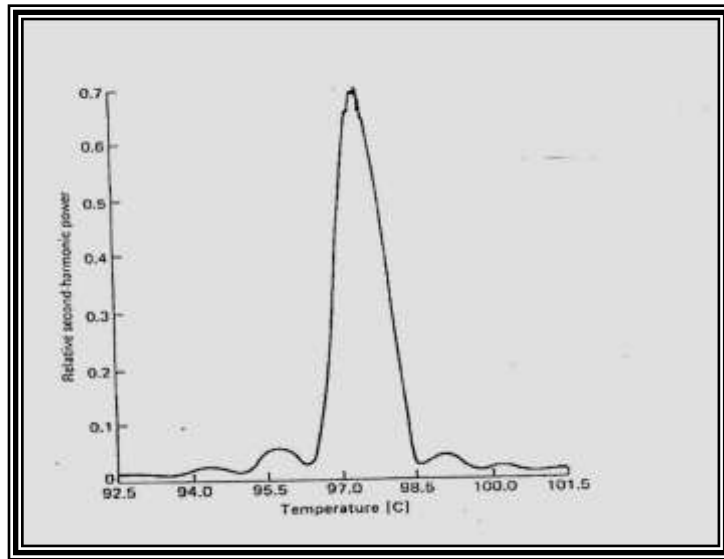


بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

المعادلة (2-53) يمكن ان تقرب الى [6]:-

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = l^2 K \left( \frac{P_{\omega}}{A} \right) \frac{\sin^2 \left( \frac{\Delta k l}{2} \right)}{\left( \frac{\Delta k l}{2} \right)^2} \text{-----(2-56)}$$

للطول الموجي المعطى والمادة اللاخطية ، (k) يعد ثابتاً لذلك  
فأن كفاءة التحويل تعتمد على طول البلورة ، وكثافة القدرة ، وعدم تطابق  
الطور . لطول بلورة ثابت فإن قدرة التوافق الثاني تعتمد على عدم تطابق  
الطور (Phase Mismatch) كما موضح في الشكل (3-2) في هذه  
الحالة فان تغير ( $\Delta k$ ) نحصل عليه بتغير درجة الحرارة [6].



الشكل (3-2) يوضح قدرة التوافق الثاني دالة لدرجة الحرارة في  
بلورة  $Ba_2 NaNb_5 O_{15}$  باستعمال ليزر (ND:YAG) [6].

القدرة التوافقية تكون بأقصى قيمة لها عندما تكون ( $\Delta k=0$ ) وهذا هو ما نعبر عنه بحرارة تطابق الطور ، وعندما ( $\Delta k$ ) تكون ثابتة فإن قدرة التوافق الثاني هي دالة للمسافة ( $l$ ) على طول نمو البلورة وتضمحل للفترة ( $\Delta k l/2$ ) نصف هذه المسافة تعطى بصيغة الطول المتشابه ( $l_c$ ) عندما تكون كثافة القدرة الساقطة وطول البلورة ثابت فإن كفاءة التحويل تتناسب مع الحد الاخير من المعادلة (2-53) وكما يأتي<sup>[6,3]</sup>:

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} \propto \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2} \text{----- (2-57)}$$

المعادلات الأساسية التي تصف (SHG) هي<sup>[3]</sup>:-

$$\frac{dE_{2\omega}}{dz} = -i \frac{\omega}{n_{2\omega} c_0} dE_{\omega}^2 \exp(i\Delta k z) \text{----- (2-58)}$$

$$\frac{dE_{\omega}}{dz} = -i \frac{\omega}{n_{\omega} c} dE_{2\omega} E_{\omega} \exp(-i\Delta k z) \text{---- (2-59)}$$

ولحل هذه المعادلات يجب تعريف متغيرين للمجال هما

( $E_{2\omega}^*$ ), ( $E_{\omega}^*$ ) كالاتي<sup>[3]</sup>:

$$E_{\omega}^* = (n_{\omega})^{1/2} E_{\omega} \text{----- (2-60)}$$

$$E_{2\omega}^* = (n_{2\omega})^{1/2} E_{2\omega} \text{----- (2-61)}$$



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

وبما ان شدة الموجة ( $I_{\omega}$ ) التي ترددها ( $\omega$ ) نفسها  $|E_{\omega}|^2$  فإن الكمية  $|E_{\omega}^*|^2$  ايضاً تتناسب مع ( $I_{\omega}$ ) وبتعويض (2-61,2-60) في (2-59,2-58) على التوالي نحصل على<sup>[3]</sup>:

$$\frac{dE_{2\omega}^*}{dz} = -\frac{i}{l_{SH}} \frac{E_{\omega}^{*2}}{E_{\omega(o)}^*} \exp[i(\Delta kz)] \text{-----} (2-62)$$

$$\frac{dE_{\omega}^*}{dz} = -\frac{i}{l_{SH}} \frac{E_{2\omega}^* E_{\omega}^2}{E_{\omega(o)}^*} \exp[-i(\Delta kz)] \text{-----} (2-63)$$

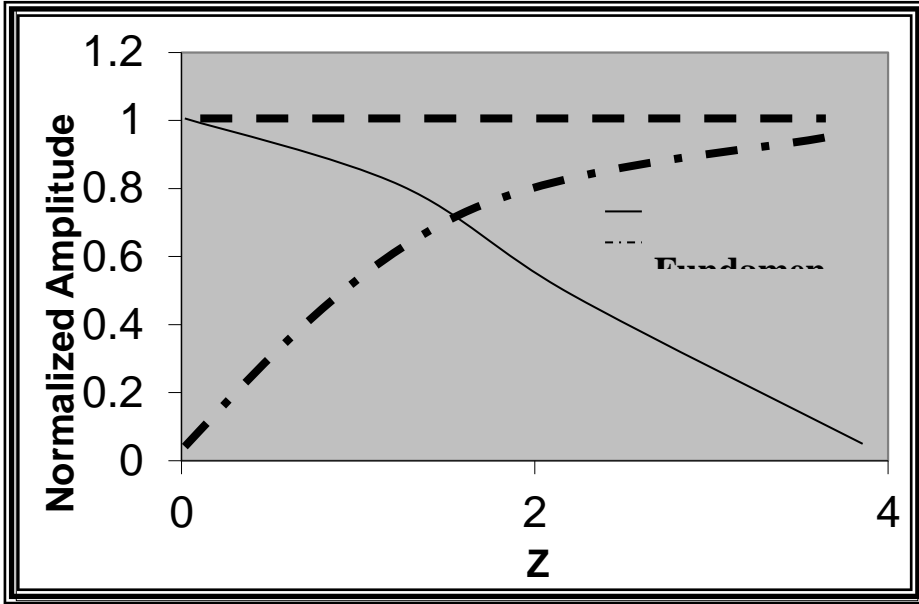
وذلك ان  $[E_{\omega}^*(0)]$  قيمة ( $E_{\omega}^*$ ) عندما ( $z=0$ ) ، ( $l_{SH}$ ) الطول المميز لتفاعل التوافق الثاني ويعطى بالعلاقة الآتية<sup>[3]</sup>:

$$l_{SH} = \frac{\lambda_o (n_{\omega} n_{2\omega})^{1/2}}{2\pi dE(o)} \text{-----} (2-64)$$

$\lambda_o$  يمثل الطول الموجي ،  $E_{\omega(0)}$  يمثل سعة المجال الساقط للموجة الاساس التي ترددها  $\omega$  .  
ومن المعادلات (2-62,2-63) نجد ان<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d|E_{2\omega}^*|^2}{dz} = -\frac{d|E_{\omega}^*|^2}{dz} \text{-----} (2-65)$$

وحسب هذه العلاقة علاقة (Manley-Rowe)<sup>[3]</sup> من الممكن في هذه الحالة الحصول على تحويل يساوي تقريبا (100%) لقدرة الحزمة الاساسية الى قدرة التوافق الثاني وفي حالة عدم وجود تطابق في الطور ملحوظ والذي نعني به ( $l_{SH}\Delta k \gg 1$ ) بحيث يتوقع حدوث تحول قليل من الموجة الاساس الى التوافقية. وحسب العلاقة (2-65) الشكل (2-4) يوضح اضمحلال الموجة الاساسية ونمو الموجة التوافقية على طول البلورة اللاخطية<sup>[43]</sup> .



الشكل (2-4) يوضح اضمحلال الموجة الاساسية ونمو الموجة التوافقية على طول البلورة اللاخطية في حالة تطابق طور تام [43].

وعلى هذا نستطيع التعويض ( $E_{\omega}^{*} = E_{\omega(0)}^{*}$ ) في الطرف الايمن من المعادلة (2-62)، ومن تكامل المعادلة الناتجة بأستعمال الشرط الحدودي ( $E_{2\omega(0)}^{*} = 0$ ) نحصل على [3]:

$$E_{2\omega}^{*}(l) = -\frac{E_{\omega}^{*}}{l_{SH}} \left[ \frac{\exp(-i\Delta kl) - 1}{\Delta k} \right] \text{----- (2-66)}$$

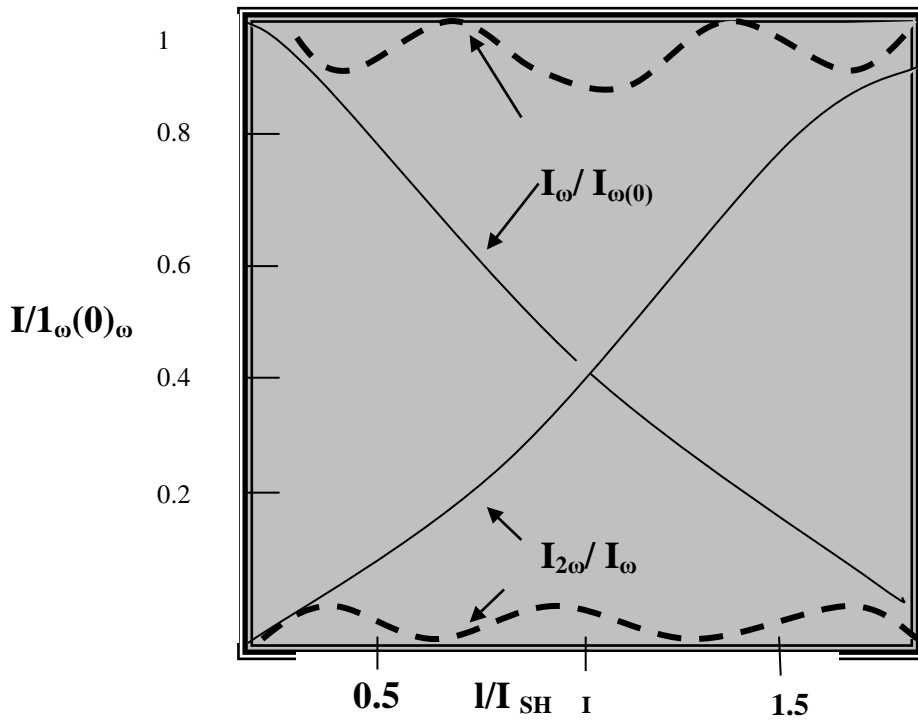
ومنها نجد ان:

$$\left| \frac{E_{2\omega}^{*}(l)}{E_{\omega(0)}^{*}} \right|^2 = \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta kl}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kl}{2}\right)^2} \text{----- (2-67)}$$

التغير في شدة (SH) يمكن الحصول عليها من المعادلة (2-67) بسهولة وذلك لان  $|E_{2\omega}^{*}|^2$  تتناسب مع شدة (SH و  $I_{2\omega}$ ) ووفقاً

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

لعلاقة (Manley Rowe) الموجودة في (2-65) يجب ان يكون التغيير في ( $I_{\omega}$ ) بحيث ان  $[I_{\omega} + I_{2\omega} = I_{\omega(0)}]$  . في الشكل (2-5) [3] نلاحظ المنحنيين المتقاطعين يوضحان العلاقة بين ( $I_{\omega}/I_{\omega(0)}$  و  $I_{2\omega}/I_{\omega}$ ) كدالة الى ( $I/I_{SH}$ ) عندما ( $I_{SH} \Delta k=0$ ) ، وبسبب عدم تطابق الطور يحدث تحول قليل فقط الى التوافق الثاني. وواضح من المعادلة (2-67) ان اول قيمة عظمى ( $I_{2\omega}/I_{\omega(0)}$ ) تحدث عندما ( $I=I_C$ ) إذ إن ( $I_C$ ) هو الطول المتشاكه.



الشكل (2-5) رسم عياري لشدة التوافق الثاني ( $I_{2\omega}$ ) والشدة الاساس ( $I_{\omega}$ ) مقابل طول البلورة ( $I$ ) في حالة مطابقة طور تام (المنحنى المتصل) وفي حالة مطابقة طور محددة (المنحنى المتقطع). [3]

### : الطول المتشاكه Coherence Length

عندما تكون  $(\Delta k)$  ثابتة فان تذبذب قدرة التوافق الثاني هي دالة لطول البلورة  $(l)$  ان المسافة التي يحافظ فيها الشعاع على تشاكهه تسمى طول التشاكه (Coherence Length). وتقاس من الوجهه الداخلي للبلورة الى النقطة التي يبلغ فيها قدرة التوافق الثاني اعظم قيمة لها وتعطى بالعلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$l_c = \frac{\Pi}{\Delta k} \text{----- (2-68)}$$

وعندما  $[\Delta k = k(2\omega) - 2k(\omega)]$  فان<sup>[6]</sup>:

$$l_c = \frac{\lambda}{4(n_2 - n_1)} \text{----- (2-69)}$$

يعبر عن عدم تطابق الطور  $(\Delta k)$  بصيغة طول التشاكه ومن المعادلتين (2-56) و(2-69) نحصل على<sup>[6]</sup>:

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = l_c K \frac{4}{\Pi} \frac{P_\omega}{A} \sin^2 \left( \frac{\Pi l}{2l_c} \right) \text{----- (2-70)}$$

سلوك التذبذب للمعادلة (2-70) يوضح في الشكل (2-6) <sup>[6]</sup> لعدة قيم من الطول المتشاكه للمعادلة المثالية ( $l_c = \infty$ ) وكفاءة التحويل للتوافق الثاني تتناسب مع مربع طول البلورة وفي تقريب الاشارة الصغيرة نحصل على<sup>[6]</sup> :-

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = l^2 K \frac{P_\omega}{A} \text{----- (2-71-a)}$$

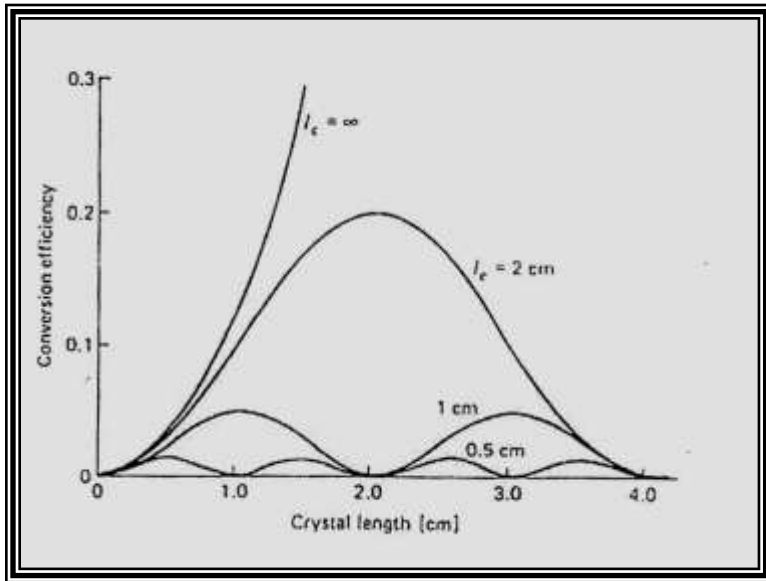
بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

وممكن الحصول على الطول المتشاكه من العلاقة (2-70) بعد

التقريب فيكون:

$$l_c = \sqrt{\frac{\Pi A P_{2\omega}}{4k P_{\omega}^2}} \text{-----(2-71-b)}$$

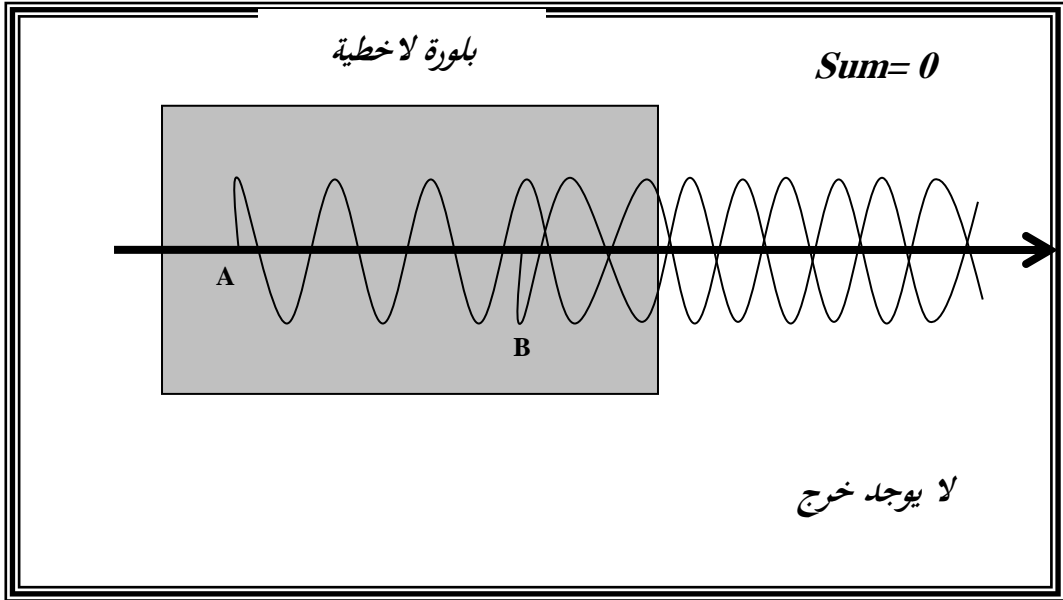
من الواضح انه اذا لم يحصل عدم تطابق الطور الكامل في البلورة ( $l_c = \infty$ ) فإن اعلى قدرة توافق ثاني نحصل عليها بأنتشار الشعاع ذي الطول المتشاكه بدون الاخذ بنظر الاعتبار طول البلورة ان تناقص القدرة التوافقية كمثال بين ( $l_c$ ) و ( $2l_c$ ) يفسر ( Reversal ) عودة جريان القدرة بدلاً من عودة او ازدواج القدرة من الموجة المستقطبة الى الموجة الكهرومغناطيسية تزوج او تعود من الموجة الكهرومغناطيسية الى الموجة المستقطبة.



الشكل (2-6) يوضح سلوك التذبذب لعدة قيم من الطول المتشاكه وتظهر كفاءة قدرة التوافقية الثانية كدالة للطول المقاس من السطح الداخلي لبلورة (CDA) [6].

### تطابق الطور Phase Matching:

لا يمكن للمعاملات في المعادلة (2-56) وهي طول البلورة، قدرة الموجة الأساسية للشعاع الضاخ، مساحة مقطع الشعاع المؤثر، ومعامل المادة ان تحدث اي تغيير اذا كان الحد الخاص بتطابق الطور مساوياً للصفر ان تطابق الطور عملية مرادفة لكل عملية غير خطية. (الشكل-7) (2) يوضح انه اذا لم تكن البلورة غير الخطية متوافقة الطور فإن الضوء المتولد في نقطة يتداخل اتلافياً مع الضوء المتولد في نقطة اخرى ان السبب في كون موجات التوافقيات الثانية مختلفة بالطور عن بعضها رغم تولدها من موجة واحدة خلال انتشارها (مرورها) داخل البلورة هو التشتت (Dispersion)<sup>[15]</sup>.

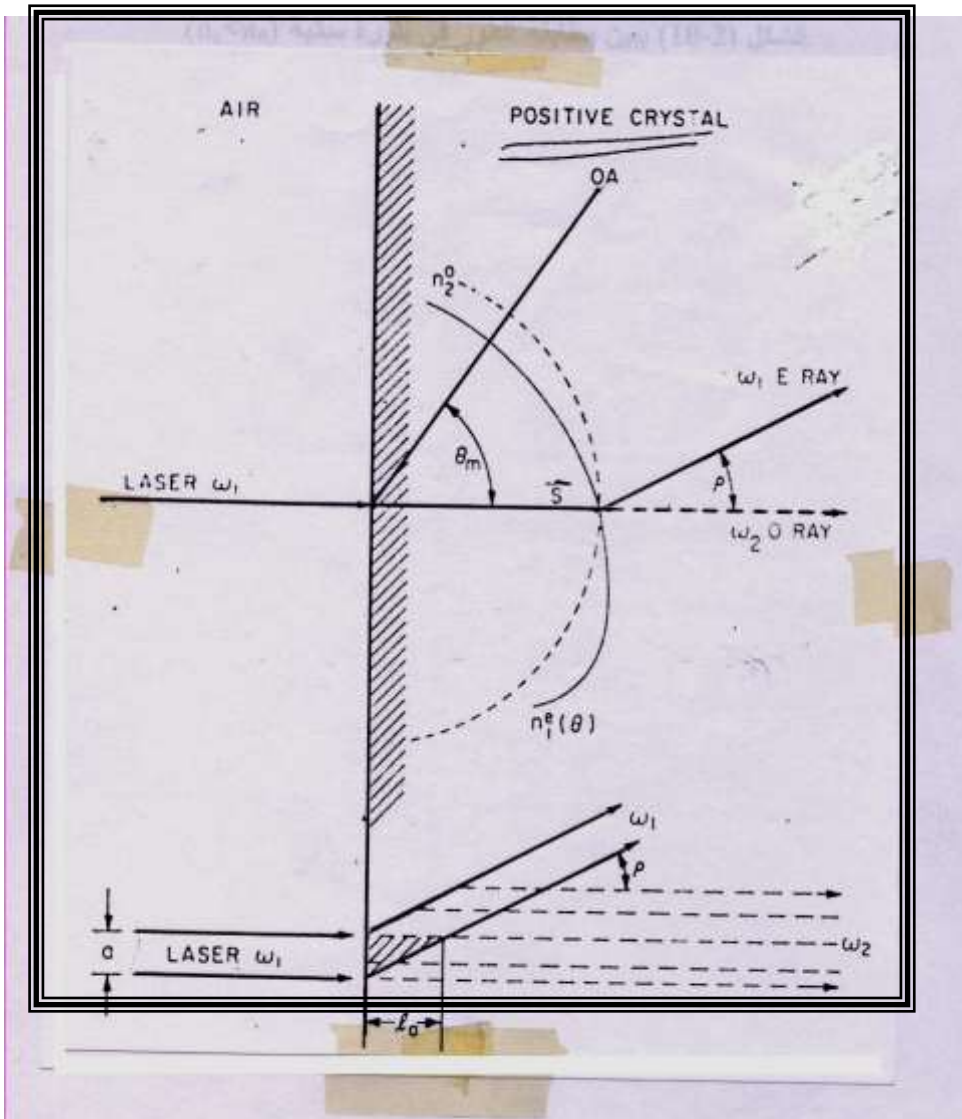


الشكل (7-2) يوضح انه اذا لم تكن البلورة غير الخطية متوافقة الطور فإن الضوء المتولد في نقطة A يتداخل اتلافياً مع الضوء المتولد في نقطة B<sup>[15]</sup>.



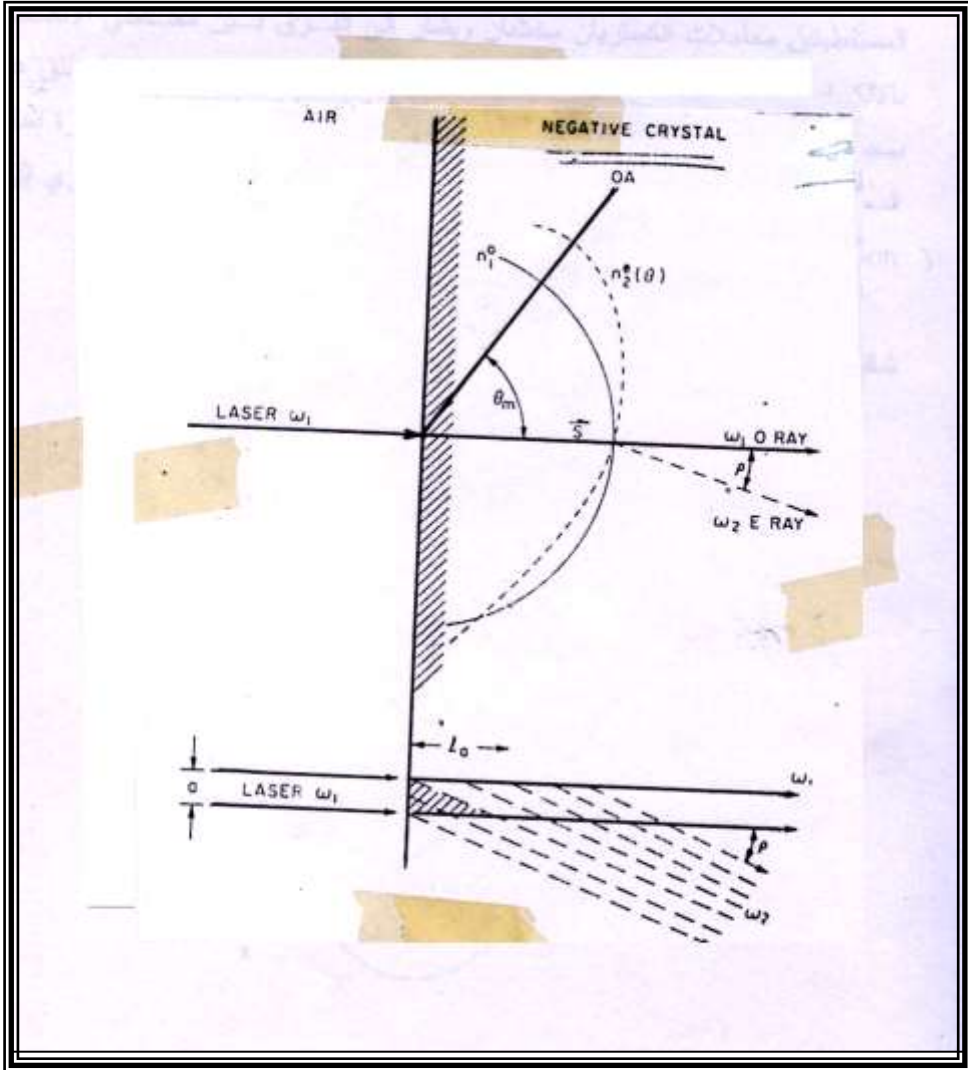
## بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

يعد التشتمت المشكلة الاساسية المسببة للاختلاف بين الموجتين الابتدائية والثانوية في داخل البلورة وفرق الطور هذا يزداد بحيث يصل الاختلاف بين الموجتين الى  $(180^0)$  وعندها تكون الموجتان مختلفتين تماماً بالطور. الشكلان (2-8) و(2-9) يبينان شرط مطابقة الطور لبلورتين احادية المحور موجبة واحادية المحور سالبة على التوالي. ان شرط مطابقة الطور المعادلة (2-13) من الممكن اثباته في بلورة لاهطية على موجتين مستويتين مستقطبتين استقطاباً خطياً باتجاه معين ويناظر هاتين الموجتين المستقطبتين معاملان انكساريان مختلفان ويشار الى الفرق بين معاملي الانكسار بالانكسار المزدوج (Birefringence) ويوصف هذا السلوك عادة بوساطة ما يطلق عليه بمجسم القطع الناقص لمعامل الانكسار (Index Ellipsoid) الذي يمثل في بلورة احادية المحور مجسم القطع الناقص الناتج عن دوران القطع الناقص حول المحور البصري (Ellipsoid of Revolution) محور (z) كما موضح في الشكل (2-10)<sup>[6,3]</sup>.

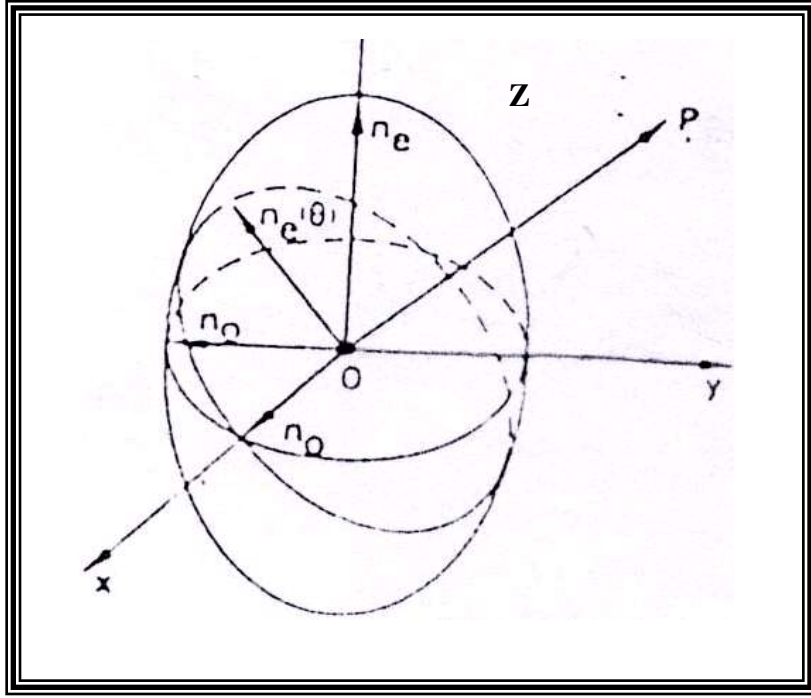


الشكل (8-2) يبين شرط مطابقة الطور في بلورة موجبة  $(n_e > n_o)$ . [44]

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....



الشكل (9-2) يبين شرط مطابقة الطور في بلورة سالبة ( $n_e < n_o$ ) [44]

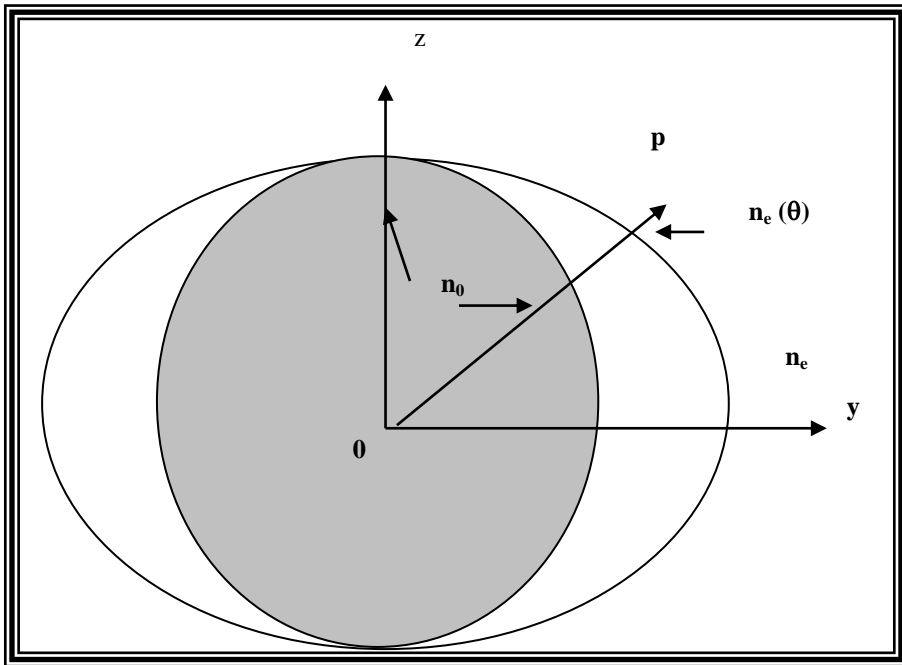


شكل (10-2) يوضح Index Ellipsoid لبلورة احادية المحور موجبة. [3]

ويمكن ايجاد اتجاه الاستقطابين المسموحين ومعامل الانكسار العائدين لها نرسم خلال مركز مجسم القطع الناقص (Ellipsoid) خطاً باتجاه انتشار الموجة (op) ومستوى عمودياً على هذا الاتجاه، ان تقاطع هذا المستوى مع مجسم القطع الناقص هو قطع ناقص ومحور القطع الناقص يكون مواز لاتجاه الاستقطاب لكل من الموجتين وطول كل محور يساوي معامل الانكسار للموجة التي اتجاه استقطابها يوازي المحور ، أحد هذين الاتجاهين يكون حتماً عمودياً على المحور البصري، والموجة التي لها هذا الاستقطاب يطلق عليها بالموجة الاعتيادية (ordinary wave) ويكون معامل انكسارها ( $n_o$ ) لايعتمد على اتجاه انتشار الموجة، اما الموجة باتجاه الاستقطاب الاخر فيطلق

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

عليها الموجة غير الاعتيادية (Extraordinary) ومعامل انكسارها  $(n_e)$ . وعندما تكون  $(n_e > n_0)$  تكون البلورة احادية المحور موجبة اما اذا كانت  $(n_0 > n_e)$  تكون البلورة احادية المحور سالبة ، ان انتشار الموجة باستعمال ما يطلق عليه سطوح معامل الانكسار (surfaces normal index) للموجة الاعتيادية وغير الاعتيادية يوضح في الشكل (11-2) لبلورة احادية المحور موجبة.



شكل (11-2) يوضح سطح معامل الانكسار لكل من الموجة الاعتيادية وغير الاعتيادية ( لبلورة احادية المحور موجبة) [3].

لاتجاه انتشار معين للموجة (op) فإن طول الشعاع (op) يمثل معامل الانكسار للموجة الاعتيادية أو غير الاعتيادية وعلى هذا فان سطح معامل الانكسار للموجة الاعتيادية عبارة عن كرة في حين ان سطح معامل الانكسار للموجة غير الاعتيادية عبارة عن سطح مجسم

وقطع ناقص ناتج عن دوران القطع الناقص حول المحور ، كما ذكرنا في شكل (2-11) . حيث يمثل تقاطع هذين السطحين مع المستوى (y-z) لحالة بلورة موجبة احادية المحور .

من الممكن الحصول على شدة عالية للتولد التوافقي الثاني من خلال تطابق طور كل من الشعاع الاساس ( $\omega$ ) والشعاع المتولد ( $2\omega$ ) باستعمال بلورات لاختية حيث يتم اختيار مسار استقطاب مختلف للشعاعين بحيث يتساوى معامل الانكسار ( $n_1=n_2$ ) عندها يحدث انسجام في الطور وتطابقهما .

استقرارية المنظومة مهمة جدا للتوافق الثاني وذلك لان القدرة الاساسية تتحول الى التوافقية وحسب كفاءة البلورة او بمعنى اخر ان القدرة متبادلة بين الاساسية والتوافقية وحسب استقرارية المنظومة ولاجل الحصول على استقرارية عالية ونتيجة لذلك شدة عالية للتوافق الثاني يجب مراعاة مايلي:

(1) توليف درجة حرارة البلورة اللاخطية وذلك بتسخين او تبريد البلورة حتى يصبح المعاملان ( المعتمدان على درجة الحرارة) متوائمين تماماً .

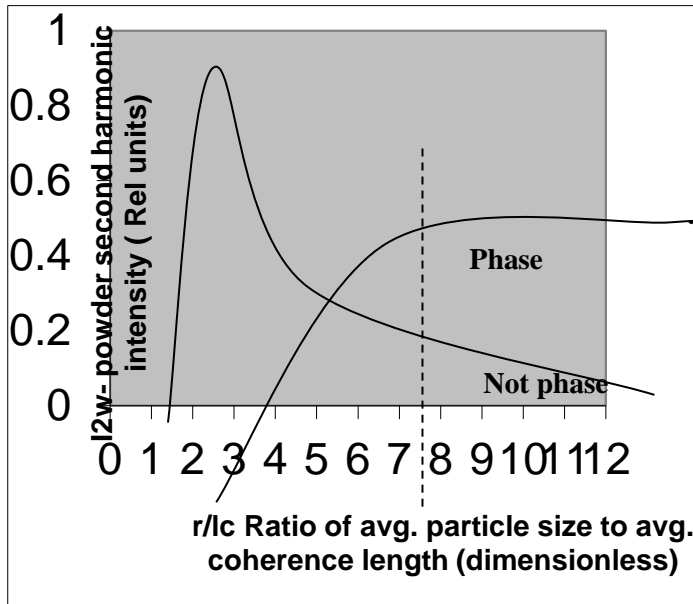
(2) توليف زاوية سقوط الشعاع على وجه البلورة اللاخطية من خلال تغيير توجيه البلورة وفقاً لمحور اشعة الليزر الساقطة .

ولان معامل الانكسار الاستثنائي ( $n_e$ ) يعتمد على زاوية انتقال الحزمة فمن الممكن توليفه بهذه الطريقة الى ان تصبح قيمته مساوية لقيمة معامل الانكسار الاعتيادي ( $n_0$ ) بهذه الطريقة يتطابق طور الشعاعين وينتج عنها شدة عالية لتوليد التوافق الثاني كما في الشكل (3-2) الأذي يوضح تغيير قدرة التوافق الثاني بتغيير درجة حرارة البلورة اللاخطية ( $Ba_2Nb_5O_{15}$ ) عند استعمال ليزر Nd: YAG .



## بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

تكون قيمة توليد التوافق الثاني في اعظم قيمة لها عندما يكون فرق الطور (صفر) اي ( $\Delta k=0$ ) ويعرف هذا بحرارة التطابق الطوري (Phase matching temperature). ومن الممكن الحصول على التوافق الطوري باستعمال الثنائية الانكسارية لالغاء تأثير التقزح في البلورة ويحصل هذا عندما يتم اختيار الزاوية بين الحزمة والمحور البصري بصورة صحيحة ويتم الحصول على اعلى كفاءة تحويل عندما تعمل زاوية التوافق الطوري ( $90^0$ ) مع المحور البصري للبلورة وهذا ممكن تحقيقه مع بعض المواد الكهرو-بصرية عند استعمال مجال كهربائي مستمر (d.c) لتشغيل البلورة بالفولتية المنحازة بها في درجة حرارة ثابتة. شكل (2-12) يوضح خرج التوافق الثاني كدالة للطول المتشاكه في بلورة (ADP) في حالة توافق الطور وبلورة (Quartz) في حالة عدم تطابق الطور.



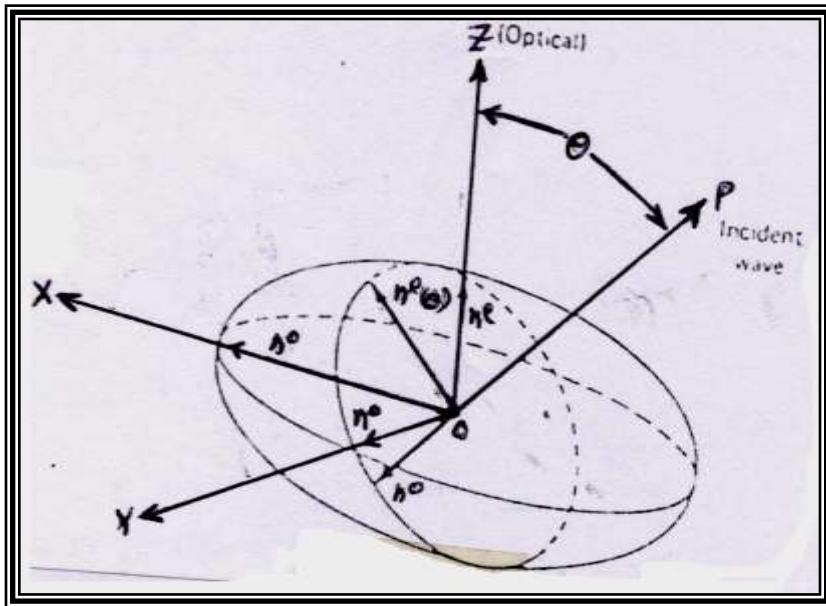
الشكل (2-12) خرج التوافق الثاني كدالة للطول المتشاكه في بلورة (ADP) في حالة تطابق الطور وبلورة (Quartz) في حالة عدم

تطابق الطور. [43]

عندما يكون انتشار الموجة باتجاه يصنع زاوية  $(\theta)$  مع المحور البصري ممكن تمثيل معامل الانكسار للموجة الاستثنائية بالعلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{[(n_o)^2 \sin^2 \theta + (n_e)^2 \cos^2 \theta]^{1/2}} \text{ -----(2-72)}$$

حيث ان  $n_o$  ,  $n_e$  معاملات الانكسار الاعتيادية وغير الاعتيادية على التوالي . كما موضح في شكل (8-2),(9-2) سابقاً إذ يوضح بلورة احادية موجبة وبلورة احادية سالبة مع زاوية (Walk-off). (الشكل -13) (2) يبين بلورة احادية المحور سالبة كوسط لاطخي والتي يمكن تمثيل معاملات انكسارها بمنحنى دوراني اهليجي مع المحور البصري.



الشكل (13-2) بلورة احادية المحور سالبة كوسط لاطخي والتي يمكن تمثيل معاملات انكسارها بمنحنى دوراني اهليجي مع المحور البصري<sup>[6]</sup>.

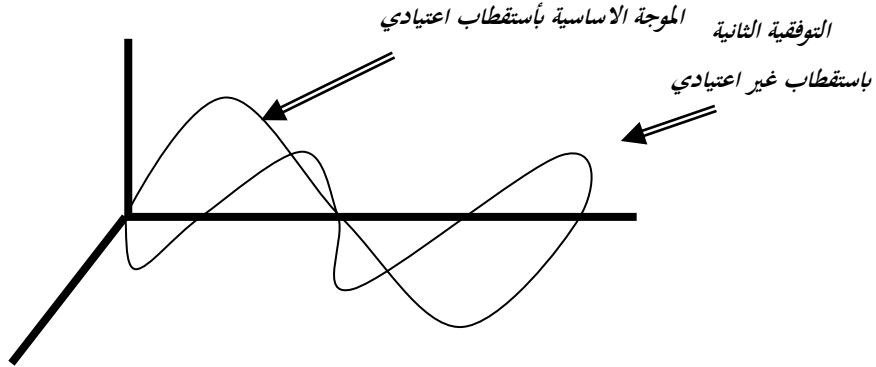


بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

## أنواع تطابق الطور :-

النوع الاول (Type I) :رمزة  $[o_{\omega}+o_{\omega}=e_{2\omega}]$

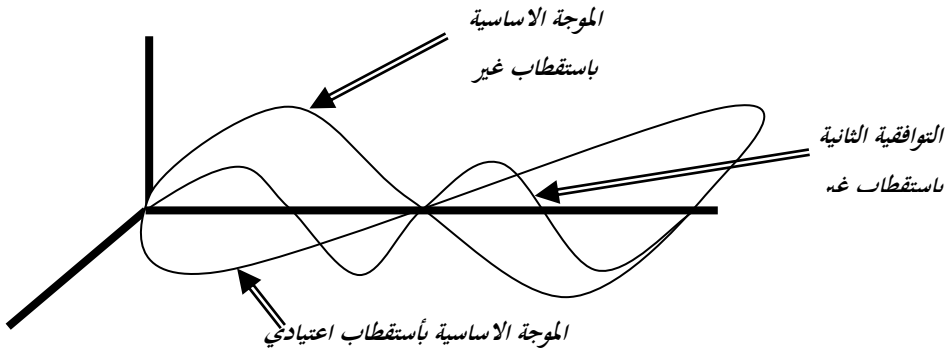
يكون الضوء الأساس عند الاستقطاب الاعتيادي للبلورة اللاخطية ويتولد التوافق الثاني عند الاستقطاب الاستثنائي كما موضح في شكل (14-2) ..



الشكل (14-2) تطابق الطور من النوع الاول [15].

النوع الثاني (Type II) :رمزة  $[o_{\omega}+e_{\omega}=e_{2\omega}]$

يكون الضوء الأساس عند الاستقطاب بين الاعتيادي والاستثنائي بصورة متساوية ويتولد التوافق الثاني في الاستقطاب الاستثنائي كما موضح في شكل (15-2) ..



الشكل (15-2) تطابق الطور من النوع الثاني [15].

## زاوية تطابق الطور Phase Matching Angle

(1) البلورات احادية المحور السالبة :

ويكون لها موضعان لتقاطع معامل السطح  $(n_e < n_o)$  [6].  
( $\Delta k=0$ )

$$n_{e2}(\theta_m) = n_{o1} \text{ ----- (2-73)}$$

$$n_{e2}(\theta_m) = \frac{1}{2} [n_{e1}(\theta_m) + n_{o1}] \text{ ----- (2-74)}$$

(2) البلورات احادية المحور الموجبة :

ويكون لها موضعان لتقاطع معامل السطح  $(n_e > n_o)$  [6].

$$n_{e1}(\theta_m) = n_{o2} \text{ ----- (2-75)}$$

$$n_{o2} = \frac{1}{2} [n_{e1}(\theta_m) + n_{o1}] \text{ ----- (2-76)}$$

حيث ان  $n_{o1}$  : معامل الانكسار الاعتيادي عند الموجة الاساسية.

$n_{e1}$  : معامل الانكسار الاستثنائي عند الموجة التوافقية الثانية.

$n_{o2}$  : معامل الانكسار الاعتيادي عند الموجة التوافقية الثانية.

$\theta_m$  : زاوية تطابق الطور.

لحساب زاوية تطابق الطور التي عندها نحصل على كفاءة تحويل

عظمى وبتعويض المعادلات (2- 73,74) في (2-72) نحصل على

زوايا تطابق بالطور ل  $\theta_m(II)$  ,  $\theta_m(I)$  على التوالي لبلورة احادية

المحور سالبة  $(n_e < n_o)$  حيث [6]:-

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

$$\sin^2 \theta_{m(I)} = \frac{(n_{o1})^{-2} - (n_{o2})^{-2}}{(n_{e2})^{-2} - (n_{o2})^{-2}} \text{-----(2-77)}$$

$$\sin^2 \theta_{m(II)} = \frac{1}{2} \left\{ n_{o1} + \left[ \frac{\cos^2 \theta_m(II)}{(n_{o1})^2} + \frac{\sin^2 \theta_m(II)}{(n_{e1})^2} \right] \right\} \text{-----(2-78)}$$

وبتعويض المعادلات (2-75,2-76) في (2-72) نحصل على  
زوايا مطابقة الطور ل  $\theta_m(I)$  ,  $\theta_m(II)$  لبلورة احادية المحور الموجبة  
( $n_e > n_o$ ) على التوالي<sup>[6]</sup>:

$$\sin^2 \theta_{m(I)} = \frac{(n_{o2})^{-2} + (n_{o1})^{-2}}{(n_{e1})^{-2} + (n_{o1})^{-2}} \text{----- (2-79)}$$

$$\sin^2 \theta_{m(II)} = \frac{\left[ \frac{n_{o1}}{(2n_{o21} - n_{o1})^2} \right] - 1}{\left( \frac{n_{o1}}{n_{e1}} \right)^2 - 1} \text{----- (2-80)}$$

**زاوية (Walk-off) :**

في حالة تطابق الطور الحرج (CPM) تتولد زاوية صغيرة بين  
اتجاه الشعاع الأساس والتوافق الثاني للبلورة وهذه الزاوية تعطى بالعلاقة  
الآتية<sup>[6]</sup>:-

$$\tan \rho = \frac{(n_{o1})^2}{2} \left[ \frac{1}{(n_{e2})^2} - \frac{1}{(n_{o2})^2} \right] \sin 2\theta_m \text{----- (2-81)}$$

الزاوية ( $\rho$ ) تسمى (Walk-off Angle) بين الشعاعين الأساس والتوافق الثاني وتكون غير مؤثرة عندما يكون قطر الشعاع بمقدار (5mm)، الشكلان (8-2) و(9-2) يوضحان موقع الزاوية ( $\rho$ ) . وتساوي صفرًا عندما زاوية تطابق الطور ( $\theta_m$ ) تساوي ( $90^\circ$ )، وتسمى أحياناً بزاوية الانتشار أو زاوية الانكسار المضاعف .

### زاوية القبول Acceptance Angle :-

يمكن حساب زاوية القبول عند منصف اعلى الشدة للتوافق الثاني (FWHM) والتي تعطى بالعلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$\Delta\theta = \frac{0.44\lambda_1 n_{o1}}{(n_{o2} - n_{e2}) \sin 2\theta_m} \text{----- (2-82)}$$

وفي حالة تطابق الطور غير الحرج (NCPM) فإن العلاقة اعلاه تصبح<sup>[6]</sup> :-

$$\Delta\theta = \left[ \frac{0.44\lambda_1}{(n_{o2} - n_{e2})} \right]^{1/2} \cdot n_{o1} \text{----- (2-83)}$$

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

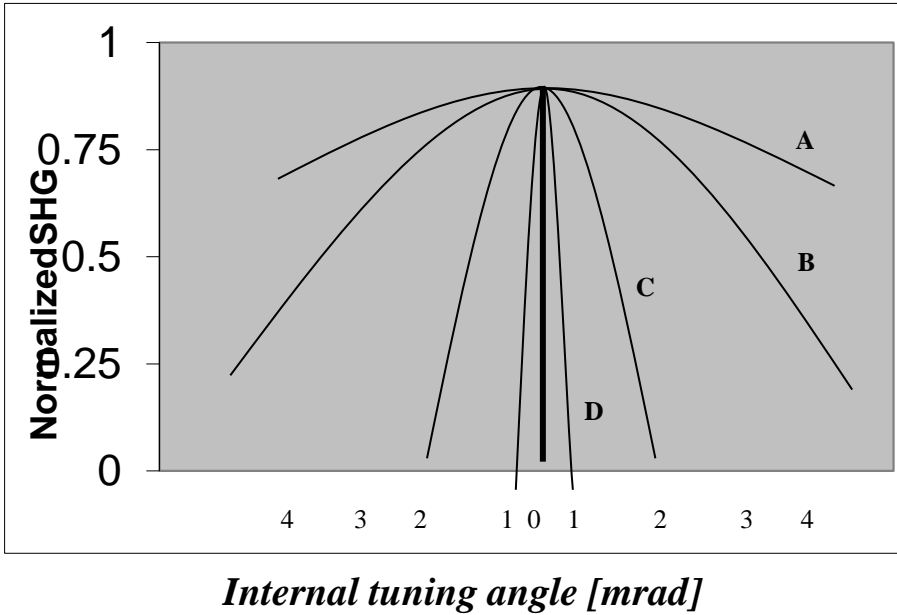
**العوامل المؤثرة في توليد التوافق الثاني :-**

**عوامل البلورة المؤثرة على توليد التوافق الثاني :-**

### Dependence Of(SHG) On Crystal Parameters

(1)زاوية تطابق الطور (phase matching angle) :

عند ثبوت درجة الحرارة يكون تأثير زاوية سقوط الشعاع مع المحور البصري للبلورة هو الاكثر تأثيراً على كفاءة التحويل حيث ان لكل بلورة زاوية سقوط معينة مع المحور البصري يتطابق فيها اتجاه الموجة الاساسية مع التوافق الثاني . الشكل (2-16) يوضح مدى التنعيم الزاوي لعدة بلورات [6].



الشكل (2-16) يوضح اعتماد توليد التوافق الثاني على زاوية تطابق الطور في بلورات لاهظية مختلفة A بلورة (CDA)، B بلورة (CD\*A)، C بلورة (RDA) D بلورة (KDP) [6].

## (2) درجة الحرارة Temperature:

تأثير درجة الحرارة يكون تأثيراً مباشراً في البلورة فارتفاع أو انخفاض درجة الحرارة يؤدي الى تغيير معاملي الانكسار وبالتالي إلى تطابق الطور غير دقيق ، معاملات انكسار البلورة عند حرارة تطابق الطور ( $T_0$ ) تمتد ضمن سلاسل تيلور للحرارة القريبة<sup>[6]</sup>.

$$n_{o1} - n_{e2} = (T - T_0) \frac{d(n_{e2} - n_{o1})}{dT} \text{ -----(2-84)}$$

حيث ان  $T_0$  = الحرارة الابتدائية .

$T$  = بعد التسخين.

كفاءة التحويل عند منتصف القمة<sup>[6]</sup> :

$$\frac{\Delta Kl}{2} = 1.39 \text{ ----(2-85)}$$

ومن المعادلتين (85- 84,2 -2) نحصل على حساسية الحرارة للمضاعفة بالبلورة بالنسبة الى توليد التوافق الثاني<sup>[6]</sup>:-

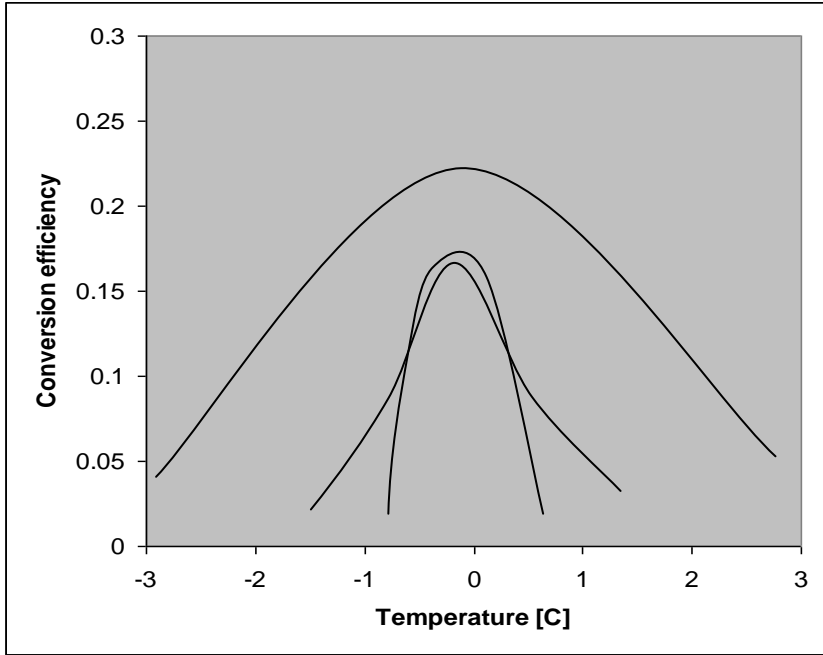
$$\Delta T = \frac{0.44 \lambda_1}{ld \frac{(n_{e2} - n_{o1})}{dT}} \text{ ----(2-86)}$$

حيث إن ( $\Delta T$ ) تمثل العرض الكامل لمنتصف القمة (FWHM) لمدى الحرارة وحيث إن توليد التوافق الثاني يكون ممكناً في البلورة المعينة شكل (2-3) . أن لكل بلورة مدى حراري معين حسب وضع البلورة ( اي زاوية سقوط الضوء مع المحور البصري) . ان التغيير الحراري للبلورة ربما ينتج من تغير درجة حرارة المحيط أو ربما بسبب



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

خسارة الامتصاص للشعاع الساقط. تجريبياً تحسب مديات التنغيم الحراري لعدة بلورات موضحة في الشكل (17-2).



الشكل (17-2) يبين منحنيات التنغيم الحراري لعدد من البلورات إذ إن A هي بلورة (CDA)، B هي بلورة (ADP)، C هي بلورة (RDA). [6]

### (3) الامتصاص Absorption :

الامتصاص في البلورة يقود الى تدرج حراري كذلك الى اجهادات حرارية محتثة. ان عدم انتظام معامل الانكسار بسبب عدد من التحديدات لحجم البلورة لمدى عدم تطابق الطور. لتسخين في البلورة اللاخطية نتيجة الامتصاص يعد مشكلة لتجارب المضاعفة التي تتطلب اشعة عالية القدرة مستمرة. التوزيع الحراري المحتث ذاتياً في المواد اللاخطية

يحدث الامتصاص للشعاع التوافقي أو الاساس. يعطى التوهين بشدة الشعاع وحسب قانون (بير لمبرت) في الامتصاص حسب

$$I=I_0EXP(-\mu x) \quad \text{الاتي}^{[4]}:$$

حيث ان ( I ) الشدة النافذة و ( $I_0$ ) الشدة الساقطة و ( $\mu$ ) معامل الامتصاص و ( $x$ ) سمك المادة أى يمكن ايجاد معامل الامتصاص من النفوذية الخارجة اذا علم كل من السمك والضياع الناتج من الانعكاس .

#### (4) التجانس البصري Optical Homogeneity:

معامل عدم التجانس في البلورات البصرية اللاخطية يكون عاملاً محدداً مهماً في توليد التوافق الثاني حيث أن شرط عدم تطابق الطور لايتحقق لمسار تفاعل الشعاع الكلي والتجانس البصري يعتمد على طريقة أنماء البلورة.

#### (5) المعامل اللاخطي Nonlinear Coefficient :

من الاعتبارات النظرية الاولية لوحظ ان البلورة التي تمتلك معاملاً خطياً عالٍ توصف لمواد مستعملة لتجارب المضاعفة. وهو عامل مهم في زيادة كفاءة التحويل كما موضح في المعادلة (2-46) إذ يعتمد على نوع البلورة وزاوية سقوط الشعاع. ان معامل اللاخطية المؤثر لبلورة (KDP) ولتطابق طور (type I) يعطى بالعلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$d_{eff} = -d_{14} \sin \theta \sin 2\phi \quad \text{-----}(2-87)$$

حيث إن:  $d_{14}$ : معامل اللاخطية الذي يعتمد على نوع المجموعة التي تنتمي اليها البلورة.

$\theta$ : زاوية السمت مع المحور x .

$\phi$ : زاوية سقوط الشعاع مع المحور z .





بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

شكل (18-2) يوضح اتجاه تطابق طور التوافق الثاني النوع

الاول في البلورة .

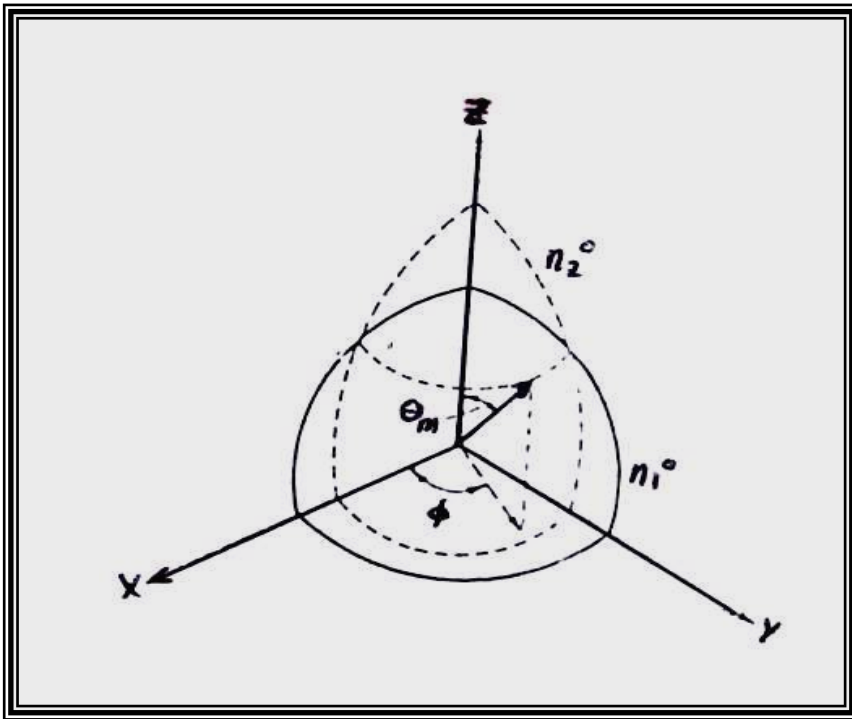
والمعادلة (2-87) تخص المجموعة (  $4\bar{2}m$  ) كما في الجدول (1-2)

الذي يبين معامل اللاخطية المؤثر ( $d_{eff}$ ) لبعض المجموعات

البلورية. وبلورة (KTP) هو<sup>[10,11,12]</sup>:

$$d_{eff}(KTP)=8.3*d_{36}(KDP)----- (2-88-a)$$

$$d_{eff}(KTP)=(d_{24}-d_{15}) \sin(2\phi)\sin(2\theta)-(d_{15}\sin^2\phi+d_{24}\cos^2\phi)\sin\theta----- (2-88-b)$$



الشكل (18-2) يوضح اتجاه تطابق طور التوافق الثاني من النوع الاول

في البلورة.

الجدول (1-2) يمثل المعاملات اللاخطية المؤثرة لبعض المجموعات البلورية [10,11,12,45]

$d_{eff}(typeII)$	$d_{eff}(typeI)$	المجموعة البلورية
$d_{22} \cos^2 \theta \sin 3\phi$	$-d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$	$\bar{6}m2$
$d_{22} \cos^2 \theta \sin 3\phi$	$d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$	$3m$
$\cos^2 \theta (d_{11} \sin 3\phi + d_{22} \cos 3\phi)$	$\cos \theta (d_{11} \cos 3\phi - d_{22} \sin 3\phi)$	$\bar{6}$
$\cos^2 \theta (d_{11} \sin 3\phi + d_{22} \cos 3\phi)$	$d_{15} \sin \theta + \cos \theta (d_{11} \cos 3\phi - d_{22} \sin 3\phi) d_{11} \cos \theta \cos 3\phi$	$3$
$d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\phi$	$d_{11} \cos \theta \cos 3\phi$	$32$
$\sin 2\theta (d_{14} \cos 2\phi - d_{15} \sin 2\phi)$	$-\sin \theta (d_{14} \sin 2\phi + d_{15} \cos 2\phi)$	$4\bar{}$
$d_{14} (\sin 2\theta \cos 2\phi)$	$-d_{14} \sin \theta \sin 2\theta$	$4\bar{2}m$
$(d_{24} - d_{15}) \sin 2\phi \sin 2\theta - (d_{15} \sin^2 \phi + d_{24} \cos^2 \phi) \sin \theta = d_{eff}(typeII)$		$mm2$

(6) طول البلورة Crystal length :-

تتناسب كفاءة التحويل مع مربع البلورة كما موضح سابقاً في شكل (6-2) والذي يبين علاقة طول البلورة اللاخطية مع كفاءة التحويل وحسب لمعادلة (2-56) . من ناحية اخرى يجب ان لا يكون الطول كبيراً جداً كي لا تبرز مشكلة عدم انتظام الوسط بصرياً واحتمالية تأثيره سالباً على كفاءة عملية التحويل.

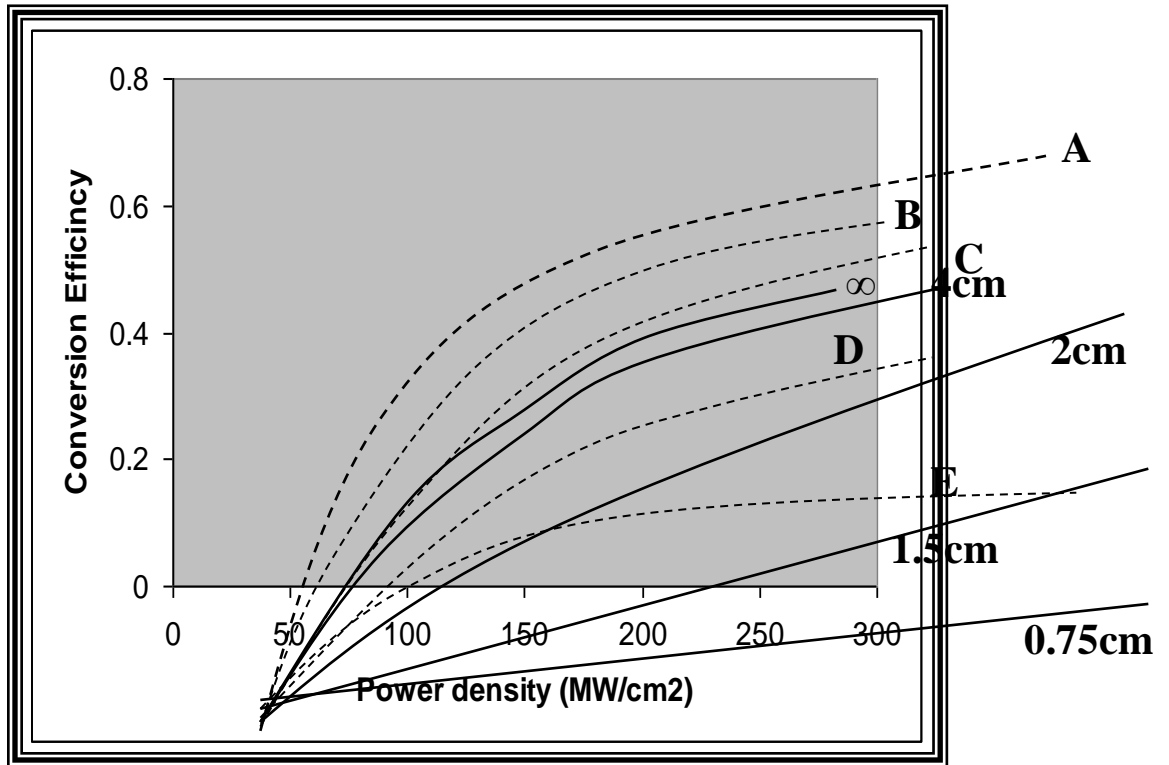
عوامل الليزر المؤثرة في كفاءة التحويل:

(1) كثافة قدرة الشعاع الليزري power density :

كفاءة التحويل تتناسب مع شدة الشعاع الأساس طردياً لكن هناك حدوداً لكل بلورة للقدرة الساقطة فعند تجاوز عتبة التلف (damage threshold) يؤدي الى تلف البلورة. اذ ان لكل بلورة حدود تلف وعندما تكون كفاءة تحويل البلورة اعلى من (20%) فإن توليد التوافق الثاني يبدأ بالانحراف عن العلاقة الخطية وذلك بسبب الاضمحلال الذي يحصل في قدرة الشعاع الليزري الأساس الذي يحصل في قدرة الشعاع الليزري

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

الأساس. الشكل (2-19) يبين العلاقة بين كفاءة التحويل وكثافة القدرة حيث يبين الخط المتقطع القيم التجريبية إلى A : ليزر (Nd:glass) مع بلورة (KDP) بطول (2.5cm) ، B : ليزر الياقوت (Rupy) مع بلورة (RDA) بطول (1.45cm) ، C : ليزر (Nd:YAG) مع بلورة (CDA) بطول (1.75cm) ، D : ليزر (Nd:YAG) مع بلورة (CD\*A) بطول (1.35cm) ، E : ليزر (Nd:YAG) مع بلورة (CDA) والخط المتصل يبين القيم النظرية لبلورة (CDA) باطوال مختلفة للبلورة وعند الضخ بليزر (Nd:YAG) ذي الطول الموجي (1064nm)<sup>[6]</sup> .



الشكل (2-19) يبين العلاقة بين كفاءة التحويل وكثافة القدرة النظرية والتجريبية وفي حالة الضخ بليزرات مختلفة لبلورات مختلفة ذات اطوال مختلفة<sup>[6]</sup> .

## (2) انفرج الشعاع Beam Divergence : -

تزداد كفاءة تحويل المواد اللاخطية في عمليات التوليد التوافقي الثاني بتحقيق عملية تطابق الطور لمتجه موجة الشعاع بالنسبة لاتجاه المحور البصري وهذا يتم من خلال تحديد انحراف الشعاع الليزري ليكون قريباً من الاتجاه الصحيح. عندما يكون تطابق الطور للتوافق الثاني خطياً (Collinear phase matched) فإن حزمة الضوء تكون صغيرة والانفرج محدوداً. إن زاوية انفرج الشعاع لليزر المار بالوسط البلوري ترتبط مع كفاءة التحويل للتوافق الثاني عندما تكون زاوية الانفرج صغيرة فإن تحقيق تطابق الطور يكون أدق وحسب العلاقة الآتية<sup>[46]</sup>:

$$L_c = \frac{\Pi}{\Delta k} = \frac{4\Pi}{k\alpha} \text{-----(2-89)}$$

حيث ان (  $\alpha$  ) يمثل انفرج الشعاع الساقط.

(  $\Pi$  ) كثافة الالكترونات (Electron Density) .

(  $k$  ) ثابت معروف بالعلاقة الآتية<sup>[46]</sup>:

$$k = \frac{\omega n_{o1}}{2c} \sin \beta \text{-----(2-90)}$$

حيث ان (  $\beta$  ) الزاوية بين العمود والمماس عند نقطة تقاطع معامل الانكسار.

## (3) عرض الخط الطيفي (Spectral line width) : -

للحصول على قدرة توافق ثاني عالية يستعمل مصدر لشعاع ليزري ذي كثافة قدرة عالية وانفرج حزمة ضيق (low divergence) وعرض خط طيفي ضيق (narrow line width) ، هذه الخصائص لليزر



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

يمكن التعبير عنها بمعدل سطوع الطيف ووحداته ( $W/cm^2$ ) . يمكن اختيار ليزرات تتميز بسطوع طيف عالٍ من خلال تحديد تذبذباتها بواسطة نمط طولي واحد عند النمط المستعرض الكاوسي. يتبين من المعلومات التجريبية ان التوافق الثاني المتولد معتمد على تركيب النمط (mode structure) لليزر . ان الانحراف (deviation) عن الاطوال الموجية المتطابقة طورياً (phase-matching wavelength) عند منتصف اعلى الشدة لكفاءة التوافق الثاني يعطى بالعلاقة الآتية<sup>[6]</sup>:

$$\Delta\lambda = \frac{0.44\lambda_1}{\left[ \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_{e2}(0)}{2\partial \lambda_2} \right]} L \quad \text{-----} \quad \text{---(2-91)}$$

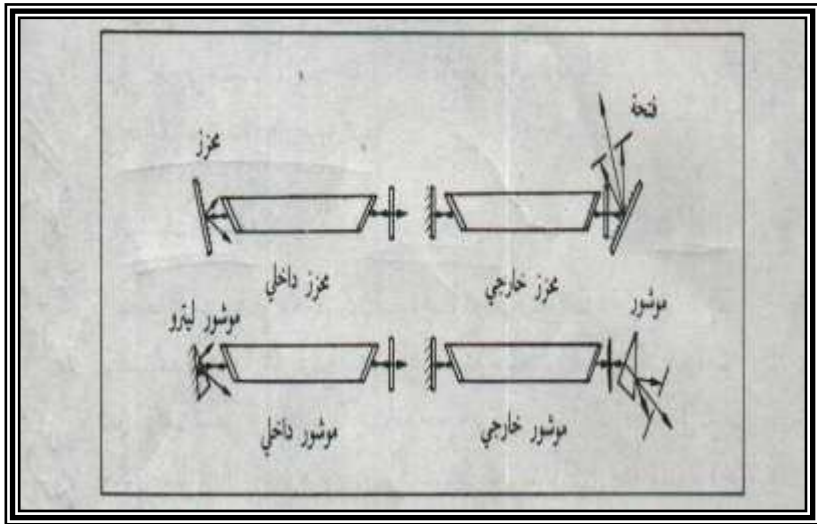
#### (4) طور النمط Phase mode :

إن استعمال شعاع ليزري ذي نمط كاوسي  $TEM_{00}$  ونمط طولي مفرد (single longitudinal mode) ، يمكننا من الحصول على كفاءة تحويل عالية للتردد التوافقي الثاني . اما الطور العشوائي للانماط الطولية (random phased longitudinal mode) فإنه يحدث انقلاباً في شدة الضوء ذي التردد التوافقي الثاني (intensity fluctuations) مما يؤدي الى تركيزه الى الخارج بقيمة مقدارها (2-1/n) حيث ان (n) هو عدد الانماط الطولية عندها سنحصل على كفاءة تحويلية قليلة.

#### طرق فصل الشعاع التوافقي عن الشعاع الأساس:-

يمكن إجراء الانتقاء للطول الموجي أما في داخل حجرة المرنان أو خارجها حيث يمكن استخدام المرشح الضوئي أو المطياف الاحادي او محززات الحيود أو المواشير أو الايتالونات المائلة لانتقاء الطول

الموجي المرغوب ونبذ الأطوال الموجية الأخرى في الحزمة الضوئية في بحثنا هذا كان الفصل بوساطة المرشح الضوئي الزجاجي والمطيف الاحادي كافي لهذا الغرض كما موضح في الجزء العملي . أما الفصل بوساطة محززة الحيود يتضمن واحد من أشكال محززة الحيود سلسلة من الأخاديد العاكسة على هيئة مثلث حيث يمكن انتقاء الأطوال الموجية الخارجة بتدوير المحززة حول محور مواز للأخاديد .وفي حالة انتقاء الطول الموجي باستعمال موشور فيقطع الموشور بحيث يسبب انحراف الأطوال الموجية المختارة عن المحور أي يتم نبذها. أما في حالة الايتالون المائل الذي يتصرف كمرشح نفاذ للتردد المنتقى عندما يميل حيث تنفذ الترددات القريبة جدا من النفوذية العظمى بينما تنبذ الترددات الأخرى بالانعكاس. الشكل(2-20)يبين انتقاء الأطوال الموجية باستعمال المحزرات والمواشير داخل وخارج حجرة المرنان لجهاز الليزر .



الشكل(٢-٢٠) يوضح طرق انتقاء الاطوال الموجية باستعمال

المحزرات والمواشير [9]

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

## الفصل الثالث

الدكتور طالب زيدان الموسوي .....





## المقدمة :-

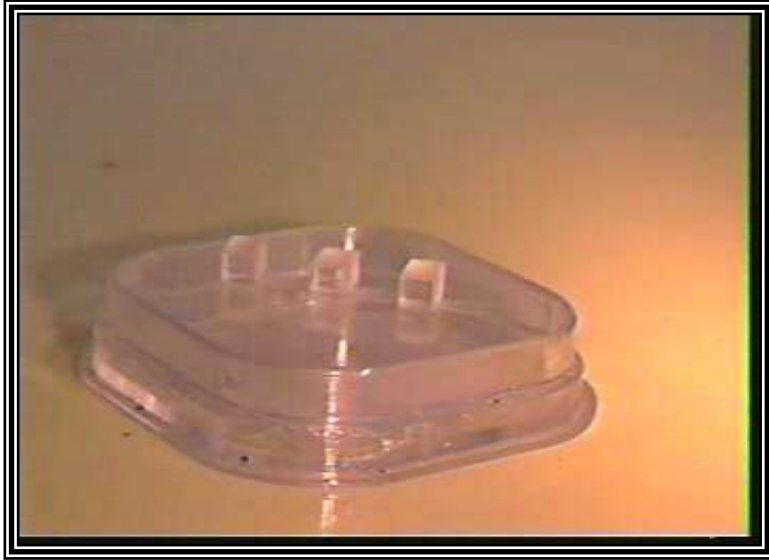
تناول الجزء العملي من هذا البحث ثلاثة محاور، المحور الأول اشتمل على بناء منظومة لتوليد التوافق الثاني بتغيير زاوية بلورة (KTP) بتدويرها حول محور شعاع الضخ والوصول إلى أفضل استقرارية للمنظومة وتغيير درجة حرارة البلورة والوصول إلى أفضل مدى حراري للتوليد التوافقي الثاني وتضمنت المنظومة الأجزاء الآتية منظومة الضخ لليزر (Nd:YAG) النبضي ذي الطول الموجي (1064nm)، وبلورة (KTP) ذات طول (5mm)، وفرن كهربائي، وكاشف ضوئي، وحامل ذو تدريج زاوي، ومرشح ضوئي زجاجي اخضر اللون، ومطياف احادي، وأجهزة لقياس الطاقة وآمد النبضه. أما المحور الثاني فقد تضمن تصميم وتصنيع فرن كهربائي خاص لرفع درجة حرارة البلورة وتصميم وتصنيع دائرة الكاشف الضوئي، المحور الثالث والأخير فتضمن طريقتين لفصل الشعاع التوافقي عن الأساس الأولى باستعمال مرشح ضوئي زجاجي والثانية باستخدام المطياف الأحادي. الشكل (3-1) يبين صورة لثلاث بلورات (KTP) ذات أبعاد (3\*3\*5)mm استعملت في التجربة العملية من هذا البحث.

### مواصفات ليزر (Nd:YAG) المستعمل في عملية ضخ بلورة (KTP)

- (1) عرض النبضة (Pulse duration) حوالي (60 $\mu$ s).
- (2) أقصى قدرة خرج (Peak power output) هي (816W).
- (3) الطاقة الخارجة هي (17-49 mJ).
- (4) يعمل بنبضات حرة.
- (5) نفاذية مرآة الخرج (54%).
- (6) الطول الموجي ( $\lambda=1064$  nm).
- (7) قيمة متسعة الشحن (C=30  $\mu$ f) و (1Kv).
- (8) الفولتية المسلطة (525-800) Volt's.

.....الدكتور طالب زيدان الموسوي

الشكل (2-3) يوضح صورة جهاز ليزر (Nd:YAG) الذي استعمل في عملية ضخ بلورة (KTP).



الشكل (1-3) يبين صورة لثلاث بلورات (KTP) ذات أبعاد  $mm$  (3\*3\*5) استعملت في التجربة العملية من هذا البحث.

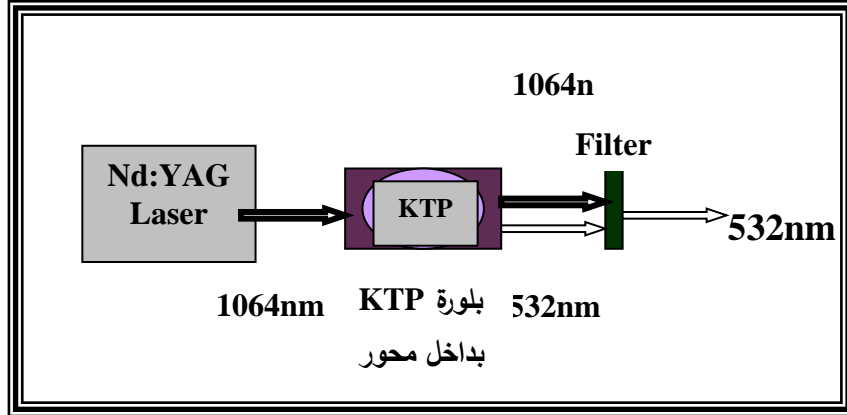


الشكل (2-3) صورة لليزر (Nd:YAG) النبضي المستعمل في عملية الضخ.

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

### توليد التوافق الثاني بتغيير زاوية بلورة (KTP):.

تم الحصول على أعلى استقرارية للمنظومة وذلك بتغيير زاوية سقوط الشعاع الأساس على بلورة (KTP) ذات طول (5mm) من خلال تدوير البلورة حول محور الشعاع الأساس بزوايا ( $0-90^0$ ) كما موضح في الشكل (3-3) .



الشكل (3-3) يبين الترتيب التجريبي لمنظومة توليد التوافق الثاني من خلال تغيير زاوية تطابق الطور .

### أجزاء منظومة توليد التوافق الثاني بتغيير زاوية بلورة (KTP):.

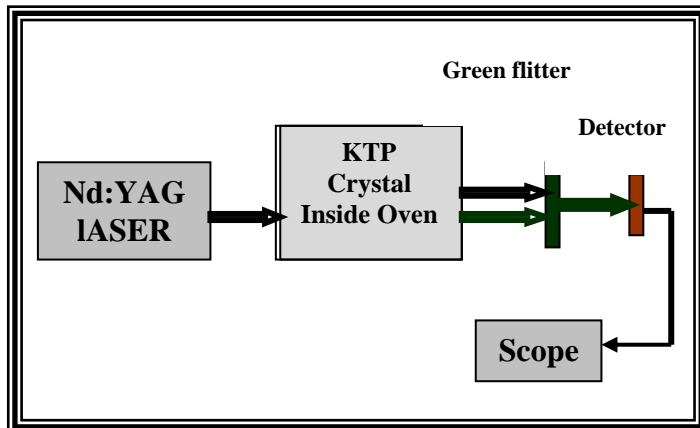
- (1) ليزر (Nd:YAG) النبضي ذو الطول الموجي (1064nm) .
- (2) بلورة (KTP) ذات أبعاد (3\*3\*5 mm) .
- (3) حامل دوار ذو تدريج زاوي ( $0^0-90^0$ ) .
- (4) مرشح ضوئي زجاجي بنفاذية (80%) للطول الموجي (532nm) ونفاذية (0.02%) للطول الموجي (1064nm) .
- (5) مطياف أحادي (Monochrometer) يمرر فقط الطول الموجي المنتخب نوع (Optometric LLC, Model No.1-04) .
- (6) كاشف ضوئي مع مضخم إشارة نوع (RS, Photodiode, No.308) .
- (7) مقياس إشارة نوع (HB, Storge Oscilloscope Model ) (1740A, 100MHz, Hewlett-Packard Comp. USA) .
- (8) مقياس طاقة نوع (GENTEC, ED, 200+) .

شكل (3-4) يوضح صورة منظومة توليد التوافق الثاني بتغيير زاوية بلورة (KTP).



الشكل (3-4) صورة منظومة توليد التوافق الثاني بتغيير زاوية سقوط الشعاع.  
**توليد التوافق الثاني بتغيير درجة حرارة البلورة :-**

تم التحقق من المدى الحراري لتوليد التوافق الثاني في بلورة (KTP) ذات طول (5mm) باستعمال ليزر (Nd:YAG) النبضي ذي الطول الموجي (1064nm) بطاقة نبضية متغيرة و في هذه التجربة تم الحصول على افضل تطابق في الطور بتغيير درجة حرارة البلورة لمدى حراري بين ( $25-80^{\circ}\text{C}$ ) كما في الشكل (3-5) .



شكل (3-5) يوضح الترتيب التجريبي لمنظومة توليد التوافق الثاني من خلال تغيير درجة حرارة البلورة داخل الفرن الكهربائي .

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

### أجزاء منظومة توليد التوافق الثاني بتغيير درجة حرارة البلورة:-

تتكون المنظومة من الأجزاء الموجودة في الفقرة ( 1-3-3 )

بالإضافة إلى الفرن الكهربائي المصنع لغرض رفع درجة حرارة البلورة والذي سيتم توضيحه لاحقا. شكل (6-3) يوضح صورة لمنظومة توليد التوافق الثاني بتغيير درجة حرارة البلورة.



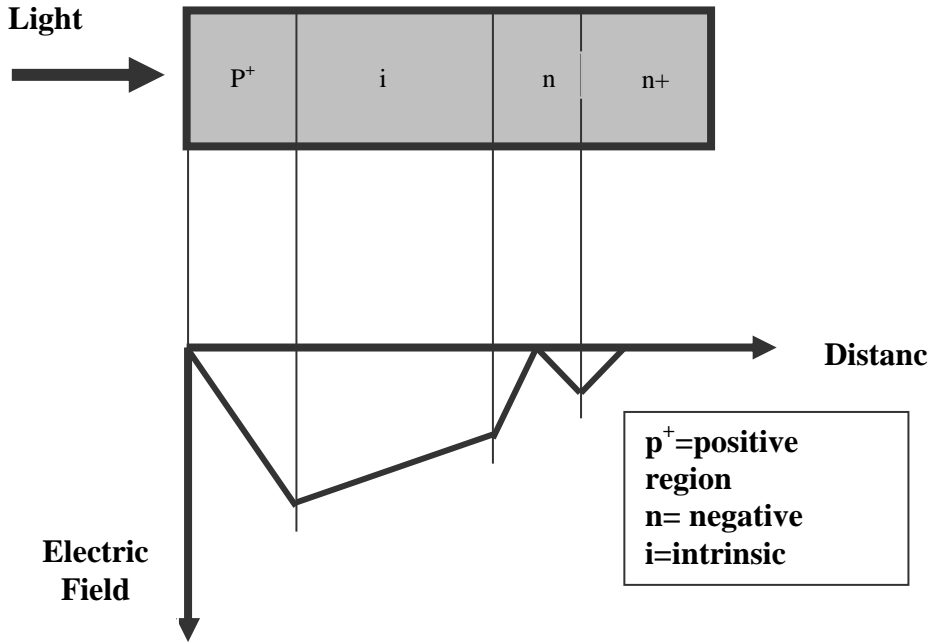
الشكل (6-3) صورة منظومة توليد التوافق الثاني من خلال تغير درجة حرارة بلورة

(KTP) داخل الفرن الكهربائي المصنع لهذا الغرض.

### تصنيع دائرة الكاشف الضوئي:-

تم تصنيع دائرة كاشف ضوئي نوع ثنائي ضوئي ذي الحشوة الوسطية ذاتية النقاوة (Positive-Intrinsic-Negative Photodiode) والتسمية مستمدة من تركيبه حيث انه يمتلك منطقة من مادة شبة موصلة ذاتية النقاوة (Intrinsic) محشوة مابين منطقتين إحداها سالبة التطعيم (N) والأخرى موجبة التطعيم (P) نوع (RS-Photodiode No.308) وهو مناسب للموجات الضوئية الأقصر طولاً ولكنه غير مناسب لاطوال

موجية أطول من ( 1100nm ) حيث إن حساسيته تكون غير جيدة بالقدر الكافي عند تجاوز ذلك الطول الموجي ومن الضروري استعمال مضخم ترانزستوري من نوع ( FET ) Field Effect Transistor ترانزوستور تأثير المجال وذلك لغرض كشف الإشارة في المنطقة المرئية من الموجة الكهرومغناطيسية، الشكل (3-7) يبين توزيع المجال الكهربائي مع تركيب ( PIN ).



الشكل (3-7) يبين توزيع المجال الكهربائي مع تركيب ( PIN ) [47].

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

### أجزاء الكاشف الضوئي:-

- (1) ثنائي ضوئي ذو حشوة وسطية ذاتية النقاوة (PIN Photodiode).
- (2) مضخم ( Amplifier ).
- (3) جهاز قدرة (Power Supply).

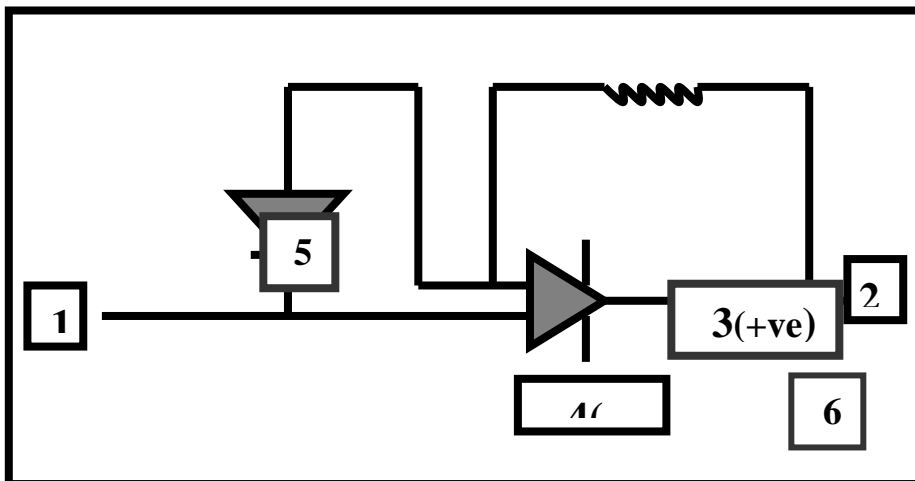
### المواصفات التقنية للكاشف الضوئي Technical Specification

- (1) أقصى استجابة طيفية (Spectral Response) له عند الطول الموجي (900 nm).
- (2) خرج مستوى الظلام ( Dark Level ) ( 20 mv ).
- (3) ممانعة الخرج (Output Impedance) عند (5kHz) و (75Ω).
- (4) الفولتية المجهزة (Supply Voltage) بحدود (±2.5 to ±18 V d.c).
- (5) معامل حرارة مستوى الظلام ( 150 μv/ 16<sup>0</sup> C ).
- (6) الاستجابة ( Responsively ) للطول (425μm) هي (30mv/μw/cm<sup>2</sup>(min)).
- (7) المساحة الحساسة ( Sensitive Area ) الفعالة ( 5mm<sup>2</sup> ).

شكل (8-3) يوضح صورة الكاشف الضوئي مع جهاز القدرة ومقياس الإشارة. أما شكل (9-3) فيوضح مخطط لدائرة الكاشف الضوئي التي تم بنائها .



شكل (8-3) صورة للكاشف مع جهاز القدرة و مقياس الإشارة.



الشكل (3-9) يوضح مخطط لدائرة الكاشف الضوئي التي تم بنائها

والدائرة مأخوذة من دوائر (RS-Photodiode no.308) .

حيث يشير كل من الأرقام الآتية الموضحة بالمخطط أعلاه إلى:

- (١) نقطة توصيل الأرضي.
- (٢) نقطة توصيل أي مقياس الإشارة.
- (٣) نقطة توصيل الموجب من المصدر المجهز للقدرة ( +12V ).
- (٤) نقطة توصيل السالب من المصدر المجهز للقدرة ( -12V ).
- (٥) ثنائي ضوئي .
- (٦) مضخم إشارة.
- (٧) مقاومة الحمل الخارجي.

**تصنيع الفرن الكهربائي والسيطرة على درجة الحرارة :-**

(1) أبعاد الفرن ( 10.5 cm \* 11.5 cm ) ويحتوي على ثقب في الأعلى بقطر (14mm) .

(2) مقياس درجة الحرارة (Thermometer) لضبط درجة حرارة البلورة

حيث يتكون مقياس درجة الحرارة من مزدوج حراري (Thermocouple)



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

نوع نيكل كروميوم ونيكل ألومنيوم متصل بمقياس رقمي ذي مدى حراري (0-300°C) وبدقة (1°C) .

(3) تم تصنيع حامل أسطواني مجوف مصنوع من مادة الألومنيوم ذي قطر داخلي (7mm) وقطر خارجي (14mm) وبطول (20mm) ، حيث دُرِجَت الواجهة الامامية الى (360°) .

(4) القدرة الكهربائية الخارجة المجهزة الى مقياس الحرارة ( 12 Voltt, 0.8Amp)

الشكل (3-10) يوضح صورة الفرن الكهربائي مع مقياس درجة الحرارة ومجهز القدرة الكهربائي.



الشكل (3-10) صورة الفرن الكهربائي مع مقياس درجة الحرارة ومجهز القدرة .

### ترصيف بلورة (KTP) للحصول على أعلى استقرارية :-

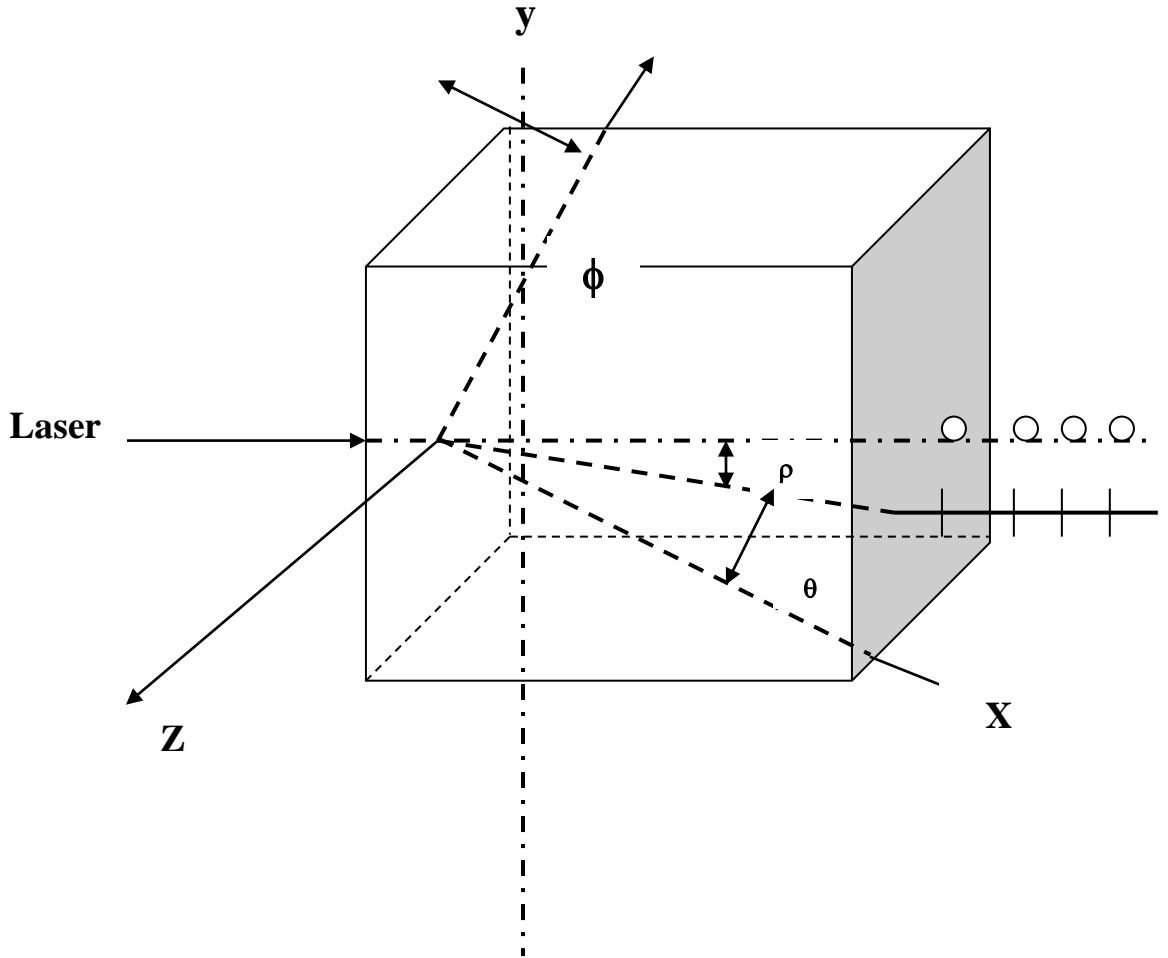
في ديناميكية توليد التوافق الثاني ولتحويل القدرة الاساسية الى القدرة التوافقية نحتاج ان تكون المنظومة في حالة استقرارية عالية وذلك من خلال العمل ضمن مدى درجات حرارة الاشتغال وترصيف البلورة

والحصول على أعلى استقرارية وبالتالي على أعلى كفاءة تحويل للتوافق الثاني (لان القدرة الداخلة تكون متنقلة بين الاساسية والتوافقية وتعتمد بذلك على الاستقرارية ) .

يتم ترصيف بلورة (KTP) باستعمال ليزر (He-Ne) بحيث يكون الشعاع الأساس باتجاه محور (z) في البلورة اللاخطية فنحصل على زاوية  $(\theta)$  والتي قيمتها  $(90^0)$  والتي هي زاوية سقوط الشعاع مع المحور (z) وزاوية  $(\varphi)$  والتي هي زاوية السميت مع محور (x) والتي قيمتها  $(23.5^0)$  ونلاحظ توليد زاوية صغيرة بين اتجاه الشعاع الأساس والتوافق الثاني للبلورة وهي زاوية (Walk-off) والشكل (3-11) يبين زوايا الأصل في بلورة (KTP) .



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....



الشكل (11-3) يبين زوايا الأصل في بلورة (KTP).

### فصل الشعاع التوافقي عن الشعاع الأساس

استعملت طريقتان لفصل الشعاع التوافقي الثاني (532 nm)

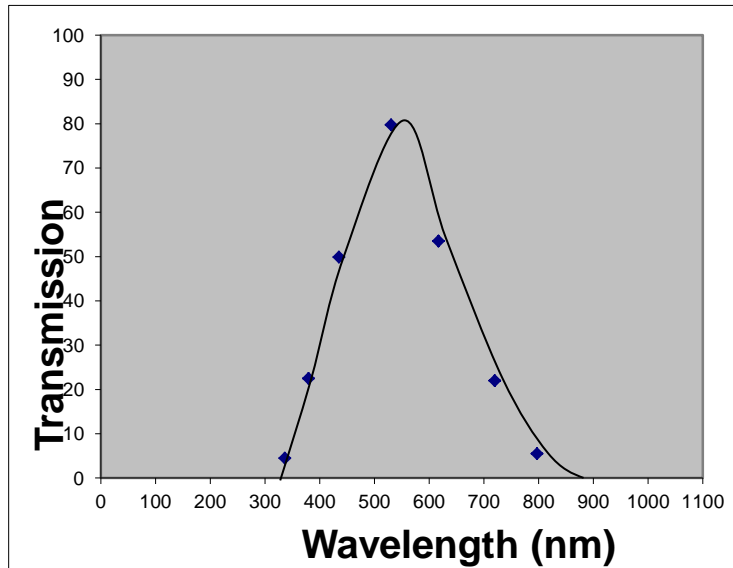
عن الشعاع الأساس (1064nm) :-

### الفصل بواسطة المرشح الضوئي (Filter)

يوضع مرشح ضوئي زجاجي اخضر (Green Filter) بعد

البلورة اللاخطية (KTP) وأمام مقياس الطاقة (J.meter) أو أمام

مقياس الكشف والمرشح هنا يقوم بأمرار الطول الموجي (532nm) بنسبة (80%) ولا يسمح بمرور الشعاع (1064nm) والمرشح ذي سمك (1mm) وقطر (5cm). الشكل (3-12) يوضح نفاذية المرشح التي تم قياسها عمليا بمقياس الطيف نوع (Cecil\* Aquarius-CE7200).



الشكل (3-12) النفاذية الطيفية للمرشح الضوئي الزجاجي المقاسة عمليا بمقياس الطيف نوع (Cecil\* Aquarius-CE7200)

### الفصل بواسطة المطياف الأحادي (Monochrometers):

استعمال محلل الأطياف (Optometric LLC, Model No.

DMC 1-04) والذي يوضح بين البلورة اللاخطية (KTP) ومقياس

الطاقة أو مقياس الكشف وينظم فقط لامرار الطول الموجي (532nm)

والمطياف الأحادي له المواصفات الآتية:

(1) الفتحة الفعالة (f3.9).

(2) الطول البؤري (74 mm).



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

(3) مساحة المحرز ( 2cm square ).

(4) عتبة الضرر ( 100W/cm<sup>2</sup>, 2J/cm<sup>2</sup> pulsed , 100 nsec ).

(5) الشقوق ( 300μ\*4mm standard ).

(6) حرارة الاشتغال ( -20 °C to +80°C ).

(7) الاستقرارية ( ± 0.02 ).

الشكل (3-13) يوضح صورة للمطياف الأحادي نوع

(Optometric LLC, Model No. DMC 1-04) المستخدم في

عملية فصل الشعاع التوافقي عن الشعاع الأساس.



الشكل (3-13) صورة المطياف الأحادي المستعمل في عملية فصل

الشعاع التوافقي عن الشعاع الأساس.



الدكتور طالب زيدان الموسوي .....

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

## الفصل الرابع

الدكتور طالب زيدان الموسوي .....





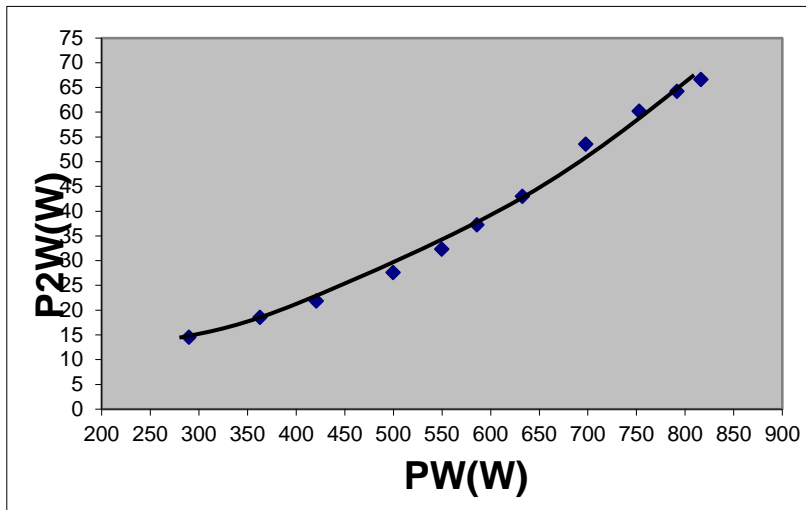
## المقدمة :-

يتضمن هذا الفصل وصف نتائج التشغيل التجريبي لمنظومة توليد التوافق الثاني التي تم بناؤها في هذا البحث والحصول على أفضل ظروف تشغيل للمنظومة. كذلك يتضمن مناقشة القياسات والنتائج العملية التي أجريت من خلال تغير درجة حرارة البلورة وتغير زاوية سقوط الشعاع ونتائج الموديل الرياضي لضخ بلورة (KTP) بطاقات متغيرة ومقارنة النتائج العملية والنظرية. وصولا الى الاسس التي تم اختيار بلورة (KTP) عليها لتوليد التوافق الثاني من ليزر (Nd:YAG) النبضي .

### قياس كفاءة تحويل بلورة (KTP) :-

تم اعداد منظومة ليزر (Nd:YAG) للضخ بطاقات متغيرة بفولتية شحن من (525V) الى (800V) والحصول على طاقات بحدود من (17mJ) الى (49mJ) على التوالي عند آمد نبضة لليزر الاساسي (1064nm) بمقدار (60 $\mu$ S) وعلية فان القدرة العظمى لاعلى فولتية شحن كانت بمقدار (816.6W) وعند وضع البلورة بعد تهيئتها حراريا وزاويا بين جهاز ليزر الضخ وبين مقياس الطاقة او مقياس الكشف واستعمال المرشح الضوئي الاخضر ذي المواصفات سابقة الذكر لامرار فقط الطول الموجي (532nm) المتولد من عملية التوافق الثاني وعند فولتية الشحن (800V) تم الحصول على طاقة توافق ثانٍ بحدود (10mJ) عند آمد نبضة (150 $\mu$ S) للطول الموجي (532nm) وعلية فان القدرة العظمى كانت بمقدار (66.6W) من هذا نجد ان أعلى كفاءة تحويل لهذه البلورة كان بنسبة (8%) الشكل (٤-١) يبين العلاقة بين القدرة الاساسية والقدرة التوافقية حيث يلاحظ ان زيادة قدرة الضخ تؤدي الى زيادة التوافق الثاني وان هذه العلاقة غير خطية وهي متوافقة مع العلاقة (2-71-a) اما الشكل (٤-٢) فيبين العلاقة بين القدرة الاساسية وكفاءة التحويل ويلاحظ ان زيادة القدرة الاساسية تؤدي الى زيادة كفاءة التحويل وهي متوافقة ايضا مع العلاقة السابقة الذكر ايضا.

الجدول (٤-١) المرفق يبين كل من فولتيات الشحن (V) و الطاقات الاساسية (E1) عند الطول الموجي (1064nm) والطاقات التوافقية الثانية (E<sub>SHG</sub>) عند الطول الموجي (532nm) والقدرات الاساسية (PW) والقدرات التوافقية (P2W) وكفاءات التحويل ( $\eta_{SHG}$ ) المرافقة لكل حالة . تم قياس الطاقات السابقة بمقياس الطاقة نوع (Gentec- model ED+200) ومقياس الاشارة نوع ( HP- model 1740A,100MHz,Storge Oscilloscope ,Hewlett-Packard . (Comp.USA

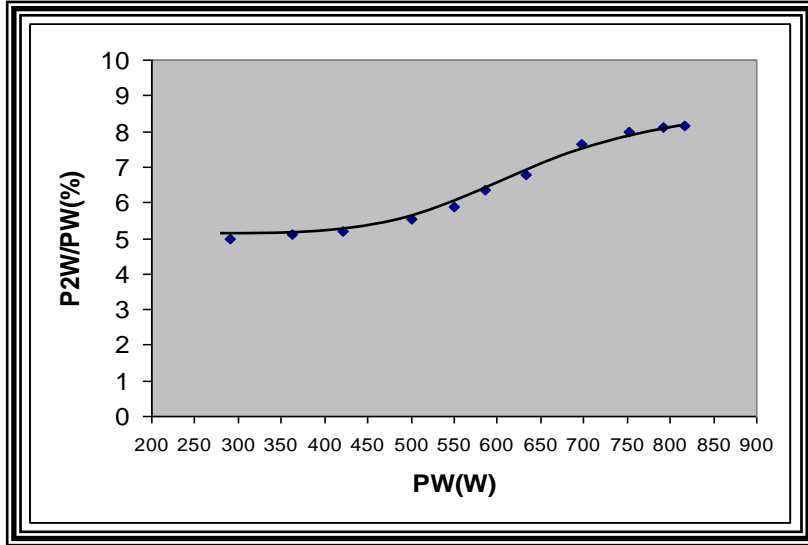


الشكل (٤-١) يبين العلاقة بين القدرة الاساسية والقدرة التوافقية الثانية

لبورة (KTP) ذات طول (5mm) وعند الضخ بقدرات متغيرة .

وكان نمط الحزمة الخارجة من النوع ( TEM<sub>00</sub> ) النمط الكاوسي كما في الشكل (٤-٣) والذي تم تصويره بكاميرا فديوية نوع ( Canon 440X ) وذات مواصفات العدسة ( 22X Zoom ) ويظهر ايضاً الطول الموجي الاخضر ( 532nm ) المتولد من عملية التوافق الثاني والصورة لاتعبر عن آمد النبضه بل هي نتيجة تفاعل الاشعاع مع مادة سطح الهدف والانعكاس منة .

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....



الشكل (٤-٢) فيبين العلاقة بين القدرة الاساسية وكفاءة التحويل لبلورة (KTP) وعند الضخ بقدرات متغيرة.



الشكل (4-3) صورة النمط الكاوسي للطول الموجي ( 532nm ) المتولد من عملية التوافق الثاني.

الجدول (٤-١) يبين كل من فولتيات الشحن (V) والطاقات الاساسية (E1) عند الطول الموجي (1064nm) وآمد نبضه (60μs) والطاقات التوافقية الثانية (E<sub>SHG</sub>) عند الطول الموجي (532nm) وآمد نبضه (150μs) والقدرات الاساسية (PW) والقدرات التوافقية (P2W) وكفاءات التحويل (η<sub>SHG</sub>).

η <sub>SHG</sub> (%)	P2W(W)	PW(W)	E <sub>SHG</sub> (mJ)	E1(mJ)	V(v)
-----	-----	-----	-----	-----	٥٠٠
-----	-----	-----	-----	١٧.٠	٥٢٥
٥	١٤.٥	٢٩.٠	٢.١٨	١٧.٤	٥٥٠
٥.١	١٨.٥	٣٦٣	٢.٧٧	٢١.٨	٥٧٥
٥.٢	٢١.٨	٤٢١	٣.٢٧	٢٥.٣	٦٠٠
٥.٥٢	٢٧.٦	٥٠٠	٤.١٤	٣٠	٦٢٥
٥.٨٧	٣٢.٣	٥٥٠	٤.٨٥	٣٣.٠	٦٥٠
٦.٣٤	٣٧.٢	٥٨٦	٥.٥٨	٣٥.٢	٦٧٥
٦.٧٩	٤٣.٠	٦٣٣	٦.٤٥	٣٨.٠	٧٠٠
٧.٦٦	٥٣.٥	٦٩٨	٨.٠٢	٤١.٩	٧٢٥
٧.٩٩	٦٠.٢	٧٥٣	٩.٠٣	٤٥.٢	٧٥٠
٨.١٠	٦٤.٢	٧٩٢	٩.٦٣	٤٧.٥	٧٧٥
٨.١٥	٦٦.٦	٨١٦.٦	١٠.٠	٤٩.٠	٨٠٠

حيث ان:

$$(PW=E1/60\mu s)$$

$$(P2W=E_{SHG}/150\mu s)$$

$$\eta_{SHG} = (P2W/PW) * 100\%$$

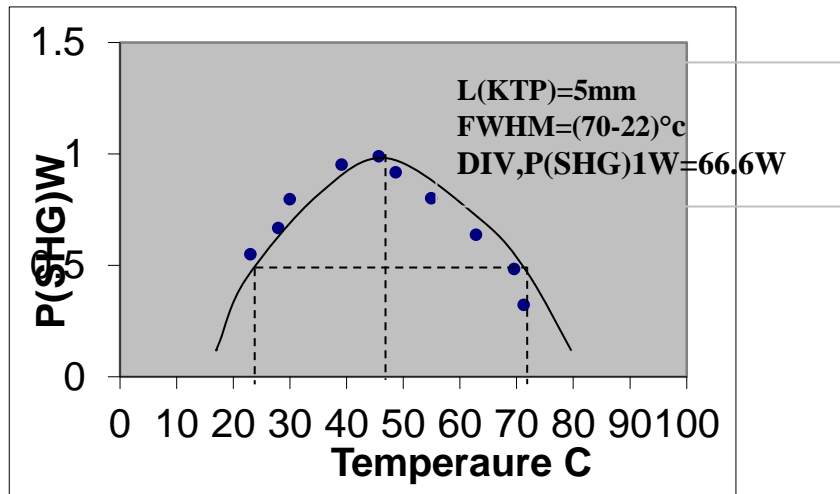


بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

### قدرة التوافق الثاني بتغيير درجة حرارة البلورة:

إن اعتماد قدرة التوافق الثاني على قدرة ليزر الضخ (Nd:YAG) النبضي لبلورة (KTP) بطول (5mm) وكذلك على درجة الحرارة الفقرة (3-4) حيث تم زيادة درجة الحرارة ( $25^0$  to  $80^0$ ) . في الشكل (4-4) تم ملاحظة ان اعظم قدرة توافق ثانٍ ناتجة تحت ظروف درجة حرارة للبلورة ( $45^0$ ) وان الاستمرار بزيادة درجة الحرارة يؤدي الى هبوط في القدرة الخارجة والسبب في ذلك يرجع الى ان زيادة درجة الحرارة تؤدي الى تغيير في معاملي الانكسار وبالتالي الى تطابق طور غير دقيق . ان العرض الكامل لنصف القمة (FWHM) لبلورة (KTP) هو بحدود ( $22-70^0C$ ) حيث بينت هذه التجربة ان لكل بلورة مدى حراري معين حسب وضع البلورة (اي زاوية سقوط الضوء مع المحور البصري) . إن التغيير الحراري يمكن ان ينتج عن :

- (1) تغيير درجة حرارة المحيط.
- (2) خسارة الامتصاص للشعاع الساقط.



شكل (4-4) يبين علاقة قدرة التوافق الثاني مع زيادة درجة الحرارة لبلورة (KTP).

### قدرة التوافق الثاني بتغيير زاوية سقوط الشعاع:

عند ثبوت درجة الحرارة يكون تأثير زاوية سقوط الشعاع مع المحور البصري للبلورة هو الاكثر تأثيراً حيث لوحظ انه لكل بلورة زاوية سقوط معينة مع المحور البصري يتطابق فيها اتجاه الموجة الاساسية مع موجة التوافق الثاني. ومن الفقرة (3-3) تم الحصول على ان افضل زاوية تكون بها المنظومة في اعلى استقرارية لتوليد التوافق الثاني كانت بمقدار  $(88^\circ)$  .

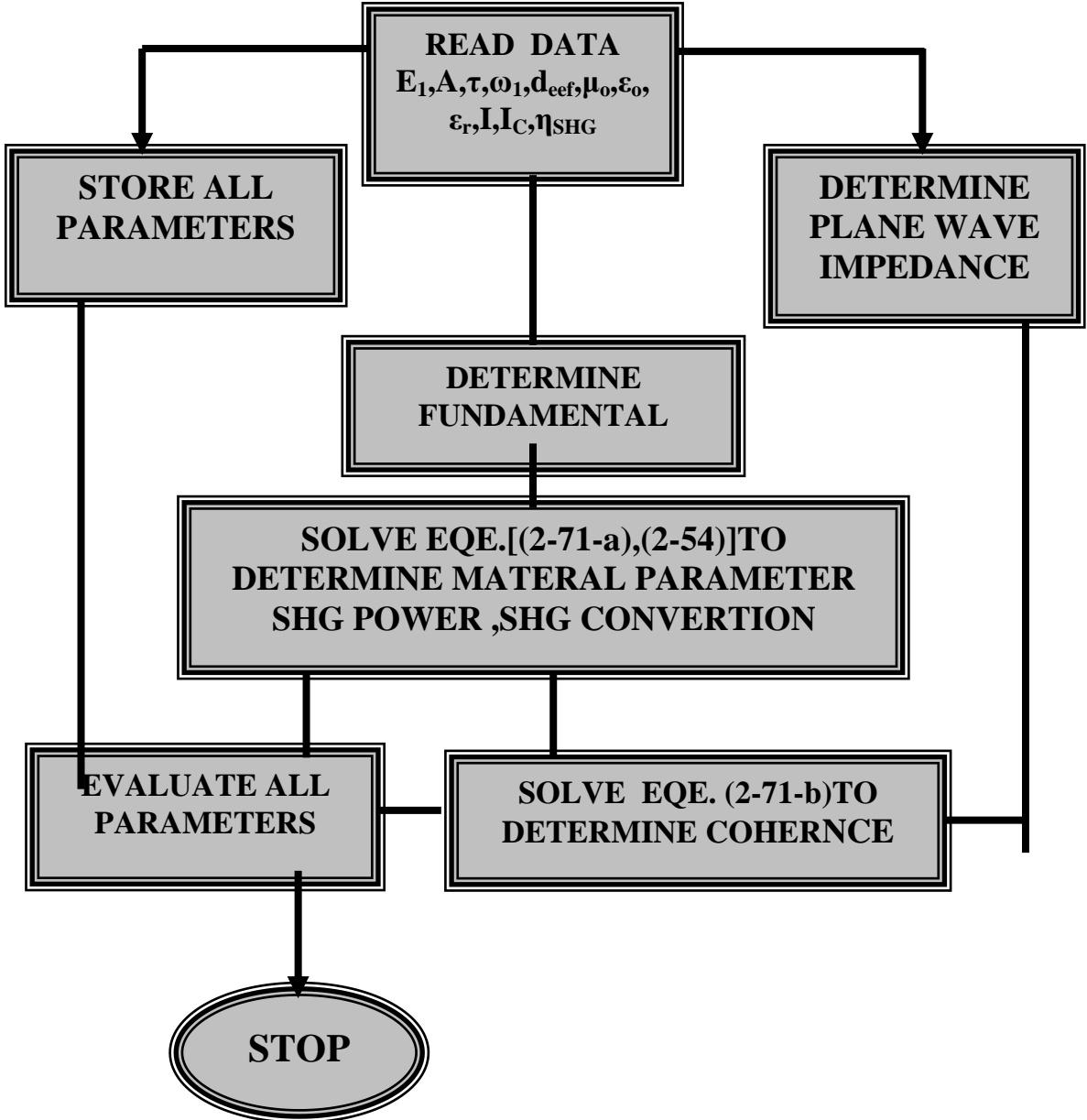
### الموديل الرياضي والبرمجة:-

تم وضع برنامج حسابي خاص لبلورة (KTP) والتي تضخ ليزر (Nd:YAG) ذي الطول الموجي  $(\lambda_1)$  الأساس (1064nm) فتم الحصول على التوافق الثاني بالطول الموجي التوافقي  $(\lambda_2)$  (532nm) ومن خلال الضخ بتغيير الطاقة الاساسية للمصدر الضاخ بطاقات متغيرة ومطابقة للطاقات المجهزة تجريبيا والحصول على قدرة التوافق الثاني وكفاءة التحويل للبلورة والطول المتشاكه ولكل حالة من الحالات السابقة .

تم حساب التردد الأساس  $(\omega_1)$  من العلاقة (2-7-b) فكان بقيمة  $(\omega_1 = 2.819 * 10^{14} \text{ sec}^{-1})$  ، كما تم حساب  $(d_{\text{eff}})$  وهو المعامل اللاخطي الفعال لبلورة (KTP) من المعادلة (2-88) حيث ان  $[d_{36} (KDP) = 0.44 \text{ pm/v}]$  فالمعامل اللاخطي الفعال لبلورة (KTP) كان  $(d_{\text{eff}} = 3.652 \text{ pm/v})$  . وتم ايضاً حساب ممانعة الموجة المستوية لبلورة (KTP) من العلاقة (2-55) فكانت  $\Omega (2.35 * 10^{-5})$  ، ومن هذه القيم تم حساب معامل مادة (KTP) (K) من العلاقة (2-54) فكان بمقدار  $(2.752 * 10^{-5} \text{ W}^{-1})$  . من العلاقة (2-71-a) تم حساب كل من قدرة التوافق الثاني  $(P_{2w})$  وكفاءة التحويل  $(P_{2w}/P_w)$  ، كما تم حساب الطول المتشاكه من العلاقة (2-71-b) بعد التقريب حيث ان (lc) كان (4.4mm). الشكل (4-5) يبين المخطط الانسيابي

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

للبرنامج الحسابي .البرنامج الحسابي تم تصميمه بواسطة ( Fortran Power Station-4) كما موضح في الملحق (٢) .



الشكل (5-4) يمثل المخطط الانسيابي لبرنامج رياضي لتوليد التوافق الثاني باستخدام ليزر (ND:YAG) النبضي لضخ بلورة (KTP) بطول (5mm).



عند ادخال نفس قدرات المصدر الضاخ في العملية التجريبية تم الحصول على القدرات التوافقية وكفاءات التحويل المبينة في الجدول (2-4) ومن مقارنة النتائج التجريبية والنظرية للقدرة التوافقية وكفاءة التحويل في الشكل (٤-٦) والشكل (4-7) نلاحظ أن زيادة القدرة المجهزة تؤدي الى زيادة قدرة التوافق الثاني وكفاءة التحويل وهذه الزيادة تكون غير خطية وفي العمليتين التجريبية والنظرية والفرق الظاهر في الحسابات النظرية عن العملية التجريبية هو ناتج من عمليات التوهين والضياح في القدرة المجهزة نتيجة الضخ خارج الحاوية الليزرية وخسائر الامتصاص والانعكاس وعمليات التشتت التي تحصل للشعاع داخل البلورة وتأثير كل من درجة الحرارة والرطوبة النسبية للجو لكون العملية هي ضخ طولي وخارج حاوية الليزر.

**الجدول (2-4) يبين الحسابات النظرية التي تم الحصول عليها من**

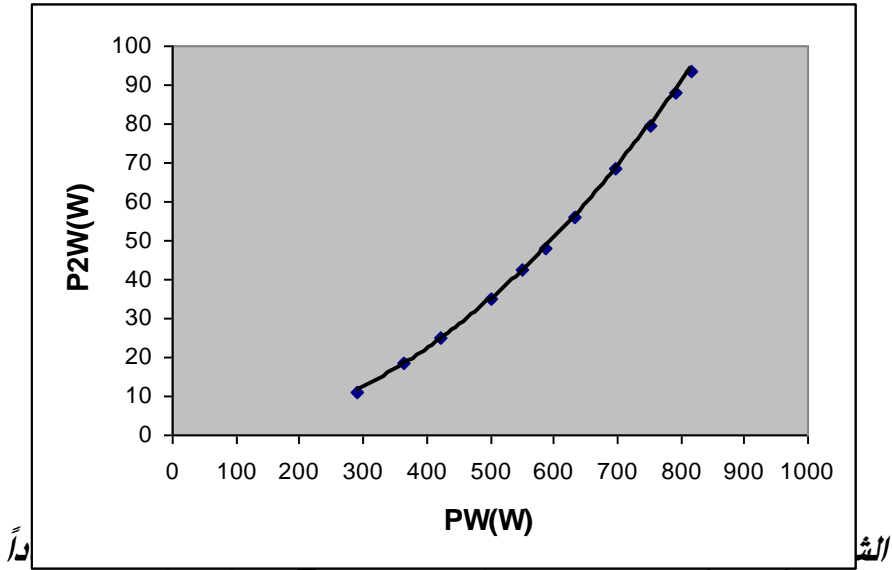
**الموديل الرياضي**

**وعند الضخ بنفس القدرات التجريبية المجهزة من الليزر الضاخ.**

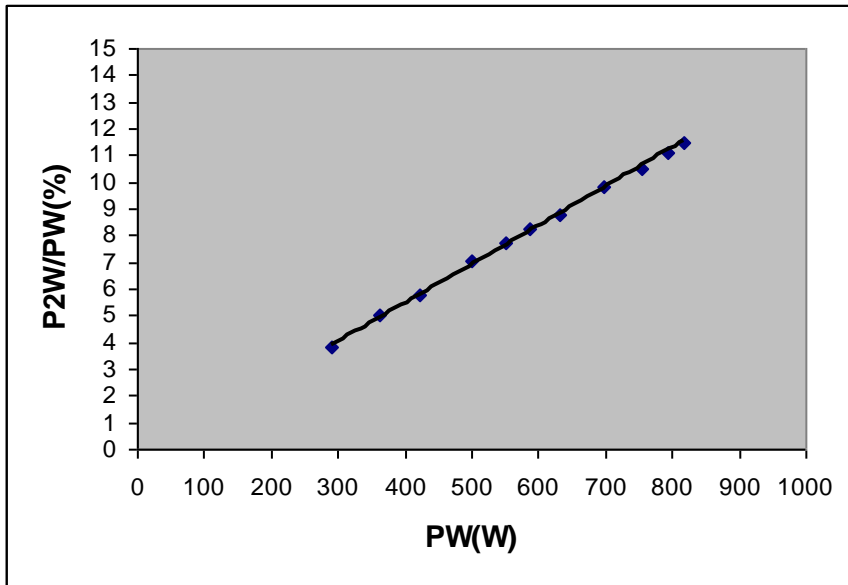
$PW(W)$	$P2W(W)$	$\eta_{SHG}$
290	11	3.79
363	18.5	5
421	24.8	5.8
500	35.1	7.02
550	42.4	7.7
586	48.2	8.22
633	56.2	8.8
698	68.4	9.79
753	79.6	10.5
792	88	11.11
816.6	93.6	11.4



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....



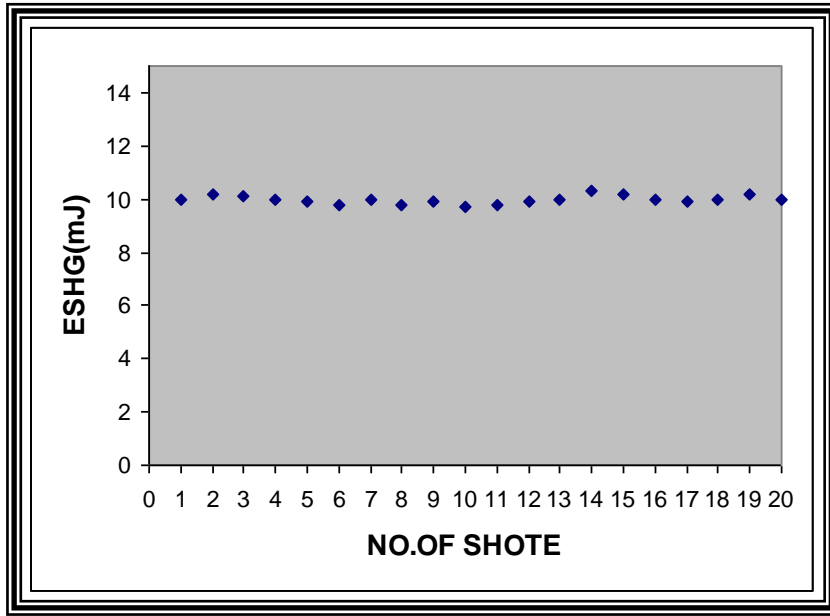
على الحسابات النظرية.



الشكل (٧-٤) يبين علاقة القدرة الاساسية مع كفاءة التحويل اعتماداً على الحسابات النظرية.

## استقرارية المنظومة:-

لغرض دراسة وفحص استقرارية المنظومة والتأكد من ادائها تم توليد (20) نبضة ليزر متتالية عند طاقة (SHG) بمعدل (10mJ) وقياس طاقة الخرج الليزري في كل عملية ضخ بقياس الطاقة ذي المواصفات سابقة الذكر كما موضح في شكل (4-8) حيث يلاحظ استقرارية عالية لاداء المنظومة والتغير الطفيف في الطاقة الخارجة الذي لايتجاوز ( $\pm 2\%$ ) الناتج من التغير البسيط في عدم ثبات درجة حرارة البلورة والرطوبة النسبية وتذبذب فولتية المصدر الخارجي.



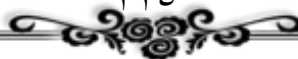
الشكل (4-8) يوضح مدى استقرارية المنظومة.

اسس اختيار بلورة (KTP) لتوليد التوافق الثاني من ليزر (Nd:YAG) النبضي :

(1) رخص الثمن نسبة الى استخداماتها ومقارنة مع (LBO) و(BBO) مع الاخذ بنظر الاعتبار حسابات الكفاءة والكلفة.

بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

- (2) تمتلك معامل لاختي عالٍ للطول الموجي (1064nm) اكبر (1.5) مرة من بلورة (BBO) و (10) مرات اكبر من بلورة (KDP).
- (3) كفاءة في المنطقة (المرئية، تحت الحمراء المتوسطة).
- (4) عتبة تلف عالية بمقدار ( 1GW/cm ) عند ( 1Hz,10ns ) عند الليزر النبضي
- ( Nd:YAG ) ذي الطول الموجي ( 1064nm ).
- (5) زاوية قبول كبيرة.
- (6) مدى حراري واسع.
- (7) زاوية (Walk-off) صغيرة.
- (8) كفاءة تحويل عالية قد تصل الى (80%) .
- (9) تعمل في درجة حرارة الغرفة.
- (10) مستقرة كيميائياً وميكانيكياً.
- (11) توصيل حراري عالٍ مرتين اكبر من ( BNN ).



الدكتور طالب زيدان الموسوي .....



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

# الختاتمة



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

### الخاتمة :

ان أهم الأستنتاجات التي تم التوصل إليها في هذا الكتاب والتوصيات بالأعمال التي من الممكن أن تتسع في المستقبل لغرض تطوير منظومة توليد التوافق الثاني وتحسين أدائها.

### الاستنتاجات :-

- (1) تم الحصول على كفاءة تحول بنسبة (8%) لبلورة (KTP) بطول (5mm) وعند اقصى قدرة ضخ والتي كانت بمقدار (816W) من ليزر (Nd:YAG) النبضي والذي يعمل بنبضات حرة .
- (2) تبين من التجربة العملية ان زيادة درجة الحرارة تزداد معها قدرة التوافق الثاني وصولا الى القمة في (T=45°C) وبعد هذه القيمة فان منحنى القدرة يبدأ بالنزول وان العرض الكامل لنصف القمة (FWHM) كان بحدود (22-70)°C والسبب الرئيسي في ذلك يعود الى ان معاملات الانكسار سوف تتغير بشكل يؤثر سلبا على عملية التوافق الثاني وكفاءة التحويل .
- (3) تم الحصول على أفضل استقرارية للمنظومة بتدوير بلورة (KTP) حول محور الشعاع الضاخ بزاوية مقدارها (88°) .
- (4) من ملاحظة نتائج الموديل الرياضي استنتجنا ما يأتي:
  - (a) تزداد قدرة التوافقية الثانية بزيادة قدرة الضخ الاساسية وان هذه الزيادة تكون غير خطية وهي منسجمة مع النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من التجربة العملية.
  - (b) تزداد كفاءة التحويل بزيادة قدرة الضخ الاساسية وان هذه الزيادة غير خطية وهي منسجمة ايضا مع النتائج التجريبية.

- (e) تم الحصول على الطول المتشاكه وكان بمقدار  $(L_c=4.4\text{mm})$  لبلورة (KTP) موضوع الدرس ويلاحظ انه كلما تزداد قدر التوافقية الثانية وتقل القدرة الاساسية يزداد الطول المتشاكه.
- (5) تم الحصول على استقرارية عالية للمنظومة لعدد من النبضات حيث تبين هناك تغير قليل في الطاقة الخارجة لا يتجاوز ( $\pm 2\%$ ) وهو ناتج من الترصيف والتصميم الجيد للمنظومة .

### التوصيات والعمل المستقبلي :-

- (1) من الممكن الضخ بليزر (Nd:YAG) بطاقات اعلى واطول مختلفة لبلورة (KTP) لدراسة خصائص هذه البلورة .
- (2) لغرض زيادة كفاءة التحويل لبلورة (KTP) استعمال ليزر مثبت النمط ذي طاقة عالية وضخ البلورة بداخل الحجرة.
- (3) ممكن اضافة بلورة ثانية للحصول على توليد التوافق الثالث (THG) من ليزر (Nd:YAG) والحصول على الطول الموجي ( $354\text{nm}$ ) من الاشعة فوق البنفسجية (uv) بمرحلتين او بمرحلة واحدة من بلورة اخرى .
- (4) ممكن الضخ بليزرات اخرى للحصول على اطوال موجية اخرى جديدة مختلفة عن الليزرات القياسية.
- (5) للحصول على منظومة مستقرة لتوليد التوافق الثاني من الافضل السيطرة على درجة حرارة البلورة بوضع البلورة بداخل فرن كهربائي مسيطر على درجة الحرارة بواسطة ثرموستات وحسب درجة حرارة اشتغال البلورة المثالية لتوليد التوافق الثاني.





بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

(6) ممكن الضخ بليزرات اشباه الموصلات للحصول على اطوال موجية مؤلفة الطول الموجي ومتغيرة الطاقة .

(7) ممكن اضافة عامل الاستقرارية الى البرنامج الحسابي في دراسات لاحقة لأهميته بالنسبة الى عملية التوافق الثاني وكفاءة التحويل .

(8) استعمال بلورات لا خطية من نوع اخر وفي نفس المصدر الضاخ لإجراء دراسات مقارنه .

الدكتور طالب زيدان الموسوي .....



## References

- [1] مهند رشيد العاني "تنقيب المواد باستخدام الترددات التوافقية لاشعة الليزر"  
اطروحة ماجستير / الجامعة التكنولوجية / (١٩٩٠).
- [2] Y.X.Fan, R.C.Eckardt, R.L.Byer, J.Nolting & R. Wallenstein Appl. Phys. Lett., Vol. 33, No.25, (1988).
- [3] O. Zvelto "Principles of Lasers" 2<sup>nd</sup> Edition,  
translated by Dr.Manam M.(1988).
- [4] د.اسعد عبد المجيد الاوسي "الليزر وتطبيقاته" الطبعة الاولى / بغداد/ (١٩٨٧).
- [٥] جي.أي.هاري "الليزر الصناعية وتطبيقاتها" ترجمة د.عبد الكريم  
معروفود.المهندس صالح نوري صالح. طبع الدار العربية/ بغداد/ (١٩٨٧).
- [٦] W.Koechner "Solid-State Laser Engineering"  
springer-  
verlag (New York-Inc.) 1976 & 1999.
- [7] د.نجاح صادق جميل اسس علم البلورات" جامعة الموصل (١٩٩٠).
- [8] د.علي عطية ، آمنة احمد رمزي "خواص المادة والحركة الموجية"  
(1978) الطبعة الاولى / جامعة بغداد/ كلية العلوم /
- [9] د.خالد عبد الحميد الخطيب ود.وليد خلف حمودي "ضوئيات الكم والليزر"  
الجامعة التكنولوجية (١٩٨٩).
- [١٠] Nonlinear Optic Crystals, Red Optronics, 2004,  
E.mail: [sales@redoptronics.com](mailto:sales@redoptronics.com).
- [١١] Nonlinear Optic Crystals, Casix company, 2003,  
E.mail: [Marketing.casix@jdsu.com](mailto:Marketing.casix@jdsu.com).
- [١٢] Nonlinear Optic Crystals,Foreal Spectrum, Inc.  
,2003  
E.mail: info.@forealspectrum.com.

- [١٣] P.A.Franken, A.E.Hill,C.W.Peters,G.Weinreich,  
phys.Rev.Letters, Vol.7, No.4,AVG. (1961).
- [14] A.Yariv “ **Optical Electronics in Modern  
Communications**” 5<sup>th</sup> edition, 1997.
- [15] C.B.Hitz “ **Understanding Laser Technology**”  
translated by Riyad. A. Mirza, 1990.
- [16] Manual (LGIOS), fifth harmonic generation for  
(Nd:YAG), E.mail: [dermrventures@Yahoo.com](mailto:dermrventures@Yahoo.com)
- [17] W.F.Hagen & P.C.Magnante,J.Appl. phy.  
Vol.40,No.1,JAN (1969).
- [18] C.Kennedy& J.Barry, IEEE J. of Quan. Elect.,  
Vol.QE10,P.528, 1974.
- [19] J. E. Murry, R.. J. Pressley, IEEE J. of Quan.  
Elect., Vol. QE-10, No. 2, 1974.
- [20] W. Cuichow, J. Kannelaud, IEEE J. of Quan.  
Elect., Vol. QE-10, No.2,  
1974.
- [21] Y. Snrematsu, Y. Sasaki, IEEE J.of Quan.  
Elect., Vol. QE-10, No.2, 1974.
- [22] A. Alippi, A. Palma, L. Palmier, J. Appl. Phys.,  
Vol. 48  
No.6, 1977.
- [23] J. Barry & C. J. Kennedy, J. Appl. Phys., Vol. 48,  
No.6,  
p.2518, 1977.
- [24] .N.Nayak,IEEE J. of Quan. Elect., Vol. Q-18,  
No.2  
P.290, FEB., 1982.
- [25] G.C.Ghosh & G.C.Bhar, IEEE J. of Quan.  
Elect., Vol. QE-18, No.2, 1982.
- [26] W.J. Kozlorsky, C.D.Nabors, IEEE J. of Quan.  
Elect., Vol. 24, No. 6, 1988.



- [27] K. Kato, IEEE J. of Quan. Elect., Vol. QE-24, No. 1, 1988.
- [28] G.C.Bhar, S.Das & U.Chatterjee, J.Phys.D: Appl. Phys. Vol. 22,P.562-563,1989.
- [29] K. Kato, IEEE J. of Quan. Elect., Vol. 28, No.10, 1992.
- [30] M.D.Shelden, R. S. Craxton, IEEE J. of Quan.. Elect., Vol. 28, No. 5, 1992.
- [31] مهند موسى العزاوي "الضخ الضوئي للأوساط اللاخطية باستخدام ليزر نياديوم-ياك صغير الحجم" أطروحة ماجستير / جامعة بغداد/ كلية العلوم (1995).
- [32] O. Pfister, M. Murtz, J.Optics letters, Vol. 21 No. 17, 1996.
- [33] D. Meshulach, Y.Barad & Y.Silberberg J.Opt. Soc.Am.B, Vol.14, No.8,AUG.,1997.
- [34] W.K. Jang, Qing Ye, Dennis Hammons, IEEE J. of Quan. Elect., Vol. 35, No. 12,P.1826,DEC. 1999.
- [35] U.Stropner,J.P.Meyn,R.Wallenstein.hattap://www.Uni-Konstanz.de/Quantum Optics/Internet Service(2000).
- [36] X.H.Zehene, M.H.LI, Y.H.Xu, R.Wang, Harbin Institute of Technology, 2001,E.mail: [limingh@dsi.nus.edu.sg](mailto:limingh@dsi.nus.edu.sg).
- [37] A. M.. March, S. S. Brook, Optics Rotation project 4, Internet Service, 2001.



(Nd:YVO<sub>3</sub>) حيدر هادي سهيل "توليد التوافق الثاني داخل فجوة ليزر

[38]

الذي يوضح طولياً باستخدام ليزر أشباه الموصلات" أطروحة دكتوراه مقدمة

إلى الكلية الهندسية العسكرية (كلية الرشيد للهندسة والعلوم) / (٢٠٠١).

[39] A.Y.Nevsky,H.Waltter, Ch. Schwedes, E. Peik, J. Appl.

Phys. B Laser & optics 2003. E.mail: Christian.

[Schwedes@mpg.mpg.de](mailto:Schwedes@mpg.mpg.de)

[40] M. Asobe, O. Tadanaga, NNT.Photonics  
Labaratories,Japan,(2004)

E.mail:m.asobe@aecl.ntt.co.jp.

[٤١] G, A.Rines, R. A. Schwarz,P.Molton, Electro-  
Optics, Inc.

Internet Service, 2003.

[42] B. S. Shi & A. Tomita, Japan Science &  
Technology

Corporation( JST), Internet Service, Japan(2004).

[43] Y.R.Shen, "**The Principles of Nonlinear Optics**"  
printed in USA.(1984).

[44] D.A. Kleinman, "**Laser Handbook**"

Vol.2,E4,ed.F.Arecchi & E.S.Dubois.North-  
holland

Publishing Gompany, (1972).

[45] J.E.Nidwinter,Zernihe F. "**Appl.Nonlinear  
Optics**"

New Yourk, 1973.

[46] V.S.Sovorov, A.S.Sonin&J. S.Roz, Sov.phy.  
JETP. Vol. 2,

No.1,JAN.(1968).

[47] J.Wilson & J.F.Bhawkes"**Opto electronics an  
Introduction**", Prentice-Hall-International Inc.  
(1983).



## الفهرس

الصفحة	الموضوع
	الآية القرآنية.
	الإهداء.
٩	المقدمة.
١٠	الأنظمة البلورية.
١٢	النظام الثلاثي الميل.
١٢	النظام الأحادي الميل.
١٢	النظام الثلاثي أو المعيني الأوجه.
١٢	النظام السداسي.
١٣	النظام المعيني القائم.
١٣	النظام الرباعي.
١٣	النظام المكعبي.
١٥	التناظر في الأنظمة البلورية.
١٧	الأصناف البلورية والمجاميع النقطية.
١٩	البلورات اللاخطية.
٢٣	خصائص وتطبيقات البلورات اللاخطية.
٢٣	خصائص وتطبيقات بلورة (KTP).
٢٦	خصائص وتطبيقات بلورتا (KD*P), (KDP).
٢٧	خصائص وتطبيقات بلورة (BBO).
٢٧	خصائص وتطبيقات بلورة (LBO).
٢٨	مقدمة عن توليد التوافق الثاني.
٣١	تطبيقات توليد التوافق الثاني.
٣٣	التوافقيات الأعلى.

٣٥	نبذة تاريخية.
٤١	الفصل الثاني
٤٣	المقدمة.
٤٣	توليد التوافق الثاني .
٤٤	الصورة الفيزيائية.
٤٩	المعالجة التحليلية.
٥٥	كثافة الطاقة وكفاءة التحويل.
٦١	الطول المتشابه.
٦٤	تطابق الطور .
٧٣	أنواع تطابق الطور .
٧٤	زاوية تطابق الطور .
٧٥	زاوية (Walk- off) .
٧٦	زاوية القبول .
٧٧	العوامل المؤثرة على توليد التوافق الثاني.
٧٧	عوامل البلورة المؤثرة على توليد التوافق الثاني.
٨٢	عوامل الليزر المؤثرة في كفاءة التحويل.
٨٥	طرق فصل الشعاع التوافقي عن الشعاع الاساس.
٨٧	الفصل الثالث
٨٩	المقدمة.
٨٩	مواصفات ليزر (Nd:YAG) المستخدم في ضخ بلورة (KTP).
٩١	توليد التوافق الثاني بتغيير زاوية الطور .
٩١	أجزاء منظومة توليد التوافق الثاني بتغيير الزاوية.
٩٢	توليد التوافق الثاني بتغيير درجة الحرارة.
٩٣	أجزاء منظومة توليد التوافق الثاني بتغيير درجة حرارة البلورة.



بناء منظومة التوافق الثاني في ليزر الحالة الصلبة وتطبيقاتها .....

٩٣	تصنيع دائرة الكاشف الضوئي .
٩٥	أجزاء الكاشف الضوئي.
٩٥	المواصفات التقنية للكاشف الضوئي.
٩٦	تصنيع الفرن الكهربائي والسيطرة على درجة الحرارة.
٩٧	ترصيف بلورة (KTP) .
٩٩	فصل الشعاع التوافقي عن الشعاع الأساسي.
٩٩	الفصل بواسطة المرشح الضوئي (Filtter) .
١٠٠	الفصل بواسطة المطياف الاحادي (Monochromators)
١٠٣	الفصل الرابع
١٠٥	المقدمة
١٠٥	قياس كفاءة تحويل بلورة (KTP) .
١٠٩	قدرة التوافق الثاني (SHG) بتغيير درجة حرارة البلورة .
١١٠	قدرة التوافق الثاني بتغيير زاوية سقوط الشعاع.
١١٠	الموديل الرياضي والبرمجة.
١١٤	استقرارية المنظومة.
١١٤	أسس اختيار بلورة (KTP) لتوليد التوافق الثاني من ليزر (Nd:YAG)
١١٧	الخاتمة
١٢٣	المصادر
١٢٧	الفهرس