كلية الكوت الجامعة
مركز البحوث والدراسات والنشر
ISBN: 978-9922-612-41-6

C.Breck Hitz

تفهم تكنولوجيا

الليزر

ترجمـــــة

أ.د. ريـاض عزيـز مـرزه
الشركـة البريطانية العلميـة

مراجعة علمية

أ.د. محمد صالح مهدي الخفاجي
جمعية الليزر العراقية

أ.م.د. طالب زيدان الموسوي
الجامعة المستنصرية /كلية العلوم /
كلية الكوت الجامعة / جمعية الليزر العراقية

تصميم واخراج : د. نغم ثامر علي الجميلي
/ جمعية الليزر العراقية

منشورات

مركز البحوث والدراسات والنشر

كلية الكوت الجامعة

٥٣٥ / ٥٨

Hitz , Breck c. 674 H

تفهم تكنولوجيا الليزر / C. Breck Hitz

ترجمة رياض عزيز مرزة ... بغداد : مطبعة الرفاه , ٢٠٢١ .

٣٢٠ ص . , ٢٤ سم .

١ . الليزر ـ اشعة ـ دراسات . أ . مرزة , رياض عزيز (مترجم) . ب . العنوان .

مطبعة الرفاه 07902823204

م . و .

٢٠٢١ / ٢٩٣٩

المكتبة الوطنية / الفهرسة اثناء النشر

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق ببغداد

٢٩٣٩ لسنة ٢٠٢١ م

بسم الله الرحمن الرحيم

وقل رب زدني علما

صدق الله العظيم

المترجم في سطور

<u>رياض عزيز مرزه</u>

- بكالوريوس فيزياء من جامعة بغداد عام 1976.
- ماجستير ودكتوراه فيزياء ليزر
- العديد من الكورسات من جامعة اريزونا في موضوعات الليزر والبصريات وجامعه لندن في موضوع البلورات .
- يعمل في حقل الليزر والبصريات ولديه العديد من البحوث المنشورة والمحاضرات اضافه للمشاركات في المؤتمرات وورش العمل في هذا المجال.
- عضو في الجمعية العراقية للفيزياء والرياضيات.
- عضو جمعية الليزر العراقية.
- عضو الجمعية الامريكية للبصريات 0SA والجمعية العالمية للهندسة البصرية SIPE والجمعية الاسترالية للبصريات AOS للفترة بين 1980 و2016 في مجموعة الهولوعرافي وبصريات فورير.
- عضو (درجة ممتازة) في غرفة تجارة بغداد 1995 ولغايه 2019
- عضو في غرفة التجارة البريطانية فرع ستافورد.
- حاصل على ثلاث براءات اختراع.
- اسس وادار شركه السلام للنظم الالكترونية المحدوده (شركة ممتازة) للفترة بين 1995 و2019.

- اسس ويدير الشركه العلمية البريطانيه UK-SCIENTIFIC LTD. وهي شركة صناعية مختصه في مجال الليزر والبصريات في عام 2009 في بريطانيا ولحد الان. (www.uk-scientific.com)

- استاذ محاضر لمادة بصريات فورير في معهد الليزر للدراسات العليا في جامعه بغداد للفترة بين 2005 و 2012 .

- عضو مجلس منظمه المبتكرين الاوربية European innovation scoreboard منذ عام 2017 .

- حاصل على شهادة تطوير المهارات لقادة الشركات من جامعه كيل في بريطانيا 2018.

من مؤلفاته

- " مبادئ واستخدامات الليزر" الكتاب الفائز بالمرتبة الثالثة في مسابقة الكتب العلمية التي اقامها ديوان رئاسة الجمهورية. ومن منشورات دار الشؤون الثقافية العامة-بغداد-1985

- " برمجة الحاسبات الشخصية بلغة البيسك MSK " من منشورات المكتبة العالمية - بغداد، والدار العربية للعلوم – بيروت- 1987-1988 - 1989

- " الليزر في الطب"مترجم من اللغة الانكليزية. ومن منشورات المكتبة العالمية - بغداد. والدار العربية للعلوم- بيروت 1987-1988.

- مدخل الى تكنولوجيا الليزر مترجم (لمؤلفه C.Breck Hitz) تحت الطبع والنسخة الانكليزية من منشورات وايلي. وترجم وفق عقد مع الناشر وايلي.

- تفهم تكنولوجيا الليزر لمؤلفه (لمؤلفه C.Breck Hitz) بطبعته الاولى عام 1987 .

مقدمة المؤلف

يعرض الكتاب مبادئ واستخدامات اشعة الليزر بأسلوب بسيط بحيث لا يتطلب ان يكون للقارئ اي خلفية في الفيزياء او الرياضيات ، وما وضع في الكتاب هو حصيلة خبرتي العملية في مجال تكنولوجيا الليزر وكذلك نتيجة حصيلة تدريسي لهذه المادة. آملاً ان يكون هذا الكتاب مفيدا للطلبة الدارسين لتكنولوجيا أالليزر والمهندسين والباحثين في المجالات الاخرى من المستخدمين لأشعة الليزر في عملهم ، ولجميع القراء من غير المختصين والذين يرومون معرفة تكنولوجيا الليزر وتطبيقاته.

كتاب " تفهم تكنولوجيا الليزر" مقسم الى اربعة أقسام فبعد الفصل الاول والمتضمن مقدمة عامة للموضوع ، تشمل الفصول الاربعة – من الفصل الثاني وحتى الفصل الخامس – مبادئ الضوء والبصريات ، مع اعطاء بعض الخصوصية لأشعة الليزر. ويشمل القسم الثاني الفصول من السادس وحتى التاسع ويتضمن مبادئ عمل الليزر، وهذه الفصول هي اكثر الفصول شمولية لمبادئ الليزر. والقسم الثالث من الكتاب والذي يشمل الفصول من العاشر وحتى الثالث عشر يناقش الطرق المستخدمة لمعالجة الشعاع الخارج من الليزر، وتكييفه ليلائم متطلبات العمل. اما القسم الاخير والي يتضمن الفصول من الرابع عشر وحتى السادس عشر، فيتضمن الانواع الخاصة من منظومات الليزر وتطبيقاتها ، وبطبيعة الحال لا تتضمن هذه الفصول جميع استخدامات اشعة الليزر بل

تستعرض اهمها مشيرة الى كيفية حل هذه الاشعة للمشاكل التكنولوجية التي لم تتمكن الطرق التقليدية من حلها.

ويختلف الكتاب عن الكتب الاخرى المشابهة، حيث يمثل مجموعة من المحاضرات التي القيتها على طلبتي.

وكل فصل من فصول الكتاب انهيته بمجموعة من الاسئلة التي يعتمد بعضها على مادة الكتاب مباشرة ، وبعضها الاخر تضمن ملاحظات يمكن الاعتماد عليها للوصول الى الحل الصحيح.

ويسعدني ويشرفني ان اقدم جزيل شكري الى البروفيسور JOEL FALS من جامعة بنس برج، ليس لمراجعته مسودة الكتاب فقط بل لمناقشاته المتعددة لموضوع الالكترونيات الكمية التي استندنا عليها للسنوات الخمس العشرة الماضية. وكذلك اشكر البروفيسور PETER MILONNI من جامعة اركنساس ، الذي كانت لملاحظاته على مسودة الكتاب اهمية بالغة في ظهوره بهذا الشكل، وكذلك البروفيسور ANTHONY SIEGMAN من جامعة ستاندفورد ، ولجميع طلبتي اللذين شاركوا في فصل تكنولوجيا الليزر للسنوات العشر الماضية واخيرا اشكر دار PENNWELL للنشر ومدير النشر فيها.

C.Breck Hitz

المقدمة

يعد كتاب UNDERSTANDING LASER TECHNOLOGY من الكتب العلمية المبسطة الخالية من الرياضيات المعقده والتي تهم مجموعة كبيره من المثقفين اضافة الى كونه من الكتب المنهجية المعتمده في المراحل الاولية في الكثير من الجامعات ومن الكتب المساعده في الاخرى.

يعد مؤلف الكتاب من العاملين البارزين في مجال الليزر فهو رئيس تحرير مجلة PHTONETICS وعضو هيئة تحرير ال SUNNYVAL التي تصدر في كاليفورنيا ومدير النشر لمجلة LASER & APPLICATIONS .

حصل هتز على شهادة البكالوريوس في الفيزياء من جامعة بنسلفانيا وشهادة الماجستير من جامعة ماستيوت. وقد درس فصل مبادئ الليزر في العديد من الجامعات وعمل في مختبرات لورنس الوطنية ومختبرات ساندیا ولدى العديد من الشركات الخاصة وله العديد من النشريات العلمية وفي عدد من المجلات العالمية. وبذلك يعد الكتاب حصيلة لهذه الخبره الطويلة .

ولافتقار المكتبة العربية لكتاب من هذا النوع. ارتأيت ترجمته لاغناء القارئ العربي بما ورد فيه من معلومات قيمة وأرجو ان اكون قد وفقت بذلك.

ونظرا للاقبال على الكتاب والاطراء الذي حصلت عليه نتيجه عملي هذا وطلب الكثير من الزملاء والطلبه لنسخ منه ولعدم توفره في المكتبات قررت اعادة طباعته بعد اجراء التعديلات الضروريه عليه والمستندة على اراء السادة المقيمين وعلى التطور الحاصل في هذا المجال حيث مضى زمن طويل على نشر الطبعه الاولى والتي كانت في الثمانينات من القرن الماضي .

ولا يسعني اخيرا إلا ان اقدم خالص شكري لكافة الذين ساهموا في انجازه واخص منهم الاستاذ الدكتور محمد صالح مهدي والاستاذ المساعد الدكتور طالب الموسوي لمراجعتهما لمسوده الكتاب الجديدة ولآرائهما القيمة حول العديد من فقراته والدكتورة نغم ثامر العجيلي التي اعادة طباعته واخراجه بهذا الشكل وادعو الله ان يوفقهم جميعا وان يتغمد المرحوم الاستاذ بهجت عبد الواحد برحمته الواسعة والذي قام بالتصحيحات اللغوية الضرورية.

ولايسعني هنا الا ان اشكر كلية الكوت الجامعة التي تبنت طباعه هذا الكتاب خدمة منها لنشر العلم والمعرفة.

رياض عزيز مرزه

المترجم

الفصل الاول

نظرة عامة على تكنولوجيا الليزر

An Overview of Laser Technology

ظهر الليزر كحل مثالي للمشاكل التي لم تجد لها حلاً حتى عام 1960. فالليزرات ذات الطاقة العالية تستطيع ان تدمر الطائرات وهي في الجو ، وتقطع المعادن كما يقطع الجبن ألطري ، والليزرات الدقيقة تستخدم كأداة في يد الجراحين ، والأنواع الصغيرة منها تستخدم في المحال التجارية لقراءة الاسعار عن ألبضائع وأنواع اخرى منها لقياس المسافات بدقة ، والسيطرة على انواع التفاعلات ألذرية ، والاندماج النووي للحصول على مصادر جديدة واقتصادية للطاقة. ولكن ما هو الليزر ؟ وكيف يعمل ؟ وما هي خصائص اشعته التي يطلقها؟ .

فالمصطلح " ليزرLASER " يمثل الاحرف الاولى من العبارة التالية:

"Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

والتي تعني **"تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفز للأشعة "** وكما سنلاحظ ذلك في اثناء دراستنا لهذا الكتاب ، ان كل كلمة في هذا المصطلح تصف عملاً معيناً يؤدي الى الحصول على شعاع الليزر. وهناك صفات اخرى لشعاع الليزر اضافة لشدته العالية ، فللشعاع طول موجي محدد ، وينتشر في الفضاء بشكل مستقيم ومتوازٍ تماماً وينطلق

باتجاه واحد دائماً ، وهذه الصفات والصفات الاخرى التي سنتطرق اليها في الفصول القادمة جعلت لأشعة الليزر العديد من الاستخدامات التي لا يمكن للأنواع الاخرى من الاشعة ان تقوم بها.

ماهي اكثر التطبيقات لأشعة الليزر ؟ الجواب عن هذا السؤال يعتمد على الاعتبارات ألاقتصادية فأي الاستخدامات تحظى بالجزء الاكبر من الميزانية ؟ ففي منتصف الثمانينات كان متوسط نفقات استخدامات الليزر بين 4 و 5 ملايين دولار في كل سنة ، ولكن كيف تتوزع هذه على استخدامات الليزر المختلفة ؟ .

شكل 1-1 : يستخدم الليزر كمشرط في العمليات الجراحية الدقيقة في الجملة العصبية

تأخذ الطابعات الليزرية حصة الاسد من المبالغ اعلاه ، وتصل هذه الى حد الربع تقريباً ، وتعد الطابعات الليزرية الاسرع والأفضل بين قريناتها الاخرى ، فهي طابعات سريعة وكفوءه . وتأتي منظومات فصل الالوان

شكل 1-2 : يستخدم ليزر النديميوم /ياك في منظومات تقدير المدى العسكرية ، وكذلك تخصيص الاهداف.

والخاصة بطباعة الصور الملونة بعد الطابعات الليزرية مباشرة في اهميتها*.

وتحتل الاستخدامات العسكرية لأشعة الليزر جزءاً كبيراً ايضاً في مجمل استخدامات هذه الاشعة ، وتصل الى حد الثمن للمبلغ المبين سابقاً، واهم هذه الاستخدامات هي في منظومات تقدير المدى وتخصيص الاهداف وتوجيه المقذوفات ، وأخيرا استخدامه كسلاح فتاك لتدمير الاهداف الطائرة.

---

*(*عند تاليف الكتاب لم تكن الاقراص الليزريه المدمجه نتشرة بالشكل الذي هي عليه الان , ولهذه الان حصه كبيرة ايضا وكذلك قارئات الاسعار في الاسواق والمحلات) . المترجم*

3-1 : يستخدم شعاع الليزر في قراءة الاسعار عن البطاقة الخاصة بذلك في الاسواق والمحال ، التجارية.

شكل 1-4 : تستخدم اشعة الليزر مع الحادلات والعجلات الاختصاص للحصول على الاراضي المستوية.

ومن الاستخدامات الاخرى المهمة لهذه الاشعة رغم كون تخصيصاتها ليست بالكبيرة ، هي استخدامها في معالجة المعادن ، في القطع ، واللحام والمعالجات الحرارية . وكذلك استخدام هذه الاشعة في المجالات الطبية التي لها حصة لا بأس بها ، فتستخدم في العلاج والتشخيص ، وكذلك كمشرط دقيق بيد الجراح. وتستخدم ايضا في مجالات الابحاث الصرفة في الفيزياء والكيمياء والهندسة كأداة دقيقة للحصول على افضل النتائج ، والتي لم يكن الحصول عليها ممكناً بالوسائل التقليدية سابقاً ، فيمكن دراسة تركيب المواد ، وتوزيع مستويات الطاقة في ذراتها وجزيئاتها وغيرها، و هذا ما سنلاحظه في الفصول القادمة من هذا الكتاب.

الفصل الثاني

طبيعة الضوء The Nature of light

ما هو الضوء ؟ كيف ينتقل من مكان الى آخر هذه هي الأسئلة التي سوف تطرح في هذا الفصل ، ولكن الإجابة عن هذه الأسئلة ليست بالبساطة التي نتوقعها . وليست طبيعة الضوء بالأمر السهل الفهم اذ لا يتصرف الضوء دائماً بالطريقة نفسها ، فهو يتصرف احياناً وكأنه موجة، وأحيانا أخرى وكأنه مكون من جسيمات. ولندرس الان تصرف الضوء الموجي، ومن ثم التصرف المادي له، وأخيرا سوف نناقش الطبيعة الثنائية له.

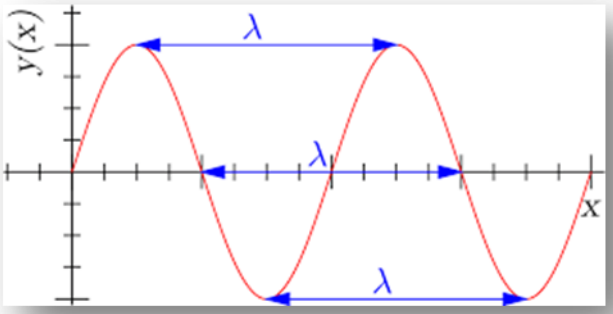
الموجات الكهرومغناطيسية Electromagnetic Waves

" *ان الضوء موجة كهرومغناطيسية مستعرضة* " لنتفحص هذه العبارة التي تصف الضوء بشكل مختصر. يمثل الشكل (1-2) رسماً تخطيطياً للموجة بصورة عامة ، وتتحرك هذه الموجة بشكل دودي ، وبسرعة محددة ومميزة لها مقدارها V . ولهذه الموجة طول موجي ثابتλ ، ويمثل هذا طول الدورة الواحدة للموجة شكل (1-2) ، اما التردد فيمثل عدد الاطوال الموجية التي تمر من نقطة معينة خلال الثانية الواحدة ، أي انه كلما قصر الطول الموجي ازداد التردد.

والعلاقة الرياضية التالية:

$$f = v/\lambda$$

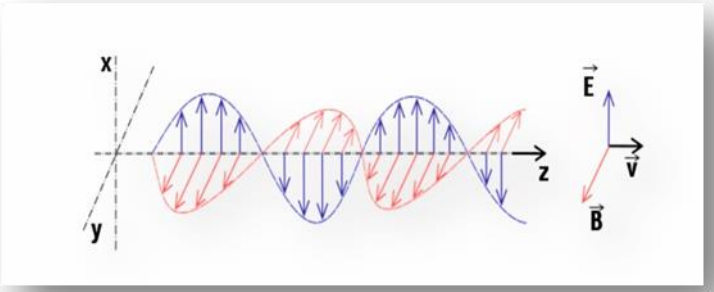
تربط بين سرعة الموجة وطولها وترددها.



شكل 2-1 موجة ومراقب

اما السعة فتمثل ارتفاع الموجة ، أي المسافة من الخط المركزي للموجة الى قمتها، اما الطور فيمثل جزءاً معيناً من الموجة يمر امامنا. في الشكل السابق فان طور الموجة يساوي 90 درجة في القمة ، و270 درجة في القعر وهكذا . لقد عرفنا فيما سبق كلمة موجة ، ولكن ماذا نعني بكلمة " مستعرضة " ؟ .. هنالك نوعان من الموجات ، الموجات المستعرضة ، والموجات الطولية ، ففي الأولى يكون التموج عمودياً على اتجاه انتقال الموجة.

والموجة المائية ابسط مثال على ذلك ، اذ يتحرك سطح الماء نتيجة القاء جسم ما فيه الى الاعلى والأسفل بينما تنتقل الموجة باتجاه افقي ومن جهة اخرى يمثل الصوت موجة طولية ، فعند انتقال الموجة الصوتية خلال الهواء تتكون حركة من التخلخل والتضاغط باتجاه الحركة نفسها للموجة.

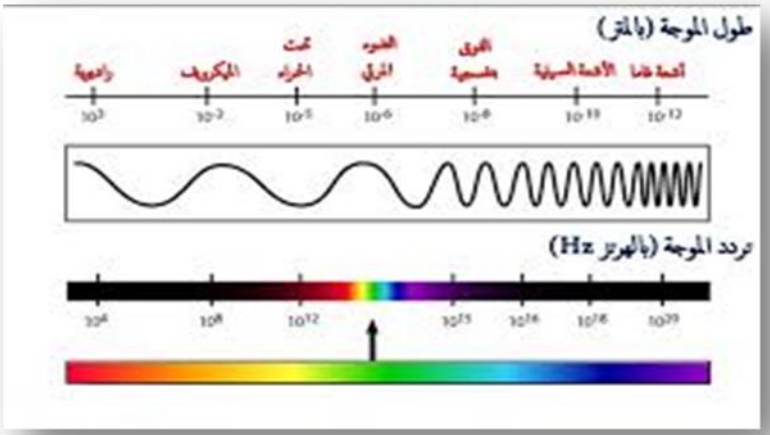


شكل 2-2 : المجالين الكهربائي E والمغناطيسي B لموجة ضوئية.

ويعتبر الضوء من الموجات المستعرضة اذ يتحرك المجالان الكهربائي والمغناطيسي بشكل عمودي على اتجاه انتقال الموجة. ويعتبر الضوء موجة كهرومغناطيسية ، لاحتوائه على المجالين الكهربائي والمغناطيسي، والشكل (2-2) يمثل مخططاً للمجالين الكهربائي والمغناطيسي للموجة الضوئية حيث يتموج المجال الكهربائي E بالاتجاه الشاقولي ، بينما يتموج المجال المغناطيسي B بالاتجاه الافقي ، وتستطيع الموجات الكهرومغناطيسية الانتقال في الفراغ بخلاف الموجات الصوتية والموجات المائية التي تحتاج الى وسط مادي للانتقال خلاله. وتنتقل الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ بسرعة ثابتة تساوي $3X10^8$ كم/ثانية.

لا يمثل الضوء المرئي إلا جزءاً بسيطاً من الطيف الكهرومغناطيسي المبين في الشكل (2-3) والذي يشمل الموجات الراديوية والضوئية وأشعة كاما والأشعة السينية ، والتي تمثل جميعها موجات

كهرومغناطيسية مستعرضة ، لا تختلف فيما بينها سوى بالأطوال الموجية التي تتراوح بين عدة مئات من الامتار في الامـواج الراديـوية الطويلـة الــى اجـزاء مــن



شكل 2-3 : الطيف الكهرومغناطيسي

السنتمتر في اشعة كاما، ولهذا يختلف تصرف الموجات في المناطق المختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي اختلافاً كبيراً.

وسنوجه اهتمامنا بما يسمى الجزء البصري من الطيف ، والذي يشمل جزءاً من المنطقة تحت الحمراء والمنطقة المرئية وجزءاً من المنطقة فوق البنفسجية ، ومن الجدير بالذكر ان تقنية الليزر تشمل الاطوال الموجية المحصورة بين 10 مايكرون (10^{-5} متر) و100 نانومتر(10^{-7} متر) ، وتمثل المنطقة المرئية الاطوال المحصورة بين (400-700 نانومتر).

وصف التصرف الكلاسيكي (غير الكمي) للضوء ، وكذلك للموجات الكهرومغناطيسية الاخرى ، بواسطة اربع معادلات تسمى معادلات ماكسويل ، نسبة للفيزياوي الاسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل ، لقد جمع ماكسويل استنتاجات عدد من الفيزياويين الاخرين ، وادخل عليها بعض التطوير وجمعها في نظرية موحدة تفسر الظاهرة الكهرومغناطيسية . وتعتبر هذه المعادلات من المعادلات المهمة جداً في الفيزياء ، ويمكن ان تكتب بالصيغة التالية عند عدم وجود مواد عازلة او مغناطيسية.

$$\nabla . E = \rho$$

$$\nabla . B = 0$$

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial T} = 0$$

$$\nabla \times B = J + \frac{\partial E}{\partial T}$$

ان هذه المعادلات معادلات تفاضلية ، ولكن الامر لا يحتاج الى معرفة كبيرة في حساب التفاضل لكي نتبين مدى بساطة هذه المعادلات ، وجمالها. تصف المعادلة الاولى (قانون كاوس في الكهربائية) شكل المجال الكهربائي E الذي تولده شحنة كهربائية مقدارها ρ وتصف المعادلة الثانية (قانون كاوس بالمغناطيسية) شكل المجال المغناطيسي B

الي يولده مغناطيس وكون الطرف الايمن لهذه المعادلة مساوي للصفر يوضح الحقيقة التي تنص على استحالة وجود مغناطيس احادي القطب.

يمكن ان يتولد المجال الكهربائي من وجود شحنة كهربائية ، وهذا ما يوضحه قانون كاوس ، وكذلك يتولد بواسطة مجال مغناطيسي متغير مع الزمن كما هو موضح من المعادلة الثالثة (قانون فرداي) ، وبالعكس يمكن توليد مجال مغناطيسي بواسطة مجال كهربائي متغير مع الزمن او بواسطة تيار كهربائي J ، وتصف المعادلة الرابعة (قانون امبير) شكل هذا المجال.

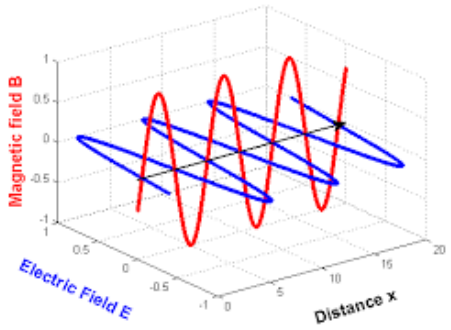
لشهرة هذه المعادلات ما يبررها اذ انها تتحكم بالقوانين الكلاسيكية للالكتروداينمك كافة، ويسري مفعولها حتى في ميدان الظواهر الكمية والنسبية ، ولن نتطرق لهذه المعادلات مرة اخرى في هذا الكتاب ، فقد تناولناها في مناقشتنا هذه لنعطي فكرة واضحة ومبسطة عن القوانين الاساسية التي تتحكم بالظاهرة الكهرومغناطيسية الكلاسيكية.

هنالك نوعان من الموجات الضوئية ، كلاهما يمتلك جبهة موجة مميزة لهما (جبهة الموجة هي سطح تساوي الطور) فالموجة المستوية الموضحة في الشكل (2-4) تبين ان السطح المستوي المبين في الشكل يمر من النهايات العظمى للموجة ، ولكون هذا السطح مستوياً تسمى الموجة " بالموجة المستوية ".

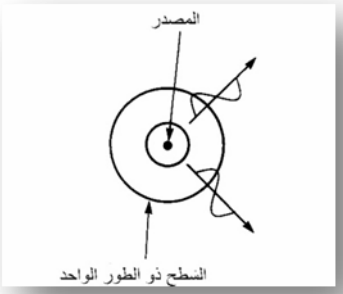
اما السطح الذي يمر من القيم العظمى للموجة المبينة في الشكل (2-5) فهو سطح كروي ، وبذلك تسمى الموجة " بالموجة الكروية " ، وهذه تنتشر في الفضاء بالإبعاد الثلاثة.

ثنائية الجسيم – الموجة Wave – Particle Duality

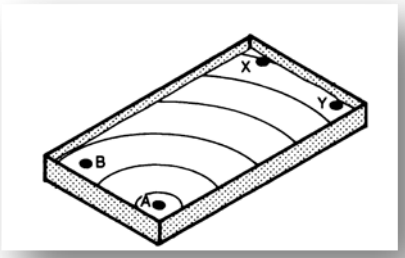
لنجر تجربة بسيطة على الموجات المائية ، فنتصور وعاء فيه ماء كما في الشكل (2 -6) . اذا ما ضربنا الماء في النقطة A ماذا يحدث في النقطتين X وY ؟ ان قمة الموجة ستصل الى النقطة Y قبل وصولها الى النقطة X ، حيث ان النقطة Y اقرب الى مصدر الموجات من النقطة X، بعد ان نفترض ان ابعاد الوعاء قد تم اختيارها بحيث يصل قعر الموجة الى النقطة X عندما تصل قمتها الى النقطة Y، والعكس صحيح ايضاً. من جهة اخرى اذا ما ضربنا الماء في النقطة B فان قمة الموجة ستصل الى النقطة X قبل وصولها الى النقطةY ، وعند وصول قمة الموجة الى النقطة X فان قعر الموجة سيصل الى النقطة Y والعكس صحيح كذلك. ولنلاحظ الان ماذا يحدث اذا ما ضربنا سطح الماء في النقطتين A و B في ان واحد؟ ستصل الى النقطة X قمة الموجة القادمة من النقطة A وفي الوقت نفسه سيصل قعر الموجة القادم من النقطة B وبذلك سيلغي احدهما الاخر, وكذلك الحال في النقطة Y ، وبذلك سيكون سطح الماء في كلتا النقطتين ساكناً. اما في منتصف المسافة بين X وY فسيكون الامر مختلفاً تماماً.



شكل 2-4 :موجة مستوية

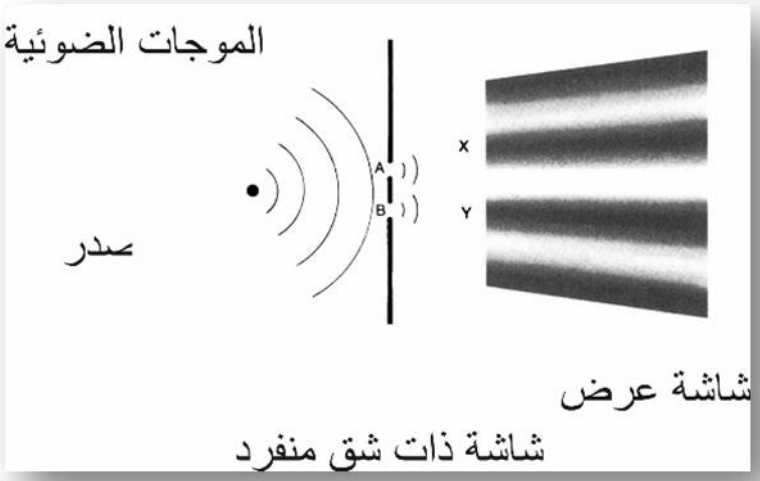


شكل 2- 5 : موجة كروية



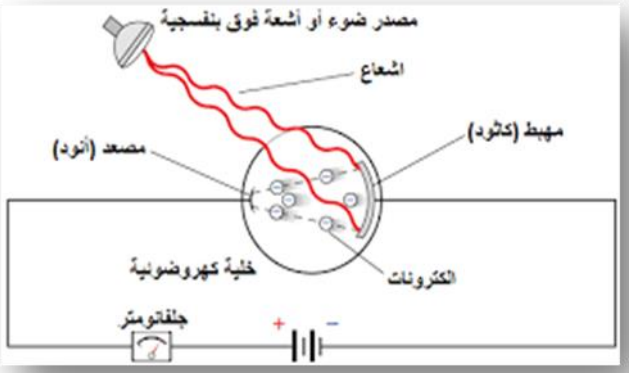
شكل 2-6 : تجربة الموجات على سطح الماء

حيث ستلتقي قمتا الموجتين القادمتين من A و B في الوقت نفسه ، وكذلك الحال بالنسبة لقعري الموجتين ، لذلك سنشاهد حركة تموجية مضاعفة لسطح الماء ، ويمكن اجراء تجربة مشابهة للضوء اذ يمثل الشقان A و B في الشكل (2-7) مصدري الموجات السابقين ، وتمثل الاهداب المظلمة على الشاشة النقطتين X وY والمناطق المضيئة تنصف المسافة بينهما. وتسمى هذه التجربة بتجربة يونك YOUNG وسنناقشها مفصلاً في الفصل الخامس من هذا الكتاب ، ولا يمكن تفسير التجربة إلا بافتراض ان الضوء يسير على شكل موجات.



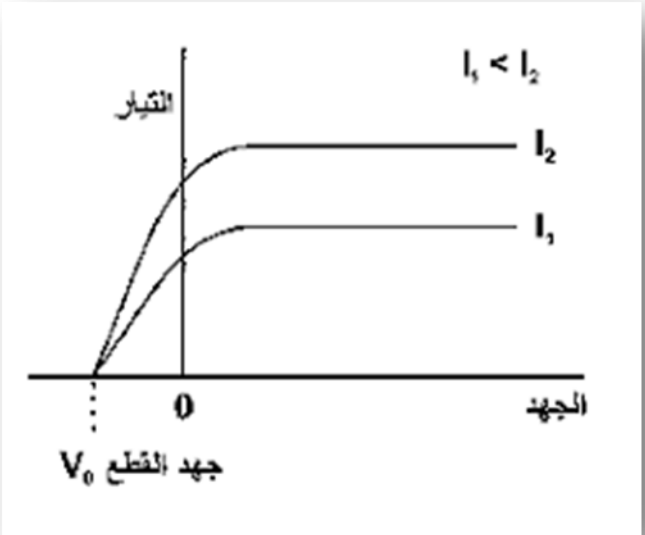
شكل 2-7 : التمثيل الضوئي لتجربة الموجات

درس الفيزياويون تجارب مماثلة لهذه في القرن التاسع عشر ، واستطاعوا بنجاح تام ان يفسروها وبافتراض ان الضوء يسير بموجات، ولكن برزت مشكلة محيرة للعلماء في نهاية القرن ذاته ، اذ لم تستطع هذه النظرية الموجية تفسير الظاهرة الكهروضوئية ، فقد لاحظ العلماء عند استخدام خلية كهروضوئية كالتي نراها في الشكل (2-8) والمكونة من قطبين كهربائيين موضوعين في انبوب مفرغ ، واسقطوا الضـوء علـــى القطب السالب منها (الكاثود) فوجـــدوا ان الطـاقـة الضوئية هذه



شكل 2-8 : خلية كهرو- ضوئية

يمكن لها ان تحرر عدداً من الالكترونات التي يجمعها القطب الموجب (الانود) ، وهذا سيؤدي الى مرور تيار كهربائي يمكن قياسه بواسطة الاميتر A كدالة للجهد المسلط على قطبي الخلية ، ويوضح الشكل (2-9) العلاقة بين التيار والجهد.



شكل 2-9: التيار كدالة للجهد في خلية كهرو- ضوئية

ان عدم تغير التيار مع الجهد الموجب (الجهد الذي يعجل الالكترونات من الكاثود نحو الانود) يعني ان جميع الالكترونات المنبعثة من الكاثود تمتلك في الاقل طاقة حركية تمكنها من الوصول الى الانود، وما ان يبدأ الجهد بالانحدار نحو القيمة السالبة حتى يأخذ التيار بالنقصان ، وهذا يعني ان بعض الالكترونات تنبعث بطاقة قليلة جداً من الكاثود ، بحيث لن تتمكن من الوصول الى الانود بسبب وجود حاجز الجهد. وان انحدار قيمة التيار بصورة حادة الى الصفر يعني وجود طاقة عظمى للالكترونات المنبعثة من الكاثود.

ونستنتج من هذا ان بعض الالكترونات تنبعث بطاقة عظمى وبعضها الاخر ينبعث بطاقة اقل ، ويفسر ذلك ان الالكترونات التي تنبعث من

سطح المادة هي التي تنبعث بطاقة عظمى اما الاخرى فأنها تنبعث من داخل المادة ، ولكن الشيء المثير للجدل هو عدم اعتماد الطاقة العظمى للالكترونات على شدة الضوء الساقط على الكاثود.

ان المجال الكهربائي الموجود في موجة الضوء يسلط قوة على الالكترونات الموجودة في مادة الكاثود ليجعلها تهتز ومن ثم تتحرر من الكاثود. وبزيادة شدة الضوء الساقط تزداد شدة المجال الكهربائي وبذلك تزداد طاقة اهتزاز الالكترونات مما يجعلها تتحرر بطاقة اكبر من ذي قبل(اي قبل زيادة شدة الضوء الساقط) ، وبمعنى اخر فان التيار الناتج من المصدر المضئ في الشكل (2-9) يجب ان ينحدر الى الصفر بجهد سالب اكبر مما هو عليه بالنسبة للمصدر الخافت . ولكن هذا لا يحصل بطبيعة الحال. وهذه ليست المشكلة الوحيدة التي ستواجهنا في تفسير هذه الظاهرة، فهناك مشكلة اخرى : اذ انه من السهولة حساب الطاقة العظمى للالكترونات المنبعثة (تساوي 2 الكترون فولت في الشكل 2-9) . اذا ما افترضنا ان الالكترون يمتص كل الطاقة التي تسقط على الذرة فما الزمن الذي يستغرقه هذا الالكترون للحصول على الطاقة مقدارها 2 الكترون فولت ؟.

يمكن حساب معدل الطاقة الساقطة على الكاثود من حساب شدة اضاءة المصدر ، ومن معرفة ابعاد الذرة ، وإذا ما علمنا ان قطر الذرة معروف منذ نهاية القرن التاسع عشر انه يساوي تقريباً 10^{-81} سنتمتر . فإذا ما كانت الطاقة الساقطة هي بحدود واحد مايكرو واط لكل سنتمر مربع ،

فأن الذرة ستحتاج الى وقت من دقيقة الى دقيقتين لكي تمتص الطاقة التي مقدارها 2 الكترون فولت. ولكن النتائج المختبرية لا تتوافق مع هذه النتيجة ، اذ تظهر الالكترونات مباشرة بعد سقوط الضوء على الكاثود ، وبتأخير زمني لا يتجاوز مايكرو ثانية واحداً.

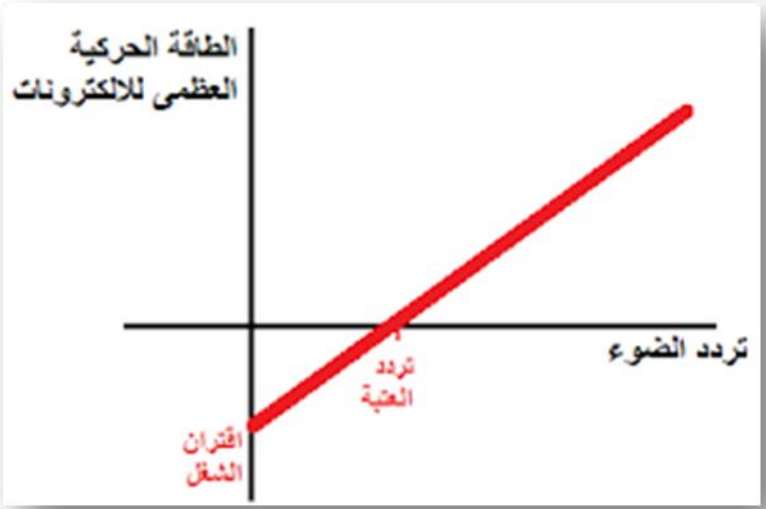
قدم العالم الفيزياوي الشهير البرت انشتاين في عام 1905 فكرة جديدة لتفسير هذه ألظاهرة اذ بين ان الضوء يتكون من جسيمات صغيرة جداً اسماها الفوتونات ، ولكل فوتون طاقة مقدارها E والتي تساوي :

$$E = hf$$

حيث ان f هو تردد الضوء ، وh تمثل كمية ثابتة ، تسمى ثابت بلانك ومقدارها هو $6.63*10^{-34}$ جول. ثانية. ويفسر هذا الانبعاث الفوري للالكترونات ، حيث يمكن لذرة واحدة فقط ان تمتص الفوتون الساقط عليها وتطلق الكتروناً اذا ما كانت طاقة الفوتون كافية لإطلاقه ، وكذلك فسرت هذه النظرية عدم اعتماد الطاقة العظمى للالكترونات المنطلقة على شدة الضوء الساقط على الكاثود ، حيث يمكن لكل فوتون ان يطلق الكتروناً واحداً فقط وبطاقة مناظرة لطاقة الفوتون ، اما زيادة شدة الضوء والتي تعني زيادة عدد الفوتونات فأنها ستؤدي الى زيادة عدد الالكترونات المنطلقة فقط وهذا ما يبدو واضحاً في الشكل(2-9). في تجارب اخرى قام الفيزياويون بتغيير لون الضوء المستخدم في التجربة ، وبذلك تم تغيير تردد الضوء الساقط على الكاثود ،اي تم تغيير طاقة

الفوتونات الساقطة وحصلوا على الكترونات ذات طاقة عظمى مختلفة ، وهذه تشابه النتائج المبينة في الشكل (2-10).

افتراضات انشتاين هذه فسرت الكثير من الظواهر الاخرى التي لم تتمكن النظرية الموجية من تفسيرها اضافة الى الظاهرة الكهروضوئية. ولكن ماذا عن تجربة يونك السابقة والتي لا يمكن تفسيرها إلا باعتبار ان الضوء ينتشر على شكل موجات؟



شكل 2-10 : تزداد طاقة الالكترونات بازدياد طاقة الفوتونات الساقطة

ظهر علم الميكانيك الكمي Quantum Mechanics في بداية القرن العشرين ليفسر جميع التناقضات التي ظهرت في الفيزياء الكلاسيكية ، وقد تنبأ الميكانيك الكمي بالتصرف المختلف لجميع المقاييس عندما تعمل في مجال الذرة والعوالم الدقيقة جداً عن تصرفها في العالم الطبيعي.

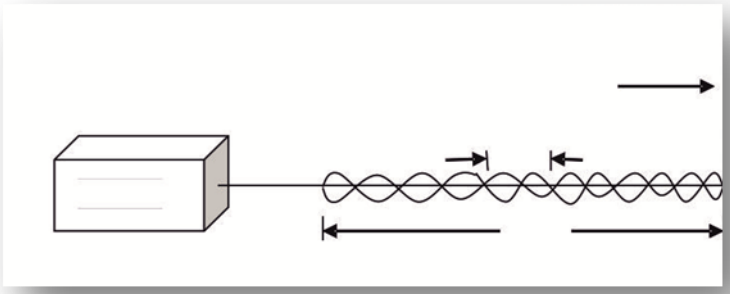
وحسب الميكانيك الكمي فان التصرف المزدوج للضوء لا يشكل اي تناقض ، كما تنبأ الميكانيك الكمي بامتلاك كل الاجسام للخواص الموجية، وقد اثبتت التجارب بعد ذلك هذا التنبؤ.

اذا حصلنا على نبضة ضوئية من جهاز ليزر بطاقة مقدارها جول واحد، ولفترة زمنية مقدارها نانوثانية واحدة ، وبطول موجي مقداره 1,06 مايكرومتر . فهناك طريقتان للتعامل مع هذه النبضة. يوضح الشكل (2-11) الطبيعة الموجية لهذه النبضة اذ يتذبذب المجالان الكهربائي والمغناطيسي على مسافة قدرها قدم واحد، وبطول موجي قدره 1,06 مايكرومتر ، وتتحرك هذه الموجة من اليسار نحو اليمين بسرعة الضوء C .اما الشكل (2-12) فيوضح الطبيعة الكمية لهذه النبضة ، اذ يمتلك كل فوتون منها طاقة مقدارها E.

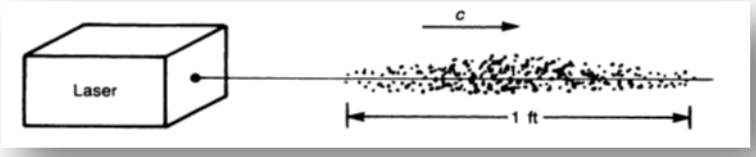
$$E = hf=hC/\lambda$$

وتتحرك هذه من اليسار الى اليمين بسرعة الضوء C .

نستنتج مما سبق انه يمكن اعتبار الضوء موجة، او فوتوناً في الوقت نفسه ويسلك السلوكين في ان واحد ،ويمكن استخدام الاهداب المضيئة الناتجة من تجربة يونك بإضاءة الخلية الكهروضوئية لتحرير الالكترونات معتمدين على الطبيعة الفوتونية للضوء، على الرغم من ان هذه الاهداب ناتجة من الطبيعة الموجية له.



شكل 2-11 : نبضة ليزر 1,06 مايكرون بطاقة جول واحد وزمن نانو ثانية (مصورة كموجة)



شكل 2-12 : نبضة ليزر 1,06 مايكرون بطاقة جول واحد وزمن واحد نانو ثانية (مصورة كفوتونات)

الاسئلة

1- ما تردد الضوء الاخضر الذي طول موجته 530 نانومتراً؟ احسب بصورة تقريبية الوقت الذي يحتاجه ليصل الى نهاية ملعب كرة القدم الذي طوله 100 متر اذا انطلق من النهاية الاخرى له؟

2- ارسم الشكل (2-3) على ورقة. وضع الترددات المقابلة للأطوال الموجية المبينة في اعلى الشكل.

3- لا تعمل البوصلة تحت خطوط الضغط العالي. اي من معادلات ماكسويل تصف المجال المغناطيسي الارضي؟

4- احسب تردد الضوء الصادر من الليزر المبين في الشكل (2-11). واحسب عدد الفوتونات المنطلقة من الليزر المبين في الشكل (2-12).

الفصل الثالث

معامل الانكسار ، الاستقطاب وشدة الاضاءة

Refractive Index, Polarization, And Brightness

تحدثنا في الفصل السابق عن طبيعة الضوء ، وسنتحدث في الفصول القادمة عن بعض الصفات المهمة له . ونبدأ في هذا الفصل بدراسة كيفية انتقال الضوء في المواد الشفافة كالزجاج والماء وغيرهما ، ثم نتحدث عن ظاهرة الاستقطاب ، واخيراً سنتعرض باختصار لمعنى شدة الاضاءة.

انتقال الضوء – معامل الانكسار
Light Propagation – Refractive Index.

ينتقل الضوء في الفراغ بسرعة ثابتة مقدارها $3X10^{8}$ م/ثا وتقل هذه السرعة في المواد نتيجة تفاعل المجال الكهربائي للموجات الضوئية مع الكترونات المادة. ويعتبر معامل انكسار المادة الشفافة المقياس لمقدار النقصان في سرعة الضوء داخل المادة ، ويعرف معامل الانكسار انه النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ الى سرعته في المادة.

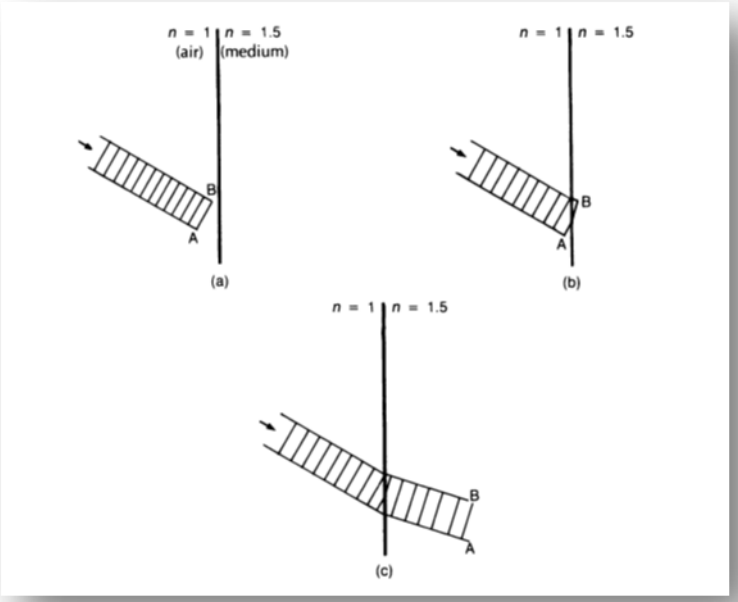
وتعتمد معاملات انكسار المواد على الطول الموجي للضوء بشدة ، لذلك تعتبر القيم المبينة في الجدول السابق قيماً تقريبية, فينتقل كل من الضوء الاحمر والأزرق في الفضاء بالسرعة ذاتها ، ولكن الضوء

الاحمر ينتقل بسرعة اكبر عند مروره بماده شفافة كالزجاج مثلاً ، وتسمى هذه الظاهرة بالتفريق Dispersion .

وفيما يلي جدول بمعامل انكسار بعض المواد الشفافة.

المادة	معامل الانكسار n
الهواء الجاف	1.0003
زجاج الكروان	1.517
الماس	2.419
الياك YAG	1.825
الجليد -8^0	1.31
الماء 20^0	1.33

ان تغيير سرعة الضوء عند انتقاله من مادة الى اخرى يسبب انكساراً لأشعته عند السطح الفاصل بينهما. ونلاحظ في الشكل (3-1) الجبهات الموجية عند عبورها بين الفراغ وأية مادة شفافة ، ولنلاحظ جبهة الموجة AB في الشكل أ حيث يسير الضوء بسرعة مقدارها C (3 *10 ^{8} متر/ ثانية), اما في الشكل ب فإن النقطه B تدخل الى المادة قبل النقطه A وهذا يؤدي الى تشوه جبهة الموجة ، والتي تستعيدها في الشكل ج. مع حصول انحراف في مسار الشعاع ككل.

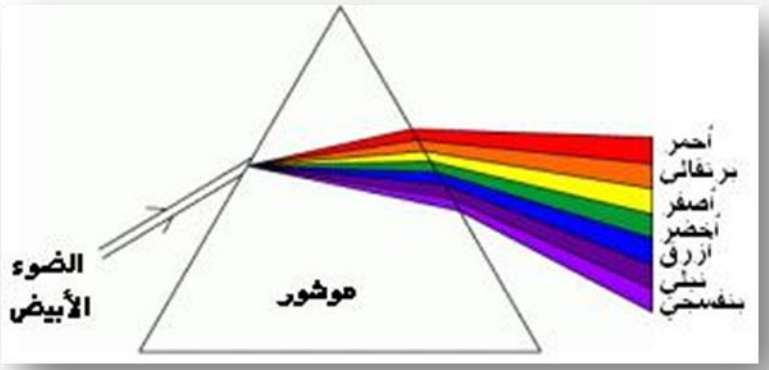


شكل 3 – 1 : انكسار جبهة الموجة الضوئية عند السطح الفاصل بين وسطين بصريين

يوضح الشكل (3-2) كيفية قيام الموشور بتفريق الضوء الابيض الى مكوناته ، حيث تصل جبهتا الضوء الاحمر والأزرق الى سطح الموشور في وقت واحد فيتباطأ الضوء الازرق اكثر قليلاً من الضوء الاحمر داخل مادة الموشور، مما يؤدي الى انكساره بزاوية اكبر من زاوية انكسار الضوء الأحمر ولذلك يخرج اللونان بزاويتين مختلفتين من الموشور.

يعتبر تردد الضوء المقياس لطاقته ، ولكون الطاقة محفوظة ، فأن الطول الموجي للضوء هو الذي يتغير اضافة لسرعته عند انتقاله من

وسط الى اخر ، وهذا التغير يتناسب مع النسبة بين معامل انكسار الوسطين.

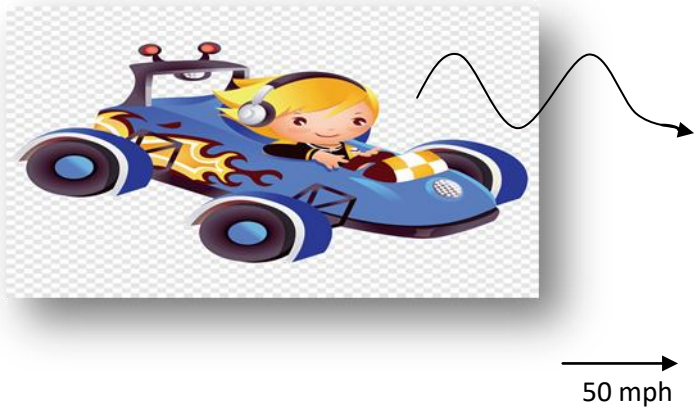


شكل 3-2 يكسر الموشور الالوان المختلفة بزوايا مختلفة لكونه عنصراً مشتتاً.

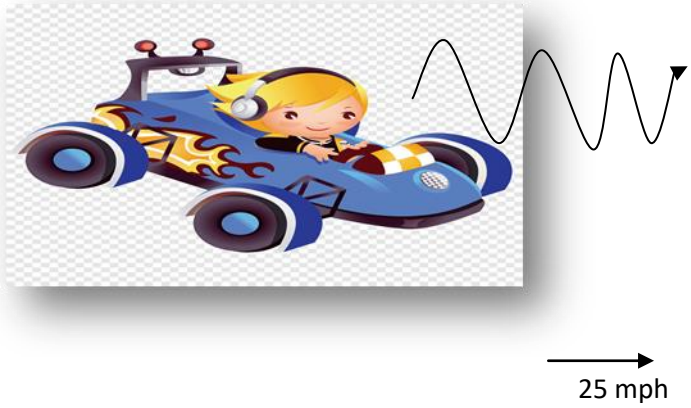
يوضح لنا الشكل (3-3) مثالاً بسيطاً على ذلك ، حيث نرى طفلاً يقفز نحو الاعلى والأسفل في المقعد الخلفي لسيارة متحركة ، يوضح لنا الشكل أ حركة انف الطفل عند حركة السيارة بسرعة 50 كم في الساعة، في حين يوضح الشكل ب الطريق الذي يسلكه انف الطفل عند حركة السيارة بسرعة 25 كم في الساعة ، اذا ما حافظ الطفل على طاقته (اي اذا ما واصل القفز بالتردد نفسه)، ونستنتج من الشكلين ان الطول الموجي في الحالة الاولى مساوٍ لضعف الطول الموجي للحالة الثانية.

ان ظاهرة تغير الطول الموجي هذه تتخذ اهمية اكبر في حالة تفريق الضوء ، حيث انه اذا دخلت موجتان ضوئيتان الى وسط شفاف وكانت الموجة الاولى تمتلك طولاً موجياً مساوياً ضعف الطول الموجي للموجة

الثانية ، فأن هذه الاطوال ستتغير وبنسب مختلفة كما في الشكل (3-4). وكما سنرى في الفصل الثالث عشر ان لهذه الظاهرة اهمية كبيرة في ميدان البصريات اللاخطية.

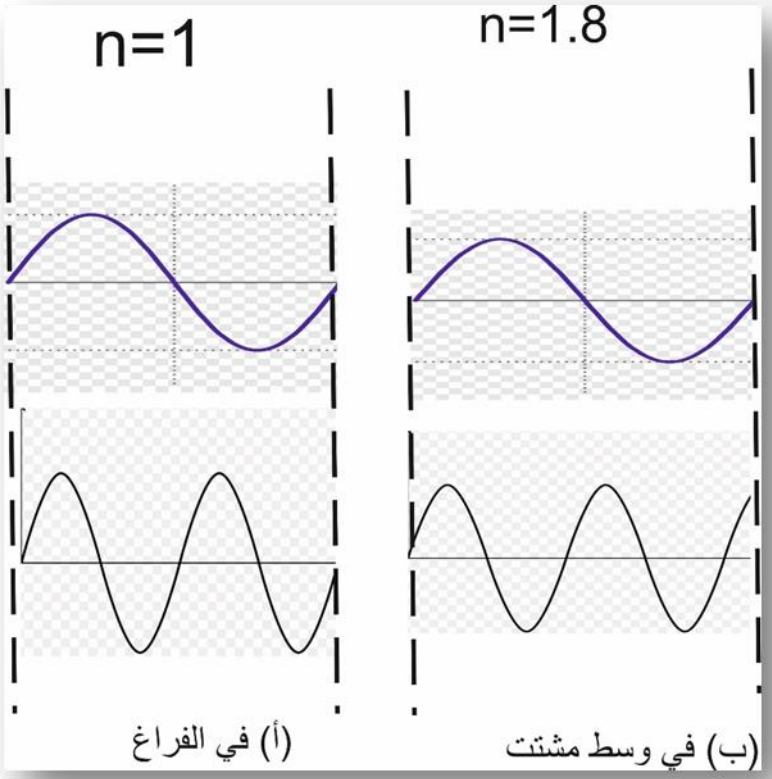


(a)



(b)

شكل 3-3 : المسار الذي يسلكه انف الطفل عند سرعة (أ) 50كم في الساعة. (ب) 25 كم في الساعة.

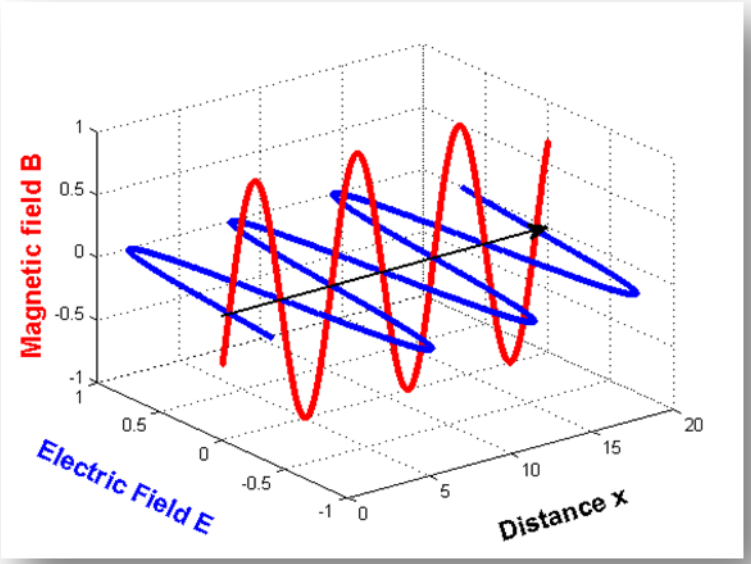


شكل 3- 4: على الرغم من كون الطول الموجي للأول هو ضعف الطول الموجي للثاني في الفراغ ، لا يكون كذلك في الوسط الشفاف المشتت

الاستقطاب Polarization

لاحظنا مما سبق ان الضوء يتكون من مجالين كهربائي ومغناطيسي متعامدين على بعضهما بعض ، وهذان المجالان يتجهان في الفضاء بصورة عشوائية وبكل الاتجاهات (على ان يكونا متعامدين دائماً وعموديين على اتجاه سير الموجة) ، فإذا ما اجبرنا هذين المجالين للتذبذب باتجاه واحد فقط فنحصل على موجة مستقطبة مستوية ، كما في

الشكل (3-5) . الذي يحدد استقطاب اتجاه المجال الكهربائي فالاستقطاب المبين في الشكل السابق هو استقطاب عمودي لكون المجال الكهربائي يتذبذب بشكل عمودي في المستوي YZ .



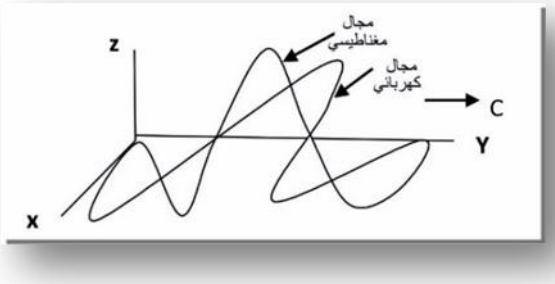
شكل 3-5 : يتكون الضوء من مجالين متعامدين ، كهربائي ومغناطيسي . والضوء مستقطب افقياً لكون مجاله الكهربائي افقياً.

اما في الشكل (3-6) فنشاهد الضوء المستقطب افقياً ، ولتبسيط المسائل سنتطرق دائماً الى المجال الكهربائي فقط ، ونعلم دائماً ان المجال المغناطيسي موجود وبشكل عمودي عليه.

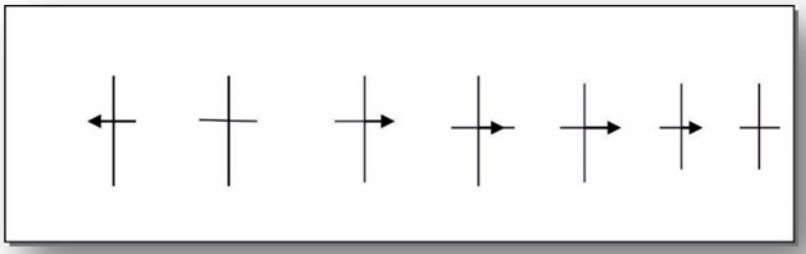
اذا ما افترضنا الموجة المبينة في الشكل (3-6) تتحرك باتجاهنا مباشرة ماذا سنرى عندما تسقط هذه الموجة على شبكية العين ؟ في بادئ

الامر لن نرى اي اثر للمجال الكهربائي مطلقاً ، ومع الزمن سنراه ينمو تدريجياً متجهاً نحو اليسار الى ان يصل الى القيمة العظمى ، ثم يبدأ بالاضمحلال الى ان يختفي تماماً ومن ثم نراه ينمو باتجاه اليمين ، كما وضح ذلك في الشكل (3-7) ، ولعدة دورات سنحصل على الصورة التي نراها في الشكل (3- 9ب) .*(العين لاترى المجال فقط للتوضيح).*

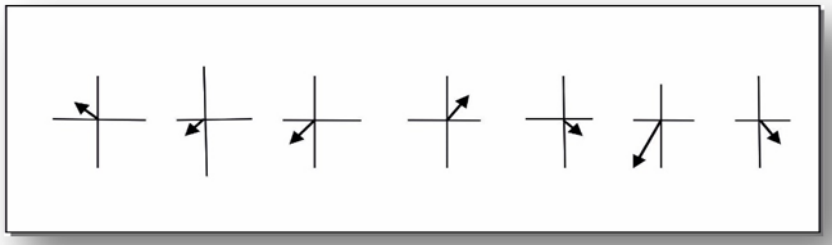
لاحظنا فيما سبق الاستقطاب المستوي او يسمى احياناً الاستقطاب الخطي وهناك نوع اخر من الاستقطاب والذي له اهمية كبيرة كبيرة في الفيزياء، وهو الاستقطاب الدائري ، والذي يشكل متجه المجال الكهربائي فيه منحنياً دائرياً عندما تتحرك الموجة باتجاهنا مباشره كما في الشكل (3-10) ولدورات عديدة سيكون تصرف المجال الكهربائي كما هو موضح في الشكلين (3-11 و3-12) . والاستقطاب الدائري على نوعين، استقطاب باتجاه حركة عقارب الساعة ، واستقطاب باتجاه معاكس لحركة عقرب الساعة.



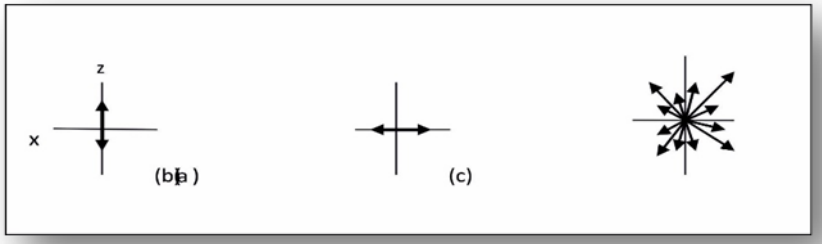
شكل 3-6 : شعاع ضوئي مستقطب



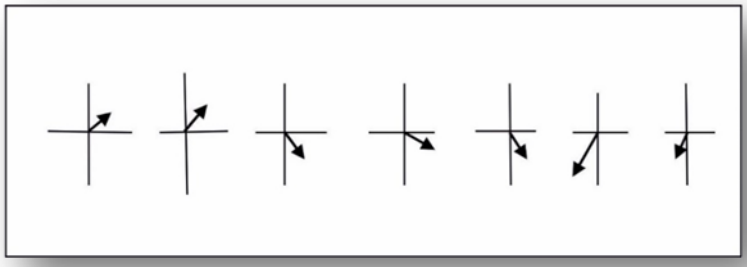
شكل 3-7: ماذا يشبه المجال الكهربائي للموجة في الشكل 3-6 وهي تمر من امامنا ؟ كل صورة في وقت معين



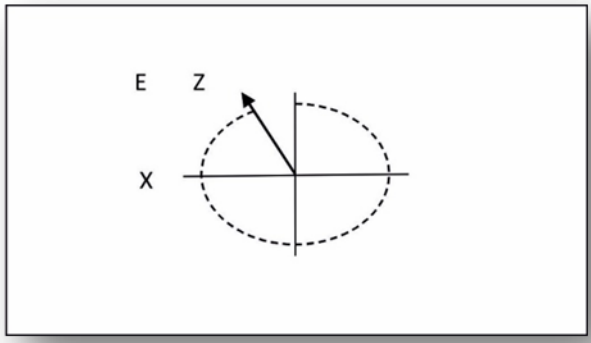
شكل 3-8 : ماذا يشبه المجال الكهربائي لشعاع ضوئي غير مستقطب وهو يبتعد عنك



شكل 3-9: شكل المجال الكهربائي ل (a) ضوء مستقطب عمودياً قادم نحونا، (b) ضوء مستقطب افقياً و(c) ضوء غير مستقطب.



شكل 3-10 : ماذا يشبه المجال الكهربائي لضوء مستقطب دائرياً وبأتجاه عقارب الساعة ، وهو يبتعد عنا



شكل 3-11 : ضوء مستقطب دائرياً يتجه نحونا.

شكل 3-12 : المسار الذي يرسمه رأس متجه المجال الكهربائي في الضوء المستقطب دائرياً

مركبات الاستقطاب Polarization components

لكي نفهم كيف يتعامل الضوء المستقطب مع الاجهزة المختلفة ، كألواح تدوير ربع طول الموجة Quarter wave plate وخلية بكل Pockls Cell والمرشحات المزدوجة Birefringent Filters وغيرها، فمن الضروري ان نفهم كيفية تكون الضوء من مركبتي الاستقطاب المتعامدين.

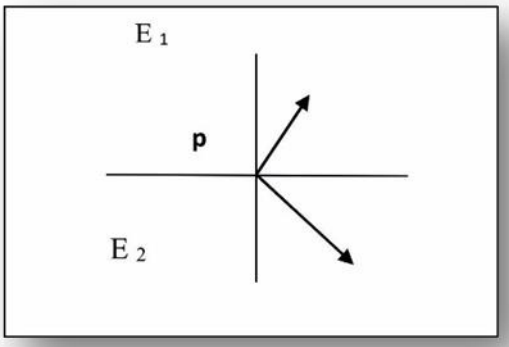
لنفترض انه في نقطة ما في الفضاء تتواجد مجالات كهربائية كما في الشكل (3 -13) . ان هذين المجالين يكافأن مجالاً كهربائياً واحداً وهو الذي يمثل المجموع ألاتجاهي للمجالين الأصليين ونستطيع ان نرسم المجالين مرة اخرى بحيث تكون بداية المجال الثاني من نهاية المجال الاول وبدون تغير في اتجاههما كما في الشكل (3-14) .

ويمكن ان نتعامل مع المجالين بصورة منفردة او مع مجموعهما ألاتجاهي، لنحصل على النتيجة ذاتها. وهذه الحالة تنطبق على اي مجالين اخرين كما في الشكل (3-15) ، وبمعنى اخر فان الاشكال (3-14) او (3-15) و(3-16) تمثل ثلاث طرق مختلفة لتمثيل الحالة الفيزيائية نفسها.

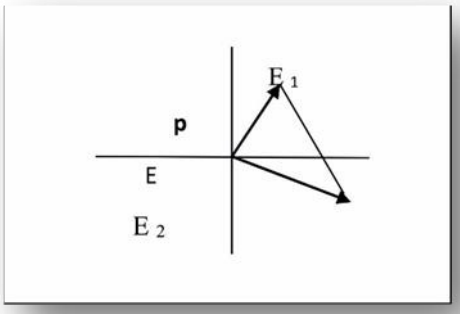
ولنلق الان نظرة على الشكل (3-16) والذي يمثل مجالين كهربائيين (وهذا يختلف عن الشكل (3-6) الذي يمثل مجالين كهربائياً ومغناطيسياً لموجة ضوئية واحدة).

وفي اي نقطة على المحور Y يكافأ المجالان بمجموعهما ألاتجاهي الذي يبدو عند سقوطه مباشره على العين مماثلاً لموجة ضوئية ذات استقطاب مستوٍ انظر الشكلين (3-17)و(3-18).

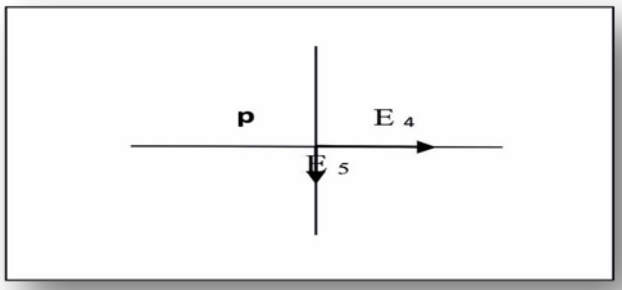
وتمثل الاشكال (3-16) و(3-17) و(3-18) طرقة مختلفة للحالة الفيزياوية نفسها.



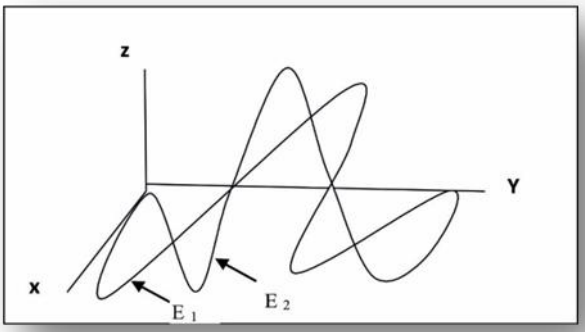
شكل 3-13 : مجالان كهربائيان في نقطة في الفضاء



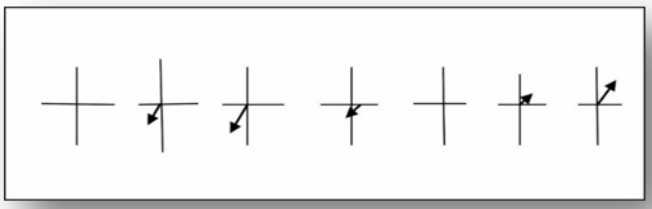
شكل 3-14 : لايجاد مقدار E ، حاصل الجمع ألاتجاهي للمتجهين E_1 و E_2 في الشكل 3-13 وصل نهاية E_1 ببداية E_2 دون تغيير الاتجاه.



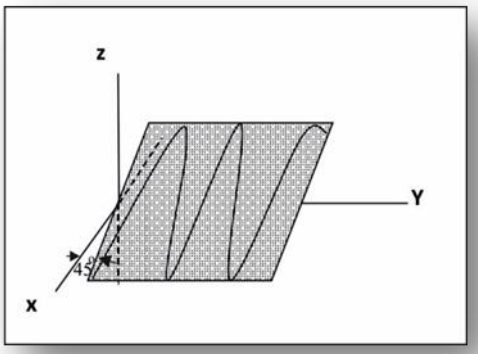
شكل 3-15: لهذين المتجهين المجموع ألاتجاهي نفسه للمتجهين E_1 وE_2 في الشكل 3-13.



شكل 3-16 : موجتان كهربائيتان ، مجموعهما الجبري موجة مستقطبة خطيا

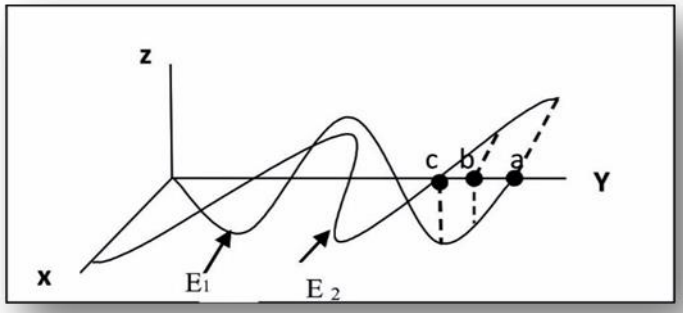


شكل 3-17 : ماذا سيشبه المجموع ألاتجاهي للموجتين في الشكل 3-16 : وهو يبتعد عنا

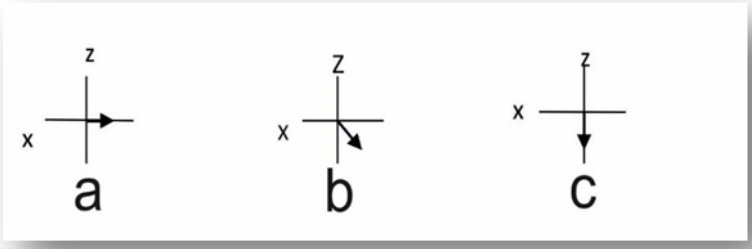


شكل 3-18 : اضافة الموجتين في الشكل 3-16 في جميع نقاطهما لنحصل على مجال يشابه هذا الشكل.

نستنتج من الكلام السابق ان الموجة الضوئية ذات الاستقطاب المستوي هي عبارة عن المجموع ألاتجاهي لمركبتين متعامدتين لهما الطور نفسه. ولننظر الان ماذا يحدث لو ان المركبتين المتعامدتين مختلفتين في الطور بمقدار 90^0 كما هو واضح في الشكل (3-19). لنأخذ ثلاث نقاط على المحور Y ونتفحص شكل المجموع ألاتجاهي للمركبتين ، والمبين في الشكل (3-20) والذي يكافئ موجة ذات استقطاب دائري. فسنجد ان الموجة الضوئية ذات الاستقطاب الدائرة هي عبارة عن المجموع ألاتجاهي للمركبتين المتعامدين واللتين بينهما فرق في الطور مقداره 90^o اي اننا نستطيع ان نحول الضوء المستقطب خطياً الى ضوء ذي استقطاب دائري بتغيير طور المركبتين المتعامدتين باستخدام لوح تدوير ربع طول الموجة ، لان للمواد المستخدمة فيها معاملي انكسار مختلفين للمركبتين

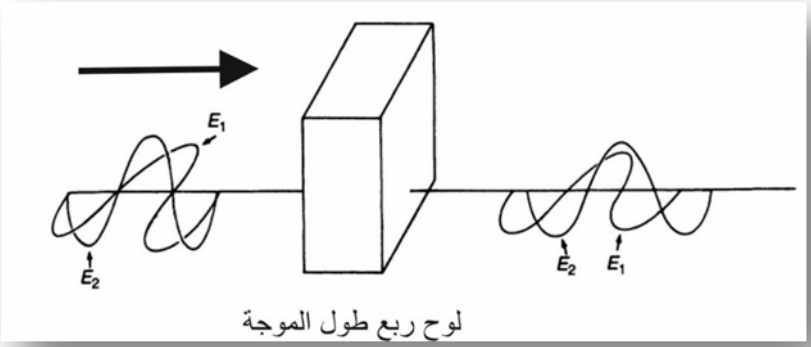


شكل 3- 19 : موجتان كهربائيتان ، مجموع متجهيهما موجة مستقطبة دائرياً



شكل 3 - 20 : ماذا يشبه المجموع الجبري للموجتين في الشكل 3-19 وهو يبتعد عنا

العمودية والأفقية من الضوء المستقطب ، ولاعتماد سرعة الضوء داخل المواد على معامل الانكسار ، لذلك تسير المركبتان بسرعتين مختلفتين (شكل 3-16) ، ونتيجة لذلك ينشأ فرق في الطور بين المركبتين عند خروجهما (شكل3 -19) ونلاحظ ذلك ايضاً في الشكل (3-21) اذ اختير سمك المادة بحث يصبح الفرق بين المركبتين مساوياً ربع الموجة.



شكل 3- 21: يغير ربع طول الموجة الضوء المستقطب خطياً الى ضوء مستقطب دائرياً ، وذلك بتأخير احدى مركبتي الاستقطاب بمقدار ربع طول الموجة على المركبة الاخرى.

زاوية بروستر Brewster's angle

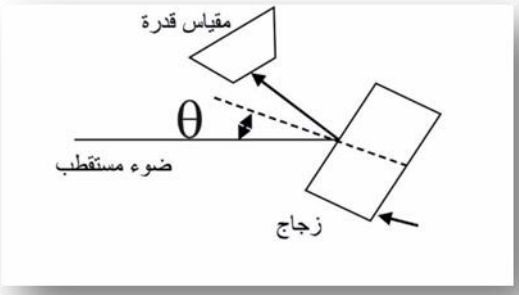
عندما ننظر الى زجاج النافذة او اي لوح زجاجي صقيل ، نلاحظ انعكاس صورتنا عليه ، وهذا ناتج من انعكاس الضوء من السطح الفاصل بين الهواء والزجاج ، وتعتمد نسبة الاشعة المنعكسة من اللوح الزجاجي الاعتيادي 8% تقريباً (4% من سطح الهواء مع الزجاج ، و4% من سطح الزجاج مع الهواء)وتعتمد كمية الضوء المنعكس كذلك على زاوية سقوط الشعاع وعلى كون الضوء مستقطباً ام لا.

فإذا ما اخذنا لوحاً زجاجياً صقيلاً وأسقطنا عليه ضوءً مستقطباً ، ومن ثم نقيس كمية الضوء المنعكس كدالة لزاوية السقوط ، كما في الشكل (3-22). فما النتائج التي سنحصل عليها ؟ يوضح الشكل (3-23) النتائج التي نحصل عليها اذا ما استخدامنا ضوءً مستقطب بشكل عمودي ،

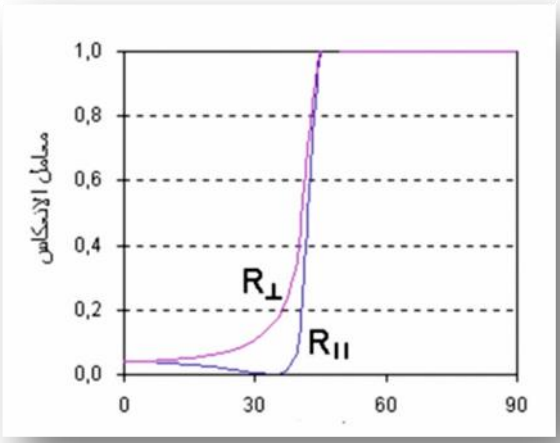
وكذلك ضوء اخر مستقطباً بشكل افقي ، والفرق بين الاثنين واضح جداً ، حيث نلاحظ ازدياد الضوء المستقطب افقياً ببطء بزيادة زاوية السقوط الى ان تصل الى الصفر عند زاوية 57 ^{0} تقريباً (بالنسبة للزجاج الاعتيادي) ثم تزداد ثانية وبحدة عندما تقترب زاوية السقوط من الزاوية القائمة. وتسمى زاوية السقوط التي يكون الانعكاس فيها مساوياً الصفر زاوية بروستر ، وهذه تعتمد على النسبة بين معاملي انكسار الوسطين . وتحسب كآلاتي:

$$\tan \theta = n_2 / n_1$$

حيث تمثل θ زاوية بروستر n_1 و n_2 معاملي انكسار الوسطين. وتستخدم زواية بروستر هذه مع اجهزة الليزر للإقلال من الفقدان للضوء المستقطب افقياً، ليصل الى حد الصفر ، وايصال الفقدان في الضوء المستقطب عموديا الى حد لا يتجاوز ال 30% (15% من كل جانب من جانبي اللوح المستخدم كنافذة).



شكل 3-22 : تجربة لقياس انعكاسية قطعة من الزجاج كدالة لزاوية السقوط.



شكل 3 – 23 : الانعكاسية من سطح الزجاج مع الهواء كدالة لزاوية السقوط

شدة الاضاءة **Brightness**

عندما نقول ان هذا المصدر اكثر اضاءة من ذلك المصدر ، فأننا نعني ان هذا المصدر يولد شدة اكثر من الاخر على شبكية العين عند النظر اليه وشدة الضوء الواصلة الى الشبكية تعتمد على شدة المصدر الضوئي وعلى المساحة التي ينتشر بها الضوء بعد خروجه من المصدر.

يدعى انتشار الضوء بعد خروجه من المصدر بالانفراج ، ويقاس بالزاوية المجسمة والتي يمكن لها ان تتخذ اي شكل منتظم او غير منتظم كما تبدو في الشكل (3-24) . والزاوية المجسمة تساوي النسبة بين مساحة السطح المقابل لها ومربع نصف قطر السطح الكروي الذي يكون هذا السطح جزءاً منه . وبذلك تكون عديمة الوحدات.

وتعرف شدة اضاءة المصدر الضوئي في الفيزياء ، بأنها نسبة شده المصدر الى مقدار الزاوية المجسمة .

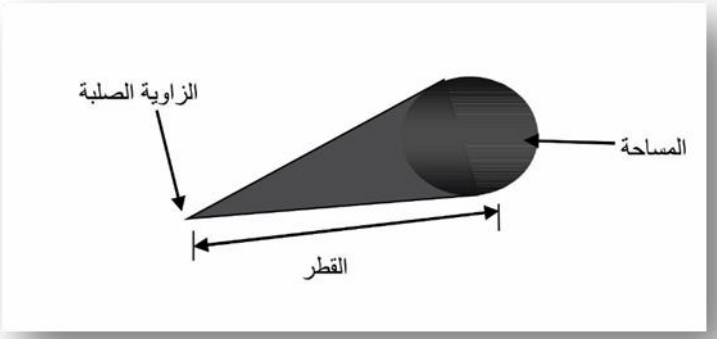
$$B = \frac{P}{A\Omega}$$

حيث تمثل P قدرة المصدر

A مساحة المقطع العرضي

Ω الزاوية المجسمة

ان وحدات شدة الاضاءة هي W/Cm^2 اي انها تحمل وحدات شدة المصدر الضوئي نفسها ولكن الاختلاف بينهما ، هو عدم اعتماد الشدة على مقدار زاوية الانفراج.



شكل 3-24 : الزاوية الصلبة

الاسئلة

1- هناك 2π من الزوايا القطرية في الدائرة . كم هي عددها في الكرة؟

2- احسب شدة الاضاءة لمصدر ذي واط واحد وقطر مقداره سنتمر واحد، والذي يشع بزاوية مقدارها 10^{-6} زاوية قطرية صلبة . اعد الحسابات لزاوية مقدارها $10X2^{-6}$ ولزاوية 10^{-6} ولكن لقطر مقداره 2 سنتمتر.

3- تحجب النظارات الشمسية المستقطبة اشعة الشمس المنعكسة من الاسطح الافقية (الشوارع وغيرها) افضل من النظارات الاعتيادية باستخدام المعلومات المبينة في الشكل (3-21) علل ذلك. هل تعكس النظارات الاستقطاب العمودي ام الافقي؟

4- اذا كانت لديك نظارتان مستقطبتان ونظرت من خلالهما وهما متعامدتان (وبذلك تحجب احداهما الضوء العمودي الاستقطاب بينهما تحجب الاخرى الافقي الاستقطاب) ماهي كمية الضوء التي تنفذ من خلال المجموعة ؟ اذا ما وضعنا الان نظارة ثالثة بين النظارتين وبزاوية مقدارها 45 درجة مع الافق . فماذا يمكن لنا ان نرى من خلال المجموعة؟ (ملاحظة : " لا شئ"جواب خاطئ . اشرح لماذا؟)

5- يزحف لوح نصف طول الموجة احدى مركبتي الاستقطاب بمقدار نصف طول الموجة نسبة للمركبة الاخرى. اذا ما استعيض عن لوح ربع طول الموجة في الشكل (3-19) بلوح نصف طول الموجة . كيف

سيكون شكل الاستقطاب للضوء الخارج من الجهة الاخرى للوح ؟ وبماذا سيختلف عن شكل الاستقطاب للضوء الداخل؟

افترض ان الضوء الداخل الى لوح نصف طول الموجة هو ضوء مستقطب دائرياً وباتجاه عقارب الساعة . كيف سيكون شكل استقطابه في الجانب الاخر من اللوح . وبماذا سيختلف عن الضوء الداخل؟

6- يرسم رأس متجه المجال الكهربائي شكلا اهليجياً (بدلاً من الشكل الدائري ، كما في الشكل (3-10) في الضوء المستقطب اهليجياً. اشرح كيف يمكن تحليل الضوء المستقطب اهليجياً الى مركبتين متعامدتين. وما هي العلاقة بين طوري المركبتين؟

7- اشرح طريقة سريعة وسهلة للكشف عن استقطاب ضوء الليزر باستخدام شريحة مايكروسكوب . وبيان استقطابه ان كان عمودياً ام افقياً. في حالة كونه مستقطباً.

الفصل الرابع

التداخل Interference

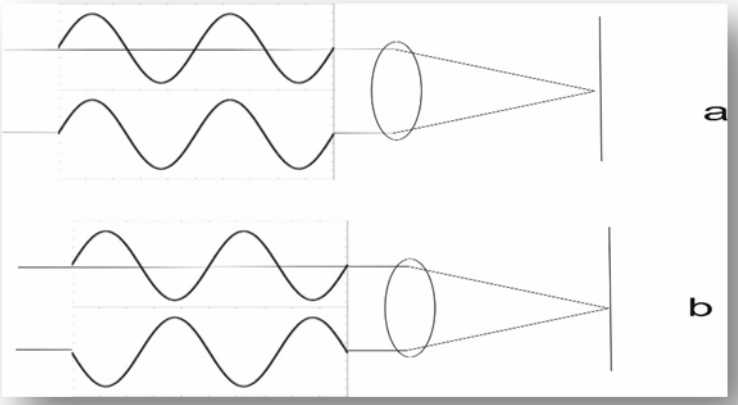
يمكن ملاحظة تأثير التداخل الضوئي بواسطة الضوء الاعتيادي (غير المتشاكه) كما يمكن ذلك باستخدام اشعة الليزر المتشاكة، وتفسر هذه الظاهرة بالاعتماد على الطبيعة الموجية للضوء فقط ، وسندرس في هذا الفصل تفاصيل هذه الظاهرة ونتطرق الى بعض الامثلة التي نستلهمها من حياتنا اليومية ، وأخيراً سنعرض مثالين مهمين لهذه الظاهرة في تكنولوجيا الليزر ، وهما : تجربة يونك ذات الشق المزدوج ، والتي تعتبر الاساس في تفسير الظاهرة الصوتية – الضوئية ، والهولوغرافي وتجربة فبري بيروت ، والتي تعتبر اضافة لأهميتها الذاتية مشابهة في عملها لعمل مرنان أللليزر الذي سنأتي عليه ضمن فصل لاحق.

ما التداخل الضوئي؟ What is Optical Interference?

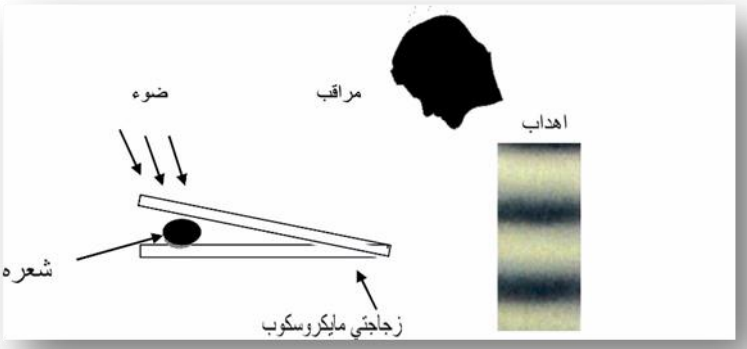
تتداخل الموجات الضوئية فيما بينها عند تقاطعهما في الفضاء ، فيحصل الجمع الجبري للمجالات الكهربائية لها ، ويكون بذلك التداخل هدام اذا ما كانت في طور مختلف ، وبناء اذا ما كانت في طور واحد . ونلاحظ ذلك في الشكل (4-1 أ) حيث ان الموجتين في طور واحد ونحصل على بقعة مضيئة على الشاشة. وأما في الشكل (4- 1 ب) ولكون الموجتين بطور مختلف فلا نحصل اي اضاءة على الشاشة.

من ابسط الامثلة على التداخل الضوئي المثال المبين في الشكل (4-2)، فإذا ما باعدنا أحد طرفي شريحتي الميكروسكوب الموضوعتين فوق

بعضهما قليلاً (بوضع شعرة صغيرة بينهما) ، وأضأناهما كما في الشكل نحصل على سلسلة من الخطوط المضيئة والمظلمة ، وهذا يعني ان الموجتين قد تداخلتا فيما بينهما على شبكية العين.



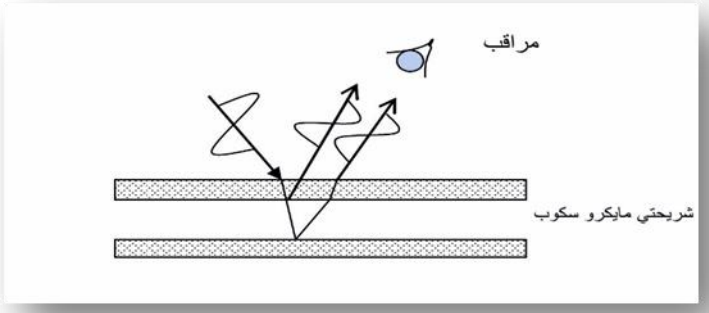
شكل 4-1: تداخل ضوئي ، بناء (أ) وهدام (ب).



شكل 4-2 : تجربة التداخل الضوئي حيث يمكن مشاهدة ازواج من الاهداب المضيئة والمظلمة كم نراها في الجهة اليمنى من الشكل.

ونلاحظ في الشكل (4-3) مصدر الموجتين ، حيث تصدر الاولى من الشريحة العليا ، والأخرى من الشريحة السفلى (هذا بإهمال الانعكاس من

السطحين الاخرين للشريحتين واللذان يعملان بالمبدأ نفسه) وتسقط الموجتان على شبكية العين بواسطة عدستها.



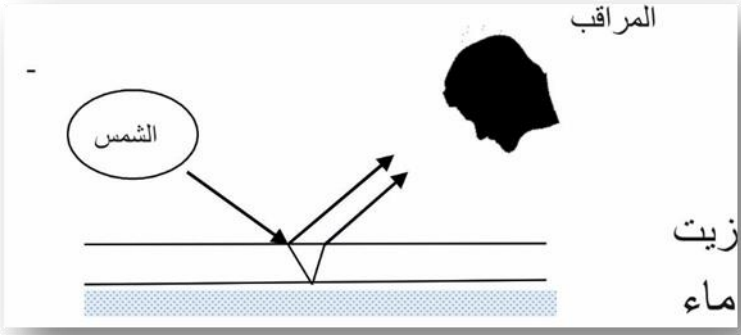
شكل 4-3 : اذا ما كان فرق المسار بين الموجتين مساوياً لعدد صحيح من الاطوال الموجية يكون التداخل بناء

صدرت الموجتان في مثالنا السابق من موجة واحدة ، شطرت الى جزئين نتيجة الانعكاس الجزئي للشريحة العليا ، فبذلك تكون الموجة المنعكسة من الشريحة السفلى قد قطعت مسافة اطول قبل ان تصل الى عين المشاهد. ولفرق المسار هذا اهمية كبيره في عملية التداخل ، فإذا ما ساوى عدداً صحيحاً من الاطوال الموجية سيحصل تداخل بناء للموجتين، اما اذا ما ساوى عدداً صحيحاً من الاطوال الموجية مضافاً اليه نصف الطول الموجي ، فسنحصل على تداخل هدام للموجتين وذلك لاختلاف الطور بينهما تماماً. لاحظنا في الشكل (4-3) تداخلاً بناء ، ولكن اذ ما تحركنا قليلاً فسنلاحظ تداخلاً هداماً ، وهذا ناتج من اختلاف فرق المسار بين الموجتين ، لذلك وباستمرار تحركنا سنلاحظ سلسلة من الاهداب المضيئة والمظلمة ، كالتي لاحظناها في الشكل (4-2).

امثلة يومية على التداخل الضوئي
Everyday Examples of Optical Interference

اذا ما شاهدنا يوماً الالوان الزاهية الناتجة من طبقة زيت مرشوشة على سطح بركة ماء ، او تلك التي تظهر على جوانب فقاعات الصابون ، فأننا نكون قد شاهدنا التداخل الضوئي الناتج من الاغشية الرقيقة. فوجود طبقة الزيت الرقيقة (شكل 4-4) على سطح اناء فيه ماء ، يؤدي الى انعكاس اشعة الشمس من السطح الفاصل بين الهواء والزيت ، وكذلك من السطح الفاصل بين الزيت والماء ، وبذلك تحصل عملية التداخل بين الموجتين، فنحصل على تداخل بناء عندما يكون فرق المسار بين الموجتين مساوياً عدداً صحيحاً من الاطوال الموجية ، وبذلك نرى احد الالوان عندما ننظر بزاوية معينة حيث نرى اللون الاحمر مثلاً عندما يكون فرق المسار مساوياً عدداً صحيحاً من طوله الموجي ، وعند تغيير زاوية النظر نشاهد لوناً اخر نتيجة لتغير فرق المسار الضوئي بين الشعاعين. وينطبق المبدأ ذاته على فقاعة الصابون ، حيث يكون احد الانعكاسات من السطح الخارجي للفقاعة بينما يكون الاخر من السطح الداخلي لها.

اذا ما نظرنا الى صورة فوتوغرافية امام اشعة الشمس ، نشاهد الوان الطيف الشمسي تنعكس نحونا عند تحريكها ، وهذا ناتج من حيود اشعة



شكل 4-4 : التداخل الضوئي الناتج من الاغشية الرقيقة

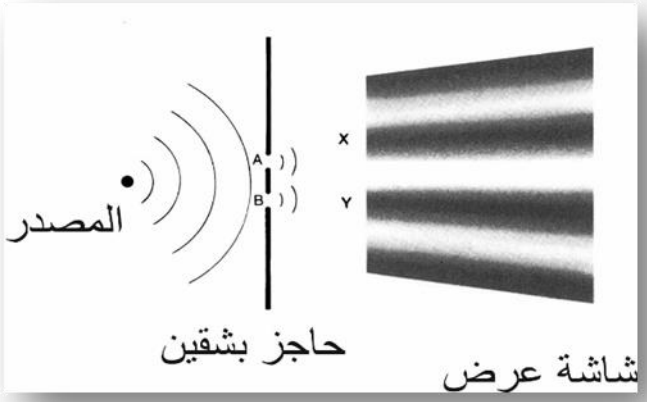
الشمس من الخطوط الموجودة على سطح الصورة ، اذ بتحريكها يتغير فرق المسار الضوئي الواصل الى العين وبذلك نحصل على تداخل هدام او بناء اعتماداً على الطول الموجي للأشعة. وعمل الصورة هنا عمل المحزز والذي سيوضح مفصلاً في الفصل الحادي عشر. وهناك انواع من المحززات التي تصنع على شكل لصقات تلصق على زجاج وابدأن السيارات ، بحيث تتغير الوانها بمجرد تغير زاوية النظر ، وهناك الكثير من انواع الحلي الصناعية تستخدم هذه الظاهرة لنحصل منها على الوان زاهية.

تجربة يونك ذات الشق المزدوج
Young's Double –Slit Experiment

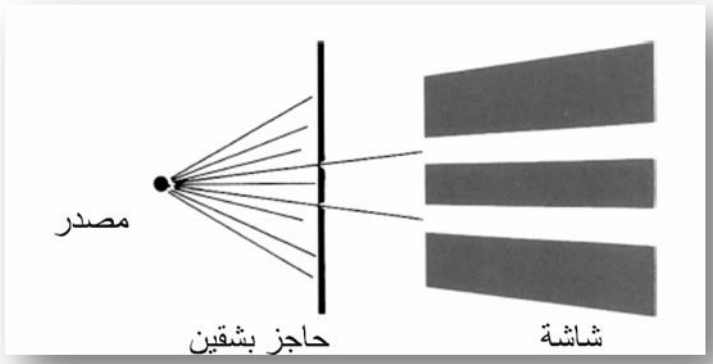
اذا ما وضعنا قطعة من الورق السميك تحتوي على شقين متقاربين امام مصدر ضوئي احادي اللون كما في الشكل (4-5) فنحصل على الشاشة التي نضعها امامها سلسلة من الخطوط المضيئة بدلا من صورة للشقين

كما نتوقع ان نراها شكل (4-6). ويكون اكثرها اضاءة في منتصف الشاشة ، في المكان الذي نتوقع ان يكون مظلماً(الشكل 4-6).

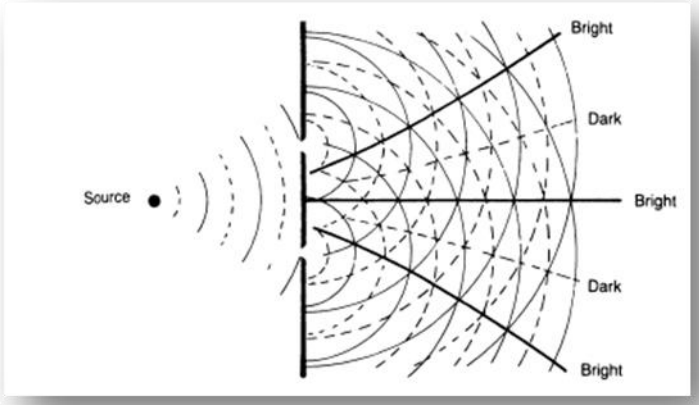
وهذه النتيجة كغيرها من نتائج التداخل لا يمكن تفسيرها الا بالتفسير الموجي للضوء ، فقد لاحظنا كيف تتداخل الموجات الصادرة من مصدرين على سطح الماء (الفصل الثاني الشكل 2-6)، وهذا ما يحدث في عملية تداخل الموجات الضوئية، ونلاحظ ذلك في الشكل (4-7) حيث يوضح الشكل الموجات الساقطة على الشقين وكذلك الخارجة منهما . وعند نقاط التقاء قمم هذه الموجات نحصل على التداخل البناء ، وهذا ما يحدده الخط السميك في الشكل ، والذي يعين المناطق المضيئة على الشاشة الموضوعة امام الشقين. ويحدد الخط المنقط المناطق المظلمة على الشاشة والناتجة من التقاء قمة احدى الموجتين مع قعر الاخرى



الشكل 4-5: تجربة يونك ذات الشق المزدوج



شكل 4-6 :اذا لم يسلك الضوء السلوك الموجي ، سنشاهد خطين مضيئين على الشاشة



شكل 4-7 : يفسر التداخل وظهور الخطوط المضيئة والمظلمة اعتماداً على النظرية الموجية للضوء.

اما الشكل (4-8) فهو يوضح لنا طريقة اخرى لتفسير الظاهرة حيث تنقسم الموجة الساقطة بواسطة الشقين الى موجتين تتجهان نحو الشاشة الموضوعة امام الشقين ، ويصل الشعاعان النقطة P1 الواقعة في

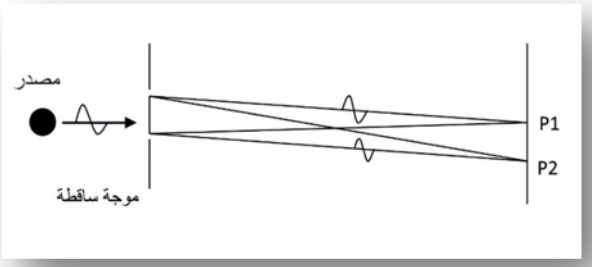
منتصف الشاشة بعد ان يقطعا المسافة نفسها ، وبذلك يكونان بطور واحد، ويتداخلان تداخلاً بناءً ، لنحصل على منطقة مضيئة في النتيجة. اما النقطة P2 والتي تقع في الاسفل قليلا عن منتصف الشاشة ، فأن الاشعة الواصلة اليها من احد الشقين تقطع مسافة اكبر من الاشعة الواصلة من الشق الاخر، وبذلك تكون اقل اضاءة من النقطة P1 او تكون مظلمة تماماً ، اعتماداً على فرق الطور بين الموجتين.

كيف يتم توزيع الضوء بين النقطتين P1 المضيئة وP2 المظلمة ؟. كلما تحركنا من النقطة P2 باتجاه النقطة P1 تصبح الشاشة اكثر اضاءة، حيث يتقارب طورا الموجتين من بعضهما ، وكذلك الحال بالنسبة للنقاط الاخرى على الشاشة ، حيث نجد مناطق مضيئة جداً وأخرى اقل اضاءة، ومناطق اخرى مظلمة ، اعتمادا على فرق الطور بين الموجتين الواصلتين الى تلك النقطة ، وبذلك تبدو الشاشة كما في الشكل (4-5) تماماً. لنعود ثانية الى الشكل (4-8) لحساب موقع المناطق المضيئة والمناطق المظلمة على الشاشة ، بافتراض ان المسافة بين الشقين والشاشة اكبر كثيراً من المسافة بين الشقين ، وبذلك يمكن اعتبار مساري الموجتين متوازيين تقريباً كما موضح في الشكل (4-9) وبالاعتماد على الزاوية يمكن حساب المسافة التي يقطعها الشعاع العلوي اكثر من تلك التي يقطعها الشعاع السفلي ، فأذا ما ساوى هذا الفرق عدداً صحيحاً من الاطوال الموجية نحصل على تداخل بناء (اضاءة) عند نقطة التقاء الشعاعين على الشاشة واذا ما نظرنا الى المثلث في الشكل (4-9)

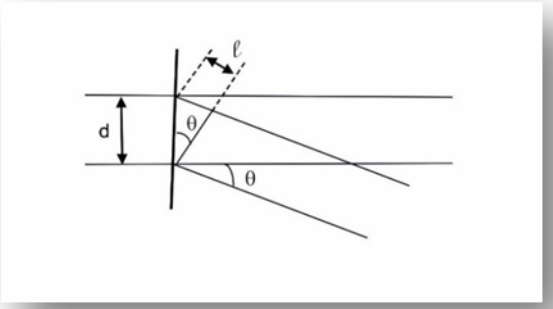
نلاحظ ان $l = d \sin \theta$. حيث تمثل d المسافة بين الشعاعين ، اي البعد بين الشقين و l فرق المسار.وبذلك يمكن كتابة المعادلة بالشكل التالي:

$$n \lambda = d \sin \theta$$

لتعيين المناطق المضيئة على الشاشة في حالة كون n مساوياً الى عدداً صحيحاً.



شكل 4-8 : تعتمد اضاءة الشاشة على فرق المسار بين الشعاعين الصادرين من الشقين

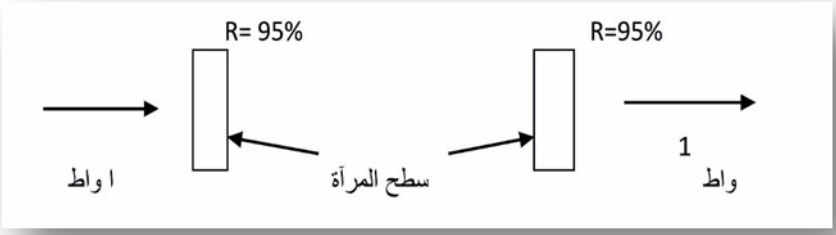


شكل 4- 9 : شكل مكبر لتجربة يونك الصوررة من كتاب هيرتز افضل

المتداخلات المتوازية (فبري بيروت)

Fabry –Perot Interferometer

اذا ما وضعت مرآة عاكسة للضوء بنسبة 95% امام اخرى عاكسة تماماً ، لا نتوقع مرور اي جزء من الضوء الساقط على المجموعة . على كل حال لندرس هذه الحالة بشيء من التفصيل ، اذ نلاحظ في الشكل (4-10) ان الضوء الساقط على المنظومة ينفذ بكامله.



شكل 4-10 : اذا اصبحت المتداخلة المتوازية في حالة رنين فأنها تمرر الضوء الساقط عليها دون فقدان اي جزء ، ومن دون الاعتماد على انعكاسية المرآتين.

تمرر المجموعة المكونة من هاتين المرآتين الضوء الساقط عليهما في حالة تكوينهما مرناناً لذلك الطول الموجي. اي عندما تكون بحلة رنين مع تردد الضوء الساقط عليها ، ولتفسير ذلك لنرى ماذا يحدث بين المرآتين.

اذا ما كانت انعكاسية المرآتين هي 95% فأن الضوء الساقط على المرآة الاولى M1 يمر منه 5% فقط الى داخل المتداخلة ، ولكون انعكاسية المرآة الثانية عالية ايضاً فبذلك سيبقى جزء من الضوء يتذبذب بين المرآتين ذهاباً واياباً ، كما في الشكلين (4-11) ، و(4-12)، حيث

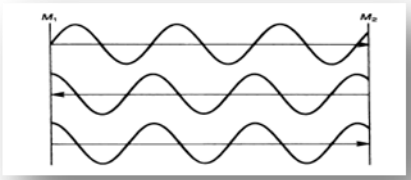
تملأ الموجات الحيز بين المرآتين . ولكون المتداخلة المبينة في الشكل (4-11) ليست في حالة رنين، لهذا تعمل المرآتان عمل الموقف للضوء ولا تمرر اي جزء منه.

لكي تكون المتداخلة في حالة رنين يجب ان تحتوي على اعداد صحيحة من الموجات ، اي يجب ان تكون المسافة بين المرآتين مساوية عدداً صحيحاً من انصاف الاطوال الموجية للضوء الساقط عليها كما يوضح الشكل (4-12) حيث تكون الموجات المتجهة بالاتجاه نفسه بطور واحد، وبذلك تضاف بعضها الى البعض لنحصل على موجة ذات شدة عالية ، ففي متداخلة كتلك المبينة في الشكل (4-10) هناك كمية من الضوء تقدر بعشرين واطاً تتذبذب بين المرآتين على الرغم من ان كمية الضوء الساقطة على المرآة الاولى هي واط واحد. فعند سقوط العشرين واطاً هذه على المرآة الثانية ينفذ منها واط واحد (نفاذيتها 5%) وبذلك نحصل على نفس القدرة الداخلة الى المجموعة. ولا نستغرب اذا علمنا ان كمية الضوء الباقية بين المرآتين هي 19 واطاً فقط حيث يخرج واط واحد من الجانب الاخر للمنظومة من خلال المرآة M2 ،ولكن ماذا يحدث عندما تصطدم هذه الكمية من الضوء بالمرآة الاولى M1 ذات الانعكاسية 95% ؟ فهل يعني هذا ان 5% من 19 واطاً ستمر من خلالها نحو الخارج الجواب سيكون كلا . لأنه اذا كانت هناك 0.95 واطاً (5% من ال19 واطاً) تخرج من المرآة M1 وهناك واط واحد يخرج من المرآة M2 ، سنحصل في النتيجة على منظومة تعطي قدرة مقدارها 1,95

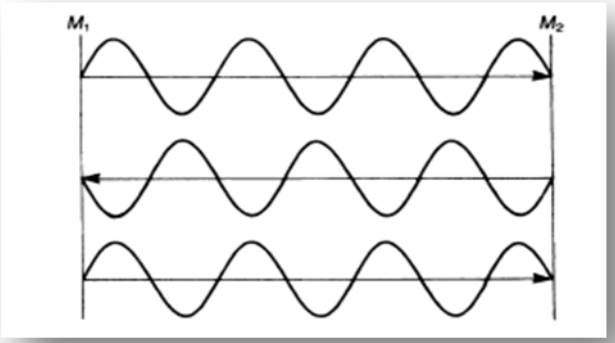
واط نتيجة قدرة داخلة فيها مقدارها واط واحد فقط وهذا غير ممكن بطبيعة الحال ، حسب قوانين حفظ الطاقة . ولكن اين ذهبت ال 0.95 واطاً هذه ؟.

احد التفسيرات لهذا ، هو ان الواط الواحد الذي سقط على المرآة الاولى نفذ منه 5% فقط وانعكست ال 95 % الباقية نحو الخارج ، وبذلك يكون 0.95 واطاً منعكسة بهذا الاتجاه من الاشعة الاولى الساقطة على المرآة، و 0.95 واط تنفذ من خلال المرآة ذاتها نحو الخارج وبالاتجاه نفسه. وفي الواقع لا نحصل على اي طاقة لكون الشعاعين السابقين بطورين مختلفين تماما بحيث يلغي احدهما الاخر . وكحصيلة نهائية فان المرآة M1 لا تعمل عمل مرآة عندما تكون ضمن متداخلة ، وفي المتداخلة المتوازية تعمل المرآتان سوية ، وكذلك المجالان الكهربائي والمغناطيسي للأشعة. ولا يمكن التعامل مع احدهما بصورة منفردة.

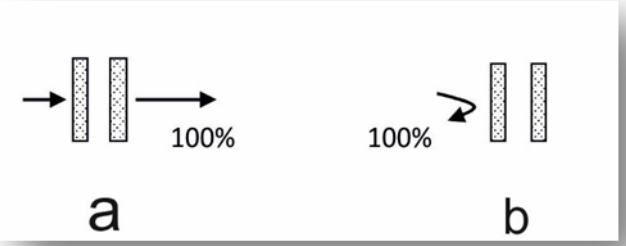
يلخص الشكل (4-13) خواص المتداخلة المتوازية ، فأذا ما كانت هذه في حالة رنين (اي المسافة بين المرآتين مساوية الى عدداً صحيحاً من نصف الطول الموجي للشعاع الضوئي) فأنها تمرر جميع الضوء الساقط



شكل 4-11 : متداخلة متوازية ليست في حالة رنين



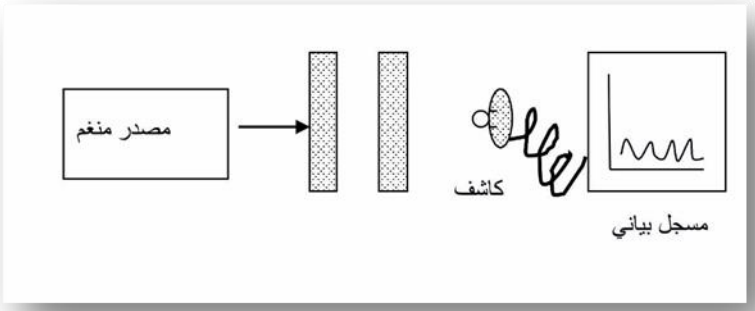
شكل 4-12 : متداخلة متوازية في حالة رنين اول منحني خطا



شكل 4-13 : أ : يمر اغلب الضوء الساقط على متداخلة متوازية اذا كانت في حالة رنين
ب: وينعكس جميعه اذا لم تكن في حالة رنين.

عليها ، دون الاعتماد على انعكاسية المرايا المستخدمة فيها ، وإذ لم تكن في حالة رنين فأنها تعكس اغلب الضوء الساقط عليها (باعتبار ان انعكاسية المرايا عالية).

باستخدام مصدر ضوئي يمكن تغيير طوله الموجي (ليزر الصبغة مثلاً) لإضاءة المتداخلة المتوازية شكل (4-14) نحصل على عدة اطوال موجية تنفذ من الجانب الاخر لها وإذا ما افترضنا ان المسافة بين المرآتين تبلغ 10000 نصف طول الموجة مثلاً ، فهذا يعني ان المتداخلة تكون في حالة رنين عند سقوط ضوء كهذا عليها ، وبإقلال الطول الموجي تدريجياً بحيث نصل الى حد يكون هناك 10001 نصف طول الموجة بين المرآتين ، في هذه الحالة ايضاً ينفذ الضوء بكامله.



شكل 4-14 :اذا ما سقط ضوء يمكن تغيير طوله الموجي على متداخلة متوازية فتمر الاطوال الموجية التي تحقق حالة الرنين جميعها

ويمكن ببساطة حساب فرق التردد بين الطولين الموجيين المتعاقبين المارين من متداخلة متوازية ، اذا ما علمنا ان حالة الرنين تكون فقط عندما تكون المسافة بين المرآتين مساوية عدداً صحيحاً من انصاف طول الموجة الساقطة ، وهذه تمثل رياضياً:

$$n\frac{\lambda}{2} = l$$

حيث λ هو الطول الموجي للضوء الساقط ، و l هي المسافة بين المرآتين، و n تمثل عدد صحيحاً ، ولحساب الطول الموجي لحالة الرنين :

$$\lambda = \frac{2l}{n}$$

وكما لاحظنا في الفصل الاول F= C/λ فان تردد الضوء لحالة الرنين n هو :

$$fn = n\ \frac{c}{2l}$$

وبذلك فان فرق التردد بين حالتي الرنين السابقتين هو :

$$fn + 1 = (n + 1)\frac{c}{2l}$$

وعليه نستنتج ان فرق التردد يعتمد فقط على المسافة بين المرآتين .

$$\Delta f = \frac{c}{2l}$$

الاسئلة

1- في تجربة يونك ذات الشق المزدوج ، احسب المسافة من مركز المنطقة المضيئة الوسطى والحلقة المضيئة التي تليها على الشاشة التي تبعد متر واحد عن الشقين ،والمسافة بين الشقين هي 1.0 ملم. ومضائين بشعاع ليزر هليوم نيون (632.8 نانومتر).

2- استخدمت مع متداخلة فبري- بيروت مرآتين اعلى انعكاسية لهما في الطولين الموجيين 488 نانوميتر و532 نانومتر. احسب فرق التردد بين القمتين المارتين من خلالهما لكلا الطولين الموجيين . اذا كانت المسافة بين المرآتين هي سنتمتر واحد . هل اصابتك الدهشة عندما لاحظت النتيجة ؟ كم ستكون المسافة بين القمم اذا استخدمنا ليزر الهليوم– نيون ذو ال 632.8 نانومتر؟

3- اذا ما اضيئت متداخلة فبري بيروت بليزر نيودميوم / ياك الذي طول موجته 1.064 مايكرومتر ، فما هو الطول الموجي الدقيق المقارب لل 1.064 مايكرون الذي يمر ؟ كم هي عدد انصاف الموجات الموجودة بين المرآتين ؟ افترض ان الطول الموجي قد قلل بحيث يمكن وضع نصف طول موجة اخر بين المرآتين. فما هو الطول الموجي هذا ؟ وكم سيختلف عن الطول الموجي السابق ؟ ماهو فرق التردد بين الحالتين للضوء النافذ؟

الفصل الخامس

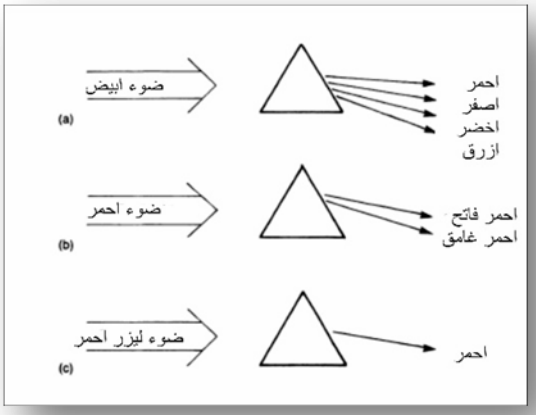
اشعة الليزر Laser Light

بينا في الفصول السابقة بعض خواص وسلوك الضوء بصورة عامة ، الموجية والمادية على حد سواء , وكيفية انتشاره في الاوساط المختلفة وحالتي الاستقطاب والتداخل . هذه الخواص والسلوك يسلكها شعاع الليزر ايضاً ، ولكن لهذا الشعاع بعض الخواص الاخرى التي لا نجدها في الضوء الاعتيادي الصادر من المصادر الاخرى. ولذلك يسمى شعاع الليزر بالشعاع الاحادي اللون. من الخواص الاخرى المهمة لأشعة الليزر هي اتجاهيته العالية ، حيث تتجه الاشعة الخارجة من جهاز الليزر جميعها باتجاه واحد تقريباً وبذلك يمكن تركيز اشعة الليزر في نقطة صغيرة جداً تتركز فيها كمية كبيره من الطاقة. ونتيجة لخاصيتي احادي اللون والاتجاهية العالية ، وبأخذ الطور لأشعة الليزر بنظر الاعتبار ايضاً تظهر خاصية الليزر الاساسية ، وهي التشاكه COHERENCY وهذه هي التي تميز اشعة الليزر عن الضوء الاعتيادي. وسنناقش في هذا الفصل هذه الخواص بشيء من التفصيل.

احادية اللون Monochromaticity

يستخدم الموشور لفصل الضوء الابيض ذي عرض النطاق الكبير جداً والذي يغطي الطيف المرئي بكامله ويصل الى حد 300 نانومتر ، الى مكوناته اللونية شكل (5-1أ) ، وكذلك الحال بالنسبة للضوء الاحادي اللون الناتج من مرور الضوء الابيض من خلال مرشح ، اذ يمكن فصله

الى الوانه الاساسية بإمراره من خلال موشور ، فاللون الاحمر يفصل الى لون احمر غامق ولون احمر فاتح كما موضح ذلك في الشكل (5-1ب).والاختلاف هنا فقط ان عرض النطاق للون الاحمر قليل جداً اذ لا يتجاوز ال 20 نانومتراً ولا يؤثر الموشور في شعاع الليزر الاحمر شكل (5-1ج) مثلاً اذ ان عرض نطاقه قليل جداً مقارنه باللون الاحمر السابق، بحيث لا يتجاوز النانو متر الواحد بالنسبة لشعاع ليزر الهليوم نيون الأحمر ، ويمكن اقلال ذلك الى اقل من هذا بكثير باستخدام الطرق التي سنتطرق اليها مفصلاً في الفصل العاشر من هذا الكتاب. على الرغم من اعتبار شعاع الليزر احادي اللون تماماً نسبة للمصادر الاخرى ، لكنه يبقى له عرض نطاق ولو بشكل قليل جداً ، ولا يمكن ان يكون لون شعاع الليزر احادياً تماماً وذلك استناداً الى اهم مبادئ الفيزياء الحديثة وهو "مبدأ اللاحدية Uncertainty Principle"



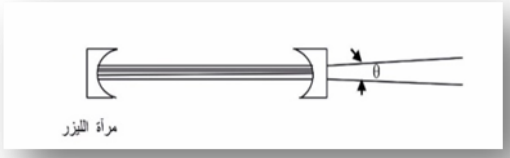
شكل 5-1: يمكن استخدام الموشور لتوضيح خاصية احادية اللون

وبدون الاعتماد على هذا المبدأ ، فمعرفتنا بالطول الموجي للشعاع تقودنا الى عدم معرفة بداية الشعاع ، والى متى سيستمر ، وهذا يعني انه بدأ منذ الازل وسيستمر الى اللانهاية ، وهذه حالة غير معقولة طبعاً.

الاتجاهية **Directionality**

لاحظنا جميعنا الانوار الكاشفة المستخدمة في المسارح والتي يكون ضوؤها على شكل حزمة ، ولكن تبقى هذه الاشعة تتبعثر بعد عدة مئات من الامتار ، اما شعاع الليزر فيسير مئات الكيلومترات بخط مستقيم ، ودون ان ينتشر.

نتيجة لحركة شعاع الليزر داخل المرنان مرات عديدة قبل ان يخرج من المرآة الامامية ، يخرج بأنفراجية قليلة جداً بحيث تقاس بأجزاء الزاوية القطرية milliradians لانه لا يخرج من المرآة سوى الشعاع الذي يتذبذب داخل المرنان ، وهذا هو فقط الشعاع الموازي لمحور المرنان وبذلك تكون الاشعة الخارجة موازية لمحور المرنان ، ومتوازية، ولا



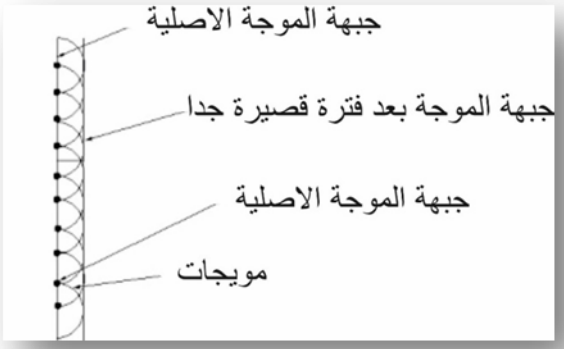
شكل 5-2 : لا يعاني الشعاع الخارج من الليزر سوى انفراج قليل ، نتيجة لحركته التذبذبية بين المرآتين

يحصل فيها سوى انفراج قليل جداً. كما لا يمكن ان يكون شعاع الليزر احادي اللون تماماً ، لا يمكن له ان يكون متوازياً تماماً (بدون انفراج) ، وعلى الرغم من كون انفراجية شعاع الليزر قليلة جداً مقارنة بمصادر الاشعة الاخرى. هذه الانفراجية القليلة ناتجة عما يسمى بالحيود Diffraction والتي وضحها العالم الفيزياوي الالماني هايجنز عام 1678.

حسب مبدأ هايجنز يمكن معرفة مكان جبهة الموجة بعد فترة اذا ما علمنا مكانها الان ، وهذه مفيدة جداً اذ يمكن بواسطتها معرفة كيفية انفراج الاشعة الضوئية ، وببساطة حسب مبدأ هايجنز يمكن اعتبار كل نقطة على جبهة الموجة مصدراً جديداً لموجة كروية ، والموقع الجديد لجبهة الموجى يمكن تحديده بالمماس للأسطح الكروية لجبهات هذه المويجات. ولدراسة هذه الحالة ، نأخذ جبهة الموجة المستوية المبينة في الشكل (5-3) حيث هناك عدة نقاط على جبهة الموجة المستوية والتي يمكن اعتبارها مصدراً لمويجات ثانوية. وهذه المويجات تنتشر بعد فترة وجيزة ، ويمكن حساب موقع الموجة الجديدة من المماس للأسطح الكروية لهذه المويجات (الخط المنقط في الشكل (5-3)).

اذا ما تسائلنا اين ذهبت جبهة الموجة الجديدة والناتجة من المماس للأسطح الكروية من الجانب الخلفي ؟ فهل يعني هذا ان هناك موجة تذهب نحو الخلف ؟ طبعاً ليست هناك اي موجة كهذه. وفي الحقيقة لم

يطرأ على فكر هايجنز سؤال كهذا ليعد الاجابة له ، كذلك لم تكن لديه معلومات كافية



شكل 5-3 : مبدأ هايجنز والموجات المستوية الصورة جبهة الموجه انصاف كرة وليس جيبيه

عن طبيعة الضوء في ذلك الوقت. والإجابة الكاملة عن مثل هذا السؤال نجدها عندما ندرس معادلات ماكسويل MAXWELL والتي هي خارج مستوى هذا الكتاب. ويمكن الحصول على جواب مقنع بأسلوب اخر ابسط.

وكمثال اخر على مبدأ هايجنز هو ما نراه في الشكل (5-4) حيث هناك موجة كروية تولد النقاط التي على سطحها موجات جديدة ، تبتعد عن مصادرها . والسطح المماس لها يكون كرة جديدة ، وهذا ما نراه بوضوح في الشكل ، حيث الموجة الكروية (الخط المتصل) ولدت موجة كروية جديدة (الخط المتقطع) ، وكما في حالة الموجة المستوية ليست هناك مويجات تتجه نحو الداخل.

بعد ان تعرفنا على مبدأ هايجنز ، لنفسر الان خاصية الاتجاهية بموجب هذا المبدأ ، اذ نلاحظ في الشكل (5-5) موجة مستوية تسقط على فتحة صغيرة وبذلك يولد قسم من نقاط هذه الموجة مويجات ثانوية تنتشر كما في الشكل ، وقسم اخر منها تصطدم بجوانب الفتحة لتمنعها من الانتشار ولذلك ينحرف المماس لأسطح المويجات الثانوية الخارجة من الفتحة وعلى جانبيها وكما في الشكل السابق.

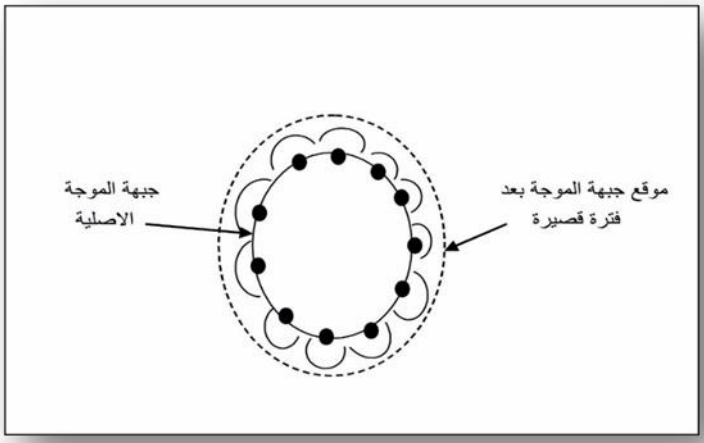
اذا ما كانت الفتحة اكبر كثيراً من الطول الموجي المار من خلالها ، فأن الانفراجية تكون قليلة ، ومن جانب اخر فأن الفتحة الصغيرة تؤدي الى انفراجية عالية . ويمكن حساب زاوية الانفراج رياضياً (بالزاوية نصف قطرية) من المعادلة التالية:

$$\theta = 2.44\frac{\lambda}{D}$$

حيث تمثل D قطر الفتحة.

لا يعطي الشكل (5-5) تفسيراً كاملاً للموضوع ، اذ لم يؤخذ التداخل في الحساب . فأذا ما سقط الشعاع الخارج من الفتحة في الشكل (5-5) على شاشة لا تظهر لنا بقعة مضيئة واحدة ، بل شكل حيود كما في الشكل (5-6). فأذا ما تذكرنا تجربة يونك في الفصل الرابع فسنعرف جيداً من اين حصلنا على هذا الشكل ، ففي تجربة يونك تكون الاضاءة في كل نقطة على الشاشة معتمدة على كيفية اضافة الموجات الصادرة

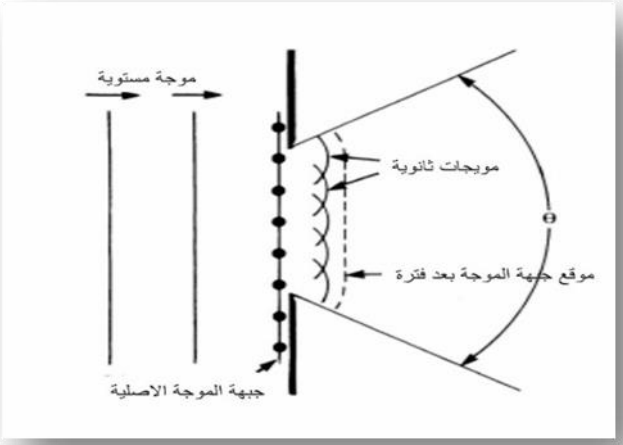
من كل شق في تلك النقطة ، فتكون النقطة مظلمة اذا ما وصلتها موجتان مختلفتان تماماً في الطور ومضيئة اذا ماكانتا في طور واحد.



شكل 5-4: مبدأ هايجنز والموجات الكروية

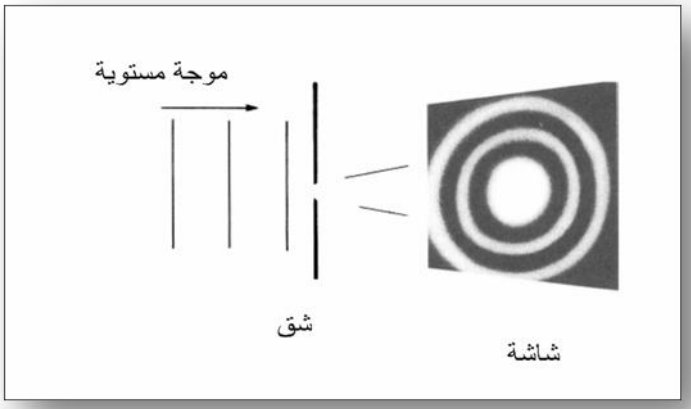
ففي عملية حيود الموجات المستوية الموضحة في الشكل (5-5) والشكل (5-6) ، تكون شدة الاضاءة في اي نقطة هي دالة لطريقة جمع المويجات الثانوية الواصلة الى تلك النقطة والنتيجة ستكون منطقة مضيئة في الوسط تحيطها حلقات مظلمة ، وأخرى مضيئة ، كما تبدو في الشكل (5-6) . وتحدد المعادلة السابقة الزاوية للقرص الوسطي والذي يحتوي على 84 % من الضوء المار من خلال الفتحة.

من الضروري فهم مبدأ الحيود هنا ، فلا يمكن مثلاً ً الاقلال من قطر

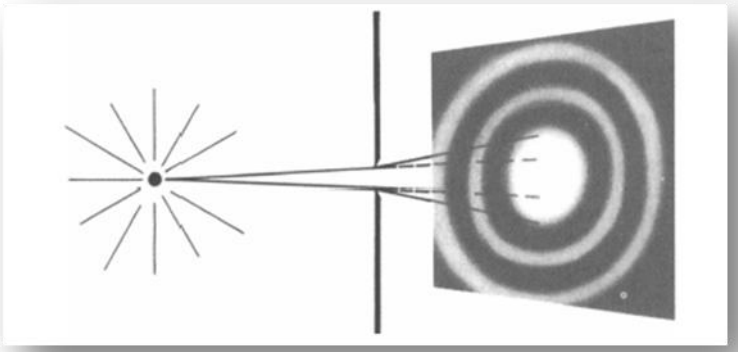


شكل 5-5: انفراج موجة مستوية نتيجة مرورها من خلال فتحة ، حسب مبدأ هايجنز.

شعاع الضوء بوضع فتحة صغيرة امامه اذ تعمل هذه الفتحة على زيادة انفراجيته وكما موضح ذلك في الشكل (5-7).حيث للشعاع الخارج من الفتحة انفراجية اعلى بكثير من الشعاع الساقط عليها.



شكل 5-6 : حيود الموجات المستوية اثناء مرورها من خلال فتحة صغيرة

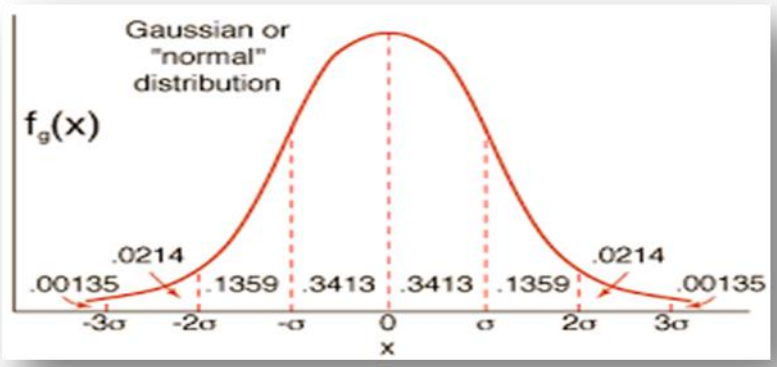


شكل 5-7 : يؤدي الحيود عملياً الى زيادة الانفراج اكثر مما يحسب هندسياً

انفراجية شعاع الليزر قليلة جداً اذ تكون اقل من انفراجية الموجة المستوية المارة من خلال فتحة صغيرة ، وسنناقش الانماط المستعرضة والأشكال التي يمكن ان يكون شعاع الليزر عليها في الفصل التاسع من الكتاب . لندرس الان التوزيع الكاوسي للشعاع (التوزيع الاكثر شيوعاً) والذي تكون الاشعة فيه موزعة كما في الشكل (5-8) ورياضياً لا يمكن ان تصل الشدة للأشعة الى الصفر مطلقاً،بل تحدد حدود الشعاع بالمكان الذي تكون فيه الشدة بحدود 14 % (او $1/e^2$) من اعلى قيمة لشدة الشعاع.

وتحسب انفراجية الشعاع الكاوسي من المعادلة التالية (بالزوايا نصف قطرية):

$$\theta = 1.27 \frac{\lambda}{D}$$



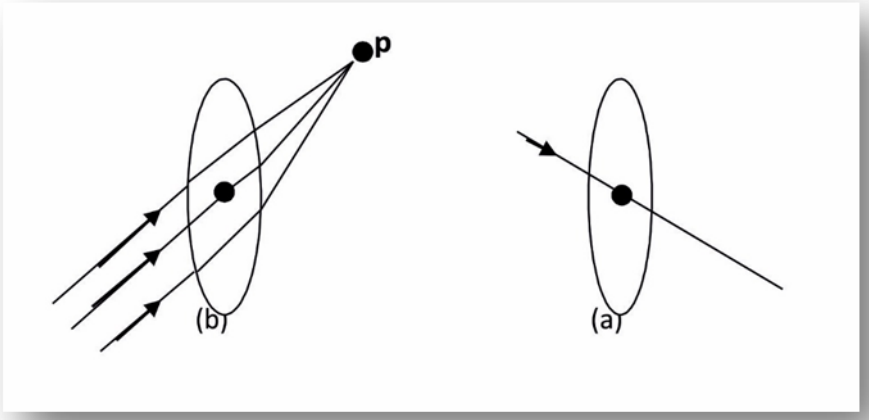
شكل 5-8: توزيع الشدة للشعاع الكاوسي ، حيث تكون اكبر شدة في القمة وتقل تدريجياً باتجاه الحافات

اذ تمثل D قطر الشعاع من حافاته عند اصغر منطقة او مايسمى بالـ " الخصر waist " .

لاحظ الفرق بين انفراجية الشعاع الكاوسي والموجة المستوية المارة من خلال ثقب صغير ، حيث الانفراجية تساوي تقريباً نصف انفراجية الشعاع المستوي الموجة والمار من خلال فتحة قطرها D ، اضافة لذلك فأن الشعاع الكاوسي لا يحتوي على حلقات مضيئة ، ولا يتغير شكله اثناء انتشاره في الفضاء ، بل يحصل فيه الانفراج فقط. على كل حال اذا ما مر شعاع كاوسي ذو قطر D من خلال فتحة قطرها D ايضاً فان حيوداً سيحصل في الشعاع ، وذلك للجزء الذي سيصطدم بجدران الفتحة (لان القطر لا يمثل حدود المنطقة التي تكون فيها الشدة مساوية الصفر)، وبذلك تكون زاوية الانفراج اكبر من $1.27\ \lambda / D$ ، وتظهر

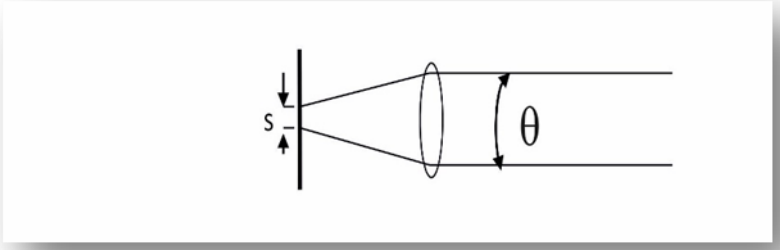
كذلك حلقات مضيئة تحيط بالمنطقة المركزية ايضاً. ولكن هذا التأثير يقل اذا ما اصبح ثلاث امثال قطر الشعاع.

اهم فوائد الانفراجية القليلة لأشعة الليزر هو امكانية تركيزه في نقطة صغيرة جداً ، اصغر بكثير من تلك التي نحصل عليها من مصادر الاشعة الاخرى ، ولمعرفة حقيقة ذلك ولحل المسالة رياضياً لحساب قطر هذه النقطة الصغيرة ، من الضروري فهم قانونين مهمين من قوانين البصريات ، وهما ما يوضحهما الشكل (5-9)، حيث في (أ) تتركز جميع الاشعة المتوازية المارة من خلال عدسة في نقطة واحدة ، وفي (ب) لا يتأثر الشعاع المار من مركز العدسة.

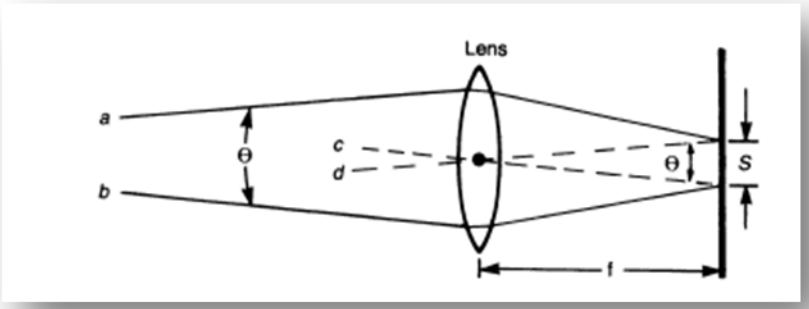


شكل (5-9): مبدأ العدسات ، (أ) تتجمع الاشعة المتوازية الساقطة على عدسة في نقطة واحدة ، (ب) لا يحصل اي انحراف للشعاع المار من وسط (مركز) العدسة.

اما في الشكل (5-10) فنلاحظ شعاعاً منفرجاً يركز على شكل نقطة بعد ان يمر من خلال عدسة ، ولحساب قطر هذه النقطة S ، نضيف شعاعين اخرين c,d موازيين ل a,b شكل (5-11) ويمران من خلال العدسة ، ولمرور كل من c,d من مركز العدسة ، لايحصل بهما اي تغيير. ولكون الشعاع c موازياً للشعاع b فأنهما يركزان في النقطة ذاتها على الشاشة . وكذلك الحال بالنسبة للشعاعين d,a ونتيجة للتوازي هذا تكون الزاوية بين الشعاعين d,c مساوية للزاوية بين الشعاعين b,a . والزاوية (نصف القطرية) تساوي S/F من الشكل (5-11) ، حيث تمثل F البعد البؤري للعدسة وبذلك يساوي قطر الشعاع بعد تركيزه F . نستنتج من ذلك ان قطر الشعاع المركز يقل كلما قلت زاوية الانفراج للأشعة ، وكلما قل قطر الشعاع ازدادت شدته.



شكل 5-10 : ركز شعاع ذو انفراجية مقدارها θ.



شكل 5-11 : مخططاً لحساب قطر النقطة التي ركز فيها الشعاع في بؤرة العدسة

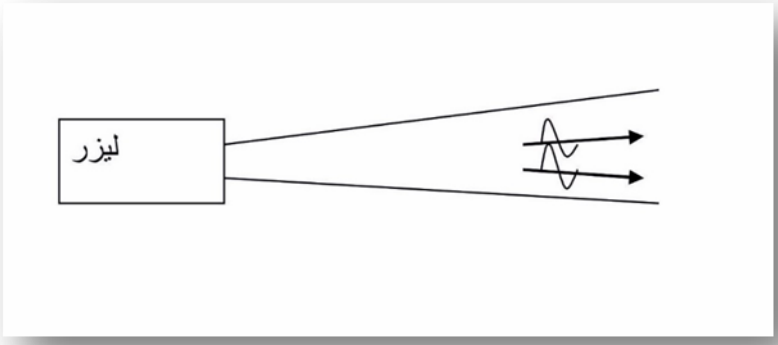
التشاكه Coherence

نرى في الشكل (5-12) موجتين لشعاع الليزر ، يوضحان خصائص هذه الاشعة ، فللموجتين صفات مشتركة ، فلهما الطول الموجي نفسه ، ويسيران بالاتجاه نفسه ، وكونهما بطور واحد ، وهذه الخواص مجتمعة هي التي تجعل من الاشعة متشاكهة ، وهذه خاصية شعاع الليزر التي تميزه عن بقية انواع الاشعة ومصادر الضوء الاخرى.

ولم تكن استخدامات الليزر معروفة لنا لولا خاصية التشاكه هذه ، فخاصية احادي اللون التي يتميز بها شعاع الليزر لايمكن استخدامها في التحاليل الكيماوية وفصل الذرات لو لم يكن الشعاع متشاكهاً.

واتجاهية شعاع الليزر العالية لم يكن بالإمكان الاستفادة منها في نقل المعلومات لولا كون الاشعة متشاكهة ، وكذلك الصور المجسمة التي

نحصل عليها بواسطة اشعة الليزر لم تكن ممكنة لولا كون الشعاع متشاكهاً.



شكل 5-12 : الاشعة الصادرة من الليزر متشاكهة ، فجميعها ذات (أ) الطول الموجي نفسه (ب) الاتجاه نفسه (ج) الطور نفسه.

والتشاكه على نوعين ، فهناك التشاكه الفضائي SPATIAL والتشاكه الزمني TEMPORAL ، فالتشاكه الفضائي يعني ان الضوء الموجود في اعلى الشعاع يكون متشاكهاً مع الضوء في اسفله ، اي يمكننا المرور عبر المقطع العرضي للشعاع مع الاحتفاظ بتشاكهيته. اما التشاكه الزمني، فيعني ان الموجات المتشاكهة في شعاع الليزر تبقى كذلك لفترة من الزمن مهما ابتعدت عنا ، اي تبقى هذه الموجات بطور واحد ولمختلف الاطوال الموجية ، ومن هذا نستنتج انه كلما كان الشعاع ذا لون احادي اكثر اصبح ذا تشاكه زمني اكبر.

الاسئلة

1- استخدام مبدأ هايجنز لتوضيح عملية الانكسار (انحناء) الضوء عند التقاء سطحي الزجاج والهواء (ملاحظة : راجع الشكل 3-1).

2- ما انفراجية شعاع ليزر الهليوم نيون الذي قطره في منطقة التخصر هي 1 مليمتر؟

3- وضع رواد الفضاء الامريكان عاكس ليزري على سطح القمر . اذا وجه شعاع ليزر نيديميوم /ياك من سطح الارض الى سطح القمر . احسب قطر الشعاع على سطح القمر (الطول الموجي للشعاع هو 1.06 مايكرومتر. وافترض ان قطر الشعاع عند المرآة الامامية لليزر هو مليمتر واحد وانه لا يتأثر بجو الارض . ويبعد القمر عن الارض 250.000 ميل تقريباً). كيف ستعالج الشعاع لتصل كمية اكبر منه الى العاكس ؟

4- اي خاصية من خصائص انتشار الامواج التي تجعلنا نسمع الصوت الاتي من وراء الحواجز؟

5- وضح كيف تعني عبارة "التشاكه الزمني " احادي اللون ؟

6- احسب الكثافة (قدرة الليزر/مساحة الشعاع) على شبكية العين اذا نظرنا خلال ليزر الهليوم نيون ذو قدرة نصف ملي واط ، بافتراض ان الشعاع اصغر من بؤبؤ العين . وانفراجيته هي نصف من الف من الزاوية القطرية. وان بعد الشبكية هو 2 سنتمتر عن عدسة العين التي

بعدها البؤري هو 2 سنتمتر ايضاً. قارن هذه الشدة مع الشدة خارج العين.

7- في احدى الليالي وجه فني مهمل شعاع ليزر الاركون الى طائرة هليكوبتر وأصاب قائدها بالعمى (هذه قصة حقيقية ، ولكن الطيار استطاع ان يهبط بطائرته بسلام وتم محاسبة الفني) . اذا ما كان شعاع ليزر الاركون بقدرة 5 واط وطوله الموجي 514 نانومتر وزاوية انفراجه 5 من الالف من الزاوية القطرية ، والطائرة على ارتفاع 100 متر وبموقع مباشر فوق الليزر ، احسب الشدة (قدرة الشعاع / قطره) على شبكية عين الطيار. مفترضاً ان قطر البؤبؤ في الليل هو 7 مليمتر، وبعد الشبكية عن عدسة العين التي بعدها البؤري 2 سنتمتر هو 2 سنتمتر ايضاً، افترض ان الشعاع كاوسي الشكل لكن شدته متجانسة على طول مقطعة (ملاحظة : الشعاع المصطدم بعيني الطيار يحيد خلال مروره من بؤبؤ العين وكموجة مستوية).

الفصل السادس

الذرات ، الجزيئات ، ومستويات الطاقة

Atoms, Molecules and Energy Levels

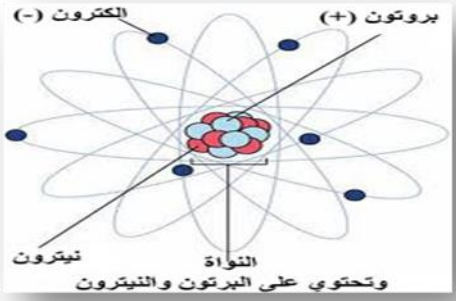
لاحظنا في الفصل الثاني كيف يستخدم ميكانيك الكم لتفسير طبيعة الضوء الموجية والمادية ، وقد فسر لنا ايضاً الكثير من الظواهر الطبيعية الاخرى ، وما يهمنا منها في هذا الفصل هو كيفية خزن الطاقة في الذرات والجزيئات ، والحقيقة المدهشة التي حصلنا عليها بواسطة ميكانيك الكم هي ان الطاقة في هذه الذرات او الجزيئات تخزن على شكل كميات محددة تسمى " الكمات " ، وبذلك يمكن سحب الطاقة او اضافتها على شكل كمات ايضاً وهذا يعني اذا ما كانت هذه الكمات هي 1.27 او 1.31 الكترون – فولت لذرة ما ، لا يمكن اضافة او سحب كمية من الطاقة مقدارها 1.26 او 1.28 او 1.30 الكترون فولت.

وما سنلاحظه في هذا الفصل هو كيفية تأثير الكمات هذه على سلوك الذرات او الجزيئات. وفي الفصل القادم سنلاحظ كيف يقود هذا الى الحصول على عملية الليزر.

مستويات الطاقة الذرية Atomic Energy Levels

نتذكر جيداً تركيب الذرة ، حيث تتكون كما تبدو في الشكل (6-1) من شحنة موجبة مركزة في الوسط تسمى "النواة " تحيطها سحابة من الالكترونات السالبة الشحنة تدور في مدارات محددة لها حول النواة ،

فعند امتصاص طاقة من قبل الذرة تذهب هذه الطاقة الى الالكترونات لتؤدي بالتالي الى حركتها بصورة اسرع او الى تغيير مداراتها ، والنقطة المهمة هنا هي وجود مدارات محددة لكل الكترون لايمكن ان يدور بغيرها، وبذلك لا يمكن للذرة ان تمتص اي كمية من الطاقة دون تحديد.



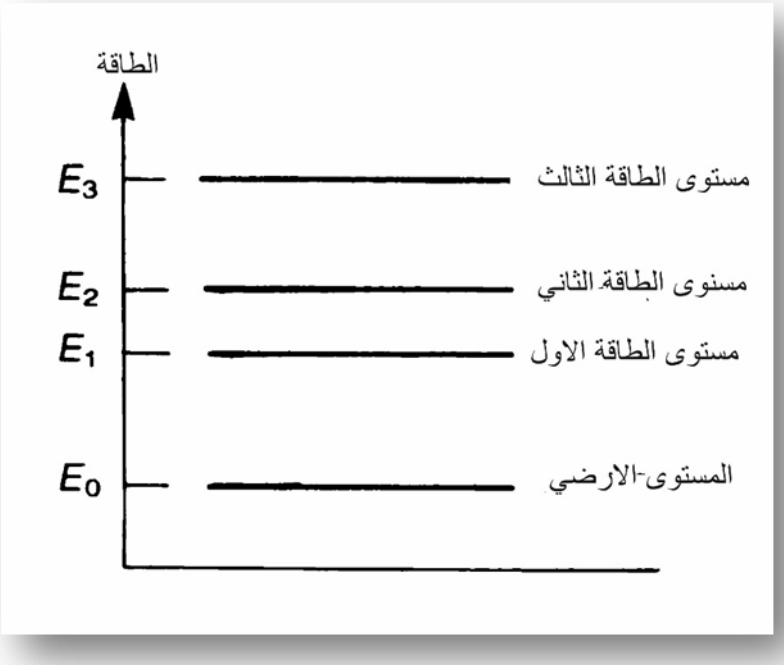
شكل 6-1: النواة الموجبة الشحنة محاطة بغيمة من الالكترونات السالبة الشحنة والتي تدور حولها

ونتيجة امتصاص الذرة مقداراً محدداً من الطاقة لايمكن لها ان تفقد الا مقداراً محدداً من الطاقة ايضاً بحيث يؤدي الى عودة الالكترون الى مداره السابق او مدار اخر يمكن ان يكون فيه. يمكن ان يوضح سلوك الذرة هذا بالرجوع الى المخطط المبين في الشكل (6-2) ، حيث وضحت مستويات الطاقة المسموحة للذرة بالمستويات المبينة في الشكل ، فالذرة المستقرة (في المستوى الطاقي الارضي) لها طاقة مقدارها E_0 ، بينما الذرة في المستوي الطاقي المحفز الاول ، لها طاقة مقدارها E_1 .

وهكذا بالنسبة للمستويات الاخرى ، فبانتقال الذرة من المستوي الاول الى المستوي الارضي تفقد طاقة مقدارها E ، وهذه مساوية الى (E_1-

(E_0). ولا يمكن لهذه الذرة ان تفقد مقداراً اخر من الطاقة ، فأما ان تفقد هذا المقدار او ان تبقى محتفظة به.

من جانب اخر فأن الذرة الموجودة في مستوى الطاقة الارضي (المستوي صفر) يمكن لها ان تمتص طاقة محددة تنقلها الى المستوي الاول اذا كانت هذه الطاقة مساوية (E_1-E_0) ، او المستوي الثاني اذا كانت مســاوية (E_2-E_0) ، وهكذا ،ولا يمكن للذرة ان تمتص طاقة اقل من (E_1-E_0) . او اي كمية من الطاقة مقدارها بين (E_2-E_0) و (E_1- E_0).



شكل 6-2: مستويات الطاقة في الذرة والمدارات المختلفة التي تدور فيها الالكترونات

وتحديد كميات الطاقة هذه هو من اهم اسس ميكانيك الكم كما وضحنا ذلك في الفصل الثاني ، وتفسيرات ميكانيك الكم لهذه الظواهر في مقاييس الذرة يبدو غريباً بعض الشيء علينا لتعودنا على المقاييس الكبيرة التي نعتمدها في حياتنا اليومية ، رغم ان التجارب المختبرية اثبتت صحة هذه التفسيرات.

من اهم الوسائل التي يمكن ان تمتص فيها كمية من الطاقة ، هي امتصاصها الفوتون ، وبطبيعة الحال لايمكن ان تمتص جزءاً من الفوتون، بل يجب ان يمتص بأكمله . وهذا يعني طاقة الفوتون يجب ان تكون مساوية لفرق الطاقة بين مستويات الذرة ، فمثلاً يمكن للذرة المبينة مستوياتها الذرية في الشكل (6-2) ان تمتص فوتوناً ذا طاقة مقدارها (E_1-E_0) وتنتقل من المستوى الارضي للطاقة الى المستوي الاول.

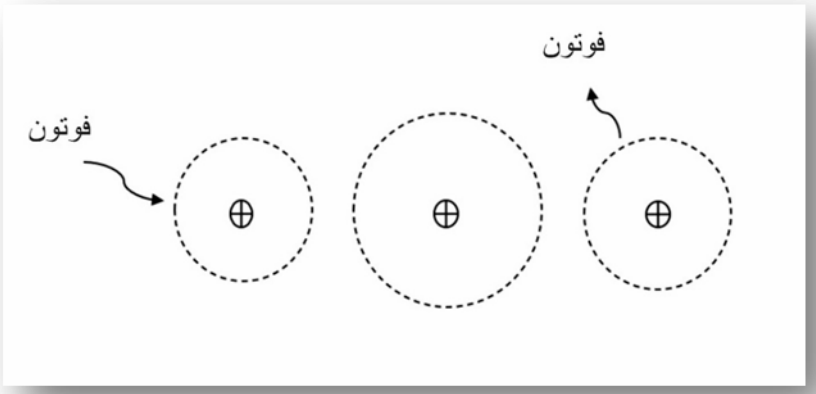
لكون طاقة الفوتون مساوية hc / λ وهذا يعني ان لكل ذرة او جزيئة هنا اطوالاً موجية معينة يمكن ان تمتصها فقط ، فالطول الموجي للضوء الذي يمكن امتصاصه من قبل الذرة في المثال السابق هو $hc/(E_1-E_0)$، ولا يمكن ان يمتص اي ضوء بطول موجي اخر ، فالزجاجة الحمراء اللون، تبدو حمراء لأنها مكونة من ذرات او جزيئات تمتص الضوء الازرق ولا تمتص الاحمر والزجاجة الشفافة الاعتيادية لا تحتوي على ذرات او جزيئات يمكن لها ان تمتص قسماً من الاشعة الواقعة ضمن الطيف المرئي، وبذلك ينفذ الضوء بكامل الوانه من خلالها.

الانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز
Spontaneous Emission and Stimulated Emission

هناك عدة طرق يمكن للذرة الموجودة في مستوي طاقة علوي ان تفقد طاقتها هذه لتعود الى مستوي طاقة اوطأ ، فيمكن ان تنتقل الطاقة هذه الى ذرة اخرى او ان تشع على شكل فوتون طوله الموجي يتناسب مع مقدار الطاقة التي تفقدها الذرة ، وهذا ينبعث بإحدى الطريقتين ، اما بالانبعاث التلقائي ، او الانبعاث المحفز.

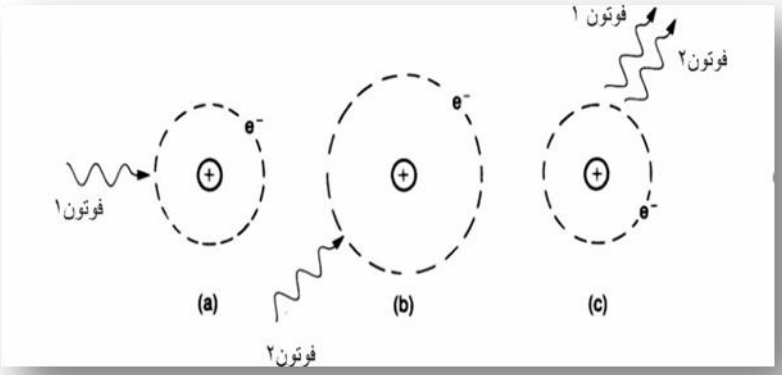
يوضح الشكل (3-6) عملية امتصاص الطاقة من قبل الذرة ، ومن ثم فقدانها على شكل فوتون بطريقة الانبعاث التلقائي ، حيث امتصت الذرة فوتوناً طاقته مساوية تماماً لفرق الطاقة بين المستوى الاول والمستوى الارضي فيها ، لتنتقل بعد ذلك من المستوى الارضي الى المستوى الاول، واعتيادياً تبقى الذرات في هذا المستوي لفترة وجيزة جداً تسمى " العمر التلقائي "Spontaneous life time والذي يعتبر خاصية لهذا الانتقال، ولا يزيد في اغلب انواع الذرات على بضع النانو ثانية ، او المايكرو ثانية، وهناك اعمار معروفة اطول او اقصر من ذلك لبعض الانواع. ومن ثم تبعث الطاقة التي حصلت عليها الذرة على شكل فوتون يخرج منها باتجاه عشوائي لتعود الى المستوى الارضي ، كما في الشكل (3-6).

اما عملية الانبعاث المحفز فهي مختلفة تماماً اذ تحتاج الى فوتون اخر له نفس طاقة الفوتون الاول ليتفاعل مع الذرة الموجودة في مستوي الطاقة



شكل 6-3 : تمتص الذرة فوتون (أ) ، فتثار لفترة (ب) ثم تطلق الفوتون تلقائياً(ج).

العلوي لتحفيزها على اطلاق فوتون جديد ، والعودة الى المستوى الارضي (شكل 6-4) .



شكل (6-4) : يمكن لفوتون ثان ان يحفز الذرة لإطلاق فوتون بزمن يقل عن عمر المستوي للانبعاث التلقائي.

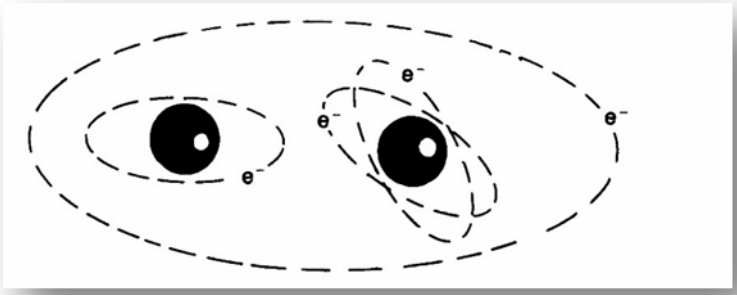
وهذا يجب ان يحدث قبل انتهاء العمر التلقائي للذرة ، وكما نلاحظ في الشكل فان هذا الفوتون الاخير لا يمتص من قبل الذرة بل يحفزها فقط على اطلاق الفوتون الجديد ، الذي يكون بنفس اتجاه الفوتون المحفز ، وبذلك ينطلق الفوتونان بنفس الاتجاه ولكون الفوتون المحفز يمتلك الطاقة نفسها للفوتون المنطلق ، فانه يكون للفوتونين الطول الموجي نفسه. وكذلك الحال بالنسبة للاستقطاب فإذا ما كان الفوتون مستقطباً ، فسيكون الفوتون المنطلق مستقطباً ايضاً وبالاتجاه نفسه ، وكذلك الطور . وبمعنى اخر يخرج الفوتونان بصورة متطابقة تماماً بعضها عن بعض .

وكما سنرى لاحقاً فان الانبعاث المحفز هو اساس عمل الليزر ، وان كلمة ليزر والتي هي الاحرف الاولى من عبارة طويلة ، يكون حرفها الثالث والرابع بداية كلمتي انبعاث ومحفز . كما سنلاحظ في الفصل السابع ان الاشعة المنبعثة من الليزر تكون متشاكهة لكون جميع الموجات فيها تتجه باتجاه واحد ، ولها الطول الموجي نفسه وتكون كذلك بطور واحد.

مستويات الطاقة الجزيئية Molecular Energy Levels

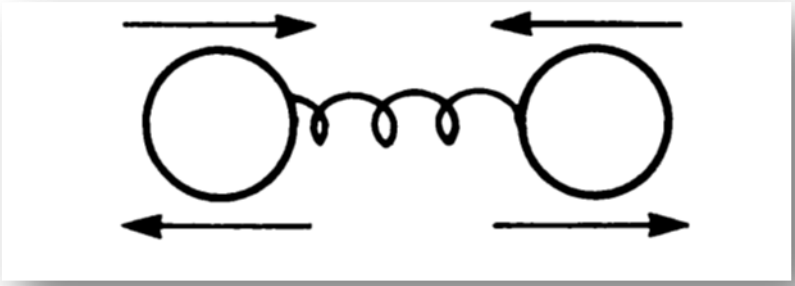
كما نعلم ان الجزيئة هي مركبة من ذرتين او اكثر ، وما نلاحظه في الشكل (6-5) هو ابسط انواع الجزيئات المتكونة من ذرتين فقط ، والتي تبقى بعض الالكترونات فيها ، في اماكنها حول نوى الذرات ، والكترون واحد من الذرة يشارك في الدوران حول الذرة الاخرى . ولكون الجزيئة معقدة اكثر من الذرة فيكون لها مستويات من الطاقة اكثر من تلك التي

للذرة. وفي الحقيقة هناك ثلاث انواع من مستويات الطاقة ، وهي المستويات الالكترونية ، والمستويات التذبذبية ، والمستويات الدورانية . فتكون للجزيئة مستويات طاقة الكترونية مشابهة لتلك الموجودة في الذرة، فيمكن لإلكترون يدور في مستوي طاقة جزيئي معين ان ينتقل الى مستوى



شكل 6- 5: تبقى بعض الالكترونات تدور حول نواتها في الجزيئات بينما تشارك الاخرى في الدوران او تنتقل لتدور حول ذرة اخرى.

طاقة جزيئي معين ان ينتقل الى مستوي اخر اعلى عندما تمتص الجزيئة كمية من الطاقة تساوي الفرق بين المستويين. وبطبيعة الحال فان هذه المستويات محددة ولكل مستوى عمر انتقالي محدد ايضاً. يمكن للجزيئة كذلك ان تتذبذب ، وهذا مالا تستطيعه الذرة ، وتذبذب الجزيئة يشبه كرتين مرتبطتين بنابض بينهما ، كما في الشكل (6-6) وتتحرك كل منها نحو الامام والخلف ، فامتصاص فوتون معين من قبل الجزيئة يؤدي الى زيادة طاقتها التذبذبية هذه.

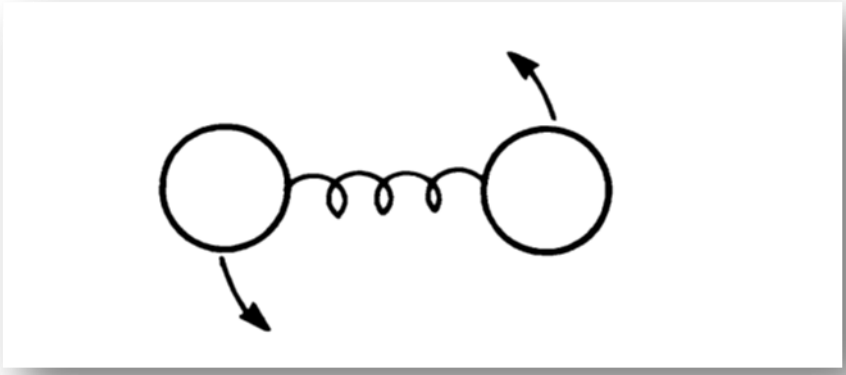


شكل 6- 6: يمكن للجزيئة ان تخزن الطاقة في التذبذب

تكون مستويات الطاقة التذبذبية هذه محددة كما في المستويات الالكترونية في الجزيئة ، وبذلك لا يمكن ان تمتص الجزيئة اي مقدار من الطاقة بل تمتص مقادير محددة فقط لتنتقل من مستوى تذبذبي معين الى مستوى تذبذبي اخر ، وبذلك يمكن رسم مستويات الطاقة التذبذبية بصورة مشابهة لمستويات الطاقة الالكترونية. وأخيرا يجب ان نعلم ان للجزيئة امكانية للدوران حول محورها كما في الشكل (6-7) ، وحفظ طاقات معينة في ذلك ايضاً. وهذا ما لا تستطيعه الذرة حيث انها متماثلة تماماً فبذلك لا تخزن اي طاقة اثناء دورانها.

والطاقة الدورانية في الجزيئة محددة أيضا ، حيث لا يمكن لها ان تمتص الا كميات محددة من الطاقة للانتقال من مستوى دوراني الى مستوى اخر اعلى.

كيف ترتبط هذه الانواع الثلاثة من مستويات الطاقة مع بعضها ألبعض؟



شكل 6-7: يمكن للجزيئة ان تخزن الطاقة في الدوران

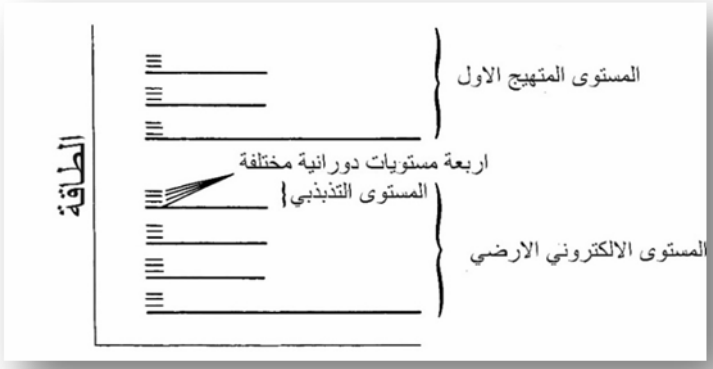
عموماً فان الانتقالات بين المستويات الدورانية هي الاقل ، وهذا موضح في الجدول ادناه ، والذي يلخص الانواع الثلاثة من مستويات الطاقة ، ومدى الاطوال الموجية التي تغطيها كل منها.

المستوي	الذرة	الجزيئة	الطول الموجي التقريبي لأغلب الانتقالات
الكتروني	نعم	نعم	مرئي ، فوق البنفسجي
تذبذبي	كلا	نعم	تحت الحمراء القريبة
دوراني	كلا	نعم	تحت الحمراء البعيدة

وإذا ما تذكرنا ان طاقة الفوتون تتناسب عكسياً مع طوله الموجي ، فسنرى ان للفوتون المنطلق او الممتص نتيجة الانتقال الالكتروني اعلى

قيمة من الطاقة مقارنة مع الانتقال التذبذبي والدوراني (هناك حالات لا تنطبق عليها هذه القواعد).

ويلخص لنا الشكل (6-8) مستويات الطاقة لجزيئة مثالية ، اذ نلاحظ فيه الانواع الثلاثة من مستويات الطاقة ، والمستويات المتقاربة جداً تمثل المستويات الالكترونية هي الاكثر تباعداً فيما بينها (مستويات الطاقة لاي جزيئة حقيقية تكون اعقد من هذا بكثير اذ تتداخل الانواع الثلاثة مع بعضها البعض).



شكل 6-8 : مستويات الطاقة الالكترونية ، والتذبذبية ، والدورانية لجزيئة.

ولكون الجزيئة اكثر تعقيداً بالنسبة للذرة ، فان مستويات الطاقة فيها تكون مركبة ، فالجزيئة المبينة في الشكل (6-8) لها مستوي طاقة ذريان فقط، والذرة التي لها مستويان فقط لا يمكن لها ان تمتص او تبعث سوى فوتون واحد فقط ، بينما للجزئية المشابهة امكانية على امتصاص او اطلاق عدد لا يحصى من الفوتونات المختلفة ، نتيجة لوجود المستويات

الثانوية من مستويات دورانية ومستويات تذبذبية. وكما سنلاحظ عند مناقشتنا لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون في الفصل الرابع عشر انه ليس كل الانتقالات ممكنة اذ تخضع العملية الى قوانين الانتخاب Selection Rules والخاصة بمبدأ حفظ الطاقة Conservation of Energy .

بعض المعالجات البارعة (الدقيقة)

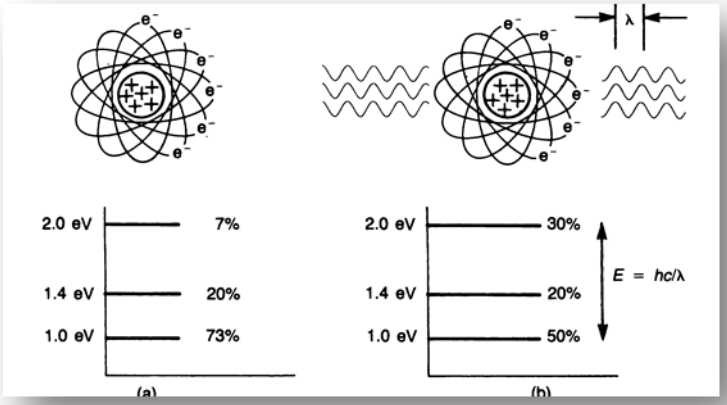
اعتمدت المناقشات السابقة لعملية حفظ الطاقة في الذرات والجزيئات على مبدأ ميكانيك الكم البسيط ، وذلك لإعطاء التفسيرات البسيطة والمقنعة في الوقت نفسه. وعلى الرغم من ان هذه التفسيرات البسيطة اوفت بغرضها لتفسير مبادئ تكنولوجيا أللليزر لكن يجب ان نعلم ان هذه التفسيرات ليست بالتفسيرات الصحيحة تماماً من الناحية النظرية بل انها تقريبية. وفي هذه الفقرة سنناقش بعضاً من الاسس البارعة في مبادئ الكم والتي تفسر عمليات الامتصاص والانبعاث للذرات فصورة الذرة المكونة من مجموعة من الالكترونات التي تدور حول النواة غير مقبولة من قبل ميكانيك الكم الحديث ، حيث يفترض مبدأ اللاحدية ان الالكترونات حول النواة تشبه غيمة سالبة الشحنة اكثر مما تشبه جسيمات سالبة فعندما تمتص الذرة كمية من الطاقة يتغير شكل هذه الغيمة تبعاً لكمية الطاقة الممتصة. عند عرضنا لعملية الانتقال التلقائي لاحظنا ان الذرة تبقى لفترة من الزمن في المستوي المتهيج يسمى " العمر التلقائي". والعمر التلقائي لمجموعة من الذرات يساوي المعدل الزمني للعمر التلقائي لهذه الذرات ويمكن ان يكون العمر التلقائي لذرة واحدة او اكبر

او اقل من ذلك. وبمعنى ادق انتقال عدد من الذرات من مستوى معين الى مستوى اخر نتيجة امتصاص او اطلاق فوتونات ليس بالصحيح. فحسب نظرية الكم يمكن للذرة ان تكون في مستويات مختلفة من الطاقة تباعاً. فعند قياس طاقة ذرة فاننا نجبر الذرة على ان تكون لها كمية الطاقة التي تم قياسها في ذلك الوقت . وبصورة عامة فأن الوصف الوحيد الصحيح لطاقة الذرات هو وصف احتمالية الحصول على عدة قياسات : فأذا ما كانت هناك احتمالية 7 % ان تكون الذرة بطاقة 2 الكترون – فولت ، واحتمالية 20% بطاقة 1،4 الكترون - فولت ، و 73 % بطاقة واحد الكترون – فولت.

كيف ستتفاعل الذرة الموصوفة اعلاه مع الضوء ؟ اي كيف سيوضح ميكانيك الكم عملية الامتصاص الضوئي والانبعاث ألمحفز يوضح ميكانيكية الكم انه اذا كانت طاقة الفوتون ($E= hc/\lambda$) مساوية للفرق بين طاقة المستويات المحتملة ، فيؤدي الضوء احتمالية تغيير قراءات طاقة الذرات بصورة ادق احتمالية وجود الذرة في اي من مستويي الطاقة التي تساوي طاقة الفوتون فرق الطاقة بينهما.

نفترض ان الذرة اعلاه اضيئت بضوء طاقة فوتونه مساوية الى الكترون فولت واحد (طوله الموجي يساوي تقريباً 1.2 مايكروميتر) ومبدئياً لها احتمالية 7 % ان تكون بطاقة 2 فولت و73% ان تكون بطاقة الكترون فولت واحد. ولكن اذا ما تمت القياسات بعد ان اضيئت الذرة بالضوء السابق (1.2 مايكرون) سنلاحظ ان الاحتمالات السابقة قد

تساوت .فأذاما اعدنا التجربة لمائة مرة (تعريض الذرة لكمية الضوء نفسها وللفترة نفسها في كل مرة) فأننا سنجد ان طاقة الذرة ستكون 2 الكترون فولت 30 مرة وواحد الكترون فولت 50 مرة و1.4 الكترون فولت 20 مرة. وبذلك نلاحظ ان احتمالية ان تكون طاقة الذرة 2 الكترون فولت قد ازدادت من 7% الى 30% ، واحتمالية ان تكون طاقتها الكترون فولت واحد قد قلت من 73% الى 50% كما نلاحظ ذلك في الشكل (6-9)*.



شكل 6-9 : يمكن للذرة ان تكون مبدئياً في المستوى الارضي باحتمالية 73% وفي المستوى الاول باحتمالية 20% والمستوى الثاني 7% (أ).عند تعرض الذرة الى ضوء طاقة فوتونه تساوي الفرق بين طاقتي المستويين الارضي والثاني فأن احتمالية وجودهما في هذه المستويات ستتغير (ب)

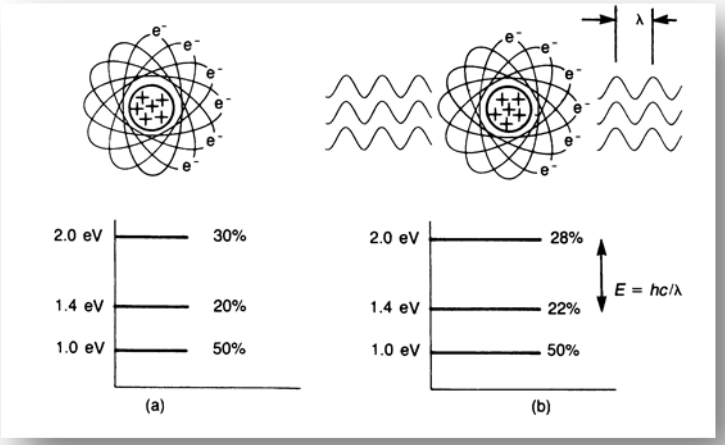
اذا ما تركت الذرة المبينة في الشكل السابق معرضة للضوء لفترة طويلة

(*) اذا عرضت الذرة الى ضوء طاقته لا تساوي اي انتقال في الذرة مثلاً ضوء طاقته تساوي 0.7 الكترون فولت . لا يحدث شيء اذ لا يتفاعل الضوء مع الذرة ، ولا تتغير الاحتمالية.

من الزمن ، فأن الاحتمالات السابقة ستتغير ، فأذا ما كانت شدة الضوء كافية فأن الاحتمالية ستكون (40 % ان تكون طاقة الذرة مساوية لإلكترون فولت وأحد و40 % ان تكون طاقتها 2 الكترون فولت) وفي هذه الحالة ستتشبع عملية الانتقال لان الاحتمالية لاتتغير ولا تعتمد على كمية الضوء التي نضخها في الذرة. ففي الحالة الموصوفة في الشكل (6-9) ، فأن الذرات ستنتهي بطاقة اكبر من التي بدأت بها اذ انتقلت الطاقة من الضوء الى الذرات ، وبذلك يمثل الشكل (6-9) تفسير ميكانيكية الكم لعملية الامتصاص الضوئي. نرى في الشكل (6-10) التوضيح من وجهة نظر ميكانيك الكم لعملية الانبعاث المحفز. فإذا تعرضت الذرة المبينة في الشكل (6-9 ب) الى ضوء طاقة فوتونه مساوية الى 0.6 الكترون فولت، فان الاحتمالية للمستويين المتهيجين الاول والثاني تتغير، اي احتمالية وجود الذرة في المستوي المتهيج الثاني ستقل من 30% الى 28% واحتمالية وجودها في المستوى الاول ستزداد من 20% الى 22%.

ففي هذه الحالة تكون الطاقة قد انتقلت من الذرات الى الضوء ، وبذلك يكون الضوء قد تضخم بطريقة الانبعاث المحفز.اذا كانت الاحتماليات المبينة في الشكل (6-10 أ) هي حالات عدم اتزان ، وستعود الاحتمالية على ما كانت عليه في الشكل (6-9أ). والزمن الذي تستغرقه للعودة الى حالة التوازن يسمى " الزمن التلقائي للمستوى " ويمكن للطاقة التي

تطلقها الذرة عند عودتها الى حالة الاستقرار ان تكون بشكل انبعاث ضوئي (تلقائي) او حرارة او تنتقل الى ذرة اخرى نتيجة الاصطدام .



شكل 6-10 : اذا ما تعرضت الذرة في الشكل 6-9 ب الى ضوء طاقة فوتونه تساوي فرق الطاقة بين المستويين الاول والثاني ، فأن احتمالية وجود الذرة في كلا المستويين ستتساوى. ونشاهد في (ب) الذرة بعد فترة وجيزة من عملية التعرض وقبل تساوي الاحتمالية.

وبذلك صورة امتصاص الذرة لفوتون ، وإطلاقه بعد ذلك وتغير مستويات الطاقة ليست بالصورة الخاطئة. وفي الحقيقة فهي تمثيل (موديل) جيد ومفيد جداً ، ولكن هذا التمثيل هو مبسط ، والتمثيل الكمي الذي وضح في هذه الفقرة اقرب الى الحقيقة.

الاسئلة

1- للضوء ذي 1.2 مايكرون المبين في الشكل (6-9) طاقة فوتونية بحدود الكترون فولت واحد . احسب طاقة الفوتون هذه بالجول . ومنها جد العلاقة بين الالكترون فولت والجول. ماهو الطول الموجي للضوء في الشكل (6-10 ب)؟

2- افترض ان المستوي الارضي للجزيئة المبينة في الشكل (6-8) هو 3.1 *10^{-19} جول اقل من اوطأ مستوى تذبذبي دوراني للمستوى الالكتروني الاول. فأذا كل تغير في مستوى تذبذبي يتطلب 4*10^{-20} جول ، وكل تغير مستوى دوراني يحتاج الى 5*10^{-21} جول . احسب الطول الموجي للضوء الناتج من الانتقالات التالية:

من : المستوي الدوراني المتهيج الاول للمستوى التذبذبي الارضي للمستوى المتهيج الالكتروني الاول.
الى : المستوى الارضي.
من : المستوى الدوراني الارضي للمستوى التذبذبي المتهيج الاول للمستوى المتهيج الالكتروني الثاني.
الى : المستوي الارضي.
من : المستوى الدوراني المتهيج الثاني للمستوى التذبذبي الارضي للمستوى الالكتروني المتهيج الاول.
الى : المستوى الدوراني المتهيج الاول للمستوى التذبذبي المتهيج الاول للمستوى الالكتروني الارضي.

الفصل السابع

توزيع الطاقة والحصول على الليزر

Energy Distributions and Laser Action

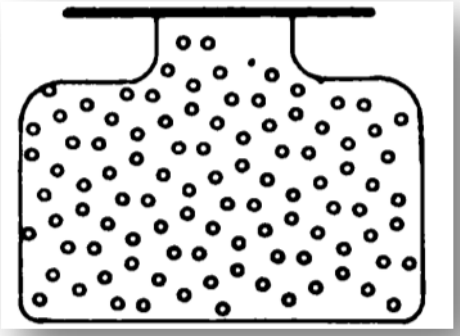
لاحظنا في الفصل السابق كيف تخزن الطاقة في الذرات والجزيئات على شكل كميات محددة ، وكيف تنتقل الذرة او الجزيئة من مستوى طاقة معين الى اخر نتيجة امتصاصها او اطلاقها كمية من الطاقة. لقد حصرنا في الفصل السادس اهتمامنا في ذرة او جزيئة واحدة ، اما في هذا الفصل فسوف ندرس سلوك مجموعة من الذرات او الجزيئات في الوقت نفسه وكيفية توزيع الطاقة فيما بينها ، فأذا ما تصورنا اناء يحتوي على مئة ذرة ، فكم منها تكون في مستوى الطاقة الارضي ، وكم منها تكون في المستوى الاول للطاقة ، والمستوى الثاني ... وهكذا؟

سندرس التوزيع الطبيعي (الاعتيادي) لهذه الذرات ، وكذلك التوزيع غير الاعتيادي ، وكيفية تضخيم الضوء المار في الاناء للحصول على الليزر، واستيعاب هذا المبدأ سيؤدي الى استيعاب اسس نظرية الليزر. سنتطرق في هذا الفصل الى الليزر ذي المستويين ، وكذلك الى طرق ضخ الطاقة في هذا النوع من الليزرات.

توزيع بولتزمان Boltzmann Distribution

لنفترض ان لدينا اناء يحتوي على مئة ذرة للعنصر نفسه ، كما في الشكل (7-1) (طبعاً اناء كهذا يحتوي على 10^{16} الى 10^{20} ذرة ،

واعتبرناه للسهولة يحتوي على 10 ^{2} ذرة فقط).

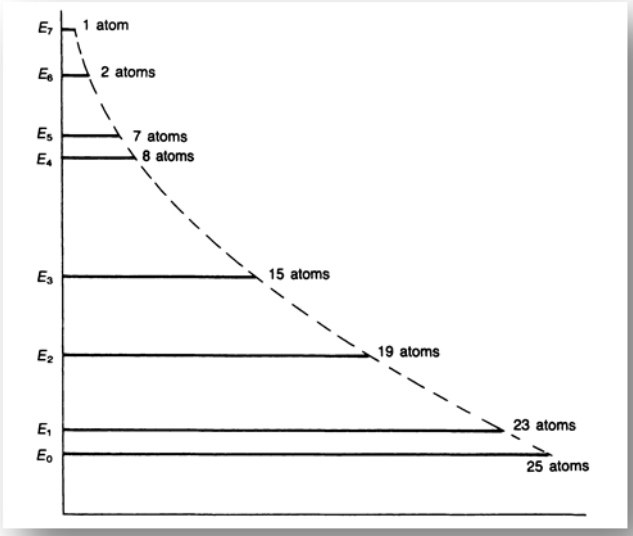


شكل 7- 1 : اناء يحتوي مئة ذرة لعنصر

وإضافة لهذه الذرات المائة هناك شيء من الطاقة في الاناء ايضاً. اول الاسئلة التي تطرح ، هي كيف ستوزع الطاقة على الذرات في الاناء وأي شكل ستأخذ ؟

سنحصر اهتمامنا في مثالنا هذا على الطاقة الحرارية ، التي بزيادتها تزداد درجة حرارة الاناء ، هذه الطاقة التي تتوزع بين الذرات بطريقتين، اذ يظهر قسم منها على شكل طاقة حركية للذرات نفسها داخل الاناء مؤدية الى حصول اصطدامات بين الذرات والجدار والذرات فيما بينها. والقسم الاخر من الطاقة يؤدي الى نقل عدد من الذرات الى مستويات الطاقة العليا ، قسم منها الى المستوى الاول ، وقسم الى المستوى الثاني ، وهكذا مع المستويات الاخرى. وقد حدد قانون بولتزمان في الحرارة ، وهو احد القوانين المهمة والمشهورة في هذا المجال توزيع الذرات على مستويات الطاقة عندما تكون هذه الذرات في

حالة اتزان حراري . يوضح لنا الشكل (7-2) مخططاً لتوزيع الطاقة حسب قانون بولتزمان ، وطول الخط في كل مستوى من مستويات الطاقة يتناسب مع توزيع الذرات (عدد الذرات) في ذلك المستوى [*].



شكل 7- 2 : اذا ما كانت الذرات في الاناء في حالة توزيع طبيعي ، فأن قانون بولتزمان يوزعها على المستويات كما في الشكل . اي بزيادة التوزيع في المستويات الدنيا.

(*) رياضياً يحدد قانون بولتزمان عدد الذرات في اي مستوى اعتماداً على عددها في المستوى الارضي وطاقة ذلك المستوى ، وبموجب المعادلة التالية : $N= N_0 \ EXP - [E/K_BT]$ حيث تمثل N عدد الذرات في المستوى i والذي طاقته تزيد عن طاقة المستوى الارضي بمقدار E وN_0 عدد الذرات في المستوى الارضي ويمثل K_B ثابت بولتزمان والذي مقداره 1.38 *10 $^{-23}$ جول/درجة كلفن و T هي درجة الحرارة. وتمثيل المعادلة سهل جداً وكما موضح في الاشكال 7-2 و 7-3 و7-4

من هذا يمكن لنا الاستنتاج انه لايوجد مستوى فيه عدد من الذرات اكثر من العدد الموجود في المستوى الذي قبله (تحته) فالمستوى E3 فيه عدد من الذرات اكثر مما هو موجود في المستويات E6,E5,E4 ولكنه من جانب اخر يحتوي على عدد اقل من الذرات من المستويين E1,E2 .

لنتذكر ان توزيع الطاقة المبين في الشكل (7-2) اعلاه ، هو لحالة الاتزان اي للتوزيع الطبيعي للطاقة بين الذرات في الاناء , ويمكن الحصول على توزيع للطاقة بشكل اخر ولكن لا يستمر إلا لوقت قليل جداً (سنأتي على مفصل ذلك لاحقاً) . ولكن يبقى التوزيع طبيعياً طالما بقيت درجة حرارة الاناء ثابتة.

نستنتج اذن مما سبق انه لايمكن ان نجد في اناء ما عدداً من الذرات جميعها في مستوى طاقة معين , بل ستتوزع الذرات على مستويات الطاقة, ففي الاناء ذي المئة ذرة توجد 25 ذرة في المستوى الارضي و23 ذرة في المستوى الاول .. وهكذا.

لندرس الان حالة الاناء والذرات التي فيه اذا ما اضفنا كمية من الطاقة فاذا ما وضعنا الاناء في موقد ورفعنا درجة حرارته سنرى ان التوزيع الذي لاحظناه في الشكل (7-2) يتحول الى شكل اخر كالذي يبدو في الشكل (7-3) اذ ازدادت نسبة الذرات في المستويات العليا من الطاقة , ولكن استنتاجاتنا السابقة بقيت صحيحة , حيث بقي عدد الذرات في اي مستوى اقل من العدد الموجود في المستوى الذي قبله (اوطأ منه) واعلى من العدد الموجود في المستوى الذي فوقه. اما اذا تم تبريد الاناء الى

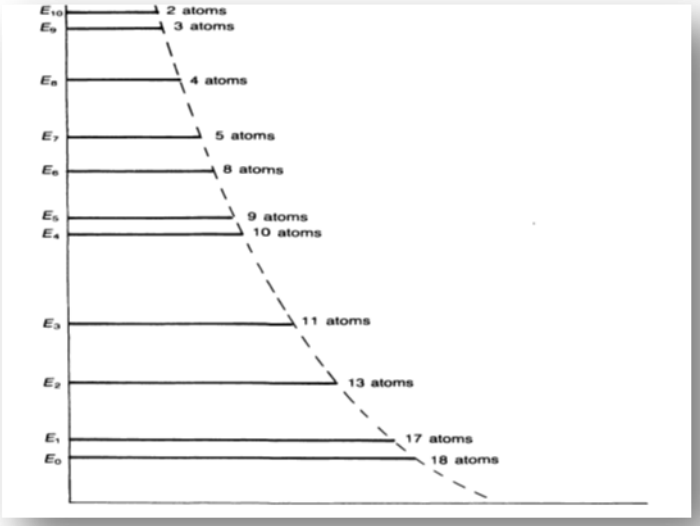
درجة حرارة اوطأ فان عدد الذرات في المستويات الدنيا سوف يزداد (شكل 7-4) فأذا ما وصلنا الى درجة الصفر المطلق فان الذرات جميعها تتجمع في المستوي الارضي E_0 .

وإذا ما كانت هناك مئة جزيئة بدلاً من الذرات المئة فان توزيع بولتزمان ينطبق عليها ايضاً مع شيء من التعقيد لوجود مستويات الطاقة الدورانية والتذبذبية في الجزيئة اضافة لمستويات الطاقة الالكترونية وبذلك يمكن ان تتوزع الطاقة في الاناء على اربعة اشكال:

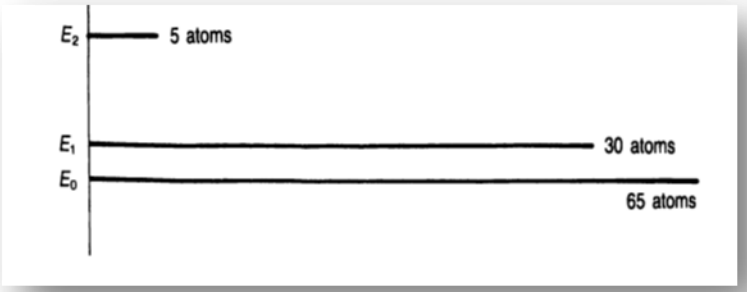
على شكل طاقة حركية للجزيئات في الاناء , وعلى شكل طاقة تذبذبية لها, وعلى شكل طاقة دورانية , وكذلك على شكل طاقة الكترونية . وتتغير الطاقة من شكل الى اخر بين الاشكال الاربعة هذه بحيث يبقى الاناء في حالة توازن وبذلك يمكن للأشكال الثلاثة (7-2) و (7-3) و(7-4) ان تمثل توزيع الطاقة بالنسبة للطاقات الدورانية والتذبذبية والالكترونية للجزيئات .

التوزيع العكسي Population Inversion

طالما بقيت الذرات في حالة توازن حراري تكون الطاقة موزعة بينها حسب قانون بولتزمان ، ولكن يمكن ان نجد مجموعة من الذرات لا تكون في حالة توازن حراري ولكنها لا تبقى في حالـة انعدام التوازن هذا لفترة طويلة بل فتـرة قصيـرة جـداً , فلـو سحبنا سـبع ذرات من الانـاء من المستوى الارضي E_0 في الشكل (7-2) ولفترة قصيرة جداً



شكل 7-3 : اذا ما سخن الاناء فان الذرات تعيد نفسها كما في الشكل ، لكن يبقى عددها اكثر في المستويات الاوطأ.



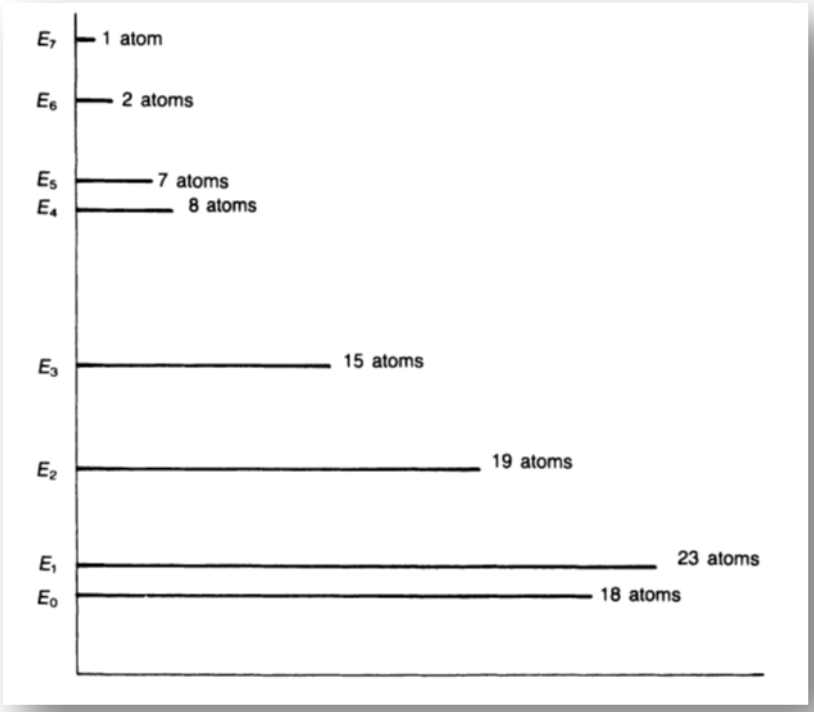
شكل 7-4 : اذا ما برد الاناء نحصل على توزيع جديد ولكن بطاقة كلية اقل.

فسنحصل على توزيع كالذي نراه في الشكل (7-5) وهذا التوزيع يكون عكسياً بين المستويين E_1 و E_0 حيث هناك عدد اكبر من الذرات في المستوي E_1 من المستوي E_0 لذلك يسمى " التوزيع ألعكسي ".

هناك عدة طرق للحصول على التوزيع العكسي , فأذا ما اضفنا طاقة حرارية الى الاناء وهذه الطاقة تكون بشكل محسوب بدقة , على سبيل المثال اذا ما وضعنا الاناء امام مصدر للالكترونات تنطلق منه الالكترونات بسرعة محددة (بطاقات محددة) فأذا ما اصطدم احد الالكترونات بذرة من الذرات المئة الموجودة في الاناء فانه سيعطيها طاقته وبذلك تنتقل الطاقة الى هذه الذرة , ولنفترض الان ان طاقة الالكترون هذه محسوبة بحيث تساوي فرق الطاقة بين المستويين الثالث والثاني , E_3 , E_2 فاذا ما اصطدم احد هذه الالكترونات بذرة في المستوى E_2 فأنها سوف تقفز الى المستوى E_3 . إذا ما كانت عملية اطلاق الالكترونات سريعة بحيث تتغلب على سرعة رجوع الذرات من المستوى E_3 الى المستوى E_2 تلقائياً فسنحصل على عملية توزيع عكسي بين المستويين E_3, E_2 لكون عدد الذرات في المستوى E_3 سيصبح اكبر من عددها في المستوى E_2 .

حالة التوزيع العكسي التي لاحظناها في الشكل (7-5) والشكل (7-6) هي حالة عدم اتزان لذلك لا تستمر لفترة طويلة , وبذلك اذا ما قطع سيل الالكترونات السابقة الذكر فسرعان ما يعود التوزيع ليصبح كما في الشكل (7-2) . ومثال اخر على حالة عدم الاتزان نلاحظ في الشكل (7-7 أ) حيث تكون المنظومة في حالة اتزان فقط عندما تصبح كما في الشكل (7- 7ب) , ولغرض اعادتها الى حالة الاتزان يجب ضخ كمية من الطاقة فيها , وهذا ما نلاحظه في الشكل (7-7ج) ، وألان عليك

ايجاد اوجه التشابه بين مثالنا هذا والمثال السابق الذي استخدمنا فيه سيل الالكترونات السريعة مع الذات الموجودة داخل الاناء.

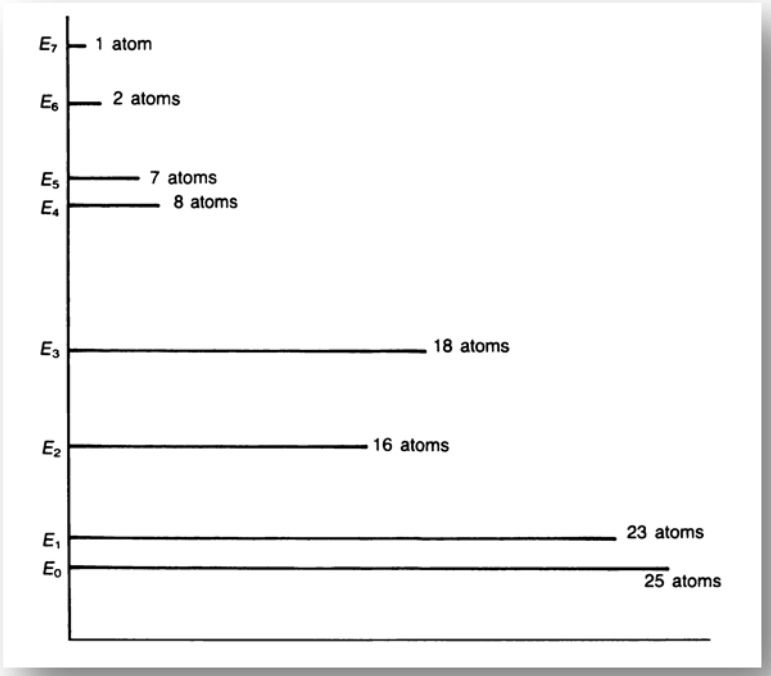


شكل 7-5 : يمكن الحصول على التوزيع العكسي بسحب عدد من الذرات من المستوى الارضي من الاناء المبين في الشكل 7-2.

الليزر L.A.S.E.R

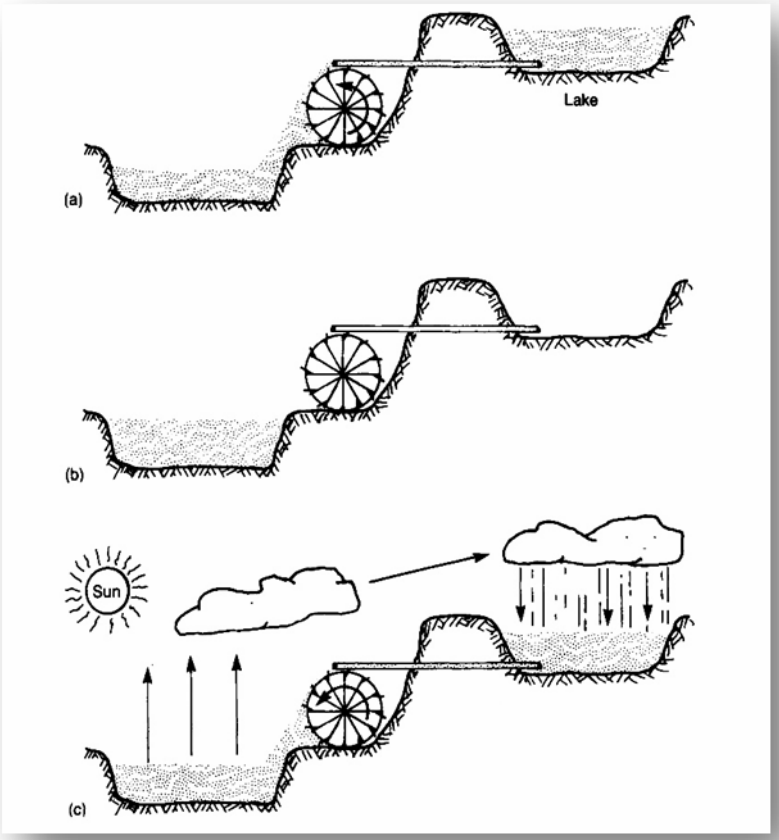
ناقشنا في الفصل السادس عملية الانبعاث المحفز ، وفي هذا الفصل نتطرق الى عملية التوزيع العكسي .وهذان هما المبدان الاساسيان اللذان يجب فهمهما لفهم مبدأ الليزر , حيث كما نعلم ان الاحرف المكونة لمصطلح "ليزر LASER " تمثل الاحرف الاولى للعبارة Light "

Amplification by Stimulated Emission of Radiation" والتي تعني " تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفز للأشعة ".



شكل 6-7 : يمكن الحصول على التوزيع العكسي بقذف الاناء بشعاع من الالكترونات المتساوية الطاقة.

لنعد قليلاً الى الاناء السابق المملوء بالذرات ونخرج جميع الذرات منه عدا واحدة نبقيها فيه ، ولنفترض ان هذه الذرة هي في المستوى الارضي E_0 ونفترض الان ايضاً ان فوتوناً ذا طاقة مساوية لفرق الطاقة بين



شكل 7-7: منظومة غير متزنة (أ) . ومنظومة متزنة (ب) وبإضافة طاقة خارجية يمكن الحصول على حالة عدم الاتزان (ج).

المستويين الثاني والأرضي قد دخل الى الاناء . اي ان طاقته :

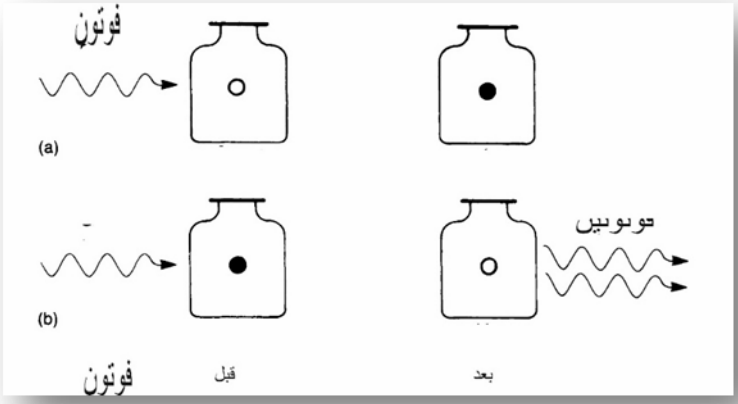
$$hc/\lambda = E_2 - E_0$$

حيث تمثل λ الطول الموجي للفوتون.

ماذا يحدث اذا ما اصطدم الفوتون بالذرة الموجودة في الإناء؟ نتيجة لكون طاقة الفوتون مساوية تماماً لفرق الطاقة بين المستويين فانها

تمتص من قبل الذرة لتنتقل هذه الاخيرة الى المستوى الثاني E_2 من المستوى الارضي E_0 ,وهذا ما يوضحه لنا الشكل (7-8أ).

ماذا يحدث الان اذا ما دخل الاناء فوتون اخر يحمل الكمية نفسها من الطاقة ؟ ونتيجة لكون هذه الطاقة مساوية لفرق الطاقة بين المستويين الثاني والأرضي , فأن لهذا الفوتون القابلية لتحفيز الذرة للهبوط الى المستوى الارضي , واطلاق فوتون مشابه للفوتون المحفز من حيث الطول الموجي والطوروكذلك يكون بالاتجاه نفسه كما اوضحنا ذلك في الفصل السابق , وهذا ما نلاحظه في الشكل (7-8ب) .



شكل 7-8: (أ) تنتقل الذرة من المستوى الارضي الى مستوى اعلى عند امتصاصها لفوتون. (ب) يمكن لفوتون ان يحفز الذرة في المستوى العلوي لإطلاق فوتون مشابه.

لنعد الان فنرجع الذرات المائة بكاملها الى داخل الاناء ، ومن ثم نبرد الاناء الى درجة حرارة الصفر المطلق لتصبح الذرات المائة جميعها في

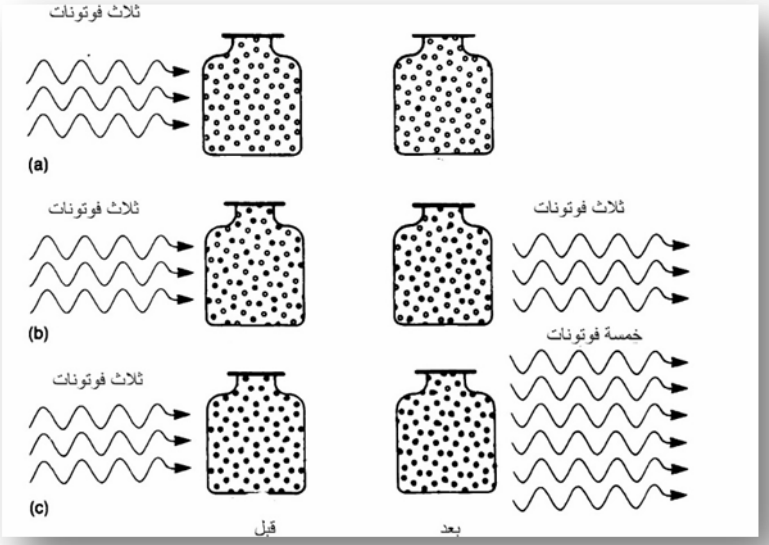
المستوى الارضي للطاقة . لندخل الان ثلاثة فوتونات الى داخل الاناء لكل منها طاقة مساوية لفرق الطاقة بين المستويين الثاني والأرضي ، كما في الشكل (7-9أ)، عندها ستمتص هذه الفوتونات الثلاثة من قبل ثلاث ذرات لتنتقل بذلك الى المستوى الثاني للطاقة , وتبقى بذلك سبع وتسعون ذرة فقط في المستوى الارضي.

اما اذا ما وضعنا خمسين ذرة في المستوى الثاني للطاقة والخمسين الاخرى في المستوى الارضي (فهذه بطبيعة الحال حالة عدم توازن , لكن لنفترض ان الاحداث تكون بسرعة بحيث لا تستطيع الذرات ان توزع نفسها على المستويات حسب قانون بولتزمان) فأذا ما ادخلنا الفوتونان الثلاثة السابقة الى داخل الاناء فان احتمالية امتصاصها من قبل ثلاث ذرات من المستوى الارضي هي 50% فقط ، وهناك احتمالية مساوية لذلك ايضاً لامتصاصها من قبل ثلاث ذرات من تلك الموجودة في المستوى الثاني للطاقة ليحفزها على اطلاق فوتونات مشابهة لها والعودة الى المستوى الارضي .

هذا يعني ان احتمالية خروج فوتون نتيجة الانبعاث المحفز تساوي احتالية امتصاص فوتون من قبل الذرات الموجودة في المستوى الارضي وبذلك فأن عدد الفوتونات الخارجة من الاناء يساوي عدد الفوتونات الداخلة له شكل (7-9 ب). وليست هناك وسيلة لمعرفة ما اذا كانت الفوتونات الخارجة هي ذاتها الداخلة الى الاناء , ولكن يمكن القول انها تشابهها تماماً. لنحاول اخيراً ان نضع الذرات المائة جميعها في المستوى

الثاني وندخل الفوتونات الثلاثة السابقة الى داخل الاناء الان ، سنلاحظ ان هذه الفوتونات ستحفز ثلاث ذرات على الهبوط الى المستوى الارضي وإطلاق ثلاثة فوتونات جديدة مشابهة للفوتونات المحفزة وبذلك ستخرج من الاناء ستة فوتونات بدلاً من الثلاثة الداخلة اليه ، وهذه هي عملية تضخيم للضوء بواسطة انبعاث محفز , او ما تسمى بالليزر. وكما يبدو ان هذه العملية لا تحدث إلا في حالة وجود توزيع عكسي للذرات في الاناء شكل (7-9ب) . وبطبيعة الحال ليست هناك حاجة الى ان تكون جميع الذرات المائة في حالة توزيع عكسي كما في الشكل (7-9ج) فأي عدد من الذرات في المستوى العلوي للطاقة يزيد على 50% من العدد الكلي الموجود في الاناء يؤدي الى حصول عملية تضخيم للضوء الداخل اليه , ولكن بزيادة نسبة عدد الذرات الموجودة في المستوى العلوي تزداد نسبة التضخيم.

افترضنا في الشكل (7-9ج) ان كل فوتون داخل الى الاناء سيحفز ذرة من الذرات الموجودة في المستوى الثاني للطاقة , ولكن لو كان عدد الذرات في المقطع العرضي كبيراً فأن للفوتون احتمالية للاصطدام بعدد اكبر من الذرات لإطلاق فوتونات جديدة , وهكذا . اما اذا كان عدد الذرات في المقطع العرضي قليلاً فأن احتمالية اصطدام الفوتونات بعدد اكبر من الذرات يكون اقل وبذلك تخرج من الاناء ستة فوتونات.



شكل 7-9 : (أ) ثلاثة فوتونات امتصت ونقلت ثلاثة ذرات الى المستوى الاعلى من المستوى الارضي.
(ب) اذا ماكانت نصف الذرات الموجودة في الاناء اساساً هي في المستوى العلوي فان للفوتونات احتمالية 50% لكي تمتص و50% لكي تحفز الذرات الذرات على الاطلاق.
(ج) اذا ما كانت جميع الذرات اساساً هي في المستوى العلوي ، فيحفز كل فوتون داخل ذرة على الانبعاث المحفز.

ليزرات المستويات الثلاثة والمستويات الاربعة
Three – Level and Four –Level Lasers

بينا في مثالنا السابق عملية التوزيع العكسي بين المستويين الثاني والأرضي فقط ، وفي الحقيقة تشترك بعملية الليزر ثلاثة اواربعة مستويات , تحصل بينها عملية التوزيع العكسي . سنناقش الان الليزر ذا المستويات الثلاثة ومن ثم الليزر ذو المستويات الاربعة ، لنستنتج الفرق بينهما. ففي منظومة المستويات الثلاثة كما في الشكل (7-10أ) ، تكون

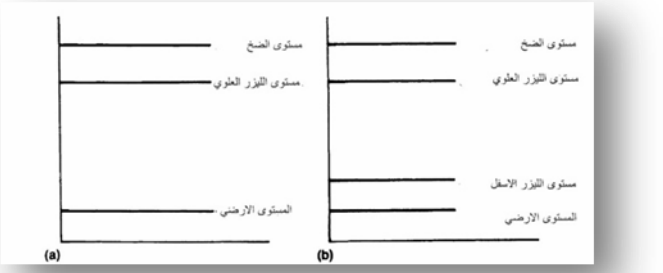
جميع الذرات في المستوى الارضي للطاقة , وباستخدام مصدر خارجي للطاقة تضخ هذه الذرات الى مستوى اعلى يسمى " مستوى الضخ Pumping Level" لتهبط تلقائياً وبسرعة الى مستوى الليزر العلوي Upper Laser Level , والطاقة التي تنتج غالباً ما تكون على شكل حرارة وليست على شكل ضوء وعمر مستوى الليزر غالباً ما يكون كبيراً بحيث تتجمع الذرات فيه لحين حصول حالة توزيع عكسي بينه وبين المستوى الارضي , لتحفز الذرات بعد ذلك للعودة الى المستوى الارضي مطلقة فوتونات مشابهة للفوتونات المحفزة لها.

يختلف الليزر ذو المستويات الاربعة عن سابقه ذي المستويات الثلاثة باحتوائه على مستوى ليزر سفلي اضافة لمستوى الليزر العلوي شكل (7- 1ب).

وكما في الليزر ذي المستويات الثلاثة تتجمع الذرات في المستوى الارضي لتضخ الى مستوى الضخ ومن ثم تهبط سريعاً الى مستوى الليزر العلوي والذي يكون عمره طويل نسبياً (لذلك يكون مستوى غير مستقر Metastable). وبتحفيز هذه الذرات بواسطة الفوتونات المناسبة تهبط الى مستوى الليزر السفلي - وليس الى المستوى الارضي- ومنه الى المستوى الارضي تلقائياً , والطاقة التي تنتج عن الحالة الاخيرة هذه تكون على شكل حرارة عادة . لنتساءل الان في اي من النظامين سنحصل على عملية التوزيع العكسي بصورة ابسط ؟. وفي اي منهما نحتاج الى ضخ كمية اكبر من الذرات لنحصل على حالة التوزيع

العكسي؟. فأذا ما اجبنا عن هذين السؤالين بصورة صحيحة سنصاب بالدهشة عندما نعلم ان اول الليزرات كان ليزر الياقوت ذا المستويات الثلاثة.

باستثناء ليزر الياقوت فأن اغلب الليزرات المعروفة ، هي ليزرات ذات اربعة مستويات , وفي بعض منها يكون مستوى الضخ ليس بمستوى مفرد بل عبارة عن عدة مستويات متقاربة ويسمى بذلك بمجموعة الضخ Pump Band . وفي بعض اخر كليزر الهليوم نيون مثلاً يكون مستوى الضخ في ذرة اخرى غير تلك التي تحدث عملية الليزر فيها ولكن كل هذه لا تختلف من حيث المبدأ عن المثال البسيط المبين في الشكل (7-10 ب).



شكل 7-10 : مخطط مستويات الطاقة لليزر ثلاثي المستويات (أ) ، ورباعي المستويات (ب)

ميكانيكية الضخ Pumping Mechanisms

كيف يمكن ضخ الطاقة الى مجموعة من الذرات او الجزيئات للحصول على حالة التوزيع العكسي ؟ لا يمكن بطبيعة الحال ضخ الطاقة حرارياً

الى الوسط , حيث تسخن هذه المجموعة وتعطيها طاقة حركية فقط , دون الحصول على عملية التوزيع العكسي .

تطرقنا في بداية هذا الفصل الى طريقتين للحصول على عملية التوزيع العكسي , فقد حصلنا عليها في الشكل (7-5) نتيجة سحب بعض الذرات من المستوى الارضي ليصبح عددها اقل مما عليه في المستوى الاعلى وأول مثال عملي لذلك كان ميزر الامونيا , وكلمة ميزر MASER تمثل الاحرف الاولى من Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation والتي تعني "تضخيم الامواج الدقيقة بطريقة الانبعاث المحفز للأشعة " ، اذ تضخ جزيئات الامونيا من خلال مرشح يفصل الجزيئات الواقعة في المستويين الواطئين الاوليين وبذلك نحصل على الجزيئات التي تكون في المستويات الاعلى فقط , ولكن لم تثبت هذه الطريقة نجاحها مع الليزرات الحديثة. على كل حال فان الطريقة الثانية وهي المستخدمة لعملية الضخ ألكهربائي تستخدم بصورة شائعة في الليزرات المختلفة , اذا ما وضع الوسط المستخدم لليزر امام شعاع من الالكترونات فان هذه ستؤدي الى حصول حالة التوزيع العكسي وبذلك تنتقل طاقتها الى الذرات نتيجة اصطدامها بها. وتستخدم هذه الطريقة مع اغلب انواع الليزرات ذات القدرة العالية . من الطرق الاخرى المستخدمة في ذلك هي طريقة التفريغ الكهربائي في الانبوب الحاوي على الغاز وبصورة مشابهة لاضوية مصابيح الفلوريسنت المعروفة . فعملية التوزيع العكسي تحصل في الذرات نتيجة مرور التيار

في الوسط الغازي هذا. ومن اهم انواع الليزرات المستخدمة لهذه الطريقة هي ليزرات , الهليوم- نيون وثاني اوكسيد الكاربون وغيرها.

تكون الذرات في الانواع الاخرى من الليزرات كليزر الياقوت وليزرالنيودميوم / ياك مرتبطة داخل نظام بلوري مكونة مادة صلبة وهذه بطبيعة الحال لا يمكن ضخ الطاقة فيها باستخدام التيار الكهربائي او باستخدام سيل من الالكترونات وبذلك فان عملية الضخ تتم بطريقة ضوئية , اذ تضخ كمية من الفوتونات ذات الطاقة المساوية لفرق الطاقة بين مستويي الضخ لتمتص من قبل الذرات وتنتقل بذلك الى المستوى الاعلى للطاقة.

وتستخدم الطاقة الكيمياوية في عملية الضخ وتسمى الليزرات بالليزرات الكيمياوية وهذه الطاقة تنتج نتيجة تفاعل مادتين او ثلاث مواد مع ظهور مادة جديدة اضافة للطاقة الناتجة . ويمكن ان تكون المادة الجديدة هذه عنصراً او مركباً . ونتيجة لهذه الطاقة تحصل عملية التوزيع العكسي , والقدرة الخارجة من هذه الليزرات تكون عادة قدرة عالية , لذلك وجدت لها استخدامات خاصة اهمها في المجالات العسكرية ، اذ تستخدم كاداة للتدمير .

وتستخدم كذلك الجسيمات النووية في عملية الضخ , والناتجة من انفلاق القنابل النووية , حيث تستغل الطاقة الناتجة من النواة في الحصول على عملية التوزيع العكسي في الوسط الليزري وقد تم الحصول على نبضة من شعاع الليزر قبل حصول الموجات الميكانيكية , والنتائج

الاخرى المصاحبة للقنبلة الذرية والتي ستؤدي الى تلف جهاز الليزر , وهذا النوع من الليزرات سيجد له استخدامات عسكرية في المستقبل القريب.

واخيراً هناك ليزر الكترون الحر ، والذي يتم الضخ فيه باستخدام الالكترونات ذات طاقة عالية والانبعاث الذي نحصل عليه ناتج من الالكترونات الحرة وليس المقيدة بالذرة او الجزيئة وبذلك تختلف التفسيرات الفيزياوية لليزر الالكترون الحر عن التفسيرات الخاصة بالليزرات الأخرى حيث ليس للالكترونات الحرة مستويات طاقة ثابتة مثل الالكترونات المقيدة فبذلك يمكن التحكم بسهولة بالطول الموجي للأشعة الخارجة. ولكن استخدام ليزر الالكترون الحر مقتصر على المختبرات المتخصصة ولإغراض الابحاث فقط نتيجة تعقيد المنظومة ، والتي يتوقع ان تجد لها استخدامات عديدة في المستقبل القريب وخاصة اذا ما اصبحت تكنولوجيتها ابسط*.

*لنتذكر ان الكتاب مؤلف في الثمانينات من القرن الماضي ولم احب كمترجم باضافه اي شيء جديد اليه ليكون نسخه طبق الاصل من النسخه الانكليزيه , وفي الجزء الثاني منه والذي ترجمته مؤخرا هناك العديد من الانواع الاخرى من الليزرات وتطبيقات جديدة لها.

الاسئلة

1- الوصف الرياضي لقانون بولتزمان هو :

$$N_i = N_0 \, EXP \, -[E_i/K_B \, T]$$

حيث تمثل N عدد الذرات (او الجزيئات) في المستوى i والذي طاقته اعلى من المستوى الارضي E_0 و N_0 تمثل عدد الذرات في المستوى الارضي. وثابت بولتزمان هو $1.38 * 10^{-23}$ جول / كلفن وT تمثل درجة الحرارة.

استخدم هذا القانون في حساب عدد الذرات في مستوى الليزر العلوي في ليزر الياقوت الحاوي على $2*10^{19}$ ايون من الكروم. افترض ان القضيب بدرجة حرارة الغرفة (300 كلفن) . (ملاحظة : احسب اولاً $E_i = hc/\lambda$ ونفترض ان الطول الموجي للياقوت هو 694.3 مايكرومتر).

2- لماذا لايمكن الحصول على شعاع مستمر من ليزر ذي المستويين الذي تضخ الطاقة فيه بطريقة ضوئية؟

3- إعط امثلة اخرى لمنظومات ليست في حالة توازن حراري ، ما هو العمر التلقائي التقريبي (الوقت الذي تستغرقه المنظومة للعودة الى حالة التوازن)؟

الفصل الثامن

مرنان الليزر Laser Resonator

نتطرق في هذا الفصل الى مبدأ مرنان الليزر ، الجهاز الذي يوفر التغذية العكسية المطلوبة للحصول على شعاع الليزر ، فقد لاحظنا في الفصل السابع ان عملية الانبعاث المحفز تتطلب وجود حالة التوزيع العكسي ، وسنلاحظ في هذا الفصل اهمية المرنان للحصول على الشعاع ذي القدرة العالية كما نلاحظ في بداية هذا الفصل ان المرنان ليس ضرورياً لحصول عملية الليزر ، ولكن لا يمكن عملياً الحصول على شعاع الليزر من دونه. ومن ثم نناقش عملية تدوير الطاقة داخل المرنان، وكيف يتحرك الشعاع داخل المرنان ذهاباً وايابا بين المرآتين ، وكذلك عملية الزيادة والنقصان في قدرة الشعاع نتيجة لذلك ، سنتوصل اخيراً الى انه في حالة الاستقرار ستكون كمية الربح مساوية الى كمية الخسارة. وسنناقش اخيراً احد انواع المرنان والذي يسمى بالمرنان غير المستقر Unstable Resonator والذي يستخدم للحصول على قدرة كبيرة من الاشعة تزيد كثيراً على القدرة التي نحصل عليها من الانواع الاخرى من المرنان ذات الطبيعة المستقرة.

وقبل البدء بتفاصيل الموضوع ، لابد لنا ان نميز بين مصطلحين سنستخدمهما بكثرة في هذا الفصل ، وهما المرنان Resonator ، والفجوة Cavity ، المصطلح الاخير يستخدم بكثرة في تكنولوجيا الامواج الدقيقة ، حيث تعني المذبذب الذي يحتاج الى هذه الفجوة لأداء عمله ،

بينما في الليزر تعني هذه عدة اشياء ، وما يماثلها في عملها في الامواج الدقيقة يسمى المرنان ، والذي يستخدم بكثرة ، ويعني الفجوة زائداً المرآتين.

لماذا المرنان ؟ Why a Resonator ?

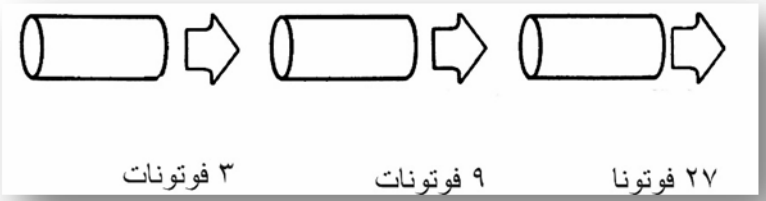
لنفترض ان لدينا ليزراً تتوفر فيه شروط التوزيع العكسي فقط ، دون توفر اي مستلزمات اخرى اي بالتحديد دون مرنان ، ولنفترض وجود حالة توزيع عكسي كبيرة في قضيب الليزر ، وهناك ذرة في نهاية القضيب اطلقت فوتوناً نتيجة الانبعاث التلقائي وباتجاه محور القضيب ، يمكن بطبيعة الحال ان يحفز هذا الفوتون ذرة اخرى لإطلاق فوتون مشابه له ، وبافتراضنا في البداية وجود حالة توزيع عكسي كبيرة ، يمكن لأحد الفوتونين ايضاً ان يحفز ذرة اخرى على اطلاق فوتون جديد ، وبذلك نحصل في نهاية القضيب على ثلاثة فوتونات.

اذا ما اعتبرنا ان طـاقـة الفـوتون في المرئي للأشعة هي تقريباً (10^{-19})، وطاقة الليزر الاعتيادية هي بحدود جول واحد (J1) . نكون بذلك بعيدين جداً عن المطلوب ، ماذا نفعل اذاً؟

الحل الوحيد امامنا هو اضافة عدداً من القضبان امام بعضها البعض كما في الشكل (8-1) ، فاذا ما استطاع كل فوتون خارج من القضيب اطلاق ثلاثة فوتونات من القضيب الذي امامه ، نحصل على تسعة فوتونات من القضيب الثاني ، و27 فوتوناً من القضيب الثالث ، وهكذا .

ولكننا نحتاج الى 10^{19} فوتوناً لنحصل على شعاع ذي جول واحد ، وبذلك نحتاج الى عدد كبير من قضبان الليزر ، وهذا غير عملي بطبيعة الحال ، فهل هناك اذن طريقة اخرى افضل ؟

الطريقة الفضلى هي باستخدام المرايا كما في الشكل (8-2) ، حيث يتم عكس الفوتونات الناتجة

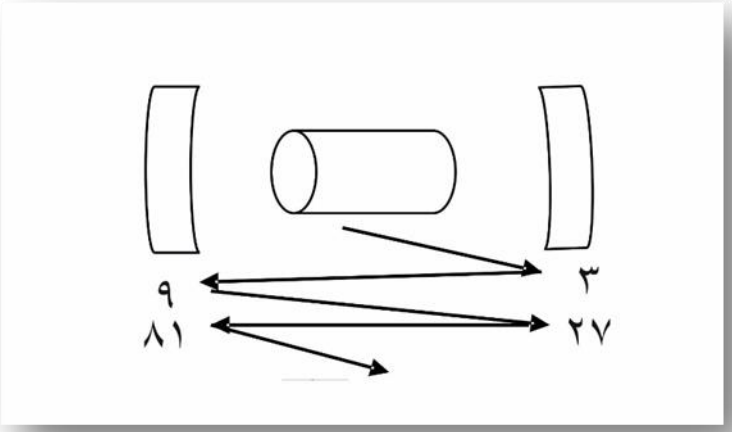


شكل 8-1 : كيف نصنع ليزر من دون مرنان.

الى الخلف والامام خلال القضيب للحصول على عملية انبعاث جديدة من خلال مرورها داخله ، وباستخدام المرايا المقعرة وكما يبدو من الشكل نحافظ على الاشعة ونمنعها من الخروج خارج القضيب ، وبجعل احدى المرايا ذات انعكاسية تامة 100% والأخرى اقل من ذلك بقليل ، بحيث يمكن لجزء من الضوء الخروج منها ، وهذا الجزء الخارج يمثل شعاع الليزر . وتتغير نفاذية المرآة هذه من 1% الى 50 % تقريباً وحسب نوع الليزر المستخدمة معه.

والجدير بالإشارة ان هناك انواعاً من الليزرات التي يمكن الحصول منها على 10^{19} فوتون من مجرد انعكاسة واحدة للأشعة داخل القضيب،

وهذه الليزرات العملاقة لا تحتاج الى وجود المرايا ، ومن هذه الانواع ، ليزر النيتروجين ، الذي يستخدم هذه الطريقة احياناً ، ومن هذا النوع نحصل على نبضة واحدة في كل عملية اطلاق للأشعة.

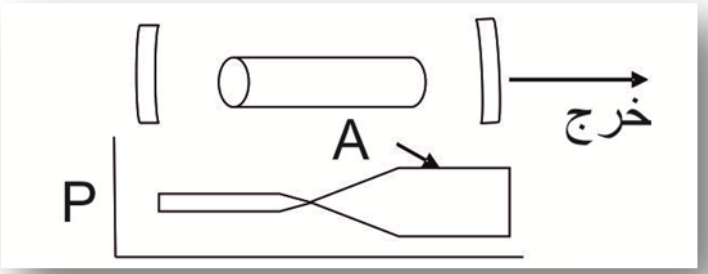


شكل 8-2 : كيف نصنع ليزر بمرنان

القدرة المدورة (المستديرة) Circulating power

اذا استمر الضوء بالتذبذب بين المرآتين كما في الشكل (8-2) ولفترة طويلة ، فسنحصل على حالة اتزان ، وبذلك تكون كمية الطاقة الخارجة من القضيب ثابتة هذه الحالة ليست صحيحة تماماً حيث هناك كمية من الطاقة تمتص من قبل المرايا ،ولكنها تعوض من الانبعاث الجديد لفوتونات جديدة من القضيب ، كما في الشكل (8-3) ، حيث نلاحظ تغير القدرة داخل المرنان ، ولمتابعة ذلك ، نبدأ مثلاً من النقطة (أ) ونتحرك نحو اليمين ، فسنلاحظ ان القدرة المدورة تهبط قرب المرآة الامامية ،

حيث يخرج قسم منها كشعاع ليزر نحو الخارج ، ويعود الجزء الاخر نحو الوسط الليزري ليعوض من جديد مرة اخرى . وكمية الفقدان في المرآة الخلفية قليلة جداً لكونها مراه عاكسة تماماً للأشعة الساقطة عليها ، وبذلك تعود الاشعة بنفس قدرتها تقريباً ، ويعود الشعاع لاداء الدورة الثانية ونصل الى النقطة (أ) ، لنبدأ من جديد.



شكل 8-3 : مخطط يمثل القدرة المدورة في مرنان الليزر

ويمكننا ملاحظة ان كمية القدرة الخارجة من الجهاز تحدد بمقدار القدرة المدورة ونفاذية المرآة الامامية ، فاذا افترضنا ان القدرة المدورة هي 50 واط ، للجهاز المبين في الشكل (8-3) ، ونفاذية المرآة الامامية هي 2%، فأن القدرة الخارجة تكون 2% من القدرة المدورة والساقطة على المرآة، اي واط واحد بالنسبة لمثالنا السابق ، ويمثل رياضياً :

$$P_{out} = \tau P_{circ}$$

اذ تمثل τ النفاذية للمرآة ، و P_{out} و P_{circ} ، هي القدرة الخارجة والقدرة المدورة تباعاً. ويستخدم المبدأ السابق ايضاً لحساب الطاقة

المدورة في المرنان ، حيث لا يمكن قياسها بصورة مباشرة بل تقاس القدرة الخارجة والتي تقسم على النفاذية للمرآة الامامية ، فهل يعني هذا انه بزيادة نفاذية المرآة ستزداد القدرة الخارجة من جهاز الليزر ؟ فالجواب كلا ، فبزيادة نفاذية المرآة فان القدرة المدورة ستقل ، وذلك لاعتماد القدرة الخارجة على القدرة المدورة اكثر من اعتمادها على النفاذية ، ولكل جهاز ليزر هناك نفاذية افضل للحصول على اعلى قدرة.

الربح والخسارة **Gain and Loss**

لو رجعنا ثانية الى الشكل (8-3) للاحظنا ان الحلقة الممثلة للقدرة فيه مغلقة ، وهذا يعني ان القدرة مخزونة في النظام ، بحيث نعود دائماً الى النقطة نفسها التي بدأنا منها ، لو سلكنا المسار الممثل للقدرة داخل المرنان، وهذا صحيح لاي حالة اتزان او ليزر ذو شعاع مستمر ، وغالباً ما تكون الحالة مختلفة في الليزرات النبضية ، حيث تنتقل الطاقة بسرعة عالية من حالة التوزيع العكسي الى القدرة المدورة الى القدرة الخارجة ، اذ لا يتوفر الوقت الكافي لحصول عملية الاتزان. ولنحصر اهتمامنا بليزرات الاشعة المستمرة CW في الوقت الحاضر ، والتي فيها يمكن ان تصل القدرة المدورة في نقطة ما على نفس قيمتها بعد دورة كاملة داخل المرنان ، فأن الربح المدور يكون مساوياً الخسارة المدورة في المرنان، اما اذا ما كان الربح المدور اقل من الخسارة المدورة فلن نحصل على شعاع ليزر اطلاقاً ، ومن جهة اخرى اذا ما كان الربح المدور اكبر من الخسارة المدورة ، فانه سيزداد الى ان يصل الى حالة

الاشباع لتصل في ذلك الوقت الخسارة المدورة الى المقدار نفسه وسنناقش حالة الاشباع هذه لاحقاً في هذا الفصل بشيء من التفصيل.

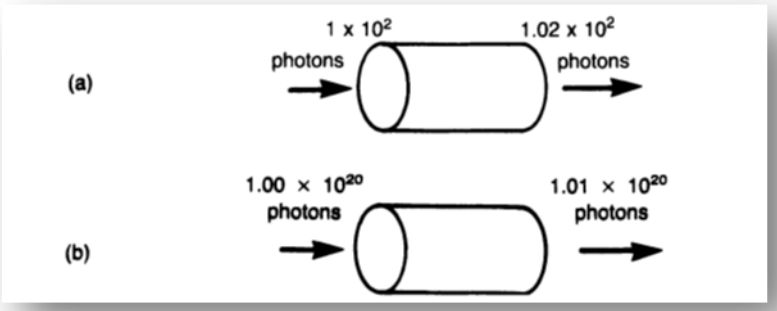
من الضروري ان نتذكر اننا ناقشنا المطلب الثاني لحصول عملية الليزر وقد لاحظنا في الفصل السابع انه للحصول على عملية الليزر يقتضي ان تكون هناك توزيع عكسي في الوسط الفعال ، وقد لاحظنا في هذا الفصل ان وجود حالة التوزيع العكسي وحدها غير كافية للحصول على شعاع الليزر ، بل يجب ان يكون التوزيع العكسي كبيراً بحيث يكون الربح المدور مساوياً للخسارة المدورة ، ويسمى اقل ربح كاف لحصول عملية الليزر ب " ربح التشبع Threshold Gain " .

ولنتساءل الان ماهي مسببات الخسارة الموجودة في مرنان الليزر؟

بطبيعة الحال هذه المسببات كثيرة ، ونفاذية المرآة تعد احداها ، ولكن قسماً من القدرة المدورة يفقد نتيجة اصطدام الفوتونات بأي سطح اخر غير المرايا ، لأننا نعلم انه ليس هناك سطح اخر غير المرايا ولأننا نعلم انه ليس هناك سطح بصري مطلق حيث ينعكس قسم من الضوء باتجاه غير مناسب من المرآة الخلفية نتيجة كون سطحها غير مصقول بصورة جيدة ، وقسم اخر من الضوء يتشتت داخل الوسط الفعال نتيجة عدم تجانس معامل انكساره ، وقسم اخر يحيد نتيجة صغر قطر شعاع الليزر داخل الوسط ، وهذه قد تضاف الى بعضها في ليزرات الاشعة المستمرة لتكون نسبة لا بأس بها من الخسارة .اذا ما فكرنا بهذا الموضوع لفترة وجيزة فأننا نلاحظ اننا في وضع محير حيث تعتمد الخسارة المدورة

على اجزاء المرنان الايجابية Passive ، كنفاذية المرايا وغيرها ، وبذلك يجب ان يساوي الربح المدور الخسارة المدورة . هل تلاحظ المشكلة ؟ المشكلة هي ما تم قياسه والذي تم قياسه والذي تم فيه حساب الربح المدور دون ان نلاحظ كيف تم ضخ الطاقة في الليزر . فهل هذا صحيح ؟ تبدو الحالة هكذا. ولفهم لماذا يجب ان نفهم ان هناك نوعين من الربح في الليزر : الربح المشبع والربح غير المشبع والفرق ببين الاثنين وضح في الشكل (8-4) فالربح غير المشبع يسمى احياناً " بربح الاشارة الصغيرة " وهو الربح الذي يظهر مع الاشارات الداخلة الصغيرة فقط ففي الشكل (8-4أ) تم تضخيم 100 فوتون بواسطة الوسط الليزري لتصبح 102 فوتون وبذلك فالربح غير المشبع هو 2% . ولكن في الشكل (8-4 ب) وباستخدام الوسط الفعال نفسه تم الحصول على تضخيم 1% فقط عندما ضخمت 10^{20} فوتون المار من خلاله الى $10 * 101^{20}$ فوتون. ماذا حدث ؟ لقد مرت اعداد كبيرة من الفوتونات من خلال الوسط وهي في الوقت نفسه محفزة الذرات خلال مرورها للإطلاق مهبطة اياها الى المستويات الدنيا وبذلك قل الربح - تشبع - من قيمته غير المشبعة في الشكل (8-4 أ).

لا تحفز الذرات في المستويات المتهيجة في الربح غير المشبع والتي تبدو في الشكل (8-4أ) على الاطلاق حيث يمكن لها ان تهبط الى المستويات وتنبعث فوتوناتها بطريقة الانبعاث التلقائي فقط او نتيجة



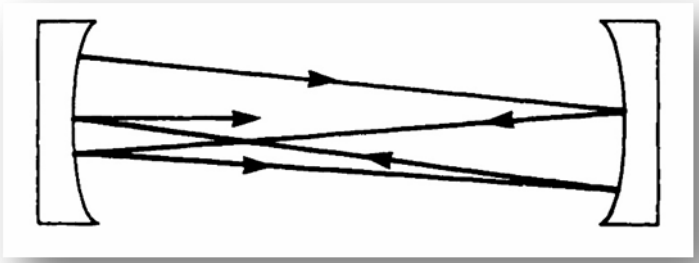
شكل 8-4: ربح غير مشبع (أ) وربح مشبع (ب)

اصطدامها بالذرات غير المحفزة . ولكن في حالة التشبع والتي تبدو في الشكل (8- 4 ب) فأن 10 ^{18} ذرة سوف تترك المستوي المتهيج وتحفز على الاطلاق وفقدان 10 ^{18} ذرة من المستوى المتهيج يؤدي الى تغيير الربح بين الحالتين . كيف نعلل ما ورد في الفقرات السابقة ؟ لنفكر اولا بليزر الشعاع المستمر CW الموضوع على المنضدة امامنا ، والذي يعمل بخسارة مدورة مقدارها 3% وربح مدور مقداره 3% ايضاً. ماذا يحصل عندما نغذي الجهاز بالقدرة الكهربائية ؟ سترتفع في الحال التغذية العكسية عالياً وكذلك الربح ، ولكن هذا الربح العالي سيزيد من القدرة المدورة ، وزيادة هذه القدرة تؤدي الى تشبع الربح بشكل اكثر مما كان عليه وبذلك يقل الربح فجأة الى 3% ولكن القدرة المدورة الان هي اكبر مما كانت عليه في البداية . ومن جانب اخر ففي حالة قطع الطاقة الكهربائية عن الجهاز تنعكس العملية وتقل بذلك القدرة المدورة ، ولكن يبقى الربح 3%. وعندها نلاحظ ان الربح الحقيقي لمرنان الليزر لا

يعتمد على الطاقة المجهزة ، بل يعتمد على القدرة المدورة وبالتالي تعتمد القدرة الخارجة على الطاقة الداخلة او (قدرة الضخ).

المرنان غير المستقر Unstable Resonators

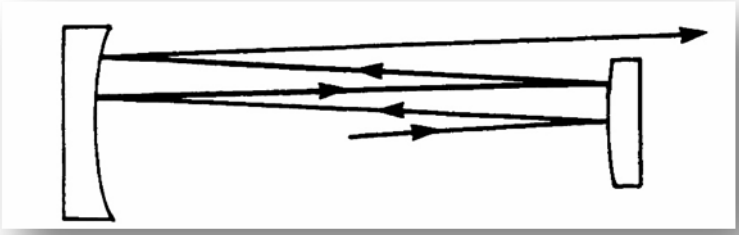
لأغلب انواع الليزرات مرنان مستقر ، حيث تؤدي المرايا المقعرة الى تركيز الشعاع قرب محور المرنان ، فاذا ما تتبعنا مسار شعاع الضوء بين مرآتي مرنان ليزر مستقر فأننا سنجد ان الشعاع ينعكس دائماً باتجاه محور المرنان بواسطة المرايا كما في الشكل (8-5) . والطريق الوحيد الذي يمكن ان يسلكه الشعاع ليخرج خارج المرنان يكون عبر احدى المرآتين.



شكل (8-5) :ينعكس الشعاع دائما نحو المركز بواسطة المرآة المقعرة في المرنان.

اما في المرنان غير المستقر المبين في الشكل (8-6) فان شعاع الضوء، يبتعد عن محور المرنان لحد ان يصطدم بالمرآة المحدبة صدفة والشعاع الخارج من هذا المرنان يشبه ال Doughnut وفي وسطه فتحة

ناتجة من وجود المرآة الصغيرة المحدبة (هناك طبعاً طرق افضل لتصميم



شكل (8-6) : يخرج جزء من الشعاع نحو الخارج في المرنان غير المستقر

المرنان غير المستقر للحصول على شعاع ليزر متكامل دون وجود فجوة في وسطه). ومن مزايا المرنان غير المستقر هو امكانية الحصول منه على شعاع ذي حجم كبير في الوسط الفعال ، وبذلك يستطيع الشعاع ان يتفاعل مع ذرات اكثر عدداً ، فتزداد القدرة الخارجة من الجهاز. ويستخدم المرنان غير المستقر عادة مع الليزرات ذات الطاقة العالية الغازية والصلبة على حد سواء. وأخيرا ننتبه الى ملاحظة ان لا تؤدي كلمة " مستقر هنا الى بعض الالتباس حيث ان المرنان المستقر هو الذي تحجز مراياه الشعاع بينها. ولا تعني شيئاً بالنسبة لحساسية المرنان لموازاة المرايا وتذبذب القدرة.

الاسئلة

1- افترض انك رغبت في صنع ليزر ينتج جولاً واحد (10 ^{19} فوتونا) ودون استخدام المرايا ، كما في الشكل (8-1) . كم قضيب ليزر ستحتاج لذلك.

2- احسب القدرة المدورة في ليزر النديميوم /ياك المستمر الشعاع والذي قدره الشعاع الخارج منه 10 واط . ونفاذية مرآته الامامية هي 6%. احسب القدرة المدورة في ليزر الهليوم – نيون والذي قدرته 2 ملي واط ونفاذية مرآته الامامية هي 1%.

3- اذا كانت نفاذية المرآة الامامية في الليزر المبين في الشكل ادناه هي 3 % . وتشتت العناصر البصرية المستخدمة فيه (ومن ضمنها المرايا) هي 0.25 % ونفاذية المرآة الخلفية هي 0.05 % احسب ربح التشبع المدور.

4- في ليزر النديميوم / ياك علاقة الربح الغير مشبع الى الربح المشبع تكون حسب المعادلة التالية:

$$g = g_0 / 1 + BP_c$$

حيث تمثل g الربح المشبع ، وg_0 الربح الغير مشبع ، وP_c القدرة المدورة ، وB هي معامل التشبع المحسوب تجريبياً. ومن هذه المعادلة والمعادلة :

$$P_{out} = \tau P_{circ}$$

اشتق معادلة تعبر عن القدرة الخارجة من الليزر بدلالة الربح غير المشبع (g_0) والربح المشبع (g) ومعامل التشبع (B) ونفاذية المرآة (τ).

اذا كان لليزر المبين في السؤال الثالث ربح تشبع مقداره 5% ومعامل تشبع 0.018 / واط. احسب القدرة الخارجة منه.

(ملاحظة : الربح المشبع يساوي نصف الخسارة المدورة. هل يمكنك توضيح ذلك ؟).

احسب القدرة الخارجة اذا ابدلت المرآة ذات نفاذية 3% بأخرى ذات نفاذية مساوية الى 2% . وأخرى 4%.

الفصل التاسع

انماط تذبذب المرنان Resonator Mode

عرفنا في الفصل الثامن لماذا يكون المرنان ضرورياً ، وكيف تتذبذب الطاقة الضوئية فيه رواحاً ومجيئاً بين المرآتين . وفي هذا الفصل نلقي نظرة على عملية تذبذب الطاقة هذه ، وعملياً سوف نلقي نظرة على توزيع هذا التذبذب فضائياً في المرنان ونلاحظ ان دراستنا لتوزيع الطاقة في المرنان سوف تقود الى فهم كيفية انتشار شعاع الليزر في الفضاء خارج المرنان وسنتطرق في هذا الفصل الى بعض المعادلات التي يمكن استخدامها لحساب كيفية تغيير خصائص شعاع الليزر في اثناء انتشاره ، كذلك كيفية اختيار المرايا المناسبة للمرنان للحصول على شعاع ليزر ذي خصائص معينة من القطر وزاوية الانفراج . وما سنتعلمه في هذا الفصل ايضاً كيفية حساب خصائص المرنان لنعرف ما اذا كان مستقراً ام لا. وأخيرا سوف نلاحظ كيف ان التوزيع الطولي Longitudinal Distribution للطاقة في فضاء المنان يؤثر في الشعاع الخارج من جهاز الليزر.

التوزيع الفضائي للطاقة Spatial Energy Distributions

حاول احد علماء الاغريق حفظ الضوء في قارورة ، حين وقف في ظهيرة يوم مشمس ، في يده قارورة صغيرة ، وجه فتحتها نحو الشمس بحيث دخلت اشعتها فيها ، وفجأة وضع غطاءها عليها وأسرع الى كهف مظلم وأزاح الغطاء بعناية ليدع الضوء يخرج منها ، لكنه لاحظ ان

القارورة مظلمة ولا يوجد فيها اي شيء من الضوء ، فكرر محاولاته عدة مرات ولم يصل إلا الى النتيجة ذاتها. ان نتيجة هذه التجربة كما نعلم هو الفشل طبعا ، ولكن هل تعلم لماذا ؟ ماذا حصل للضوء في داخل ألقارورة اين ذهب ؟ وكم استغرق من وقت ليذهب ، اينما يذهب؟

في لحظة ما كانت القارورة ملاى بالفوتونات المحصورة بين جوانبها، وبعد لحظة اغلقت القارورة لتختفي الفوتونات جميعها ، فأين ذهبت ؟ الفوتونات قد امتصت جميعها من قبل جدران القارورة ، حتى القارورة الاغريقية ذات الجدران البيضاء الصقيلة فأنها تمتص بحدود 10% من الاشعة الساقطة عليها ، فعندما تصطدم الاشعة بالجدران مئة مرة او اكثر فأنها تمتص جميعها ، ولكن كم يستغرق ذلك من وقت ؟.فاذا تصورنا ان القارورة كانت بقطر قدم واحد ، وإذا ما تذكرنا ان سرعة الضوء هي قدم واحد في النانوثانية (10^{-9}) تقريباً ، فيمكننا بذلك ملاحظة ان الضوء سوف يختفي بعد 100 نانو ثانية فقط ، فبذلك يكون الفيلسوف الاغريقي قد استخدم الفكرة بصورة صحيحة ، ولكنه لم يتحرك بالسرعة الكافية الى داخل الكهف.

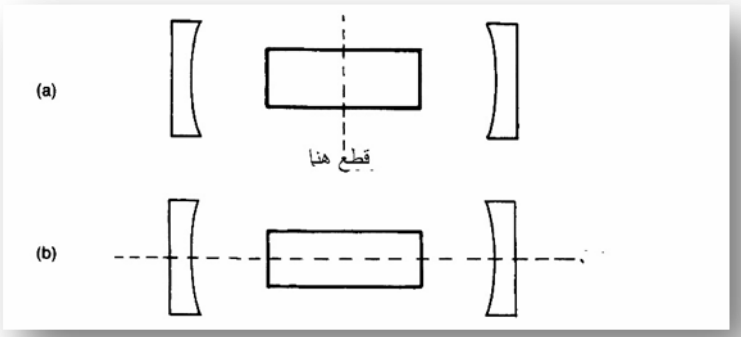
اما في القرن الحالي فقد حاول العلماء اثبات صحة نظرية القارورة الاغريقية ، ولم يكن مرنان الليزر سوى القارورة الحديثة التي استخدمت لحفظ الضوء ، وصممت هذه القارورة ووضع فيها ثقب صغير يسمح لقسم قليل من الضوء من الخروج منه ، واستخدم الوسط الفعال في

الليزر ليعوض ما فقد من ضوء من خلال هذه الفتحة ، وما فقد نتيجة العوامل الاخرى التي ذكرناها في الفصل السابق.

عندما نتكلم عن انماط التذبذب ، فإننا نتكلم عن توزيع الطاقة الضوئية بين مرايا الليزر ، وهذا يعني ان الطاقة لم تحفظ في المرنان بصورة متماثلة (متناظرة) كما يحفظ الماء في اناء زجاجي ، وبصورة اوضح فان الطاقة تخزن كمجموعات ، كما تخزن الكرات في الوعاء ، ويقاس نمط المرنان بطبيعة توزيع هذه المجموعات من الطاقة في المرنان ، وتوزع الطاقة داخل المرنان بطريقتين اما عرضياً ، وتسمى الانماط بذلك بالأنماط المستعرضة Transverse Mode او طولياً وتسمى الانماط الطولية Longitudinal Modes .

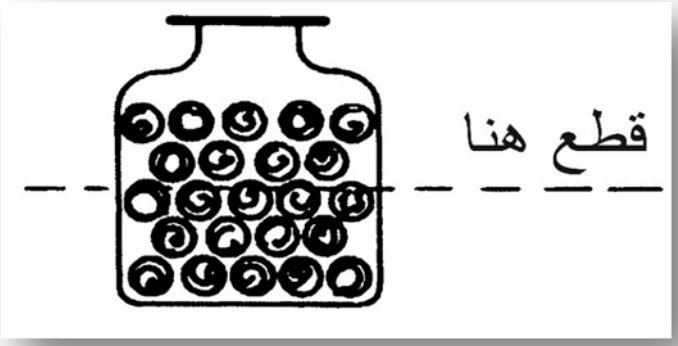
ولتصور الانماط المستعرضة في الليزر ، نفترض ان المرنان قد قطع في المنتصف الى نصفين ، وعلى طول المقطع العرضي لمحور الليزر ، كما في الشكل (9-1أ) ، فاذا ما فحصنا توزيع الطاقة بعد ذلك وعلى طول هذا المستوى ، فأننا سنرى شكل انماط الليزر المستعرضة هذه ، ومن جانب اخر اذا ما قطعنا المرنان كما في الشكل (9-1ب) فأننا سنشاهد الانماط الطولية في الليزر.

هذا المبدأ يشابه مبدأ توزيع الكرات في اناء ، كما في الشكل (9-2) . ولنتصور ان بإمكاننا رسم خارطة تمثل توزيع هذه الكرات بمستوى



شكل 9-1 : كيف نرى انماط الليزر المستعرضة (أ). والطولية (ب)

الشكل ، ولكن في مرنان الليزر فان خارطة توزيع الطاقة لا تتغير بتغير موقع المستوى ، فاذا ما تحرك المستوى في الشكل (9-1أ) الى اليمين او اليسار ، او اذا ما تحرك المستوى في الشكل (9-2 ب) الى الاعلى او الى الاسفل ، فان شكل توزيع الطاقة لن يتغير (وكذلك قياسه).



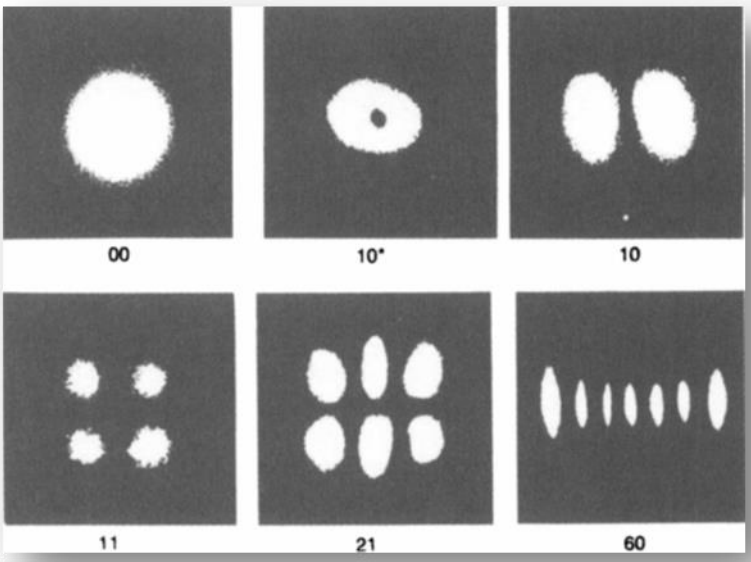
شكل 9 -2 : كيفية مشاهدة الانماط العرضية لتوزيع كرات القطن

انماط المرنان المستعرضة Transverse Resonator Modes

ليس من الضروري ان نقطع المرنان الى نصفين كما في الشكل (9-1أ) لنتمكن من مشاهدة اشكال الانماط المستعرضة من النظر الى شكل الشعاع الخارج من الليزر والذي يمثل شكل هذه الانماط ، اذ يخرج الشعاع من المرآة بنفس الشكل الذي هو عليه داخل المرنان ، ويمكن ان يكون الشعاع الخارج بعدة اشكال ، نلاحظ بعضاً منها في الشكل (9-3).

ونظرياً يمكن ان نجد اعداداً كبيرة من الانماط المختلفة وبترددات مختلفة، تتذبذب في المرنان ، ولكن عملياً هناك انماط محددة (او نمط واحد فقط) تتذبذب في المرنان ، والأنماط التي نلاحظها في الشكل (9-3) هي نتيجة تذبذب المرنان بنمط واحد في كل مرة فقط ، ولكن الليزر الذي يتذبذب بأنماط متعددة يعطي قدرة اكبر من الليزر الذي يتذبذب بنمط واحد ، اذ تتوزع الطاقة المتاحة لليزرعلى هذه الانماط، ونلاحظ في الشكل (9-3) ان لكل نمط شكلاً وتوزيعاً مختلفا ، وإذا ما تذكرنا ان المناطق المظلمة في الشكل تمثل ال Subscript ، فيمكن لنا تسمية النمط بصورة صحيحة ، وفي الواقع ليس هناك نظام معتمد لتسمية الانماط ، فيمكن ان نسمي احد الانماط TEM 41 ، ويسميه اخر TEM 41 والتسميتان صحيحتان (TEM هي مختصر Transverse Electric Mode وهي التي تمثل سلوكية الموجة داخل المرنان).

ومن الشكل (9-4) يمكننا ملاحظة ان الانماط ذات المستوى العالي

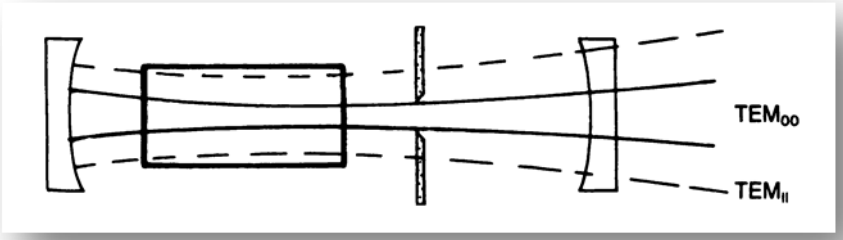


شكل 9-3 : اشكال الانماط العرضية لليزر

تكون اكبر من الانماط ذات المستوى الواطئ ، وفي اغلب التطبيقات العملية لأشعة الليزر نحتاج الى النمط TEM_{00} فقط . كيف اذاً يمكننا الحصول على هذا النمط دون غيره من الانماط من جهاز الليزر؟

يمكن الجواب عن السؤال السابق في معرفة حجم هذه الانماط والاختلاف بينهما فالنمط TEM_{00} هو اصغر الانماط المستعرضة مساحة ، فأذا ما وضعنا فتحة ذات قطر مناسب (شكل 9-4) في داخل المرنان فيمكن بذلك الحصول على النمط TEM_{00} فقط دون غيره من الانماط اذ هو النمط الوحيد الذي يمكن له المرور من هذه الفتحة الصغيرة ، ولا تظهر الانماط الاخرى لكون الخسارة اكبر من الربح الناتج في الوسط الفعال نتيجة لوجود هذه الفتحة الصغيرة . وتحتوي

بعض انواع الليزرات على مثل هذه الفتحة في داخل المرنان ، كما تبدو في الشكل (4-9) ، بينما الانواع الاخرى من الليزرات ذات القطر الصغير لا تحتاج الى مثل هذه الفتحة للحصول على النمط TEM_{00} ، بل يعمل قطرها الصغير عمل الفتحة.



شكل 4-9 : يجبر الثقب الموجود في المرنان الليزر التذبذب بالنمط الاساسي- TEM_{00}

نلاحظ في الشكل (4-9) ان النمط TEM_{11} يشغل حيزاً اكبر مما يشغله النمط TEM_{00} في الوسط الفعال ، وبذلك يتفاعل هذا بصورة اكبر مع عملية التوزيع العكسي ، ويستغل طاقة اكبر من الليزر ، ولهذا السبب فان الليزرات ذات الانماط العالية المستوى تعطي قدرة اعلى من تلك المشابهة لها والتي تعمل في النمط TEM_{00} ، ولكن مزايا هذا الاخير تتغلب عللى فرق القدرة هذا ، حيث يتطلب استخدام هذا النمط دون غيره في اغلب استخدامات الليزر.

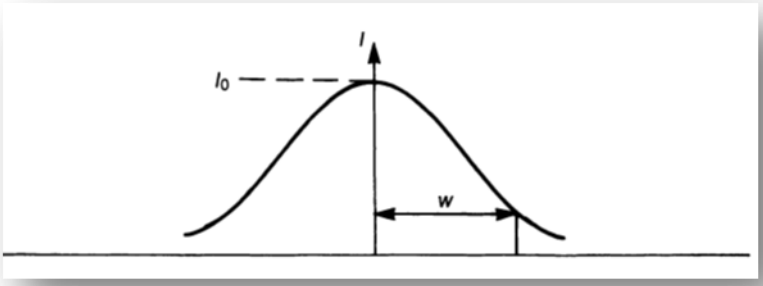
انتشار الشعاع الكاوسي Gaussian – Beam Propagation

لأهمية النمط TEM_{00} ، فقد ظهرت له العديد من الاسماء في مجال تكنولوجيا أللليزر فيسمى احياناً بالنمط الكاوسي ، والنمط الاساسي ، والنمط المحدد الحيود ، وغيرها من الاسماء التي تعني الشيء ذاته ، ولأهميته سندرس في هذه الفقرة كيفية انتشاره في الفضاء ، ولأجل ذلك يجب ان نفهم خاصيتين اساسيتين يتصرف الشعاع وفقهما ، وهما قطر الشعاع وهذا القطر تقريبي بالنسبة للشعاع الكاوسي ، حيث ليس لهذا الشعاع حواف حادة تحدده ، وإنما توزيعه يكون حسب المعادلة التالية:

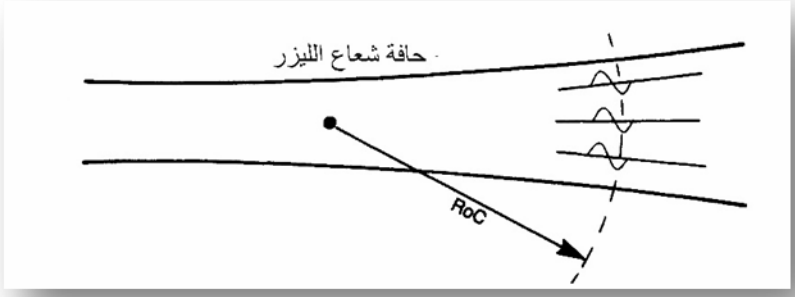
$$I = I_0 e^{-2x^2/w^2}$$

اذ يمثل I_0 شدة الاشعة في المركز ,x المسافة من المركز ، w قطر الشعاع . وشكل توزيع الاشعة المبين في الشكل (9-5) يمثل الحواف فيه بالنقاط التي تكون فيها الشدة مساوية الى $(1/e^2)$ اي تقريباً 13% من شدة الاشعة في المركز ، وهذه المنطقة تبدو للعين وكأنها حواف الشعاع. والعامل الاخر الذي يميز ويصف الشعاع الكاوسي ، هو نصف قطر التكور لجبهة الموجة للشعاع ويجب ان نتذكر هنا ان من اهم صفات الشعاع المتشاكه هي كون جميع مويجاته بطور واحد. فاذا ما اردنا ان نمثل النقاط التي تكون بطور واحد لجبهة الموجة بسطح ، يكون هذا

السطح كروياً بالنسبة للشعاع الكاوسي ، فسنجد وكما يبدو في الشكل (9-6) ، ان الخط المنقط يمر من النقاط ذاتها في جميع المويجات للشعاع.



شكل 9-5 : توزيع الشدة في الشعاع الكاوسي



شكل (9-6) : يكون سطح تساوي الطور (الخط المنقط) للشعاع الكاوسي كروياً.

يتغير كل من قطر الشعاع ونصف قطر التكور له مع انتشاره ، فيمكن لنا تصور الشعاع الكاوسي كما يبدو في الشكل (9-7) (وبطبيعة الحال لا يمكن لنا مشاهدة نصف قطر التكور لجبهة الموجة للشعاع ، ولكن يمكننا

تصور ذلك) ويمكن ان يتجه الشعاع باي من الاتجاهين ، من اليسار الى اليمين ، او من اليمين الى اليسار ، وقطر الشعاع ونصف قطر تكور جبهته هما نفسهما في الحالتين . ويكون نصف قطر التكور لجبهة الموجة مساوياً الى اللانهاية في منطقة تخصر الشعاع Waist ويقل هذا تباعاً كلما ابتعدنا عن هذه المنطقة ليبدأ بالزيادة مرة اخرى ، وللمسافات البعيدة جداً يكون مساوياً لبعده عن منطقة التخصر تقريباً. وهذه الزيادة تكون تدريجية كلما ابتعدنا عن منطقة التخصر.

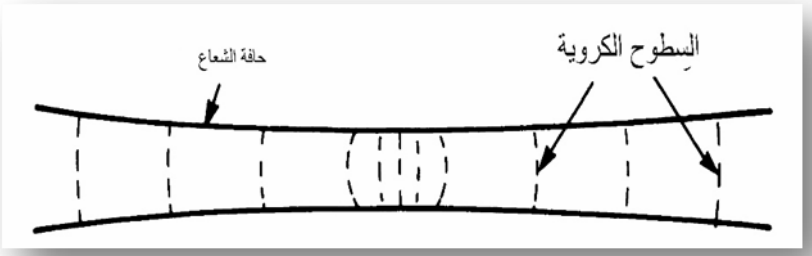
يمكن لنا من المعادلات ادناه حساب كل من نصف قطر الشعاع W ، ونصف قطر التكور لجبهته R في منطقة تبعد Z عن منطقة التخصر ، اذا ما علمنا نصف قطر الشعاع عند منطقة التخصر W_0 والطول الموجي له λ .

$$w = w_0\left[1+\left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$R = z\left[1+\left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2\right]$$

يمكن لنا من المعادلة الاولى ان نحصل على قطر الشعاع ، ومن الثانية على نصف قطر التكور لجبهة الموجة ، ولنستخدم الان هاتين المعادلتين في بعض الامثلة المفيدة.

لنفترض اننا نحتاج الى اجراء تجربة لقياس المسافة بين الارض والقمر ولتحقيق ذلك نرسل نبضة من شعاع الليزر الى عاكس موجود على سطح القمر وضعه احد رواد الفضاء ، وبقياس الوقت الذي تستغرقه



شكل 9-7 : يتغير كل من قطر الشعاع الكاوسي وقطر تكور جبهته اثناء انتقاله في الفضاء

هذه النبضة للذهاب الى القمر والعودة ثانية وبدقة متناهية ، يمكننا حساب هذه المسافة وبدقة تصل الى حد القدم او الانج الواحد. ولكن كم سيكون قطر الشعاع المرسل على سطح القمر ؟ فاذا ما كان قطره كبيراً جداً ، فهذا يعني ان نسبة قليلة جداً منه فقط تنعكس بواسطة العاكس ، وبذلك فان كمية الاشعة التي تعود الى الارض تكون من الصغر بحيث لا يمكن قياسها او التحسس بها. فاذا ما استخدمنا ليزر النديميوم / ياك ، الذي يبلغ طول موجته 1,06 مايكرومتر ، ونصف قطر تخصره (نصف قطر الشعاع عند منطقة التخصر) 0.5 مليمتر. والمسافة التقريبية بين الارض والقمر هي 239,000 ميل تقريباً. وباستخدام المعادلة الاولى:

$$w = w_0\left[1+\left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^{1/2}$$

والمعلومات التي لدينا هي :

$\lambda = 1.06 * 10^{-6}$ m

$w_0 = 5*10^{-4}$ m

$z = 239,000$ mi $= 3.84*10^{8}$ m

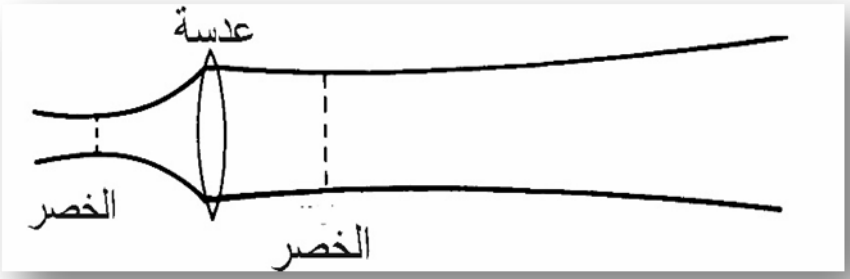
وبتعويضها في المعادلة اعلاه نحصل :

$$w = (5\times10^{-4}\,\mathrm{m})\left\{1+\left[\frac{(1.06\times10^{-4}\,\mathrm{m})(3.84\times10^{8}\,\mathrm{m})}{\pi(5\times10^{-4}\,\mathrm{m})}\right]^2\right\}^{1/2}$$

$$w = (5\times10^{-4}\,\mathrm{m})[1+(5.2\times10^{8})^2]^{1/2}$$

$$\approx (5\times10^{-4}\,\mathrm{m})(5.2\times10^{8}\,\mathrm{m}) = 2.5\times10^{5}\,\mathrm{m}$$

وهذا يمثل نصف قطر كبير جداً للشعاع ، ولكون قطر العاكس لا يتجاوز المتر الواحد ، فان جزءاً قليلاً جداً من الشعاع فقط ينعكس نحو الارض. ماذا يمكن لنا ان نفعل لنقلل من قطر الشعاع على سطح ألقمر؟



شكل 9-8 : تغير العدسة الشعاع الكاوسي الى اخر

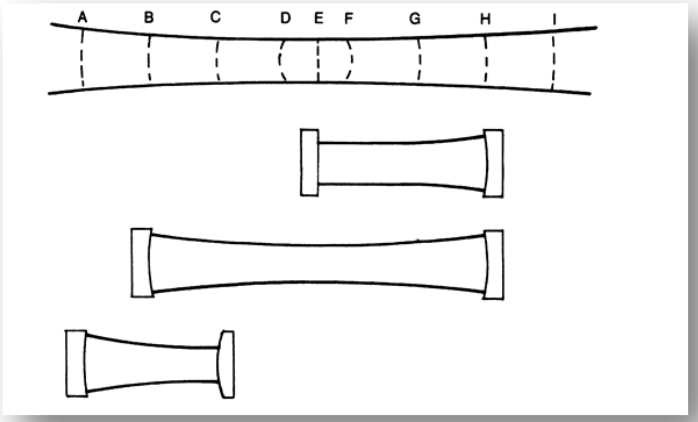
لو القينا نظرة على المعادلة السابقة ، لوجدنا هناك ثلاث معاملات هي W_0 , Z, λ ، فالطول الموجي للشعاع ثابت ، وكذلك بعد القمر عن الارض لا يمكن تغييره ، ولكن يمكننا التحكم بقطر الشعاع وهذا هو الحل الامثل للتغلب على المشكلة السابقة ، فكلما ازداد نصف قطر التكور للشعاع الكاوسي قلت انتشاره ، اذا ما استخدمنا تلسكوباً لتعريض الشعاع (زيادة نصف قطر تخصره) امكننا الاقلال من زاوية انتشاره وبمعرفة قطر التخصر للشعاع الكاوسي يمكن معرفة قطر الشعاع في اي نقطة وعلى اي مسافة وكذلك نصف قطر التكور لجبهته ، وهذا لأنه هناك عدة انواع من الاشعة ذات التوزيع الكاوسي ، والتي تختلف بقطر التخصر لها وبذلك بزاوية الانتشار . ويمكن الحصول على جميع الخواص للأشعة الكاوسية اذا ما علمنا نصف قطر منطقة التخصر (في حالة كون الطول الموجي ثابتاً) . وباستخدام عدسة او مجموعة من العدسات او مرآة جامعة يمكن لنا تحويل الشعاع الكاوسي من نوع الى اخر ، فنلاحظ مثلاً

في الشكل (9-8) شعاع كاوسياً ذا قطر صغير وزاوية انفراج اصغر باستخدام عدسة منفردة.

ويمكننا تصور العديد من الاستخدامات لهذا المعادلة ، فيحتاج المصممون مثلاً معرفة قطر شعاع الليزر على مسافة معينة لاستخدام الكاشف المناسب لذلك .

لكن اين يمكننا استخدام المعادلة الثانية ؟ وماذا يعني لنا نصف قطر تكور جبهة الموجة ؟ وما أهميته للإجابة على الاسئلة السابقة يجب علينا ان نعلم الحقائق التالية ، اولها يجب ان تكون جبهة الموجة للشعاع الكاوسي منطبقة تماماً على تكور المرايا في المرنان ، والشعاع الكاوسي في الشكل (9-7) موضح مرة اخرى في الشكل (9-9) ، مع انواع من اشكال المرنان المناسبة لأجزائه ، فالجزء المحصور بين H,E من الشعاع يمكن له ان يتذبذب في المرنان المحتوي على مرآة مستوية وأخرى يطابق تقوسهما تقوس الشعاع في المنطقة H ، ويمكن استخدام مرآتين كرويتين اذا ما اردنا لجزء الشعاع الواقع بين B,H ان يتذبذب ، ويمكن كذلك استخدام مرآة محدبة للحصول على مرنان ثابت كما نلاحظ ذلك في الشكل الاسفل من الشكل (9-9).

ومن السهولة فهم المبدأ السابق ، ولماذا يجب ان تطابق جبهة الموجة للشعاع الكاوسي تكور مرآة المرنان في الليزر ، اذ نعلم ان الطاقة تنتقل في الشعاع الكاوسي كما في اي موجة اخرى بشكل عمودي على جبهة



شكل 9-9: يولد المرنان الشعاع الكاوسي الذي ينطبق تقوس جبهته على تقوس مراياه

الموجة ، فاذا ما اردنا ان نلاحظ او نشاهد انتقال الطاقة في موجة ، فبإمكاننا رسم عدد من الاسهم على طول جبهة الموجة ، وبصورة عمودية عليها عند نقاط التقائها ،فاذا ما كان تكور المرآة يطابق تكور جبهة الموجة تماماً فان الطاقة الموجودة في جبهة الموجة تنعكس بالاتجاه نفسه ، ويكون المرنان بذلك ثابتاً. ومن هنا يتبين لنا اهمية المعادلة الثانية، اذ توضح لنا نوعية المرآة التي يجب ان نستخدمها لنحصل على الشعاع الكاوسي في مرنان ثابت. لنلق نظرة على المثال التالي ، لنفرض ان المطلوب منا تصميم ليزر الاركون(514.5) نانومتر بقطر شعاع (0.5 ملم) في منتصف الليزر تماماً ، والبعد بين مرآتيه متر واحد . فما مواصفات المرايا التي يجب استخدامها لنحصل على النتائج السابقة ؟

يجب اولاً حساب نصف قطر تكور جبهة الموجة عند المرايا ، لاختيار المرايا المناسبة ، ويحسب ذلك من المعادلة التالية:

$$R = z\left[1+\left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2\right]$$

والمعلومات التي لدينا هي :

$z = 5*10^{-1}$ m

$\lambda = 5.14*10^{-7}$ m

$w_0 = 2.5*10^{-4}$m

وبتعويضها في المعادلة اعلاه ، نحصل على :

$$R = (5\times10^{-1}\text{m})\left\{1+\left[\frac{\pi(2.5\times10^{-4}\text{m})^2}{(5.14\times10^{-7}\text{m})(5\times10^{-1}\text{m})}\right]^2\right\}$$

$R = (5*10^{-1}m)[1+(0.76)^2]$

$= (5*10^{-1}m)(1.58)$

$= 0.79$ m , or 79 cm

اي يجب استخدام مرايا بنصف تكور قدره 80 سم . ولكن ما حجم المرايا المطلوبة ؟ بطبيعة الحال يجب ان يكون حجم المرايا (نصف قطرها) مساوياً في الاقل لقطر الشعاع في نقطة التقائه مع المرايا ، هل تستطيع حساب ذلك ؟ حاول فسترى ان حسابها ليس صعباً.

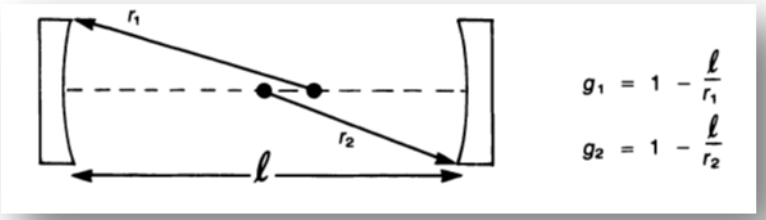
لقد عرفنا في الفصل الثامن ان المرنان المستقر هو الذي تحصر مراياه الشعاع داخلها ولا تدعه يخرج جانباً ، بل يبقى يتذبب نحو الامام والخلف بينها والى الابد. وبعد ان تعرفنا في هذا الفصل على الشعاع الكاوسي ، يمكننا ان نعرف المرنان المستقر بشكل اخر ، فالمرنان المستقر هو المرنان الذي تكون جبهة الموجة للشعاع الكاوسي الذي فيه متطابقة تماماً مع سطح مرآتيه (تكور مرآتيه). وبطبيعة الحال هناك بعض التصاميم التي لا تنطبق عليها هذا التعريف ، كالمرنان الذي يحتوي على مرآتين محدبتين مثلاً ، ويبقى من الصعب جداً الحكم على استقرارية المرنان بمجرد النظر اليه فقد لاحظنا في الشكل (8-8) مرناناً مكونا من مرآتين احداهما مقعرة والأخرى محدبة ، وهذا غير مستقر كما يبدو من الشكل ، وفي الشكل (9-9) نلاحظ مرناناً مشابهاً له ومكوناً ايضاً من مرآتين احدهما محدبة والأخرى مقعرة ولكنه مستقر ، والاختلاف واضح بين الاثنين اذ تعتمد الاستقرارية اساساً على تكور المرآتين. والشيء الجدير بالذكر ان المرنان الذي يحتوي على مرآتين مقعرتين لا ينبغي ان يكون دائماً مستقراً ، اذ تعتمد الاستقرارية ايضاً في هذا على تقوس المرآتين. بم نفسر ذلك ؟ اليس هناك طريقة لفحص استقرارية المرنان؟

لحسن الحظ هناك طريقة لذلك ، وإلا لكان الامر يتطلب تصنيع المرنان وتشغيل الجهاز لنرى بعد ذلك ان كان يعمل ام لا ، وهذه الطريقة ليست

بالسهلة . فنلاحظ في الشكل (9-1). المعلومات التي يمكن بواسطتها حساب استقرارية المرنان ، وهي تكور المرآتين r_1,r_2 والمسافة بينهما l، فاذا كانت المرآة محدبة فان نصف قطر تكورها يعتبر سالب . وتحسب حالة الاستقرارية من المعادلة التالية:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1$$

حيث يسمى كل من g_1,g_2 بالمعامل g والموضح في الشكل (9-10) فاذا ما كان حاصل ضربهما واقعاً بين الصفر والواحد ، فان المرنان يكون مستقراً . ولنلاحظ الان المثال التالي.



شكل 9-10 : المعاملات g الخاصة بحساب استقرارية المرنان

نلاحظ في الشكل (9-11) مرناناً مكوناً من مرآتين ، احدهما محدبة ، والأخرى مقعرة , لنحسب ما اذا كان هذا مرناناً مستقراً ام غير مستقر ، ويجب اولاً ان نحسب المعاملات g_1,g_2 للمرآتين :

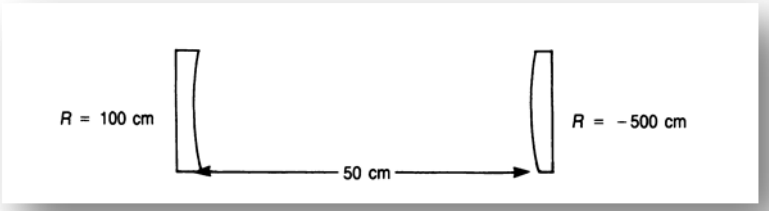
$g_1 = 1 - (50cm/-500\ cm) = 1.1$

$g_2 = 1- (50cm/ 100cm)= 0.5$

وثم حاصل ضربهما

$$g_1g_2 = (1.1)(0.5) = 0.55$$

ولكون الرقم (0،55) واقعاً بين الصفر والواحد ، فان المرنان يعتبر مستقراً ، ويمكن الحصول منه على النمط الكاوسي ، او اي نمط اخر من مستوى اعلى مبين في الشكل (9-3) . والشيء الجدير بالذكر والملاحظ ان الاستقرارية تعتمد فقط على تقوس المرآتين والمسافة بينهما ، ولا تعتمد على نوع الوسط الفعال والطول الموجي للأشعة ، او اي من العوامل الاخرى ، فالمرنان المبين في الشكل (9-11) يعتبر مرناناً



شكل 9-11 : مرنان مستقر ذو مراتين مقعرة ، محدبة

مستقراً لليزر الهليوم – نيون ، ولليزر الاركون ، وثاني اوكسيد الكاربون وغيرها.

نلاحظ في الشكل (9-12) مراناً مكوناً من مراتين مقعرتين ، لنرى ما اذا كان مستقراً ام لا . نحسب اولاً المعاملات g_1,g_2

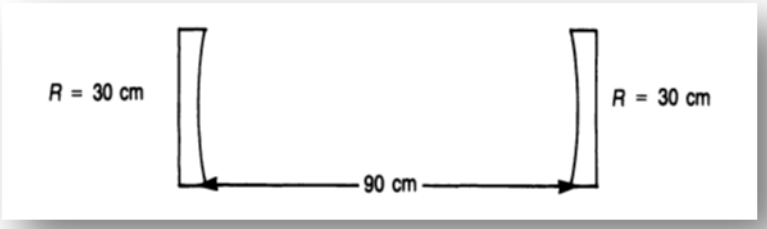
$$g_1 = g_2 = 1\text{-}9/3 = -2$$

وثم حاصل ضربهما ،

$$g_1g_2 = (-2)^2=4$$

ونلاحظ هنا ان حاصل الضرب اكبر من واحد ، وبذلك يعتبر المرنان غير مستقر . ولا تكفي استقرارية المرنان لنحصل على الشعاع من جهاز الليزر اذ يجب ان تكون المرآتان متوازيتين كذلك ، لتحصرا الشعاع بينهما.

وكذلك يجب الانتباه الى ان عملية فحص اتزان المرنان باستخدام المعادلة السابقة والموضحة في هذا الفصل لا يمكن استخدامها في فحص موازاة المرآتين. وهناك انواع من المرنان الذي يمكن ان تبقى الطاقة الخارجة منه دون فقدان يذكر ، اذا ما حركت احدى المرآتين قليلاً ، وهناك انواع تفقد الطاقة بكاملها اذا ما حرك قليلاً ، وكما بينا لا يمكن للمعاملات g_1,g_2 ان تعطيا اي انطباع عن مدى حساسية المرنان.



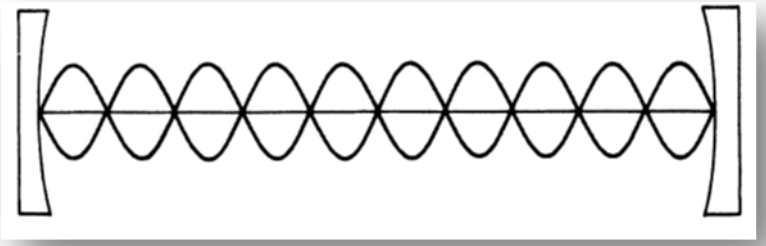
شكل 9-12 : مرنان غير مستقر.

الانماط الطولية Longitudinal Modes

لا يكون تغير الطاقة المخزونة في مرنان الليزر بشكل عمودي على المحور الطولي للمرنان كما في الشكل (9-1أ) فقط ، بل يمكن له ان يكون على طول المحور ايضاً كما في الشكل (9-1 ب) . ولكن التغيرات الطولية هذه تكون اصغر بكثير من حيث المقياس من التغيرات المستعرضة ويتمثل كل نمط طولي في المرنان بموجة واقفة Standing Wave من الضوء مكونة من تراكب موجتين متحركتين، تتحركان باتجاهين متعاكسين ويوضح الشكل (9-13)التوزيع الطاقي لأحد انواع هذه الموجات.

وكما نلاحظ في هذا الشكل يجب ان يتناسب الطول الموجي للضوء مع حجم المرايا ، ويمكن لنا ان نحسب عدد الموجات بين المرآتين في اي ليزر ، اذا ما افترضنا ان المرآتين تبعدان عن بعضهما مسافة 30 سم مثلاً في ليزر طوله الموجي مايكرون واحد ، يكون بذلك عدد الاطوال الموجية المحصورة بين المرآتين هو

$$N*l/\lambda = 3*10^{-1}\,m\,/(1*10^{-6}m) = 300{,}000$$



شكل 9 -13 : توزيع الطاقة في ليزر ذي نمط طولي مفرد

في حين نلاحظ في الشكل (9-31) خمسة اطوال موجية فقط ، وهذا لغرض التوضيح فقط. وبإمكاننا ايضاً ملاحظة ما يسمى بال Boundary Conditions الخاصة بالموجات الضوئية الواقفة في المرنان ، والتي يجب ان تكون عقداً Nodes عند كلتا المرآتين (تمثل العقدة للموجة بالنقطة التي تمر الموجة فيها من نقطة الصفر)، وهذا يقودنا الى الاستنتاج المهم ، وهو لا يمكن لجميع الاطوال الموجية ان تعمل في المرنان الواحد، اذ يجب ان يحقق الطول الموجي العامل داخل المرنان الشرط التالي ، هو وجود اعداد صحيحة من انصاف الاطوال الموجية بين المرآتين ، فيمكن ان يكون هناك 600000 نصف طول موجي او 600001 كما في المثال السابق ، ولكن لا يمكن ان يكون هناك شيء بينهما.

لو امعنا النظر في المثال السابق للاحظنا انه لا يوجد فرق يذكر بين الاثنين ، فكل منهما يمثل 300000 طول موجي ، وحيث لا يمكن التحكم بالمسافة بين المرآتين الى حد نصف طول الموجة ، لذا نرى في

مرنان الليزر اعداداً من انصاف الاطوال الموجية للأنماط الطولية المختلفة. لنحسب الان الفرق الترددي بين الانماط الطولية المتعاقبة في مرنان الليزر ، وفي حساباتنا هذه سوف نستخدم بعض المبادئ البسيطة والخاصة بالتردد والطول الموجي ، والتي مر ذكرها في الفصل الثاني ، ولنبدأ بمتطلبات الطول الموجي اذ يجب ان يكون هناك عدد صحيح من انصاف الاطوال الموجية بين المرآتين ، وهذا يمثل رياضياً بالصيغة التالية.

$$n \lambda/2 = l$$

حيث تمثل n عدداً صحيحاً و l المسافة بين المرآتين ،وبذلك :

$$\lambda = 2l/n$$

ومن الفصل الثاني

$$f = C/\lambda$$

فبذلك

$$f_n = n (C/2l)$$

حيث تمثل C سرعة الضوء . والتردد للخط المجاور والذي يحتوي على (n+1) من انصاف الاطوال الموجية ، هو :

$$f_n +1 = (n+1) c/2l$$

وبذلك يكون فرق التردد ΔF

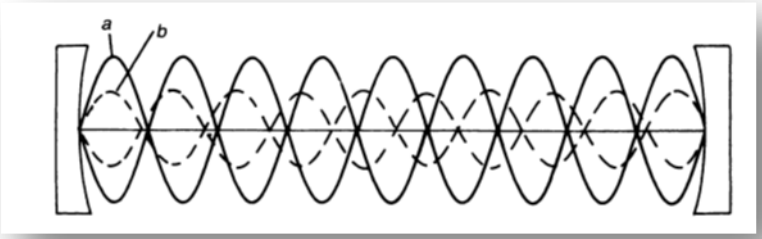
$$\Delta f = f_{n+1} - f_n = C/2l$$

هل سبق ان لاحظنا هذه المعادلة ؟ طبعاً فهي مشابهة للمعادلة الخاصة بقياس التداخل Perot Fabry والموضحة في الفصل الرابع . وأصبح الامر الان واضحاً وعلمنا من اين اتى فرق التردد هذا ، حيث يمثل كل واحد موجة واقفة بين مرايا مقياس التداخل السابق .

والشيء الجدير بالملاحظة ان فرق التردد يعتمد على المسافة بين المرآتين فقط ، ولا يعتمد على الطول الموجي للشعاع ، ففرق التردد لليزر الهليوم نيون ، ذي المرنان ذي الطول 30 سم ، هو ذاته لليزر النديميوم/ياك ذي المرنان ذي الطول 30 سم ، وإذا اردنا حساب هذا الفرق ، فسيكون بالشكل التالي :

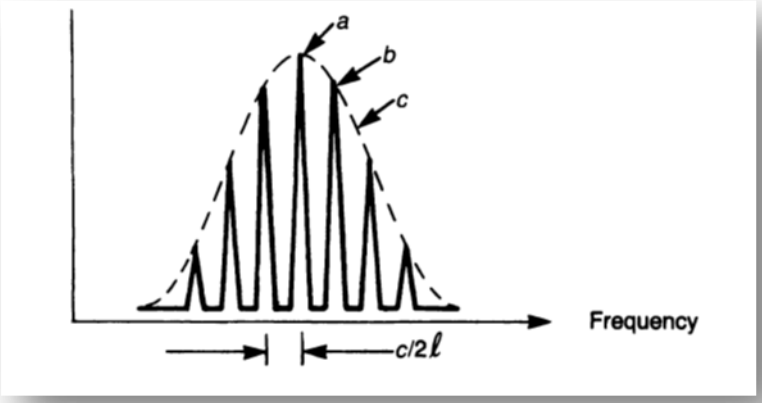
$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{3*10^8\ \mathrm{m/s}}{2(3\times 10 m^{-1})} = 5*10^8\ \mathrm{m/s}$$

ولكن في الواقع ان فرق التردد لليزر الهليوم / نيون او ليزر الياك المبينين في المثال السابق هو اكثر من ذلك ، لذا يظهر لدينا العديد من الانماط الطولية التي تتذبذب في المرنان بالوقت نفسه . ونلاحظ في الشكل (9-14) نمطين طوليين يتذبذبان في المرنان ، وفي الشكل (9-15) طيف نحصل عليه نتيجة لتعدد الانماط الطولية هذه ،والنمطان



شكل 9-14 : نمطي ليزر طوليين

a,b يمثلان النمطين المبينين في الشكل السابق (ولكن ليست جميع الانماط المبينة في الشكل (9-15) ، موضحة في الشكل (9-14). ويحدد الخط المنقط في الشكل (9-15) الربح gain للوسط الفعال ، وكما سنتطرق لذلك في الفصل القادم. لاحظ عدم وجود نمط في المنطقة C في الشكل (9-15)، وهذا يدل على ان التردد في هذه المنطقة لا يمثل عدداً صحيحاً من انصاف الاطوال الموجية الواقعة بين المرآتين.



شكل 9-15 : الطيف الترددي لأنماط الليزر الطولية

الاسئلة

1- استخدم ليزر الياقوت (λ = 694،3 نانومتر) لمتابعة قمر صناعي في مدار له حول الارض وبارتفاع مقداره 500 ميل عنا مباشرة ، اذا كان خصر شعاع الليزر هو 2 ملي متر عند الليزر. احسب قطر الشعاع عند القمر الصناعي.

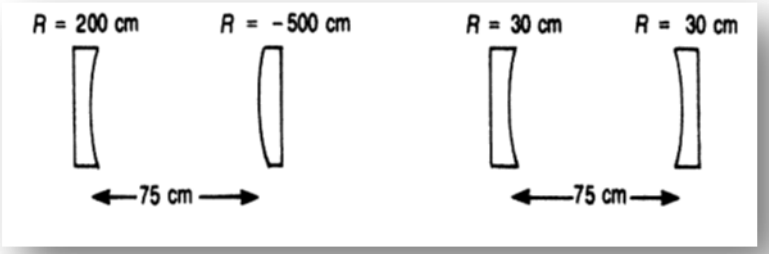
2- استخدم تلسكوب مع مقدرة مدى ليزرية لنحصل منه على قطر للشعاع مقداره متر واحد على الارض . كم سيكون قطر الشعاع على سطح القمر ؟ اذا استخدمنا ليزر النديميوم / ياك (1,06 مايكرون).

3- كم هو عرض شعاع الليزر على مرآتي ليزر الاركون المبين في نهاية الفقرة الخاصة بالشعاع الكاوسي ، اهمل تأثير المرايا كعدسات ، واحسب قطر الشعاع على بعد 25 متراً من الليزر.

4- صمم مرنانا لليزر الهليوم – نيون والذي تخصر شعاعه هو 0.25 ملمتر على المرآه الامامية . والمسافة بين المرآتين هي 30 سم.

5- وضع ليزرا هليوم نيون يعملان بالنمط الطبيعي (TEM_{00}) على منضدة وكان لكل منهما مرآة امامية مستوية ، وتخصر احدهما هو 0.5 ملم والأخر هو 1 ملم . واعتيادياً سيحصل انفراج لشعاع الاول اكثر مما يحصل للشعاع الثاني . ويتساوى قطرا الشعاعين بعد مسافة معينة. احسب هذه المسافة.

6- اي مرنان من الشكل المبين ادناه مستقراً؟



7- ما فرق التردد بين الانماط الطولية في ليزر الاركون المبين في السؤال الثالث اعلاه؟

8- اذا باعدنا مرآتي الليزر المبين في الشكل (9-14) . كيف سيتغير شكل طيف التردد المبين في الشكل (9-15)؟ ارسم الطيف الجديد موضحاً التغير الحاصل في المنحني المنقط وكذلك شكل الانماط . اعد الرسم مبيناً التغيير الذي سيحصل اذا مما قاربنا المراتين.

الفصل العاشر

تضييق عرض نطاق التردد لشعاع الليزر

Reducing Laser Bandwidth

سنتطرق في هذا الفصل الى طرق تضييق عرض نطاق شعاع الليزر للحصول على شعاع احادي اللون بصورة اكثر دقة مما هو عليه في منظومات الليزر الاعتيادية. يعتبر الليزر من اكثر المصادر الضوئية الاحادية اللون ، ولكن هذه الاحادية في اللون تبقى احياناً قاصرة في بعض الاستخدامات الخاصة ، كفصل النظائر عن بعضها والدراسات الطيفية للمواد ، اذ نحتاج ان نحصل على عرض نطاق ترددي ضيق جداً لذلك.

درسنا في الفصل الخامس خصائص اشعة الليزر وكونا فكرة مبسطة عن عرض النطاق ، وسوف ندرس في هذا الفصل الطرق المستخدمة لقياس عرض نطاق التردد ، وكذلك سنطلع على المسببات المؤدية الى زيادة عرض النطاق لشعاع الليزر ، ومن ثم الطرق المستخدمة للإقلال من ذلك، وكيفية اخضاع الشعاع الى التذبذب بنمط طولي واحد .

تمر علينا عدة مصطلحات في تكنولوجيا الليزر كعرض النطاق Band Width وعرض الخط Line Width وعرض الطيف Spectra Width وهذه جميعها تعني الشيء ذاته ، اي درجة احادية الطول الموجي لشعاع

أللیزر وكما لاحظنا في الفصل الخامس فان عرض النطاق يقل بازدياد التشاكه الزمني للشعاع.

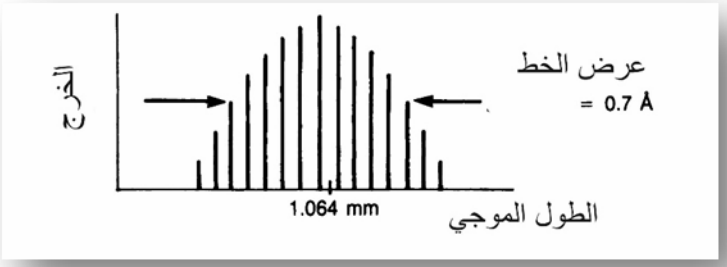
قياس عرض نطاق التردد لشعاع الليزر

Measuring Laser Band Width

لكون عرض نطاق التردد احدى الصفات (المعاملات) المهمة لأشعة الليزر لذلك يتوجب علينا ايجاد الوسيلة لقياس هذا المعامل وبصورة دقيقة، لذلك ظهرت عدة طرق حسابية يمكن بواسطتها حساب هذا المعامل ، ويمكن حسابه بالطول الموجي ، او التردد او العدد الموجي او بطول التشاكه ، وكل هذه الوحدات تقود الى النتيجة ذاتها.

نلاحظ في الشكل (10-1)عملية قياس عرض النطاق وبالأطوال الموجية، اذ نلاحظ ان اعلى قيمة لقدرة ليزر النديميوم / ياك هي في الطول الموجي 1.064 مايكرون ، ولكن هناك بعض من القدرة موزع على جانبي هذه القمة ، وعرض النطاق يساوي عرض المنحني في منطقة تساوي القدرة فيها نصف القدرة العظمى ويسمى هذا "العرض الكامل لمنتصف القمة Full Width Half –Maximum ويرمز له ب FWHM، ويعتبر من اكثر الاساليب المتبعة لقياس عرض النطاق شيوعاً. يمكن قياس خصائص الليزر بواسطة التردد ، اذ يمكن ان نلاحظ في الشكل (10-2) والذي مشابهاً للشكل (10-1) ان قمــة القدرة تقع في التردد $2.8 * 10^{14}$ هرتز ، وهناك اقل للترددات التي تقع على جانبي

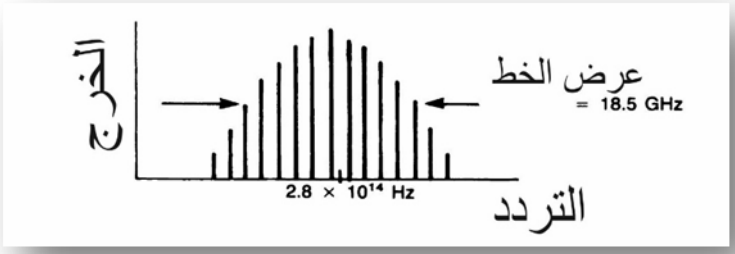
هذا التردد ويتمثل عرض النطاق هنا ايضاً " العرض الكامل لمنتصف القمة FWHM ".



شكل 10-1 : مخطط يوضح العلاقة بين خرج الليزر والطول الموجي ،يتضح فيه تركيب الانماط الموجية الطولية

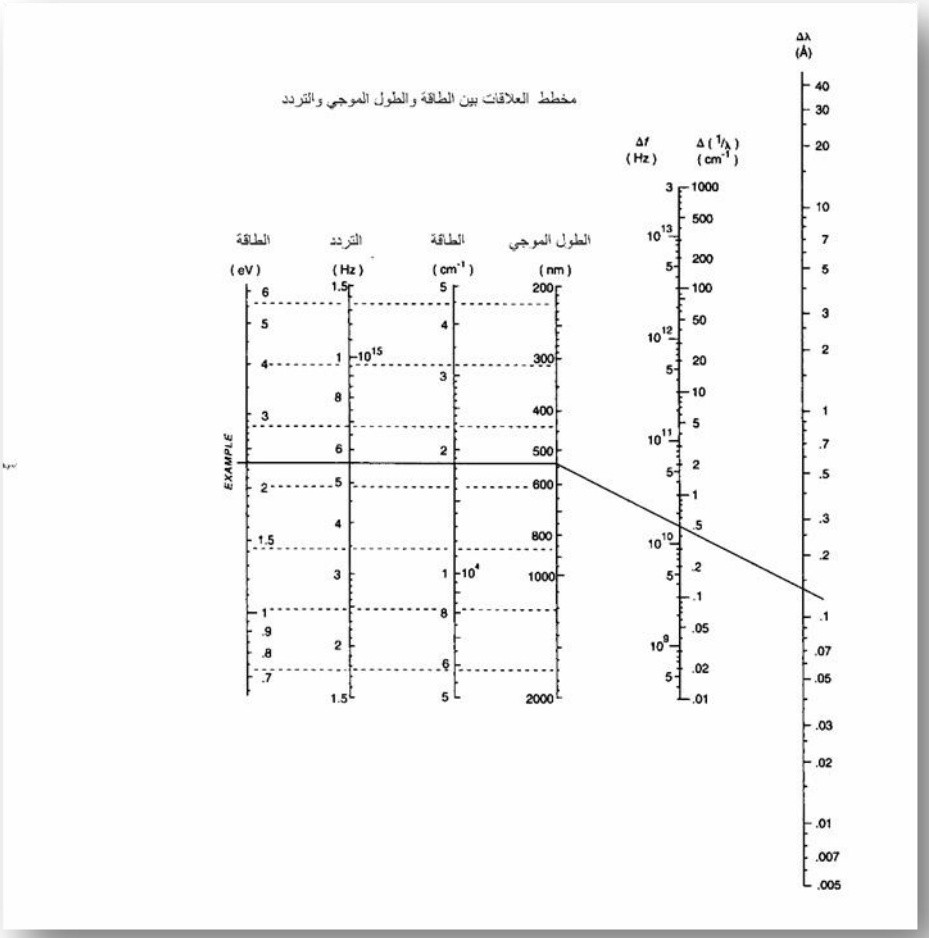
وتستخدم كذلك الاعداد الموجية في قياس عرض النطاق ، وهذه كانت مستخدمة ومنذ زمن طويل في القياسات الطيفية ، فتستخدم هذه لقياس تردد الانتقال الضوئي ، فاذا ما قلنا ان هناك انتقال في العدد الموجي 20.000 فان ذلك يعني ان 20.000 طول موجي يقع في السنتمتر الواحد.او ان الطول الموجي المقصود هو 20.000/1 من السنتمتر اي 500 نانومتر ويعبر عن ذلك اعتيادياً بالصيغة التالية 20.000 سم $^{-1}$ اي عشرون الف طول موجي في السنتمتر الواحد ، ويقرأ عشرون الف عدد موجي ، او عشرون الفاً في السنتمتر ، وطالما يمكننا التعبير عن التردد بالعدد الموجي ، فانه يمكننا التعبير عن عرض النطاق بذلك ايضاً. يستخدم المخطط الموضح في الشكل (10-3) لحساب العلاقة بين

الوحدات الموضحة سابقاً والخاصة بعرض النطاق ، وكذلك الوحدات الممثلة للخط



شكل 10-2 : مخطط لخرج الليزر مع التردد

ألوسطي اذ يمثل الجانب الايسر للمخطط العلاقة الخاصة بالخط الوسطي، والجانب الايمن العلاقة الخاصة بعرض النطاق ، وفي منتصف المخطط تماماً نجد المقياس الخاص بالأطوال الموجية لليزر ويمثل لنا المثال الموضح في الشكل شعاع ليزر ذا طول موجي مقداره 532 نانومتراً وعرض نطاق 0.5 سم $^{-1}$ وبأتباع الخط الافقي قاطعاً الجدول نحو اليسار، يمكن ملاحظة ان للشعاع خطاً وسطياً مقداره 6.5 *10 ^{14} هيرتز ، او ما يعادل 18،800 سم $^{-1}$ ، او طاقة فوتونية مقدارها 2،3 الكترون فولت (هناك 6،2 *10 ^{18} ev الكترون فولت في كل جول). اما اذا ما رسمنا خط مستقيم باتجاه الجزء الايمن من المخطط يصل بين الطول الموجي للشعاع وعرض انطاق بوحدات معينة ، يمكن قراءة عرض النطاق بوحدات اخرى ، وللشعاع المبين في المثال ، فان عرض النطاق 0،5 سم $^{-1}$ يقابل 15 كيكاهرتز او 0،14 انكستروم.



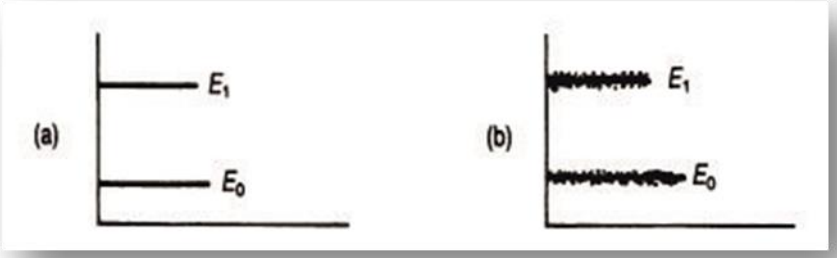
شكل 10-3 : مخطط مستويات الطاقة

الصفة الرابعة التي تحدد عرض نطاق شعاع الليزر هي الطول التشاكهي، وهذه تمثل المسافة التي يبقى فيها شعاع الليزر متشاكهاً ويمكن الحصول بواسطته على اهداب التداخل (والتي تعتبر مقياس التشاكه)، ويتناسب هذا عكسياً مع عرض النطاق ، ويقاس بالتردد او الطول الموجي ، ويساوي مقلوب عرض النطاق المقاس بالعدد الموجي.

مسببات عرض النطاق Laser broadening mechanisms

لماذا يكون لشعاع الليزر عرض نطاق ضيق؟

عرض نطاق شعاع الليزر ناتج اساساً من سمك مستويات الطاقة التي تشترك في عملية الانبعاث المحفز ، اذ كما لاحظنا لا يمكن تمثيل مستويات الطاقة لعدد من الذرات والجزيئات بخط نحيف كما في الشكل (10 -4أ) ، بل يكون لها سمك محدد كما في الشكل (10-4ب) ، فبذلك لا تطلق الفوتونات المنتقلة من هذه المستويات الى مستويات اوطأ الطاقة نفسها ، او الطول الموجي نفسه.



شكل 10 -4 : لا تمثل مستويات الطاقة بخط نحيف (أ)بل بخط سميك(ب).

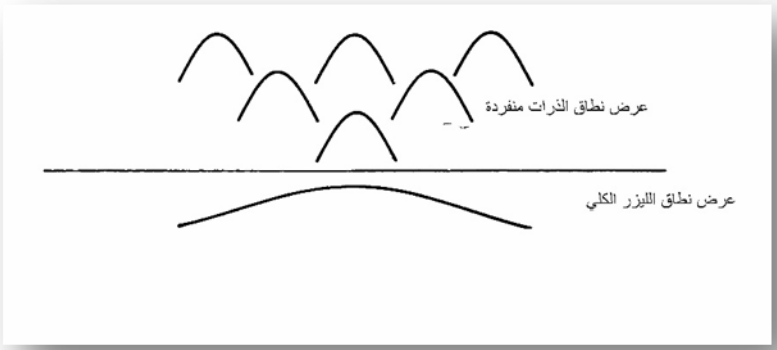
وهناك العديد من المسببات لسمك المستويات هذه ، فلنأخذ الليزرات الغازية اولاً والتي تكثر فيها المسببات عما عليه في الانواع الاخرى من الليزرات ، فتكون الذرات او الجزيئات في الغاز في حالة حركة دائمة لأنها حرة وغير مرتبطة بمواقع معينة كالذرات في المادة الصلبة ، والتي تحدد ضمن التركيب البلوري للمادة.

يعد تأثير ظاهرة دوبلر في زيادة سمك المستوى من الظواهر العامة في اغلب الغازات ، وإذا ما تذكرنا تجربة السيارة القادمة نحونا وهي تطلق زمارها ، نلاحظ فيها ان حدة الصوت تزداد باقترابها ، لان هذا يعني ان عدداً اكثر من الموجات الصوتية تدخل الى اذاننا في الثانية ومن جانب اخر اذا ما كانت السيارة تبتعد عنا ، فهذا يعني ان عدداً اقل من الموجات يصل الينا في الثانية ، عما لو كانت السيارة واقفة ، وبذلك يكون الصوت الواصل الينا ذي تردد اقل.

لنتصور الان اننا نقف في مكان فيه عدد كبير من السيارات التي يقترب بعضها منا ، ويبتعد البعض الاخر عنا ، وهي تطلق مزاميرها جميعاً ،فعندها سنسمع مدى واسعاً من الترددات على الرغم من كون السيارات جميعها تطلق مزاميرها بتردد واحد ، فالسيارات المبتعدة يقل تردد مزمارها ، والمقتربة يزداد ، ومقدار الزيادة والنقصان هذا يعتمد على سرعة السيارة وتأثير دوبلر هذا يكون في الذرات المتحركة كما هو في السيارات المتحركة فالذرات والجزيئات تتحرك بجميع الاتجاهات وبسرع مختلفة في انبوب الليزر وبذلك تغطي مدى واسعاً من الترددات كما في مثالنا السابق ، وهذا ما يؤدي الى زيادة عرض النطاق لشعاع الليزر.

يكون عرض تأثير دوبلر للذرة الواحدة (او الجزيئة) اقل من عرض نطاق الليزر عادة ، اذ ان للفوتون امكانية لتحفيز ذرة واحدة في الموقع المحدد ولا يمكن له تحفيز ذرة اخرى ، بل يتوقع وجود فوتون اخر يمكن

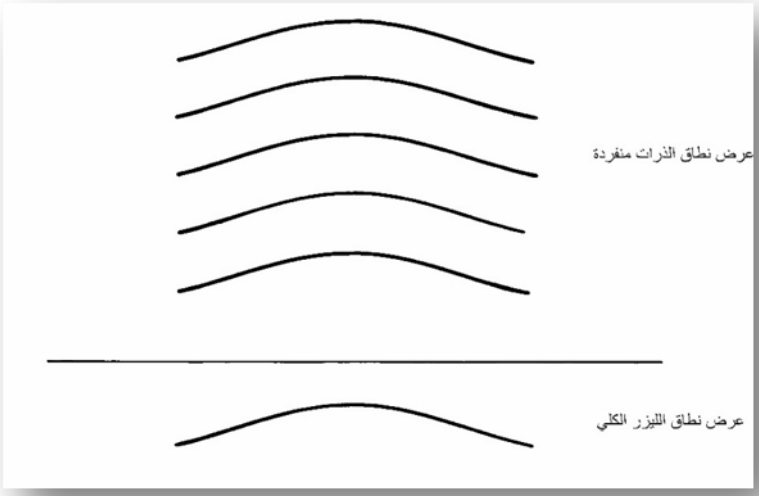
له ذلك ، وبذلك سنحصل على عدة ترددات ضمن تردد الليزر ، وهذا ما يسمى " العرض غير المنتظم ، او غير المتجانس Inhomogeneous Broadening " وهذا ما نلاحظه في الشكل (10-5).



شكل 10-5 : في الليزر ذي عرض النطاق غير المتجانس تشع الذرات بترددات مختلفة.

اما في عرض النطاق المتجانس Homogeneous Broadening لشعاع الليزر ، فان للذرات عرض نطاق مساوياً لعرض نطاق الليزر ، كما نلاحظ ذلك في الشكل (10-6). والفوتون الذي يمكن امتصاصه من قبل الاخرى ايضاً. وبصورة اوضح ، يمكن اقلال عرض النطاق للحالة هذه بصورة اسهل من الحالة السابقة ،وذلك لكون عرض النطاق للذرات جميعها متساوياً ، وبذلك يكون عرض النطاق الكلي اقل ، وبذلك يكون عرض النطاق الكلي اقل ، وكذلك تكون قدرة الليزر الخارجة اقل في الحالة الاولى حيث لا تشترك جميع الذرات في عملية ألانبعاث لكونها تقع خارج عرض النطاق للفوتونات المحفزة. من الامثلة على عرض

النطاق المتجانس في الليزرات الغازية ، هو عرض النطاق المتسبب من الضغط Pressure Broadening او ما يسمى احياناً " عرض النطاق التصادمي Collision Broadening " .والذي ينتج اساساً من مبدأ اللاحدية Uncertainty Principle المعروف في الفيزياء ، والي ينص على ما يلي :" يتناسب عرض نطاق الذرة الطبيعي عكسياً مع الوقت بين تصادمين " او بمعنى اخر كلما استطاعت الذرة السير مسافة اطول دون اصطدام بذرة اخرى او بجدار الانبوب ، كلما حصلنا على عرض نطاق طبيعي اقل.



شكل 6-10 : تتشابه الذرات في الليزر ذي عرض النطاق المتجانس

وهذا يقودنا الى حقيقة معروفة ، وهي ان الزمن بين تصادمين متتالين يزداد كلما قل ضغط الغاز في الانبوب ، وبزيادة ضغط الغاز في

الانبوب يزداد بذلك عرض النطاق ، وهذا النوع يكون متجانساً اذ يزداد عرض نطاق شعاع الليزر ككل بازدياد عرض نطاق الذرات.

تعتبر الزيادة في عرض النطاق الناتج من ظاهرة دوبلر ومن زيادة ضغط الغاز في انبوب الليزر من اهم الزيادات في عرض النطاق في الليزرات الغازية ، ويتغلب عرض النطاق الناتج من ظاهرة دوبلر في الليزرات ذات الضغط الواطئ.

اما ذرات ليزرات الحالة الصلبة فلا تتمكن من الحركة لكونها مرتبطة ضمن الهيكل البلوري للمادة ، وبذلك لا تحصل فيها ظاهرة دوبلر ، وتظهر الزيادة في عرض النطاق لأسباب اخرى ، اهمها تلك الناتجة من زيادة درجة الحرارة ، فعلى الرغم من كون الذرات مرتبطة ضمن الهيكل البلوري ولا يمكن لها الحركة ، إلا انه للهيكل البلوري ان يتحرك ككل نتيجة للطاقة الحرارية ، وهذه الحركة تؤثر في الترددات الطبيعية للذرات، وبالنتيجة نحصل على زيادة في عرض النطاق وهذه الزيادة تكون متجانسة حيث ان جميع الذرات عرضة للاهتزاز الحراري.

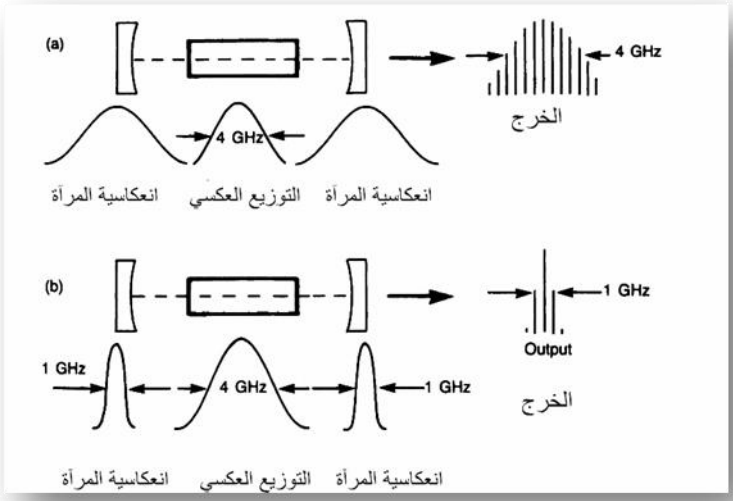
عندما يعمل ليزر الحالة الصلبة في درجات الحرارة الواطئة نتخلص من الزيادة الحاصلة في عرض نطاق الناتج من زيادة درجة الحرارة ، وتحصل الزيادة في عرض نطاق ليزرات الحالة الصلبة ايضاً نتيجة لوجود الشوائب في التركيب البلوري للمادة ، ولكون هذه الشوائب مختلفة التركيب والشكل ، وتتوزع في اماكن مختلفة في التركيب البلوري ، تكون الزيادة في عرض النطاق غير متجانسة.

الاقلال من عرض نطاق شعاع الليزر

Reducing laser bandwidth

هناك العديد من الوسائل المستخدمة للإقلال من عرض النطاق لشعاع الليزر ، وكانت اولى هذه الوسائل استخدام التبريد ، الذي يؤدي الى الاقلال من الطاقة الحرارية (في ليزرات الحالة الصلبة) ، ومن الطاقة الحركية (في ليزرات الحالة الغازية) ، ويمكن الاقلال من عرض النطاق في الليزر الغازي بإقلال الضغط داخل انبوب الليزر ، ولكن ذلك لسوء الحظ يقلل من القدرة الخارجة من الجهاز وبالتالي من كفاءة الجهاز اذ تقل اعداد الذرات المشاركة في عملية الليزر. اذا ما تذكرنا ان عملية حصول الليزر تتطلب وجود حالة للتوزيع العكسي ، وكون الربح في حركة الشعاع في المرنان اكبر من واحد . وفي جميع العمليات التي ذكرناها سابقاً لغرض الاقلال من عرض نطاق شعاع الليزر ،كالتبريد وإقلال ضغط الغاز ، فأنها تقلل من عرض نطاق الشعاع بالإقلال من عرض نطاق التوزيع العكسي . والطريق الامثل للإقلال من عرض نطاق الشعاع دون التأثير في عملية التوزيع العكسي ، هو الاقلال من عرض نطاق حركة الشعاع في المرنان ، وذلك بمعالجة التغذية اعكسية في المنان للسيطرة على عرض نطاق الشعاع. اذا ما افترضنا ان لدينا جهاز ليزر فيه عرض نطاق التوزيع العكسي 4 كيكا هيرتز ، وقد استخدمت فيه مرايا ذات عرض نطاق كبير ، فالنتيجة التي نحصل عليها تكون كما موضحة في الشكل (10-7أ) ، حيث يكون الشعاع بالكامل في

مدى عرض نطاق التوزيع العكسي اي بعرض نطاق 4 كيكا هيرتز وذلك لكون عرض نطاق المرايا كبيراً. ولكن اذا ما استبدلت هذه المرايا بأخرى ذات عرض نطاق 1 كيكا هيرتز ، سيتذبذب جزء من الشعاع فقط من



شكل 10-7 : (أ) اذا ما كان عرض نطاق التغذية العكسية عريض ، فان عرض الشعاع الخارج يساوي عرض نطاق التوزيع العكسي.

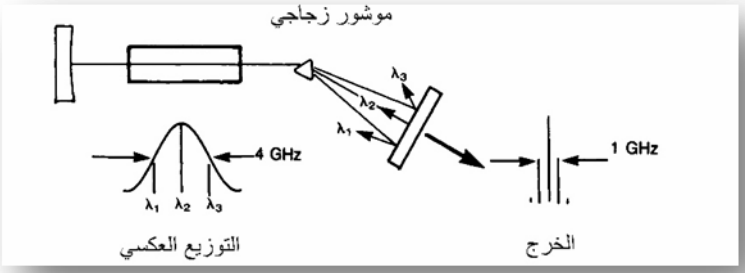
(ب) لكن اذا ما قلل عرض نطاق التغذية العكسية ، فسيؤدي ذلك الى الاقلال من عرض نطاق شعاع الليزر ايضاً.

مجموعة الترددات في مدى ال4 كيكا هيرتز ، اي ان عملية الليزر لا تتم الا في جزء ضيق من المجموعة ، وبذلك يكون عرض النطاق قد قلل، كما في الشكل (10-7ب). هذه هي الطريقة البدائية للإقلال من عرض النطاق ، ولا تعتبر هذه من الطرق العملية اذ ان من الصعوبة ،

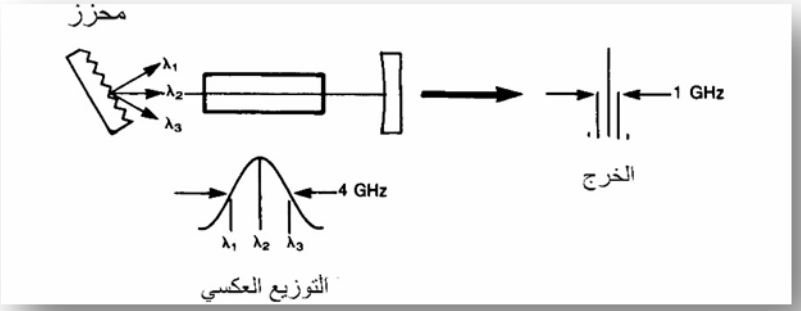
بل من المستحيل جعل عرض نطاق المرايا واحد كيكا هيرتز فقط ،لذلك استخدمت اجهزة اخرى وضعت داخل المرنان لتؤدي هذا العمل.

يستخدم الموشور بصورة عامة لهذا الغرض ، وذلك بوضعه في داخل المرنان ، وكما موضح في الشكل (10-8) ،فعلى الرغم من كون عرض نطاق التوزيع العكسي هو 4 ميكاهيرتز ، لكن عملية الليزر لا تحدث سوى لعرض ضيق من الترددات التي تنعكس بواسطة المرآة داخل المرنان ، حيث يقوم الموشور الموجود داخل المرنان باءحراف الاشعة نحو المرآة بعد فصلها الى مجموعة يمكن تقسيمها الى ثلاثة اقسام هي 1،2،3 ، ولكن ما يسقط على المرآة هو فقط الجزء الوسط 2 ،كما نلاحظ في الشكل (10-8) ، وبذلك نحصل على عملية الليزر لعرض ضيق من الشعاع فقط. وتستخدم عدة مواشير مع بعضها للحصول على افضل النتائج ، وتتأثر قدرة الليزر الخارجة بهذه العملية ايضاً.

ومن الطرق الاخرى المستخدمة هي ابدال احدى مرايا المرنان بمحزز، من النوع العاكس ، الذي يعكس الاطوال الموجية الساقطة عليه بزوايا مختلفة ، وبالتحكم بوضعه يمكن تحديد الطول الموجي المطلوب للحصول على شعاع الليزر منه ، اذ يعكس ذلك الطول الموجي المطلوب للحصول على شعاع الليزر منه ، اذ يعكس ذلك الطول الموجي فقط الى داخل الوسط الفعال كما في الشكل (10-9) ، وبذلك نحصل على شعاع لهذا الطول الموجي ، او بالأحرى لهذا المدى الضيق من الاطوال الموجية.

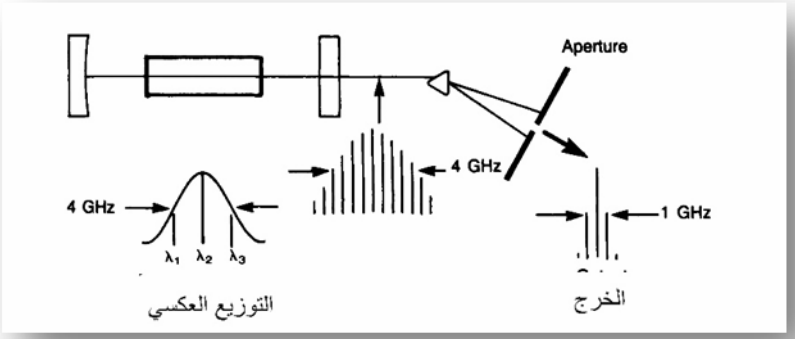


شكل 10 -8 : الموشور الموضوع داخل المرنان يؤدي الى الاقلال من عرض نطاق التغذية العكسية ، ومن ثم عرض نطاق شعاع الليزر.



شكل 10- 9: المحزز الموضوع داخل المرنان يؤدي الى الاقلال من عرض نطاق الشعاع.

لنتأمل ماذا سيحدث لو وضعنا الموشور خارج ألمرنان لنلاحظ المثال الموضح في الشكل (10-10) والذي وضعنا فيه الموشور خارج المرنان، وهذا يفصل الاطوال الموجية لعرض النطاق ، وتوضع امام ذلك فتحة صغيرة لتمرر الطول الموجي المطلوب فقط ، ومن مزايا هذا النظام سهولة تنظيم موازات مرنانه ، حيث ان المرنان مستقيم . لكن ماذا سنحصل نتيجة لذلك؟



شكل 10-10: احد الطرق المستخدمة للحصول على شعاع ذي عرض نطاق ضيق من الليزر.

سنحصل على خسارة كبيرة ، حيث سنخسر جميع الاشعة التي تسقط على الجوانب ، وما يخرج من الفتحة الصغيرة ماهو إلا شيء قليل اما في حالة وضع الموشور داخل المرنان فسنحصل على مدى ضيق من عرض النطاق ، ودون خسارة تذكر.

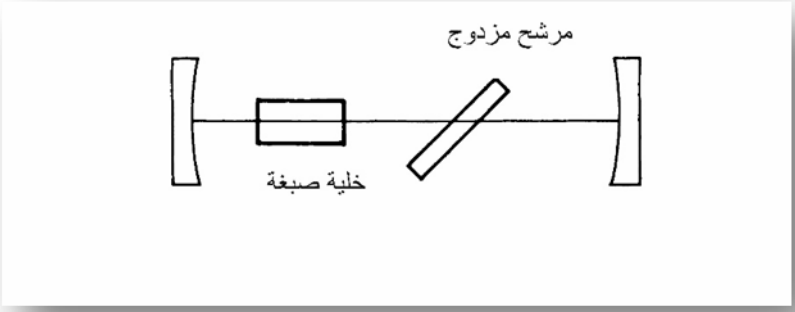
ويكون الوضع افضل في حالة الليزر المتجانس النطاق ، حيث يمكن لكل ذرة في حالة توزيع عكسي ان تشارك في عملية الليزر ، في حالة توزيع عكسي ان تشارك في عملية الليزر ، ففي الشكل (10-6) يمكن لكل ذرة ان تحفز بواسطة الضوء الحامل للتردد الوسطي ، اما في الليزرات غير متجانسة عرض النطاق ، فلا يمكن لقسم من الذرات ان تشارك في عملية الليزر المحددة النطاق وبذلك يقل خرج الليزر ، (10-5) ، ولكن يمكن للذرات التي تقع خارج هذا النطاق ان تنقل طاقتها الى الذرات الاخرى التي تقع ضمنه نتيجة للتصادم الذي يحصل بينها، وبذلك

يزداد الخرج لشعاع الليزر ، واستناداً الى ما تقدم ، يمكننا الحصول على عرض نطاق ضيق من الليزر ذو عرض النطاق المتجانس دون ان تكون هناك خسارة في القدرة الخارجة ، وذلك حيث يمكن لعدد كبير من الذرات المشاركة في القدرة الخارجة وذات عرض النطاق الضيق ، كما لو كان عرض النطاق واسعاً. وفي واقع الحال فهي لا تعمل بهذه الصورة ، اذ ان عملية وضع جسم غريب كالموشور داخل المرنان يؤدي الى الاقلال من القدرة الخارجة ، لأننا نعلم انه لا توجد عناصر بصرية مثالية ، وكذلك تأثير Spatial Hole Burning الذي سنناقشه في فقرة لاحقة والذي يؤدي الى الاقلال من قدرة الليزرات ذات عرض النطاق الضيق.

يعتبر المرشح الثنائي الانكسار Birefringer عنصراً اخراً من العناصر التي تؤدي الى الاقلال من عرض النطاق بإقلال عرض نطاق الربح للدورة داخل المرنان. لنعد الى السؤال الخامس من الفصل الثالث، حيث يؤدي اللوح نصف الموجي الى دوران مستوى الاستقطاب ب 180 درجة نسبة الى مركبته المحورية ، وبذلك يدور الشعاع المستقطب المار من خلاله بزاوية مقدارها 90 درجة . اما اذا استخدمنا لوحاً موجياً كاملاً فلا يحصل اي تغيير للضوء المستقطب المار من خلاله ، لان المركبة تدور بزاوية مقدارها 360 درجة.

لنفترض الان اننا وضعنا لوحاً موجياً كاملاً داخل المرنان وبزاوية مساوية لزاوية بروستر ، كما في الشكل (10-11) ، ويعتبر اللوح لوحاً

موجياً كاملاً لطول موجي محدد فقط ، وذلك لكون معامل انكساره يختلف عن الطول الموجي المحدد هذا دوراناً يقل او يزيد على 360 درجة وبذلك يكون هذا الضوء مستقطباً بيضوياً بعد خروجه من اللوح ولننظر ثانية الى الشكل السابق ، فسنلاحظ ان اللوح وضع بزاوية مساوية لزاوية بروستر للطول الموجي المحدد ، وبذلك يمر الطول الموجي هذا فقط من خلاله وتنعكس الاطوال الموجية الاخرى نحو خارج المرنان على شكل ضوء مستقطباً بيضوياً ، اما الضوء المار فيكون مستقطباً خطياً تماماً ، وبذلك يكون الربح لهذا الطول الموجي فقط ، اما الاطوال الموجية المجاورة له فيكون الربح فيها قليلاً بشكل يجعل من عرض نطاق الليزر ضيقاً ومحدداً للطول الموجي الوسطي. وتستخدم عملياً عدة مرشحات ثنائية الانكسار تلصق جميعها لتكون لوحاً موجياً كاملاً واحداً.



شكل 10-11 : مرشح مزدوج في مرنان ليزر الصبغة

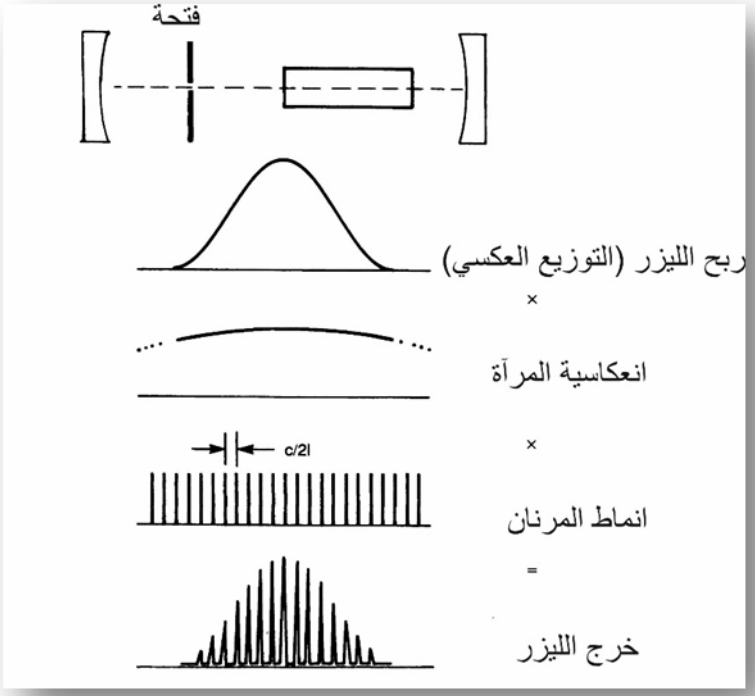
الليزر احادي النمط Single – Mode Lasers

يتذبذب كل نمط طولي وكل نمط عرضي في الليزر بتردد مختلف ودون ان يؤثر احدهما في الاخر ،وكما لاحظنا في الفصل التاسع كيف يمكن جعل الليزر يتذبذب بتردد عرضي منفرد ، باستخدام فتحة صغيرة توضع في المرنان. لا تلزم الطرق المبينة سابقاً والتي ادت الى تضييق عرض نطاق الليزر الى التذبذب بنمط طولي وعرضي واحد عادة.

وإذا ما وضعنا فتحة صغيرة في مرنان الليزر السابق ، فسنلاحظ انه يتذبذب بعدة ترددات ، تعود الى انماط طولية مختلفة لنمط عرضي واحد، كما نلاحظ ذلك في الشكل (10-12)، ومن هذا الشكل يمكن حساب قدرة الليزر الخارجة ، والذي يساوي حاصل ضرب الربح ، وانعكاسية المرآة ، وتركيب النمط ، فاذا ما اردنا معرفة القدرة الخارجية لأي تردد، ضربنا العوامل السابقة الخاصة بذلك التردد. وتكون القدرة الخارجة لبعض الترددات مساوية الى الصفر لكون التركيب للنمط مساوياً للصفر.

وإذا ما تم اقلال عرض نطاق الليزر باستخدام موشور مثلاً ، فان بعض الانماط هي التي تتذبذب فقط ، وهذه الحالة موضحة في الشكل (10-13)، والقدرة الخارجة الموضحة في الشكل هي ناتج حاصل الضرب لمركبات التوزيع العكسي والتغذية العكسية. ويتطلب الزام الليزر للتذبذب بنمط واحد وضع مرشحة متوازية etalon داخل

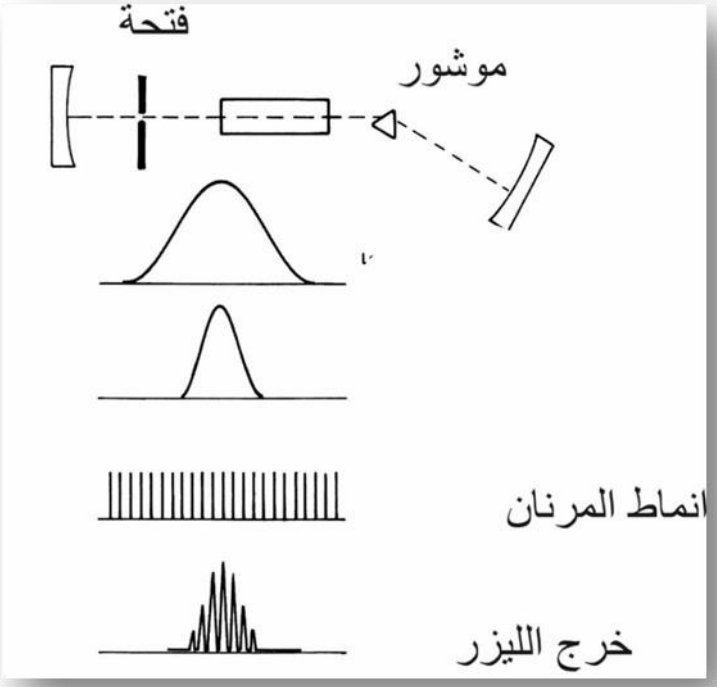
المرنان ، وهذه ليست إلا سطحين متوازيين تفصلهما مسافة ثابتة ، ويعملان عمل متوازية فبري



شكل 10-12 : يمكن لليزر الذي يتذبذب بنمط عرضي واحد ، ان يذبذب بأكثر من نمط طولي

بيروت ، وإذا ما تذكرنا ان الفرق بين القمتين العابرتين من خلال المتداخلة السابقة هو C/2L حيث تمثل L المسافة بين السطحين العاكسين، فاذا ما كانت هذه المسافة صغيرة فننا نحصل على فرق تردد كبير بين القمتين العابرتين ، وهاتان القمتان (الممثلتان الانماط الطولية للمتوازية) تعملان معاً مع الانماط الطولية للمرنان ،لتحذف بعضها بعضاً ما عدا واحدة ، كما نلاحظ ذلك في الشكل (10-14). تصنع هذه

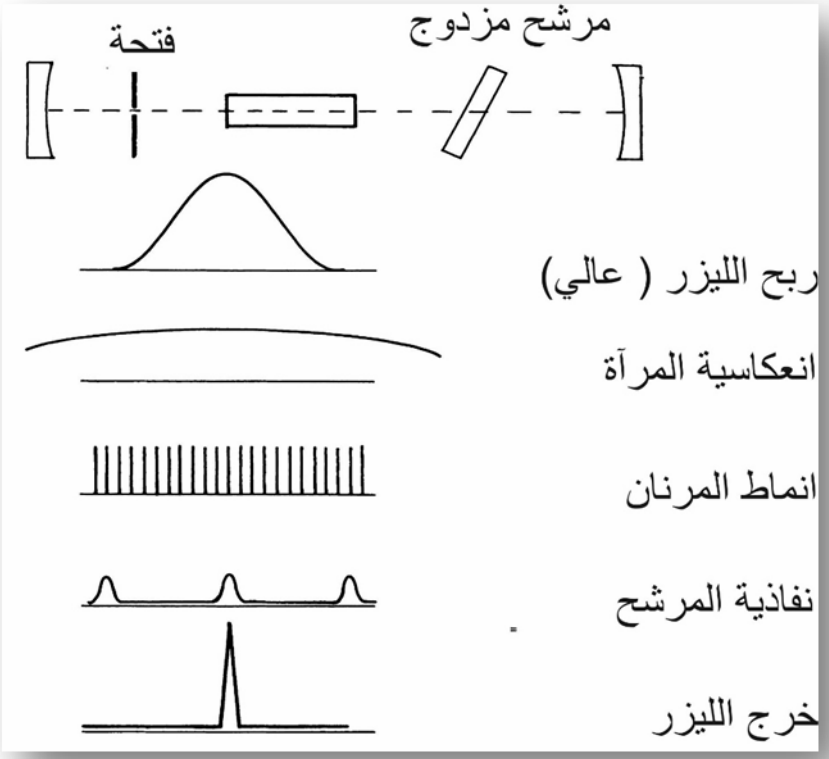
المتوازية عادة من قطعة من الزجاج المصقول بدقة عالية جداً للحصول على سطحين متوازيين تماماً ، وقد يطلى هذين السطحين لزيادة الانعكاسية لهما.



شكل 10-13: تتذبذب انماط اقل عندما يحدد عرض نطاق التغذية العكسية في المرنان.

ويزيد الطلاء من دقة المتوازية، كما موضح ذلك في الشكل (10-14).

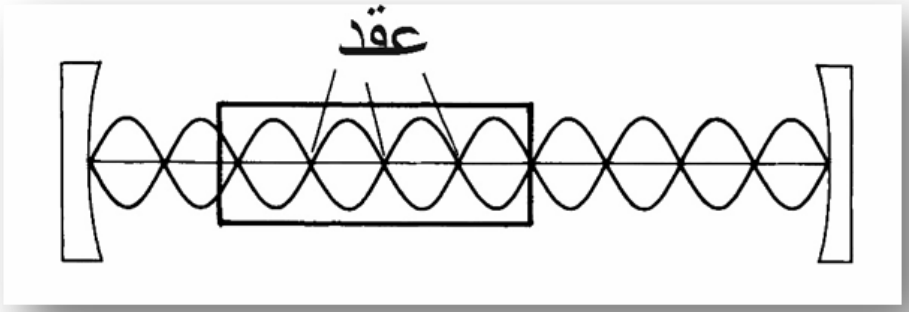
ويستخدم اكثر من متوازية داخل الليزر للحصول على انماط احادية دقيقة. ويسمى الليزر الاحادي الخط "بالليزر الاحادي التردد "، اما الليزر الاحادي الطول الموجي فهو يعني شيء آخر فالعبارة تعني عادة



شكل 10-14 : التذبذب احادي النمط

ليزراً يعمل بأكثر من انتقال بين المستويات ، لكنه اخضع عملياً للعمل بانتقال معين واحد ، ذي طول موجي محدد. وإذا افترضنا لدينا متداخلة مثالية ، لايحدث اي امتصاص للضوء الساقط عليها من المادة المصنعة منها أطلاقا وإذا ما وضعت هذه المتداخلة في مرنان ليزر ذي عرض نطاق متجانس ، نتوقع الحصول على خرج لنمط واحد اكبر مما نتوقع الحصول عليه من عدة انماط طولية ، وعلى حساب ان كل ذرة تشارك في الانماط الطولية ستشارك في هذا النمط المفرد. هل هذا صحيح ؟!

طبعاً هذا افتراض خاطئ ، فاذا ما نظرنا الى التوزيع الفراغي للمجال الكهربائي في النمط الطولي المفرد ، كالذي موضح في الشكل (10-15)، فلا نلاحظ اي اثر للمجال الكهربائي في نقاط العقد للموجات الواقفة ، فبذلك لا يمكن للذرات الموجودة في هذه المناطق التحفز لإطلاق طاقتها. في الحقيقة يولد النمط ثقوباً في عملية التوزيع العكسي في النقاط التي يكون فيها المجال الكهربائي في قيمته العظمى ، وأما الذرات في مناطق العقد فلا يمكن لها الاشتراك في عملية الليزر ، وبذلك يقل خرج الليزر حتى في حالة اطلاقها للتردد نفسه.



شكل 10-15 : لا يمكن ان تتشارك الذرات في مناطق العقد بعملية الليزر

لا يمكن من الناحية العملية لمتداخلة واحدة اخضاع الليزر للتردد بنمط واحد ، فالربح الناتج في مناطق العقد يكون بمقدار لا باس به بحيث يؤدي الى ظهور نمط اخر او اكثر . وبذلك تستخدم متوازية ثانية او ثالثة، للحصول على النمط المنفرد ، ويكون هذا على حساب قلة الطاقة

الخارجة، والطاقة تقل نتيجة عدم اشتراك الذرات الموجودة في مناطق العقد بعملية الليزر.

الاسئلة

1- جد التردد الضوئي لليزر الاركون الذي طوله الموجي هو 514.5 نانومتر ، من الشكل (10-3) ومن ثم حسابياً. وافترض ان عرض نطاقه هو 0.4 /سم. احسب عرض نطاق التردد وكذلك عرض نطاق الطول الموجي وقارن النتائج التي تحصل عليها مع الشكل السابق. يمكن لليزر الاركون ان ينتج طولا موجياً قدره 488 نانومترا. فاذا كان عرض نطاق تردده لا يزال 0.4 /سم. فما هو عرض نطاق تردد وعرض نطاق تردد وعرض نطاق الطول الموجي؟

2- شدة الطيف هي المقياس لقدرة الليزر في عرض نطاق محدد ، فشدة الطيف لليزر ذي قدرة واحد واط . وعرض نطاق واحد انكستروم هي 1 واط/ انكستروم. ماهي شدة الطيف لليزر النديميوم /ياك ذي قدرة 500 ملي واط وعرض نطاق 0.3 انكستروم؟.

اذا وضع مرشح خارج المرنان وعمل على الاقلال من عرض النطاق الى حد 0,1 انكستروم وكذلك القدرة الى حد 170 ملي واط. ماهي شدة الطيف الان؟

اذا وضع موشور داخل المرنان وعمل على اقلال عرض النطاق الى 0,1 انكستروم وكذلك القدرة الى حد 450 ملي واط. ما هي شدة الطيف في هذه الحالة؟

ماهي افضل الطرق للحصول على عرض نطاق ضيق في الليزر؟

3- يمكن اخضاع (اجبار) الليزر للتذبذب بنمط طولي واحد وذلك بتقريب المرآتين من بعضهما البعض الى حد ما . كيف تفسر ذلك؟

وكم يجب ان يكون البعد بين المرآتين في ليزر عرض نطاقه الاعتيادي هو كيكا هيرتز واحد ليتذبذب بنمط طولي واحد؟

4- نغم ليزر صبغة على طول موجي مقداره 600 نانومتر ، وتم تحليل الشعاع بمطياف ذي مرآة مقعرة وعرض طيفه هو 0.5 انكستروم. وضح عرض الطيف هذا في مجال أ- التردد ب-الاعداد الموجية اذا كان طول حجرة الليزر هو متر واحدة . كم هو عدد الانماط الطولية التي يمكن تتذبذب فيه؟

الفصل الحادي عشر

تنظيم معامل النوعية (الكفاءة) Q-Switching

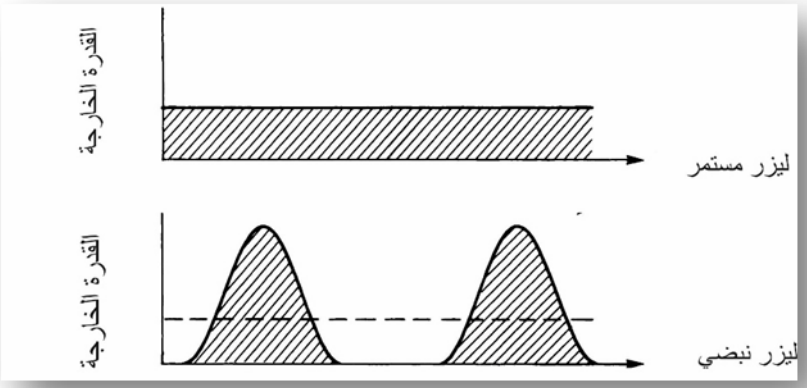
غالباً ما نحتاج الى نبضة واحدة او سلسلة من النبضات من الطاقة العالية بدلاً من شعاع مستمر ، لذلك تجمع الطاقة في شعاع الليزر لتخرج مرة واحدة على شكل نبضة بحيث تكون فيها بكمية كبيرة جداً اذا ما قارناها مع الكمية التي نحصل عليها من الشعاع المستمر وللفترة الزمنية نفسها. ويتم هذا بعدة طرق ، اهمها طريقة (تنظيم معامل الكفاءة - النوعية- Q-Switching)، وهذا ما سنتطرق اليه في هذا الفصل.

سنبدأ اولاً بالتعرف على طرق قياس طاقة الليزر النبضي وهذه اكثر تعقيداً من تلك الطرق المستخدمة لقياس متوسط الطاقة في ليزرات الاشعة المستمرة ، ومن ثم نتناول مبدأ تنظيم معامل النوعية وكيفية خزن الطاقة داخل الليزر لفترة وثم السماح لها بالخروج دفعة واحدة بشئ من التفصيل. وأخيرا نتطرق الى الطرق الاربع المختلفة والمستخدمة في عملية تنظيم معامل النوعية.

قياس خرج الليزر النبضي
Measuring The Output of Pulsed Lasers

يقاس خرج الليزر ذي الشعاع المستمر بطرق بسيطة للغاية لكون الطاقة الخارجة مستمرة ، كما نلاحظها في الشكل (11-1) ، ولكن الامر يختلف بالنسبة لليزر النبضي ، اذ يحتاج الى بعض المعلومات

الاخرى التي يجب ان نعرفها قبل ان نبدأ بعملية القياس ، فنحتاج الى معرفة عدد نبضات الخارجة منه ، وكيفية توزيع الطاقة بهذه النبضات اذ عندما نقيس القدرة لشعاع الليزر ألمستمر فأنا نقيس كمية الطاقة الخارجية في فترة زمنية محددة ، وتقاس الطاقة بوحدات الجول Joule ويرمز لها ب J ويقاس الوقت بالثانية. اما معدل الطاقة الخارجة من الليزر فيقاس بالجول/ثانية (J/S) وهذه تمثل القدرة Power وتقاس بالواط Watt ويرمز لها ب W .



شكل (11-1): تتولد الطاقة مجتمعة على شكل دفعات في الليزر النبضي ، وبذلك تكون الطاقة العظمى كبيرة جداً.

ولمصطلحي الطاقة والقدرة معنيان مختلفان لدى الفيزياويين ، فالطاقة التي تقاس بالجول تعرف بأنها القابلية على انجاز الشغل ، وهذه كالحركة والحرارة وغيرهما . اما القدرة فأنها تمثل معدل توزيع الطاقة ، المصباح ذو المئة واط مثلاً يستهلك مائة جول من الطاقة

الكهربائية في كل ثانية ، فاذا ما استخدم لمدة خمس دقائق فانه يستهلك 30,000 جول من الطاقة.

لنتساءل الان ، ماذا تعني قائمة استهلاك الكهرباء التي نتسلمها كل شهر؟ هل تعني كمية القدرة المستهلكة ام كمية القدرة ؟ بطبيعة الحال لا تعني كمية القدرة اذ انها لا تعني اي شي لنا بل تعني كمية الطاقة ، وبذلك تقاس بالواط *ساعة ، وتسمى " واط ساعة " فأننا نستهلك ما مقداره " كيلو واط ساعة " من القدرة الكهربائية ، عند استخدامنا قدرة بمعدل كيلو واط واحد ولمدة ساعة واحدة ، وهذا ما يعادل استخدام عشرة مصابيح ذات مائة واط ولمدة ساعة ، او استخدام جهاز ذي 4 كيلو واط، ولمدة 15 دقيقة ، وهذه جميعها تعادل كيلو واط واحداً من القدرة (1000 جول/ ثانية) لمدة ساعة ، او ما يعادل 3,600,000 جول كمجموع لها.

هناك مقياسان لطاقة الليزر النبضي ، الاول هو مقياس القدرة العظمى Peak Power ، والثاني هو مقياس معدل القدرة Average power، ويمثل معدل القدرة مقياس معدل تدفق الطاقة من جهاز الليزر خلال دورة واحدة ، فان كان الجهاز يولد نبضة واحدة ذات طاقة مقدارها نصف جول في كل ثانية ، فأن قدرة الشعاع تكون مساوية الى 0,5 واط، اما القدرة العظمى ، فأنها تمثل الطاقة الخارجة خلال النبضة ، فأذا كان الليزر ينتج نبضة ذات نصف جول ، ولزمن مقداره واحد مايكرو ثانية ، فان القدرة العظمى تكون 500,000 واط.

اي: 0,5 جول/10 ^{6} ثانية = 500,000 جول /ثانية.

ولعدد النبضات في الثانية Pulse Repetition Frequency اهمية ايضاً في حساباتنا ، والذي يختصر ب PRF ، وكذلك لزمن الموجة الذي يمثل الوقت الذي تستغرقه النبضة منذ بدايتها وحتى بداية النبضة التي تليها ، والتي تمثل دورة عمل الليزر Duty Cycle .

وكمثال على ذلك لنأخذ ليزر النديميوم /ياك ، المجهز بتنظيم معامل الكفاءة ، والمستخدم للمصباح الوهاج في عملية ضخ الطاقة وذو الطاقة التي مقدارها 100 ملي جول وبعرض نبضة مقداره 20 نانو ثانية ومعدل عدد نبضاته هو 10 نبضات في الثانية . فأن معدل طاقته هو واحد واط وطاقته العظمى هي خمسة ميكا واط ولدورة زمنها هو 0,1 ثانية ، ولدورة عمل طولها 2 *10 $^{-7}$ ثانية.

تنظيم معامل الكفاءة (النوعية) Q-Switching

يعتبر مبدأ تنظيم معامل الكفاءة من المبادئ البسيطة ، اذ تتم فيه عملية تخزين الطاقة الناتجة من عملية التوزيع العكسي ، لحين الوصول الى المستوي المطلوب ، لتطلق فجأة كطاقة كبيرة ، وهذه تشابه عملية خزن الماء في اناء ذي فتحة في اسفله ، حيث يتجمع الماء النازل فيه حتى يصل الى مستوى معين ، تفتح الفتحة وينزل الماء منها دفعة واحدة كما نلاحظ ذلك في الشكل (11-2). والسؤال الذي يطرح الان كيف يمكن

خزن الطاقة في عملية التوزيع العكسي في الليزر ؟ اي كيف يمكن حفظ هذه الطاقة من الانطلاق بسرعة ، وإبقاؤها ضمن التوزيع العكسي؟

تتم هذه العملية بمنع حدوث عملية الليزر ، فيجب اما منع عملية التوزيع العكسي او عملية التغذية العكسية ، ولكون الطاقة تحفظ في عملية التوزيع العكسي ، فلا يمكن اذاً منعها ، لذلك سنحاول منع عملية التغذية العكسية لمنع حصول عملية الليزر ولكي نخزن الطاقة الناتجة من عملية التوزيع العكسي نحجب احدى المرآتين عن الاشعة المتولدة.

وهذه هي الطريقة الصحيحة لتنظيم معامل الكفاءة. وكما نلاحظ في الشكل (11-3) ، فأن الطاقة تخرج باستمرار من التوزيع العكسي ، وحال وضعها فيه وبسرعة ، ولكن اذا ما اوقف عملية التغذية العكسية ، فان الطاقة التي توضع في عملية التوزيع العكسي تبقى لحين اعادة التغذية العكسية ، لتخرج بذلك على شكل نبضة واحدة ذات طاقة عالية.

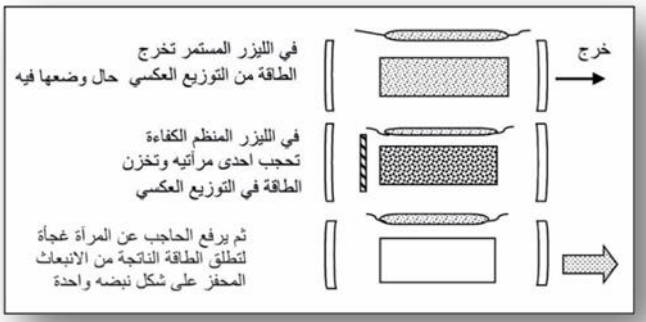
ماذا يعني مصطلح ال Q-Switch ، ومن اين اشتق؟ وللإجابة عن ذلك نقول ان الحرف الاول منه مأخوذ من كلمة Quality والتي تعني النوعية او الكفاءة ، والكلمة الثانية منه تأتي هنا بمعنى السيطرة اكثر من معناها الاصلي التحويل ، لذلك ترجم المصطلح ب " السيطرة على النوعية او الكفاءة " والمرنان العالي الكفاءة او النوعية هو الذي يكون فيه الفقدان او الخسارة قليلة جداً.

بطبيعة الحال تكون كفاءة المرنان الذي تحجب مرآته صفر ، ولكن

شكل 11-2 : تشبه عملية تنظيم معامل الكفاءة في الليزر عملية خزن الماء في اناء الزهور.

بإزالة الحجب عن المرآة فجأة ترتفع كفاءته الى درجة عالية جداً فجأة، وبذلك يمكن تحويل الليزر الذي يمكن التحكم بمعامل كفاءته من ليزر ذي كفاءة واطئة الى ليزر ذي كفاءة عالية جداً. ولكن عملية التحويل هذه لا تتم دون حصول عملية الانبعاث الثانوي ، وبالتالي دون حصول عملية التوزيع العكسي ، اذ تجمع الطاقة لحين حصول عملية التغذية العكسية لتنطلق وتستمر عملية الليزر هذه لحين هبوط جميع الذرات من

مستوياتها العليا وليس لحين انتهاء عملية التغذية العكسية ، وبذلك لا تؤثر هذه العملية



شكل 11 -3 :تخزن الطاقة الناتجة من عملية التوزيع العكسي في الليزر المنظم الكفاءة وهذا الشكل يوضح ليزر الحالة الصلبة الذي تضخ الطاقة فيه بواسطة مصباح وهاج.

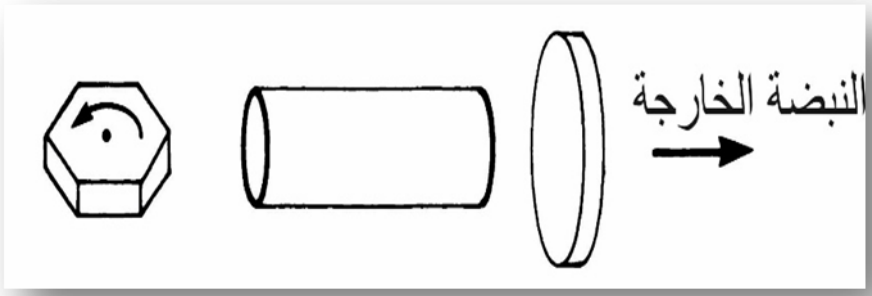
في طول النبضة ، ولكن ما يحدد طول النبضة هو الوقت الذي تستغرقه الذرات كافة للهبوط الى المستوى الاوطأ او ما تستغرقه عملية الليزر ويتراوح طول النبضة هذا بين عدة اجزاء من النانو ثانية في ليزرات القدرة العالية الى عدة مئات من النانو ثانية في ليزرات القدرة الواطئة. نفهم مما سبق اننا لا نستطيع التحكم بمعامل الكفاءة لجميع الانواع، حيث يشترط فيها ان يكون عمر الانبعاث للمستوى العلوي كبيراً بعض الشئ ، وبذلك لا تفقد الطاقة نتيجة الانبعاث التلقائي قبل حدوث عملية التحكم بالنوعية ومن ثم الانبعاث المحفز ، وبذلك يركز استخدام هذه العملية مع ليزرات الحالة الصلبة ، كليزرات النديميوم /ياك والنديميوم / زجاج والياقوت.

طرق التحكم بمعامل النوعية Types Of Q-Switches

لا تعتبر الطريقة المبينة في الشكل (11-3) عملية لمنع حصول عملية الليزر اذا لايمكن رفع الحاجب بسرعة عالية بحيث تكون كافية ليصل الشعاع بكامله الى المرآة مرة واحدة ، لذلك استخدمت طرق اخرى للتحكم بمعامل الكفاءة ، ومن اهمها الطرق الميكانيكية ، وتتم هذه بتحريك اجزاء ميكانيكية كالمرآة مثلاً للسيطرة على عملية الليزر. والطرق البصرية الصوتية Acousto- Optics لحرف الشعاع عن المرآة بحيث تمنع عملية التغذية العكسية او بتغيير زاوية استقطاب الشعاع ، وهناك طريقة اخرى تعتمد على تغير الصفات اللونية لأحد انواع الصبغات ألعضوية حيث تمتص هذه الاشعة الساقطة عليها وتمنعها من المرور ، الى ان تصل الى حالة الاشباع ، ليتغير لونها المعتم الى اللون الشفاف وبذلك تمر الاشعة من خلالها الى المرآة لتتم عملية التغذية العكسية ويعود لون الصبغة الى اللون المعتم مرة اخرى.

التحكم الميكانيكي بمعامل الكفاءة Mechanical Q-Switches

يتم التحكم بمعامل الكفاءة ميكانيكياً كما نلاحظ ذلك في الشكل (11-4) حيث تدور المرآة المسدسة الاوجه بصورة سريعة جداً ليصبح كل وجه من اوجهها الستة مواجهاً للمرنان لفترة زمنية قليلة جداً ، بحيث يؤدي ذلك الى خروج شعاع الليزر من المرآة الثانية (الامامية) في تلك الاثناء، واستخدمت هذه الطريقة بكثرة في بداية عصر الليزر في الستينات ، وقد حلت محلها طرق اكثر كفاءة في الوقت الحاضر.



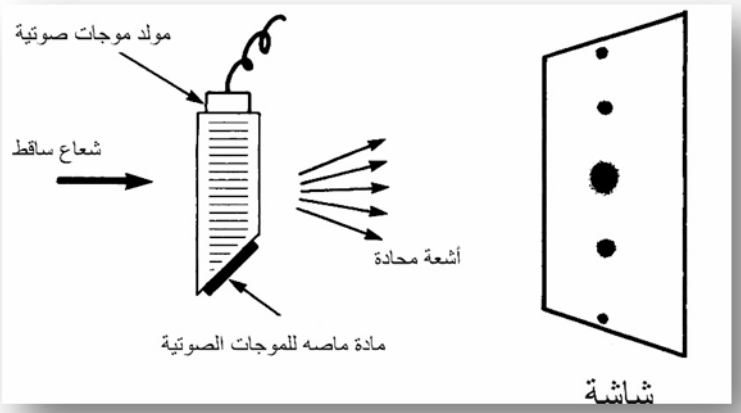
شكل11 -4 :تنظم كفاءة الليزر وتحول من كفاءة واطنة الى عالية عندما يكون احد اسطح المرآة المسدسة موازياً تماماً للمرآة الامامية في الليزر

ومن الطرق الميكانيكية الاخرى الطريقة المعتمدة على الانعكاس الكلي داخل المواشير اذ تحصل عملية الليزر عندما ينعكس الضوء انعكاساً كلياً داخل الموشور ويدخل فجأة موشور اخر الى المنظومة بشكل ملاصق للأول ليؤدي الى تغير مسار الشعاع ويمنع حدوث عملية الليزر ، وهذه تسمى Frustrated Total Internal Reflection، ويرمز لها ب FTIR والتي تعني " الانعكاس الكلي ألداخلي المجبر " وهذه الطريقة غير شائعة الاستخدام ولكن لها استخداماتها الخاصة التي لا يمكن استخدام الطرق الاخرى بدلا عنها على الرغم من كون مبدأ التحكم الميكانيكي بسيطاً ، لكن توجد بعض المعوقات في استخدامه نتيجة لوجود الاجزاء الميكانيكية المتحركة بسرعة عالية والتي يصيبها التلف بسرعة في اثناء الاستخدام.

التحكم باستخدام الاجهزة الصوتية البصرية بمعامل الكفاءة
Acousto-optic Q-switches

تتكون الاجهزة الصوتية البصرية Acosto Optics (A-O) ، من بلورة من المواد الصلبة (الكوارتز مثلاً) تلتصق بأحد اطرافها مرسلة صوتية ، وهذه مشابهة في عملها عمل السماعة الصغيرة المستخدمة مع اجهزة المذياع ، حيث تطلق امواجاً صوتية في المادة كما تطلق السماعة الامواج الصوتية في ارجاء الغرفة ، مع ملاحظة انه مع الاولى تستخدم امواجا فوق الصوتية (غير مسموعة) Ultrasonic. وتنتشر هذه الامواج في المادة بشكل دوري ، وكل شعاع يمر من خلال المادة يرى هذه الامواج على شكل شقوق ، كتلك التي استخدمناها في تجربة يونك (راجع الفصل الرابع) ، وبذلك يحيد الشعاع كما في الشكل (11-5).

يستخدم هذا النوع اساساً في موقع داخل المرنان بين المرآة الخلفية والوسط الفعال كما في الشكل (11-6) ، فبدون وجود الاشارة على المنظومة تمرر البلورة جميع الاشعة الساقطة عليها ، دون ان يحيد اي جزء منها وبذلك نحصل على نظام ذي كفاءة عالية جداً ، ولكن بوضع الاشارة على المرسلة والتي تؤدي الى تكو الموجات الواقفة المشابهة للشقوق تحيد الاشعة وتحرفها عن المرآة ، وبذلك تقل كفاءة المنظومة لدرجة انها تصل الى الصفر. وتوضع عادة مادة ماصة على الجانب المقابل لمصدر الاشارة ، للحيلولة دون انعكاسها ومن ثم تداخلها مع الموجات المتولدة ويكون هذا السطح بزاوية كي ينعكس الجزء المتبقي

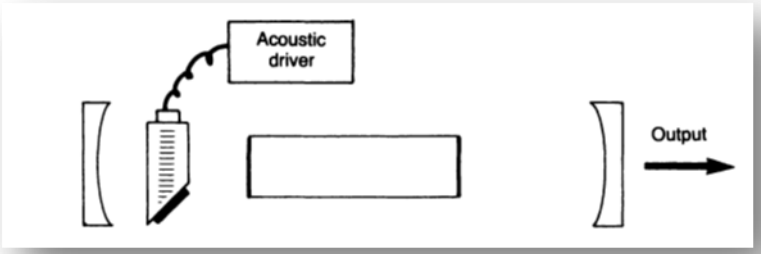


شكل 11-5 :ينحرف الشعاع الساقط نتيجة الموجة الصوتية في المنظومة الصوتو بصرية.

نحو خارج البلورة ، وهذه العملية ضرورية جداً مع الترددات الصوتية العالية المستخدمة مع عملية تنظيم الكفاءة وعملية تحديد الانماط التي سنتطرق اليها في الفصل الثاني عشر.

تعتمد سرعة عملية تنظيم معامل الكفاءة اي سرعة تحويل نظام الليزر من نظام ذي كفاءة واطئه الى نظام ذي كفاءة عالية على عاملين اساسيين هما سرعة الموجات الصوتية داخل البلورة وقطر شعاع الليزر ، وبذلك اذ يعتمد الزمن على سرعة ابتعاد الموجات الصوتية من امام الشعاع وبذلك تصبح السرعة اكبر كلما صغر قطر الشعاع داخل المرنان .

تستخدم هذه الانواع بكثرة مع انواع الليزرات لقلة كلفتها مقارنة مع الاجهزة الكهروبصرية E.O ، وكذلك لكون سرعتها مناسبة لأغلب التطبيقات . وليس لهذه المنظومات سوى عيب واحد ، حيث لا تحيد



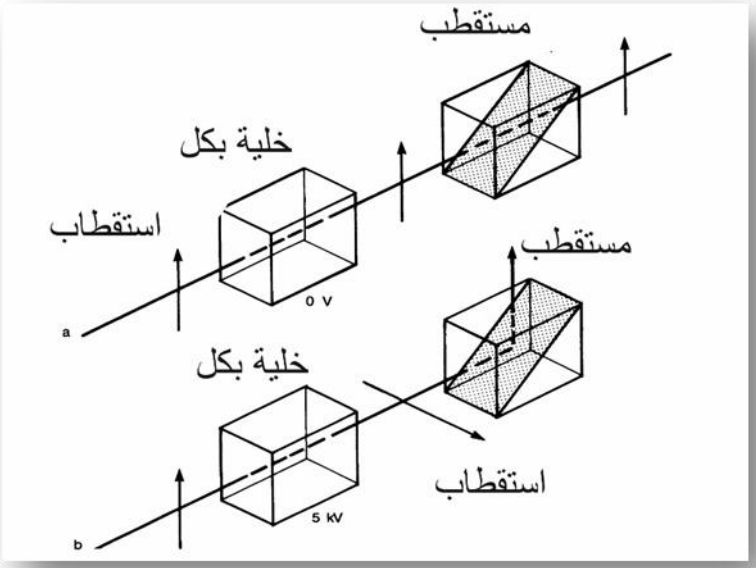
شكل 11-6: منظومة صوتو بصرية داخل مرنان الليزر

الامواج الصوتية جمع الاشعة بل يبقى جزء منها يمر دون ان تحدث فيه عملية الحيود وتكون هذه الكمية الصغيرة كافية احياناً لحدوث عملية الليزر وخاصة مع الليزرات ذات القدرة العالية حيث يصبح الربح اكبر من الخسارة فيها. لذلك تستخدم هذه الطريقة عموماً مع الليزرات الواطئة القدرة ، او القليلة الربح.

تنظيم معامل الكفاءة باستخدام الاجهزة الكهروبصرية
Electro-Optic Q-switches

تتكون الاجهزة الكهروبصرية اساساً من عنصرين اساسيين كما في الشكل (11-7) ، وهما خلية تسمى خلية بكل Pockel Cell والتي يكون لوح ربع طول الموجة فيها منظماً كهربائياً ، حيث يمر الضوء من خلالها دون حدوث اي تغير فيه اذ لم يكن هناك جهد كهربائي عليها، وبوضع الجهد الكهربائي فأن الخلية تؤدي الى دوران مستوى الاستقطاب بزاوية مقدارها 90 درجة. والجزء الاخر هو مستقطب ثان يعمل عمل محلل ، بحيث يمرر الضوء ذو مستوى الاستقطاب الموازي الى مستوى

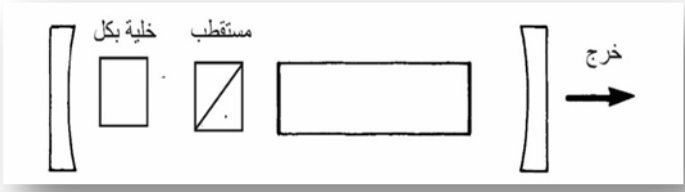
الاستقطاب العمودي عليه ويوضع المسيطر الكهرو- بصري على معامل الكفاءة اعتياديا داخل المرنان بين المرنان بين المرآة الخلفية والوسط



شكل 11-7 :عندما يسلط جهد كهربائي على خلية "بكل يدور مستوي الاستقطاب للضوء المستقطب المار من خلالها ، وبذلك يمكن للضوء الانحراف عن مساره عند مروره خلال المستقطب الاخر.

الفعال لليزر كما يبدو ذلك في الشكل (11-8). وطالما هناك جهد على طرفي الخلية ، فأن الكفاءة تكون واطئة للمنظومة الليزرية ، وتخزن الطاقة المتولدة من عملية التوزيع العكسي فيها لحين رفع الجهد لتنطلق هذه فجأة على شكل نبضة ذات طاقة عالية ، ومن الضروري وضع الخلية بين المرآة الخلفية والوسط الليزري حيث انعكاسية هذه المرآة اكبر من انعكاسية المرآة الامامية. لننظر الان من قرب الى الخلية

الكهروبصرية هذه ولنرى كيف تتم عملية تدوير مستوى الاستقطاب للضوء المار من خلالها . تصنع هذه الخلية من المواد ذات الصفات الكهروبصرية حيث يتغير معامل انكسارها بتغير الجهد الكهربائي المسلط على طرفيها ، وبصورة ادق تكون ذات انكسارية مزدوج للضوء Birefeinget ، اي ان معامل انكسارها يعتمد على نوعية استقطاب الضوء المار من خلالها.



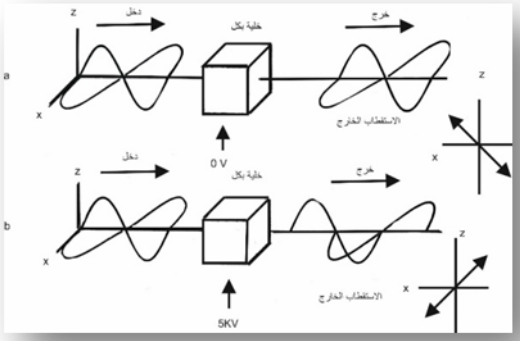
شكل 11-8:منظومة كهروبصرية موضوعة داخل المرنان بين الوسط الفعال والمرآة الخلفية

ولفهم عملها بصورة ادق يجب ان نتذكر ان الضوء المستقطب خطياً يتكون من محورين متعامدين من الاستقطاب (راجع الفصل الثالث) ، فأذا ما مر هذا الضوء من خلال خلية كهرو بصرية ، كما في الشكل (11-9 أ) فأن مركبتي الاستقطاب ستلاقيان معامل انكسار متساوياً ، وبذلك تسيران بالسرعة نفسها داخل المادة ، ويخرج الضوء من الطرف الاخر حاملا خصائصه نفسها.

ولكن بوضع الجهد على طرفي الخلية ، فان معامل انكسارها للمركبتين يتغير (خاصية البلورات الكهروبصرية) وبذلك تسير

المركبتان بسرعتين مختلفتين داخل الخلية ، وتخرجان من الطرف الاخر بطور مختلف وبوضع الجهد المناسب واختيار الطول المناسب للبلورة ، يمكن ان نحصل على فرق في الطور مقداره 180 درجة اي نصف طول الموجة، وكما نلاحظ ذلك في الشكل (11-9 ب) ، وبجمع المركبتين نلاحظ ان مستوى الاستقطاب اختلف بزاوية مقدارها 90 درجة عن الضوء الداخل الى البلورة.

تستخدم هذه الطريقة بصورة عامة كما في الشكل (11-8) ، اذ يمر الضوء من خلال الخلية مرتين قبل ان يمر ثانية من خلال المستقطب ، وفي هذه الحالة نحتاج فقط الى تغيير احدى المركبات بمقدار ربع طول الموجة في كل مرة يمر الضوء من خلالها ، وبذلك نحتاج الى جهد اقل يوضع على طرفي الخلية.



شكل11-9 (أ) عندما لا يسلط جهد كهربائي على طرفي خلية" بكل" لا تعاني مادتها اي انكسار مزدوج ، ويمر بذلك الضوء من خلالها دون ان يعاني اي تغيير.

(ب) عندما يسلط جهد كهربائي على الخلية تمر احدى المركبات بصورة اسرع من المركبة الاخرى وبذلك يدور مستوى الاستقطاب للضوء الخارج.

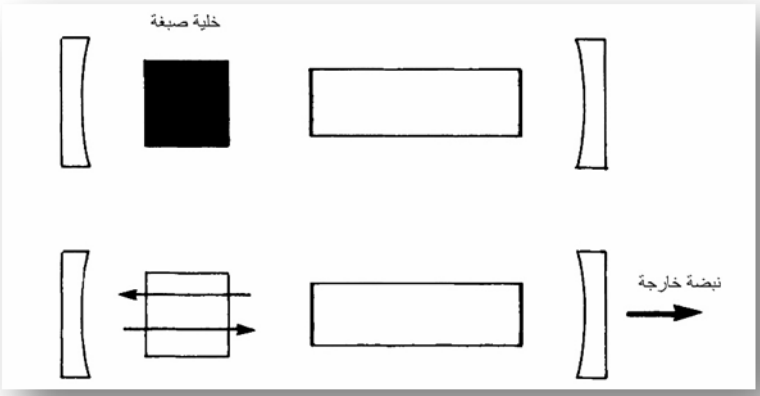
وتعتبر هذه الطريقة اكفأ الطرق الاربع المستخدمة في السيطرة على معامل الكفاءة ، اذ لا تحتوي على اجزاء ميكانيكية متحركة ، او موجات صوتية ، لذلك تكون سريعة جداً ، ويمكن التحكم بنتائجها بسهولة حيث يخرج شعاع الليزر مباشرة بعد وضع الجهد على طرفي الخلية ، ولكنها تعتبر مكلفة جداً ، لكون المواد الكهرو بصرية باهضة الثمن ، وهي مكونة عادة من بوتاسيوم دايهيدريت - فوسفيت KDP او احد مشابهاتها وعملية تنمية البلورات من هذه المواد من العمليات المكلفة ايضاً ، وكذلك نحتاج في هذه المنظومة الى جهد عال يصل الى بضعة آلاف من الفولتات وهذا مكلف ايضاً. ولكون الوقت المستغرق لحصول عملية التغيير لا يتجاوز عدة نانو ثانية فان الالكترونيات المستخدمة والتي تجهزنا بالجهد العلي ولهذه الفترة القليلة تكون مرتفعة الثمن ايضاً.

وهناك نوع اخر من الاجهزة الكهرو- بصرية يسمى ب خلية كير KERR CELL وهذه مشابهة للأولى ، ماعدا ان الوسط المستخدم فيها هو سائل وليس صلباً ، مثل النتروبنزين ، ولكن الجهد المستخدم يكون هنا اكبر بكثير من الجهد المطلوب في الحالة الاولى ، اضافة الى سهول تلف الاخير نتيجة الحرارة العالية المتولدة فيها ، وبذلك تكون استخداماتها قليلة ومحدودة.

تنظيم معامل الكفاءة باستخدام الصبغة Dye Q-Switches

تستخدم الصبغات التي تعتمد نفاذيتها على شدة الاشعة الساقطة عليها (شكل 11-10) في عملية تنظيم معامل الكفاءة ، وتسمى هذه الطريقة بالطريقة الايجابية. كما نلاحظ في الشكل (11-10) ، حيث توضع الخلية التي تحتوي على صبغة بين الوسط الليزري والمرآة الخلفية ، فاذا ما وصلت شدة الاشعة المنبعثة من الوسط الليزري الى مستوى معين (نتيجة الانبعاثين التلقائي والمحفز)، فان الصبغة تصبح عديمة اللون ، ويمر الضوء من خلالها ليصل الى المرآة الخلفية لتحدث عملية الليزر . وهذه الطريقة رخيصة جداً ، ولكن عيوبها عديدة ، اهمها Pulse Jitter، تحلل الصبغة ، وصعوبة التحكم بالوقت المناسب للحصول على النبضة. ما عدا ما ورد اعلاه ، لهذه الطريقة تطبيقات عديدة لسهولة استخدامها ، وهذه لا تستخدم عادة مع الليزرات الواطئة القدرة ، وذلك لعدم امكانيتها لتغيير لون الصبغة لقلة شدة الاشعة المتولدة قبل حدوث عملية الليزر.

شكل 11-10 : تتغير نفاذية المادة العضوية فجأة عند نقطة الاشباع



شكل 11-11:تقصر الفوتونات الناتجة من الانبعاث المحفز والانبعاث التلقائي الصبغة لتصبح عديمة اللون ويمر الضوء من خلالها

الاسئلة

1- لنفكر في ليزر يعطي شعاعاً مستمراً مقداره واط واحد . اذا ما نظمت كفاءته ليعطي عشرة نبضات في الثانية ودون خسارة وبزمن قدره 100 نانو ثانية لكل نبضة. ماهي القدرة العظمى في كل نبضة؟

2- عرفت الكفاءة Q ب:

Q = الطاقة المخزونة في المرنان / الطاقة المفقودة في كل دورة

ماهي الكفاءة لليزر النديميوم/ ياك الذي الخسارة المدورة فيه هي 5%؟

3- احسب سرعة الفتح والغلق لمحملة صوتو- بصرية اذا كانت سرعة الصوت في المحملة هي 6000 م/ثانية وقطر الشعاع الفعال مع المنظومة هو 0,5 مليمتر.

4- افترض اشتراك $2*10^{19}$ ايون للكروم من تلك الموجودة في قضيب ليزر الياقوت في عملية الليزر. فأذا كان كل ايون يبعث فوتوناً واحداً في كل نبضة ، ما هو التوزيع العكسي النسبي المطلوب للحصول على نبضة ذات جول واحد ؟ (يعرف التوزيع العكسي النسبي F بأنه :$= (N_1-N_0)/(N_1+N_0)$. حيث N_0,N_1 يمثلان عدد الذرات في مستويي الليزر العلوي والسفلي . ونذكر ان لليزر الياقوت ثلاثة مستويات فقط).

5- استخدمت مرآة دوارة للسيطرة على معامل الكفاءة في ليزر النديميوم / ياك فاذا كانت الاوجه الستة للمرآة المسدسة تدور 3200 دورة في الدقيقة ، احسب عدد النبضات الخارجة من الليزر في الثانية PRF .

6- عند وضع منظم كفاءة كهرو-بصري في داخل مرنان وكما في الشكل (11-8) ، فان مستوى الاستقطاب في الضوء المستقطب يدور 90 درجة في كل مرة خلال مروره لمرة واحدة خلال الخلية ؟ (اي ما استقطاب الضوء بين الخلية والمرآة الخلفية ؟).

7- زمن النبضة لليزر المنظم الكفاءة وذو الربح العالي اقصر من زمن النبضة في الليزر الواطئ الكفاءة حيث يؤدي الربح العالي الى افراغ التوزيع العكسي بوقت اقل. وزمن النبضة يعتمد على عاملين اخريين : طول المرنان ونفاذية المرايا . ما تأثير هذين العاملين على زمن النبضة. ولماذا؟ .

الفصل الثاني عشر

افراغ الحجرة وتثبيت النمط

Cavity Dumping and Mode locking

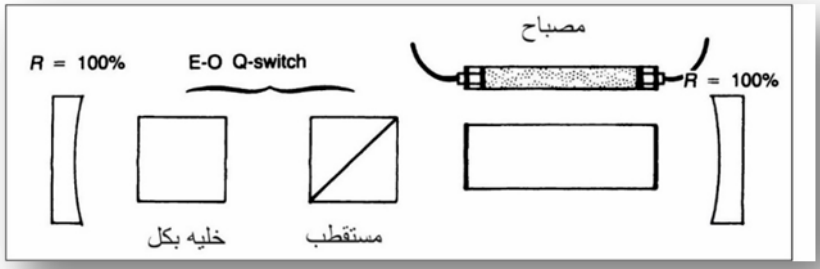
يمكن الحصول على نبضات عالية الطاقة من اغلب انواع الليزرات باستخدام طريقة السيطرة على معامل الكفاءة Q.S . ولكن هذه الطريقة تعجز عند استخدامها مع انواع الليزرات التي يكون عمر المستويات العليا فيها قليلاً بحيث تحصل عملية الانبعاث التلقائي بسرعة عالية ، مانعة بذلك تجمع الذرات في المستويات العليا نتيجة التوزيع العكسي ، وبذلك تمنع تجمع الطاقة في هذه العملية. الطريقة الامثل المستخدمة تتم بالسيطرة على الموجات داخل الحجرة وذلك بإخمادها ، وتسمى هذه ب" كبت او إخماد الموجات او تفريغ الحجرة Cavity Dumping " . ومن هذه نحصل على موجات ذات عرض (زمن) نبضات مناسب. ويمكن استخدامها مع عملية السيطرة على معامل الكفاءة ، لنحصل على زمن مناسب للنبضات وكذلك عدد مناسب منها ، ويمكن كذلك بواسطتها الحصول على نبضات ذات زمن قصير جداً بترددات عالية جداً ايضاً.

يمكن كذلك استخدام عملية تثبيت النمط Mode Locking للحصول على الترددات العالية ، والنبضات القصيرة ، ويمكن بطبيعة الحال استخدام العمليات الثلاث. تنظيم معامل الكفاءة وتثبيت النمط وإفراغ الحجرة معاً للحصول على اشعة ذات مواصفات معينة.

افراغ الحجرة Cavity Dumping

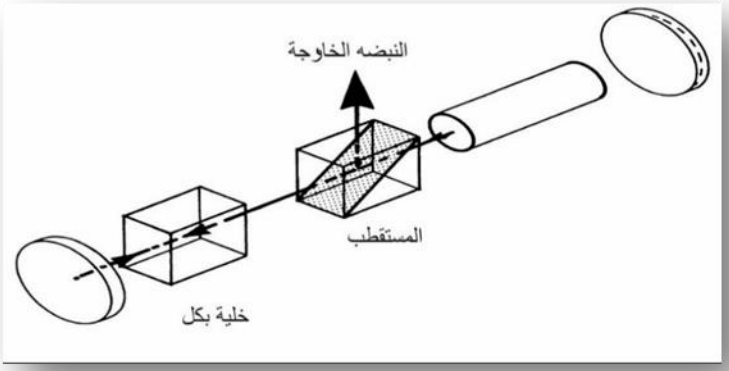
تعبر عبارة " افراغ الحجرة " عن وصف دقيق لعملية الحصول على نبضة واحدة ذات طاقة عالية من الليزر . والمقصود بالحجرة هنا هو المرنان بحد ذاته ، ويوضح لنا الشكل (12-1) هذه العملية ، اذ نلاحظ فيه ان المرآتين تكونان ذات انعكاسية 100% ، اذن كيف يخرج الشعاع من المنظومة ؟ لندرس هذه الحالة ونرى ماذا يحصل اذا ما اطلق هذا الليزر نبضة بطريقة افراغ الحجرة ، عندما يومض المصباح الوهاج في الليزر المسيطر على معامل كفاءته وتكون الخلية الكهروبصرية في حالة نفاذية للضوء الساقط عليها اي بوضع لا يؤدي الى دوران مستوى استقطابه ، وحالما يصل الربح الى مستوى الخسارة في الدورة الواحدة داخل المرنان تبدأ عملية الليزر، ويبدأ الشعاع بالحركة نحو الامام والخلف بين المرآتين ، ولكون المرآتين عاكستين 100% تبدأ عملية تضخيم ونمو لهذا الضوء الى ان يصل الى حد معين ، يسلط الجهد على الخلية الكهرو - بصرية ، وبذلك يدور مستوى الاستقطاب للضوء المار من خلالها وبسقوطه على المستقطب ينعكس نحو الخارج كنبضة ذات طاقة عالية جداً كما موضح ذلك في الشكل (12-2). وبذلك تكون النبضة الخارجة ناتجة عن عملية تفريغ الحجرة بما فيها من طاقة ، وهذه الطاقة لا تعتمد على المرآتين كما في الليزرات الاخرى وكما ناقشنا ذلك سابقاً.

وعملية افراغ الحجرة هذه ما هي الا نوع من انواع عمليات تنظيم معامل الكفاءة ، والتي يتم فيها تحويل كفاءة الليزر العالية الى كفاءة واطئة بعد اطلاقه النبضة. وهذا عكس ما حصلنا عليه سابقاً اذ تتم عملية الحصول على كفاءة عالية من اخرى واطئة ، ولذلك تسمى عملية افراغ الحجرة (بعملية تنظيم الكفاءة بنمط اطلاق النبضة (Transmission mode Q.S pulse ولكن عبارة " تفريغ الحجرة" ابسط استخداماً.



شكل12-1 : ليزر مفرغ الحجرة باستخدام منظومة تفريغ الحجرة الكهرو- بصرية.

لنتساءل الان ما هو زمن النبضة في عملية تفريغ الحجرة في الشكل (12-2)؟ هذا يعتمد على الوقت الذي يستغرقه الشعاع للدوران داخل المرنان ، اي بمعنى اخر يعتمد هذا على طول المرنان ، فكلما اصبح المرنان اطول ، اصبح الوقت المطلوب للنبضة لكي تخرج اطول واخر فوتون ينطلق هو الفوتون الاخير الذي يمر من الخلية الكهرو- بصرية قبل تسليط الجهد عليها ، وهذا يجب ان يدور دورة واحدة في المرنان قبل ان يخرج.



شكل 12-2 : عندما يدور مستوى الاستقطاب نتيجة تسليط جهد على خلية " بكل " ، فأن النبضة الحاملة لطاقة الحجرة الكاملة ستندفع خارج المرنان.

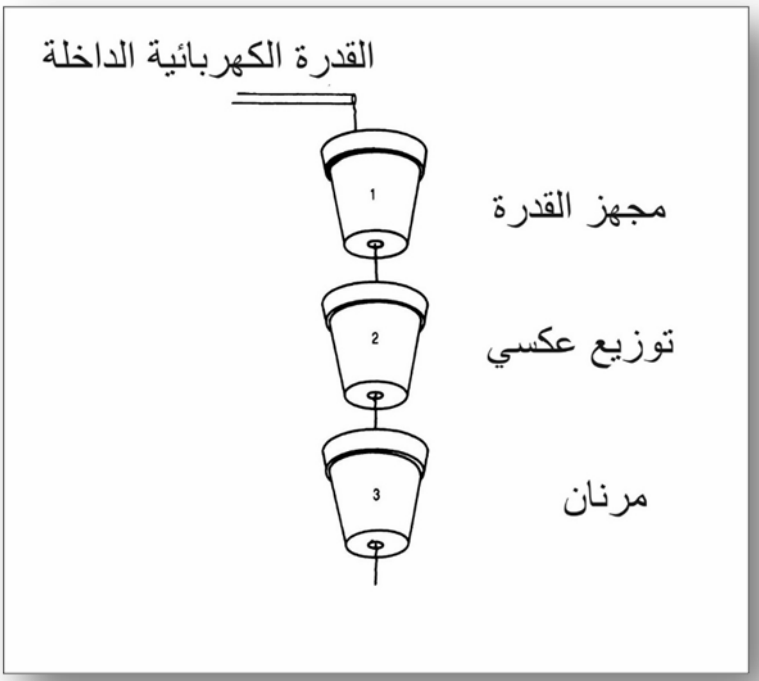
والمسافة التي يقطعها هي 2l (حيث يمثل l الطول البصري للمرنان) وسرعته هي C ، بذلك يكون الوقت المطلوب هو 2l/C فيصبح من النبضة هو الوقت المحصور بين خروج الفوتون الاول والفوتون الاخير، او ما يعادل 2l/C .

وزمن النبضة الذي نحصل عليه بهذه الطريقة قليل جدا اذا ما قورن بزمن النبضة الذي نحصل عليها بطريقة ال Q.S ، فاذا اعتبرنا ان سرعة الضوء تساوي تقريبا قدما واحدا في النانو ثانية وباستخدام ليزر بطول مقداره قدم واحد ، نحصل على نبضة ذات زمن يصل الى 2 نانو ثانية وهذا قليل جدا مقارنة مع النبضات التي نحصل عليها من عملية ال

Q.S. والفرق الاخر بين العمليتين حيث تخن الطاقة في الحجرة (المرنان) في عملية تفريغ الحجرة.

ويمكن بطبيعة الحال خزن الطاقة في مجهز القدرة . وهذا ما يحصل في المصباح الومضي (الوهاج) عند استخدامه مع ليزرات الحالة الصلبة او بعض انواع ليزرات ثاني اوكسيد الكاربون الصناعية ، ويوضح الشكل (12-3) فكرة عما يحتويه هذا الفصل حيث يبين امكانية خزن الطاقة في مجهز القدرة و في التوزيع العكسي وفي المرنان الضوئي لليزر . فالطاقة الكهربائية التي تدخل مجهز القدرة تخرج من المرنان مباشرة اذا ما كانت الفتحات الثلاث مفتوحة . ولكن اذا ما تم غلق احدى هذه الفتحات (او اكثر) يمكن خزن الطاقة في ذلك الجزء ، واطلاقها بشكل نبضة قوية واحدة ، ويوضح الشكل (12-4) الاجزاء الثلاثة المرادفة لتلك المبينة في الشكل (12-3).

فاذا ما ومض المصباح الومضي المستخدم في ليزر الحالة الصلبة ، وبدون وجود لعملية تنظيم معامل الكفاءة او تفريغ الحجرة (هذا يشبه وضع السدادة في الخزان الاول فقط من الشكل (12-3). يسمى الليزر ب " الليزر ذا النمط الاعتيادي Normal Mode Laser " ويكون الشعاع الخارج حاوياً على عدد من النبضات المختلفة ، وهذا النوع يكون مفيدا احياناً في التطبيقات الصناعية التي تحتاج الى

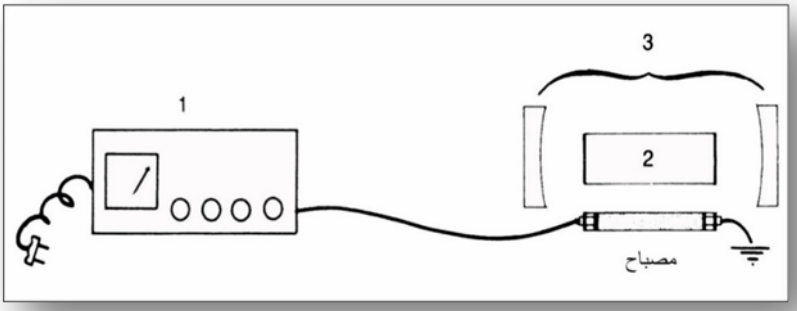


شكل 12-3 : تنقل الطاقة من مجهز القدرة في الليزر الى التوزيع العكسي ومن ثم الى المرنان الضوئي ، كما ينتقل الماء من اناء الزهور الى اخر . ويمكن حفظ الطاقة في اي من هذه لحين تضخيمها وثم تطلق كنبضة واحدة.

طاقة دون ان يكون لتنظيم هذه الطاقة اثر في العمل ، لذلك يكون استخدام عمليتي Q.S او تفريغ الحجرة لا داعي لهما.

بوضع السدادات في فتحات الاواني في الشكل (12-3) يصبح الامر اكثر اثارة ، اذ يمكن تمثيل ليزر الحالة الصلبة المحفز باستخدام المصباح الوهاج والمستخدمة معه عملية تفريغ الحجرة بحالة وضع السدادة في كل من الاناء الاول والاخير، فتضغط الطاقة اولا في مجهز القدرة وتركز النبضة اكثر في المرنان وبذلك تكون النبضة اكثر طاقة مما لو استخدم

الضخ بواسطة المصباح الوهاج عملية تفريغ الحجرة منفردة وبوضع السدادات الثلاثة في الفتحات نحصل على عملية مشابهة الى الليزر ذي المصباح الوهاج المستخدمة معه عمليتا تنظيم الكفاءة وتفريغ الحجرة.



شكل 12-4 : تمثل السدادات في الشكل 12-3 في منظومة الليزر ، 1- مجهز القدرة، 2- التوزيع العكسي ، 3- المرنان الضوئي.

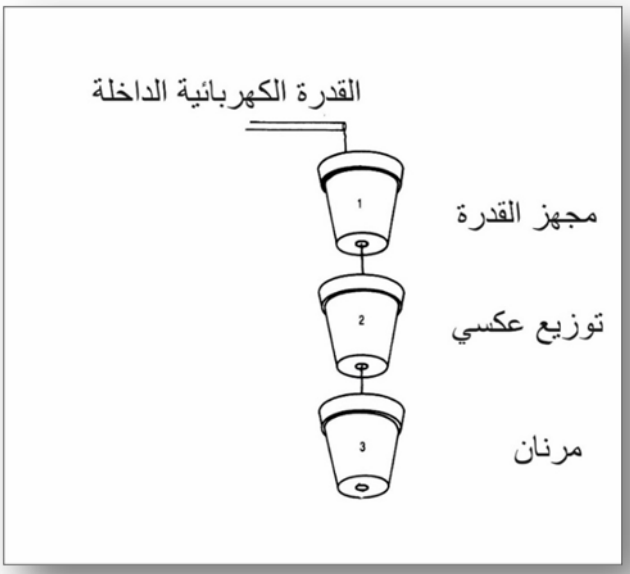
افراغ الحجرة الجزئي Partial Cavity Dumping

عندما تفرغ الطاقة التي تدور في المرنان جميعها الى الخارج ، يتطلب الامر وقتاً يصل الى جزء من الملي ثانية لكي تحصل عملية بناء اخرى للطاقة بحيث يمكن افراغها وتوجيهها نحو خارج المرنان ، اما في عملية التفريغ الجزئي للحجرة فأن قسما فقط من الطاقة التي تدور في المرنان يطلق نحو الخارج. ولتشبيه ذلك في مثالنا السابق يسحب جزء مما هو موجود في الاناء الثالث بحيث يبقى هناك جزء من الطاقة فيه

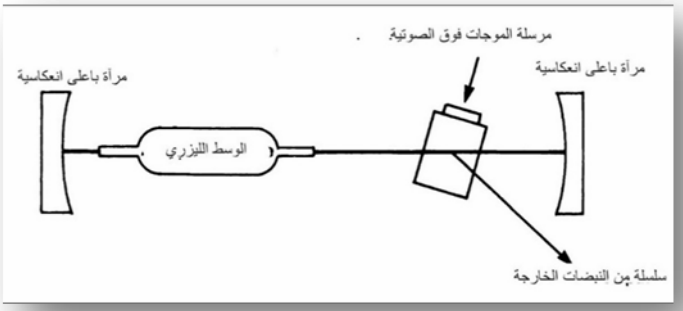
دائماً وذلك بسحب السدادة لفترة قصيرة واعادتها قبل ان يفرغ الاناء كلياً وهذا ما يوضحه الشكل (12-5).

ومن الطبيعي ان تخرج الطاقة الداخلة الى الليزر بالسرعة نفسها ، لكنها تخرج مضغوطة على شكل نبضة قيمتها القصوى عالية جداً ، وهذه هي طريقة عمل جميع انواع ليزرات الحالة الصلبة . يكون عمر مستوى الطاقة العلوي في الليزرات الايونية قليلاً جداً بحيث لا يساعد على استخدام عملية تنظيم معامل الكفاءة (اي ان الاناء الثاني في مثالنا السابق يسرب الماء بسرعة الى الاناء الثالث) فاذا ما اردنا الحصول على نبضة من ليزر الاركون او ايون الكربتون ، فيجب ان نستخدم طريقة تفريغ الحجرة ، وهذا النوع موضح في الشكل (12-6) حيث استخدمت الظاهرة الصوتو – بصرية لتفريغ الحجرة جزئياً للحصول على سلسلة من النبضات الليزرية. وتستخدم اعتيادياً اشارات صوتية ترددها بحدود 80 ميكا هيرتز مقطعة (محملة) بتردد 10 كيلو هيرتز، كما في الشكل (12-7). وبذلك يكون خرج الليزر عبارة عن سلسلة من النبضات وبتردد 10 كيلو هيرتز. لاحظنا في الفصل السابق عند استخدام الظاهرة الصوتو- بصرية نحصل على اشعة محادة ، وليس على شعاع واحد ، وهذا يسمى "تحميل رامان Raman ".

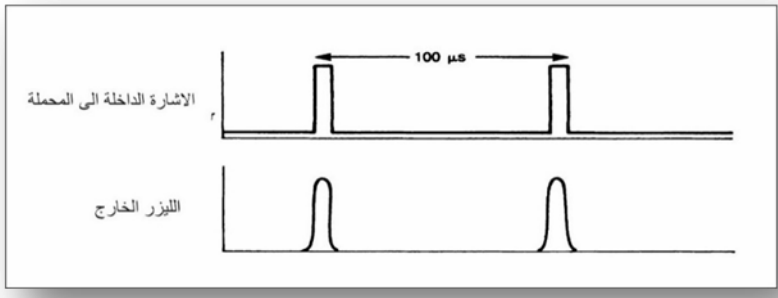
وهناك نظام اخر يسمى " نظام براك Bragg " والذي نحصل فيه على شعاع مُحاد فقط ، وهذا هو الذي يمكن استخدامه في موضوعنا



شكل 12-5 : في عملية تفريغ الحجرة الجزئي، يخزن جزء قليل من الطاقة فقط في المرنان من كل نبضة خارجة.



شكل 12-6 :ليزر الاركون مفرغ الحجرة بمنظومة صوتو- بصرية



شكل 12-7 : الاشارة الصوتية الداخلة ، وسلسلة النبضات الضوئية الخارجة من ليزر مفرغ الحجرة الجزئي.

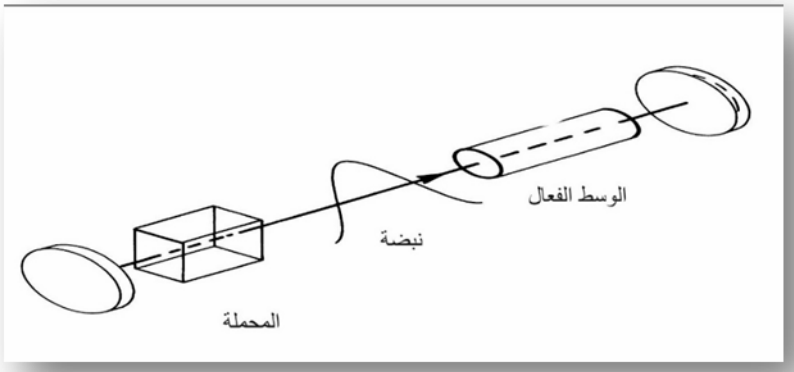
السابق ، ويعتمد الفرق بين النظامين على الطول الموجي للأشعة الضوئية ، وكذلك الموجة الصوتية المستخدمة ، وطول منطقة التفاعل بين الاشعة والموجات الصوتية.

تثبيت النمط (مجال الزمن) Mode Locking – Time Domain

اقصر النبضات التي يمكن الحصول عليها هي تلك التي نحصل عليها بطريقة تثبيت النمط ، فيتراوح زمن النبضة التي نحصل عليها بطريقة تنظيم معامل الكفاءة بين عدة مئات من النانو ثانية الى عدد من النانو ثانية اعتماداً على معاملات الليزر. اما النبضات الخارجة بطريقة تفريغ الحجرة فتكون اقصر من ذلك لتصل الى اقل من النانو ثانية الواحدة تقريباً. ولكن تلك التي نحصل عليها من ليزر الصبغة وبطريقة تثبيت النمط تصل الى حد اقل من البيكو ثانية الواحدة ، اي اقل من الاولى بعدة الاف من المرات . هناك طريقتان لفهم عملية تثبيت النمط

فيمكن تفحص العملية من حيث الوقت ، اي بدراسة ما يحدث عند حركة شعاع الليزر الى الامام والخلف بين المرآتين ، او من حيث التردد اي بدراسة تداخل الانماط الطولية في الليزر مع بعضها.

والطريقتان صحيحتان وتقودان الى الاستنتاج نفسه ، ولكن التفكير بالوقت ابسط فهماً لذلك سنشرحه اولاً ومن ثم نتطرق الى الطريقة الثانية. نلاحظ في الشكل (12-8) ليزراً مثبت النمط حيث ضغطت الطاقة بين مرأتيه الى نبضة اقصر من المرنان نفسه ، ففي عمليتي تنظيم معامل الكفاءة ، وافراغ الحجرة يكون المرنان مملوءً بالكامل بالطاقة اما في هذه العملية فان الطاقة ضغطت على شكل نبضة

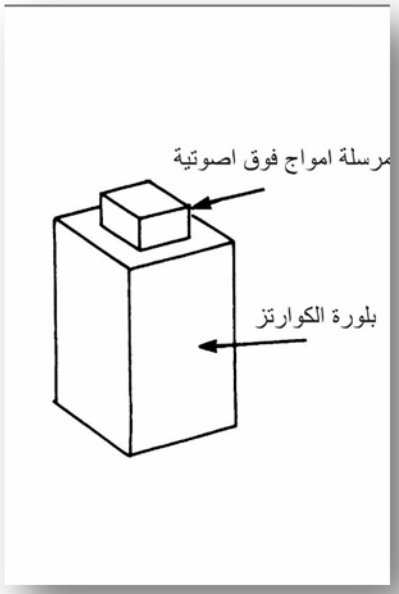


شكل 12-8 :نبضة قصيرة من الضوء تتذبذب الى الامام والخلف بين مراتي ليزر محدد النمط.

تتحرك نحو الامام والخلف بين المرآتين ، وفي كل مرة تصل هذه النبضة الى المرآة العاكسة جزئيًا يخرج جزء منها نحو الخارج على شكل نبضة. هذه الطاقة ضغطت على شكل نبضة ثابتة النمط في المرنان باستخدام محملة Modulator تثبيت النمط ، والتي هي ببساطة عبارة عن بوابة Gate بصرية سريعة (يمكن ان تكون منظم معامل كفاءة كهرو- بصري) وهذه تفتح مرة واحدة في كل دورة للطاقة في المرنان سامحة لكمية من الطاقة بالخروج نحو الخارج ، وتكون في بقية الوقت مغلقة والضوء المسموح له بالتذبذب بين المرآتين هو ذلك الموجود في النبضة المثبتة النمط فقط . تكون المحملة هذه اقرب ما يمكن الى المرآة، وتفتح فقط حال مرور النبضة منها لتنعكس من المرآة وتعود وتمر من خلالها ثانية وبذلك لا يتأثر معدل القدرة الخارجة من الليزر بعملية تثبيت النمط . ويتكون الشعاع الخارج من الليزر المثبت النمط من سلسلة من النبضات القصيرة جداً . والمسافة بين النبضات هي المسافة التي تقطعها النبضة داخل المرنان بين المرآتين العاكستين مقسومة على سرعتها ، اي ان الوقت بين النبضات هو $2l/C$ حيث تمثل l طول المرنان الضوئي.

اما تردد النبضات F فيساوي $C/2l$. وبذلك ينتج الليزر الذي تكون المسافة بين مرآتيه هي 30 سم سلسلة من النبضات بتردد مقداره 500 ميكا هيرتز ، اي 500 مليون نبضة في الثانية الواحدة . ويعتمد زمن النبضات الناتجة من عملية تثبيت النمط على عدة عوامل ، اهمها : عرض نطاق الليزر ، كفاءة منظومة التحميل (اي عمق التحميل)

فبزيادة عرض النطاق يقل من النبضات بحيث يصل في انواع من ليزرات الصبغة العريضة النطاق الى حد 100 فيمتو ثانية (0,1 بيكو ثانية). ومن جانب اخر فليزر النديميوم / ياك ذو عرض النطاق القليل جداً تصل النبضات الثابتة النمط فيه الى حد 30-60 بيكو ثانية. تستخدم انواع من المنظومات الكهرو- بصرية والصوتو- بصرية، وكذلك الخلايا الصبغية في ذلك . ويوضح الشكل (12-9) مثبتات النمط الصوتو-بصرية ، اذ نلاحظ ان جانب بلورة الكوارتز المعاكس للمرسلة غير معالج ،وذلك لعدم الحاجة الى الاقلال من الموجات المنعكسة كما في عملية تنظيم معامل الكفاءة ، وفي الحقيقة فان عمل الاثنين مختلف



شكل 12-9 : نحصل من محدد النمط الصوتو-بصري على موجات واقفة نتيجة انعكاس الموجات المتولدة من الجانب الاخر لمنظومة التحميل.

تماماً، ففي عملية تنظيم معامل الكفاءة عمل المنظومة الصوتو- بصرية نتيجة تسليط ورفع الموجات الصوتية على طرفي البلورة ، اما في عملية تثبيت النمط فان الامواج المنعكسة من جانب المرسلة الاخر تتداخل مع الموجات المسلطة لتحصل الامواج الواقفة التي تشبه وتر الة العود.

لنقف الان ونفكر بالأمواج الواقفة هذه، فسنلاحظ ان الموجة تختفي مرتين خلال كل دورة ، فوتر العود المهتز يرتفع نحو الاعلى ثم ينخفض نحو الاسفل ، ولكن بين الحالتين هذه يصبح خطاً مستقيماً تماماً، ولمرتين في كل دورة ، وهذا هو الحال كذلك مع الموجات الواقفة في الوسط المستخدم في المرسلة حيث يصبح هذا الوسط غير متأثراً بالأمواج الصوتية مرتين في كل دورة ، وخلال هاتين الفترتين لا تتأثر الموجات الضوئية عند مرورها خلال البلورة ، وبذلك لا تحيد عن مسارها، وبذلك تمر النبضة الليزرية دون ان تحدث فيها اي خسارة.

فإذا ما سلطنا اشارة بتردد 100 ميكا هرتز على بلورة صوتو-بصرية للحصول على موجات واقفة، فأننا سنحصل على 200 مليون مرة في كل ثانية يمر الشعاع فيها دون ان يعان اي حيود فاذا ما وضعنا البلورة قرب المرآة في ليزر طوله 75 سم ($2l/C$= 200 ميكا هيرتز) فأننا سنحصل على شعاع مثبت النمط. اذ تمر الاشعة من خلال البلورة وتنعكس من المرآة وتمر من خلال البلورة ثانية 200 مليون مرة في الثانية ، وبذلك سنحصل على شعاع مكون من 20 مليون نبضة في الثانية.

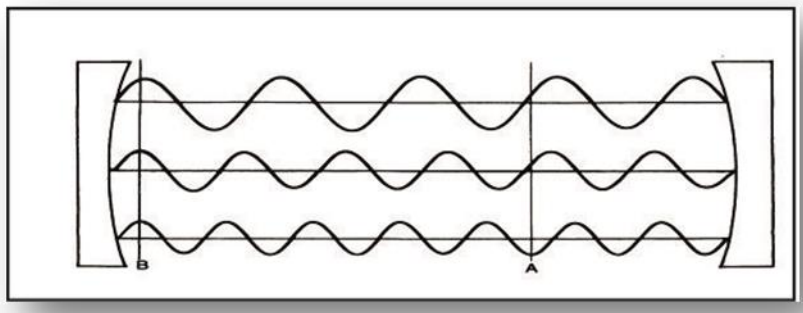
يكون استخدام المنظومات الكهرو- بصرية بشكل مشابه لاستخدامها في عملية السيطرة على معامل الكفاءة ، وذلك بتدوير مستوى الاستقطاب للشعاع الخارج من المستقطب ، ويمكن الاعتماد على هذا النوع للحصول على النتيجة المشابهة للمنظومة السابقة والمعتمدة على الظاهرة الصوتو– بصرية اعتمدنا في الطريقتين السابقتين في عملية تثبيت النمط على فقدان الطاقة نتيجة حجب الضوء او حيوده عن مساره، وهناك طريقة اخرى تعتمد على مبدأ ازاحة الطور ، وهذه تسمى " تعديل الطور Phase Modulation " فالأشعة المارة من خلال البلورة في هذه الطريقة تعاني من انحراف في التردد نحو الاسفل قليلاً، وهذا يعني ان عملية التعديل تغير تردد الاشعة بحيث لا تستطيع ان تقوم بعملية الانبعاث المحفز بصورة كفوءة عند مرورها من خلال الوسط الفعال ، وهذه عملية اقلال من الربح وتشبه عملية مرور الاشعة المحفزة في الوقت غير المناسب لها ويمكن كذلك استخدام الخلايا الصبغية لتثبيت النمط بطريقة ايجابية في اثناء استخدامها للسيطرة على معامل الكفاءة ويتكون الشعاع الخارج من ليزر كهذا نمط السيطرة على معامل الكفاءة الايجابي السابق الذكر اذ تؤدي بداية النبضة الى ازالة لون الصبغة لتسمح بذلك بمرور النبضة بكاملها دون فقدان يذكر ، ويثبت النمط لحوالي 50% - 80% من النبضات بهذه الطريقة.

تثبيت (تحديد) النمط (مجال التردد)

Mode Locking - Frequency Domain

تثبيت النمط هو مصطلح لعملية ، مشابهة لمصطلح افراغ الحجرة الذي وصف فيما سبق ، فما الانماط التي تثبت ؟ وماذا نعني بعملية تثبيت النمط؟ لكي نفهم لماذا سميت العملية ب " تثبيت او تحديد النمط " يجب ان نفهم اولًا مجال التردد اضافة لفهمنا لمجال الوقت فعندما نثبت نمط ليزر فإننا نقوم بتثبيت الطور للأنماط الطولية معاً في المرنان (ولذلك يسمى احياناً " بعملية تثبيت الطور") . فاذا ما افترضنا وجود ليزر ذي ثلاثة انماط طولية تتذبذب معاً كما نرى مخططه في الشكل (12-10) ولكون الموجات تسير بسرعة الضوء داخل المرنان لذا يرينا الشكل ما تكون عليه الموجات في لحظة ما ، فكل النقاط في داخل الحجرة تشابه النقطة A في الشكل وبإضافة الانماط بعضها الى بعض نحصل على شدة نهائية قليلة نتيجة تداخل هذه الموجات مع بعضها البعض تداخلاً اتلافياً . وفي نقطة ما (او اكثر من نقطة) تكون هذه الموجات في قممها العليا ، وبذلك تضاف الى بعضها البعض لنحصل بالنتيجة على شدة عالية. ولكون الموجات تسير بسرعة الضوء فأن هذه النقطة ذات القيمة القصوى تتحرك بسرعة الضوء ايضاً داخل المرنان ، والتداخل البناء في هذه النقطة هو الذي يؤدي الى الحصول على النبضة الثابتة النمط.

المشكلة هي ان الموجات الثلاث المبينة في الشكل (12-10) تتحرك



شكل 12-10 : ثلاثة انماط طولية في مرنان مضافة الى بعضها البعض ايجابياً في B (تداخل بناء) وسلبياً في A . تداخل هدام.

في الليزر غير المثبت نمطه دون ان تبقى في طور ثابت مع بعضها البعض فتشوه المرنان يؤدي عادة الى تغير الاطوار بين الموجات وبذلك نفقد النبضة ، فمن الضروري اذن ان نثبت الانماط معاً وبطور واحد للحصول على نبضة ثابتة النمط ، وهذا ما تقوم به عملية تثبيت النمط حيث تنتقل الطاقة بين الانماط وهذه العملية تنقل المعلومات الكاملة عن الطور بحيث لا يؤدي ذلك الى حصول عملية انحراف بين الموجات .

فنظرتنا للموضوع من حيث الزمن او التردد هي النظرة ذاتها وتقود الى النتيجة ذاتها ايضاً ولأجل اثبات ذلك رياضياً يتطلب الامر الدراية الكاملة في الرياضيات العالية وبالأخص تحليل فورير.

طبيقات الليزرات المثبتة النمط

Applications of Mode Locked Lasers

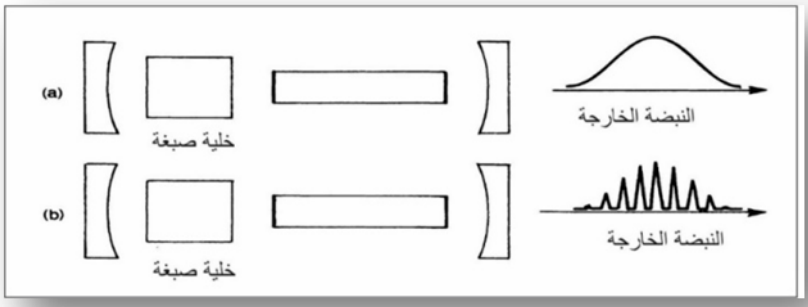
ليست لليزرات المثبتة النمط طاقة عالية ، فالنبضات قصيرة جداً ولا تحتوي الواحدة منها على كمية كبيرة من الطاقة ، وبذلك لا نجد استخدامات كثيرة لليزر المثبت النمط في المجالات التي تحتاج طاقة عالية. ومن جانب اخر تستخدم الليزرات المثبتة النمط حيث الحاجة الى نبضات قصيرة جداً. واحد هذه التطبيقات هو المواصلات ، ونقل المعلومات الرقمية ، اذ يمكن ارسال المعلومات الرقمية بسرع عالية جدا باستخدام الليزرات المثبتة النمط وتتم العملية ببساطة بوضع منظومة التحميل السريعة في مرنان الليزر . وعلى الرغم من عدم استخدام الليزر المثبت النمط في الاتصالات عبر الالياف البصرية ، فانه يستخدم في الاتصالات العسكرية بين الطائرات والغواصات عبر الفضاء المفتوح.

أحد الاستخدامات الاخرى المهمة لليزرات المثبتة النمط هو استخدامها في عملية قياس المسافات ، اذ تعكس النبضة المثبتة النمط من الجسم المراد قياس بعده ويقاس الزمن المقطوع في الذهاب والاياب بدقة ، ولانتقال هذه النبضة بسرعة ثابتة في الفضاء وهي سرعة الضوء يمكن حساب بعد الجسم . تستخدم الليزرات ذات معامل الكفاءة المنظم في قياس المسافات ايضاً ، ونظراً لطول نبضات هذا النوع من الليزرات فان دقة القياس بها تكون قليلة (عدة امتار) اما في الليزرات المثبتة النمط فتصل

الدقة الى حد بضعة سنتمترات. وتستخدم الليزرات المثبتة النمط ايضاً في الدراسات الطيفية وتعد الدراسات الطيفية علماً بحد ذاته وسنأتي عليه بشئ من التفصيل في الفصل السادس عشر.

انواع الليزرات المثبتة النمط
Types of Mode Locked Lases

يمكن استخدام عملية تثبيت النمط مع العمليات الاخرى التي تطرقنا اليها في هذا الفصل معاً للحصول على نبضات قصيرة ، ويمكن كذلك استخدامها منفردة للحصول على نبضات قصيرة ، ويمكن كذلك استخدامها منفردة للحصول على سلسلة من النبضات المثبتة النمط فنلاحظ مثلاً في الجزء الاعلى من الشكل (12-11) ليزر منظم معامل الكفاءة باستخدام صبغة وفي الجزء الاسفل من الشكل نلاحظ ان الصبغة قد غيرت بشكل اصبحت النبضة الخارجة مثبتة النمط ايضاً.



شكل 12-11 : يمكن لخلية الصبغة ان تنظم معامل كفاءة الليزر (أ) ويمكنها ايضاً تنظيم معامل الكفاءة وتحديد النمط بالوقت نفسه في الليزر(ب).

الاسئلة

1- ماهي ميزة الليزر الذي تنظم كفاءته وتفرغ حجرته في الوقت نفسه على الليزر الذي تنظم كفاءته او تفرغ حجرته؟ كيف يمكنك تصميم منظومة كهذه وباستخدام بلورة كهرو- بصرية واحدة؟. ارسم المرنان ، مبيناً موضع المنظومة ونفاذية المرايا. وارسم مخططاً بيانياً للجهد المسلط على البلورة مع الزمن.

2- ماذا يشبه شكل الشعاع الخارج من ليزر مفرغ الحجرة ومحدد النمط ؟ ارسم مخططاً لمرنان مبينا الاجزاء التي يجب ان توضع في داخله.

3- ليزر النديميوم / ياك ذو شعاع مستمر وقدرة مقدارها 500 ملي واط. المسافة بين مرآتيه هي 40 سم . احسب تردد نبضاته والقدرة القصوى للنبضة المحددة النمط والتي طولها 50 بيكو ثانية.

4- يمكن لخلية الصبغة ان تنظم الكفاءة وتحدد نمط الليزر كما في الشكل (12-11) فاذا كانت المسافة بين المرآتين هي 30 سم. وزمن النبضة المنظمة الكفاءة هي 30 سم . وزمن النبضة المنظمة الكفاءة هي 30 نانو ثانية. كم هو عدد النبضات المحددة النمط في النبضات المنظمة الكفاءة؟

الفصل الثالث عشر

البصريات اللاخطية Non liner optics

ناقشنا في الفصول الثلاثة السابقة ، كيفية تسخير خصائص شعاع الليزر ليلائم متطلباتنا ، فتعلمنا كيفية الاقلال من عرض النطاق وتحويل الاشعة المستمرة الخارجة من الليزر الى سلسلة من النبضات. وفي ذلك كله استخدمنا الخواص البصرية الخطية للمنظومات المستخدمة وسنتطرق في هذا الفصل الى الخواص اللاخطية للمنظومات البصرية ، وكذلك الى كيفية تغيير الطول الموجي لأشعة الليزر باستخدام هذه المنظومات .نحن لا نحتاج في الواقع الى اشعة الليزر للحصول على الظاهرة اللاخطية في المواد ، بل ان كل ما نحتاجه هو مصدر ضوئي عالي الشدة ، وهذا ما يوفره لنا الليزر .

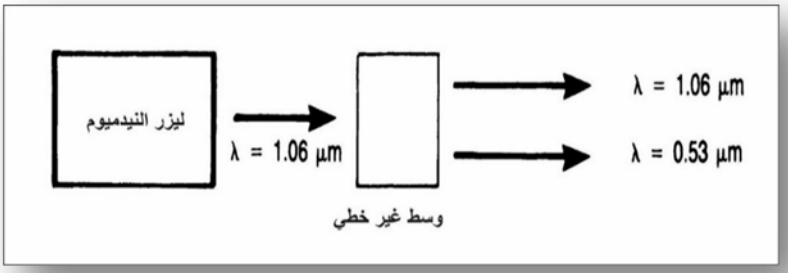
تعتبر البصريات اللاخطية مفيدة جداً اذ بواسطتها يمكننا تغيير الطول الموجي لأشعة الليزر ، وبذلك نزيد من مزايا هذه الاشعة ،فيمكن بواسطة هذه التكنلوجيا الحصول على اطوال موجية اطول او اقصر من جهاز الليزر الذي لدينا .

نبدأ في هذا الفصل بمناقشة عملية توليد التوافقيات الثانوية Second Harmonics ، والتي تعتبر الجزء الاهم في البصريات اللاخطية ، وكذلك سنناقش عملية مطابقة الطور Phase Matching واخيراً سنلقي نظرة على التأثيرات اللاخطية الاخرى ، كالحصول على

التوافقيات الاعلى وعمليات مزج هذه التوافقيات والتذبذبات المحددة Parametric Oscillations .

ماهي البصريات اللاخطية ؟ What is nonlinear optics

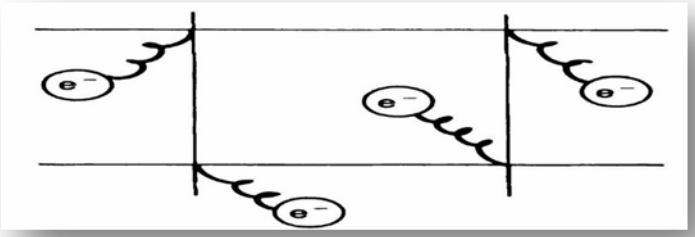
تعتبر البصريات اللاخطية ظاهرة جديدة تماماً لا تشبه اياً من الظواهر التي ناقشناها سابقاً في هذا الكتاب ، اذ تتم بواسطتها عملية تغيير الطول الموجي للضوء من طول موجي الى اخر ، وعملية تغيير الطول الموجي هذه تختلف تماماً عما يحدث عندما نستخدم زجاجة حمراء لتغيير لون الضوء الابيض المار من خلالها الى الاحمر ، اذ ان الضوء الاحمر الناتج موجود اساساً ضمن الضوء الابيض الساقط على الزجاجة الحمراء، اذ لم تقم الزجاجة الا بعملية ترشيح للألوان الاخرى التي يحتويها اللون الابيض ، والابقاء على اللون الاحمر فقط ، اي ان الزجاجة الحمراء هذه لا تولد لوناً جديداً ، كما يحدث في البصريات اللاخطية ، حيث يتولد لون جديد مختلف عن اللون الساقط . ونشاهد في الشكل (13-1) مثالاً تقليدياً يوضح ذلك ، حيث نحصل على شعاع اخضر اللون ذي طول موجي قدره 0.532 مايكرومتر من شعاع غير مرئي ذي طول موجي قدره 1.06 مايكرومتر من شعاع غير مرئي ذي طول موجي قدره 1.06 مايكرومتر صادر من ليزر النيوديميوم/ ياك.



شكل 13-1 : في عملية توليد التوافقيات الثانوية ، يتغير الطول الموجي لقسم من الضوء المار عبر الوسط ليصبح مساوياً لنصف الطول الموجي للضوء الساقط.

ويمكن ملاحظة ان جزءاً فقط من الاشعة ذات الطول الموجي 1.06 مايكرومتر قد تحول الى اللون الاخضر (0.53 مايكرومتر) ، وخرج الجزء الاخر من المنظومة كما كان. في كثير من الاحيان يتطلب الامر زيادة كفاءة التحويل هذه لزيادة نسبة الاشعة التي تم تحويلها هذه لزيادة نسبة الاشعة التي تم تحويلها ،وهذا ما سنتابعه في الفقرات القادمة. كيف يتصرف الطول الموجي للضوء الجديد ؟ لتفسير ذلك يجب ان ننظر الى الالكترونات في البلورة المكونة للوسط غي الخطي (ويمكن ان نحصل على الظاهرة غير الخطية في الغازات ، والسوائل ، لكن الحصول عليها من البلورات اكثر شيوعاً ، والتفسيرات التي سنتطرق اليها الان تنطبق على الغازات والسوائل مع بعض التغيير البسيط) ، فالإلكترونات في البلورات مرتبطة ضمن ما يسمى " جدار الجهد Potential Well " والذي يعمل عمل النوابض التي تربط الالكترونات بزوايا البلورة ، كما يوضح ذلك الشكل (13-2) فإذا ما سحب الالكترون

نحو الخارج بعيدا 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 اتزانه.



شكل13 - 2: ترتبط الالكترونات في البلورات غير الخطية بجدار الجهد ،الذي يعمل عمل النوابض ويربط الالكترونات مع النظام البلوري.

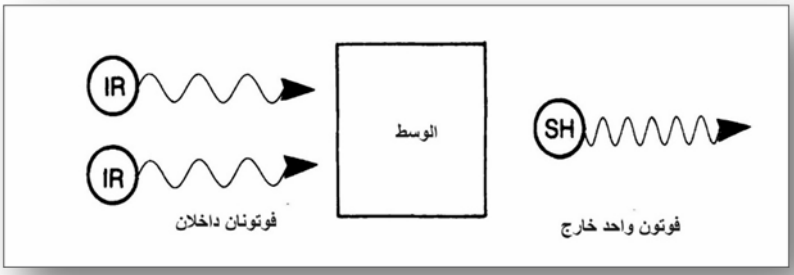
يوثر المجال الكهربائي للموجة الضوئية المارة خلال بلورة على الالكترونات فيها حيث يسحبها بعيداً عن مواقع اتزانها ، ففي المواد البصرية الخطية (الاعتيادية) تتذبذب هذه الالكترونات حول مواقع اتزانها بتردد المجال الكهربائي، وحسب قوانين الفيزياء تطلق هذه الالكترونات المتذبذبة اشعة بتردد مساوٍ للتردد الذي تتذبذب فيه ، وبذلك تطلق (تولد) هذه الالكترونات ضوءً بالتردد نفسه للضوء الساقط عليه.

ولو فكرنا بهذا جيداً لعرفنا لماذا يسير الضوء بسرعة ابطأ في البلورات، والمواد الاخرى من سرعته في الفراغ ،اذ قسم من طاقة الموجات الضوئية هذا يتحول الى طاقة حركية للإلكترونات وهذه الطاقة

تعود وتتحول الى ضوء مرة اخرى ، ولكن هذا يؤثر في مسيرة الموجات الضوئية داخل البلورة.

كيف تختلف المواد غير الخطية عن المواد الخطية؟ يمكن تصور المواد غير الخطية بتلك المواد التي تكون الكتروناتها مرتبطة بنوابض قصيرة فاذا ما مر ضوء من خلالها وكان ذا شدة كافية بحيث يمكن لمجاله الكهربائي سحب الالكترونات بعيداً بحيث تصل الى نهاية النابض، وبذلك تكون علاقة الطاقة المخزونة غير الخطية مع المسافة التي سحب النابض اليها ، وبذلك تسحب الالكترونات الى الخلف قليلا وبسرعة ، وليس الى امكنتها الطبيعية وببطىء، وبذلك تتذبذب بترددات غير تردد الضوء الساقط عليها ، وعندها تشع هذه الالكترونات الضوء بهذا التردد المختلف عن تردد الضوء الساقط عليها .

ويتم حساب الطول الموجي للضوء الجديد بدقة باستخدام مبدأ حفظ الطاقة ، اذ يجب ان تكون طاقة الفوتونات الخارجة مساوية لطاقة الفوتونات الداخلة. نلاحظ في الشكل (13-3) الفوتونات المسببة للانبعاث التوافقي الثانوي ، ومن الشكل (13-1) يمكن ان نتصور العملية غير الخطية لعملية ربط (لحام) فوتونين ذي طول موجي يقع في مدى الاشعة تحت الحمراء ، لتوليد فوتون ذا لون اخضر ، ومجموع الطاقة للفوتونين ذي الطول الموجي الطويل يساوي الطاقة للفوتون ذي الطول الموجي القصير.



شكل 13-3 : يمكن اعتبار توليد التوافقيات الثانوية عملية لحام لفوتونين سوية لإنتاج فوتون واحد ذا طاقة مساوية لطاقة الفوتونين سوية.

يوضح الشكل (13-4) احدى العمليات غير الخطية الاخرى ، اذ تتم فيها عملية مزج فوتونين ضوئيين مختلفي الطول الموجي للحصول على فوتون ثالث ذي طول موجي اقصر . فما مقدار الطول الموجي الجديد الذي يتولد ؟ اذا ما تذكرنا ان طاقة الفوتون E تساوي hc/λ واستناداً الى مبدا حفظ الطاقة فسنحصل على :

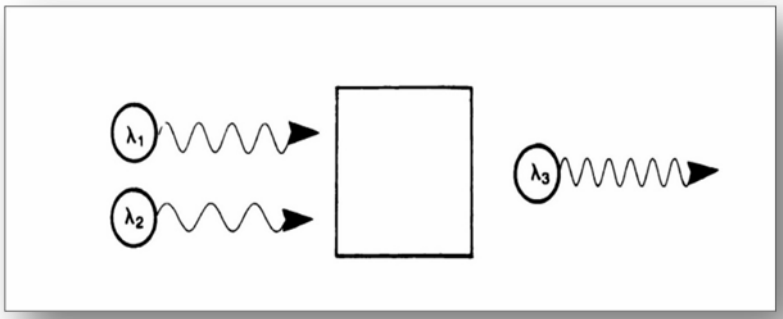
$$\frac{hc}{\lambda_1}+\frac{hc}{\lambda_2}=\frac{hc}{\lambda_3}$$

وبذلك :

$$\lambda_3=\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}$$

وبذلك نكون قد تطرقنا الى مطلبين من ثلاثة مطالب اساسية لحصول العملية غير الخطية ، وهما وجود المصدر الضوئي ذي الشدة العالية ، ومبدأ حفظ الطاقة ، واما المطلب الثالث فهو مبدأ حفظ الزخم ، وهذا

يعتمد على عملية مطابقة الطور Phase Matching والتي ستتم مناقشتها لاحقاً في هذا الفصل.



شكل 13-4 :عملية الجمع الضوئي تشابه عملية توليد التوافقيات الثانوية فيما عدا ان للفوتونين الداخلين طولين موجيين (طاقة) مختلفين.

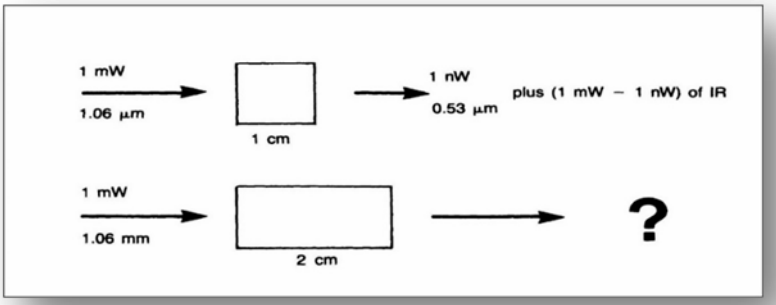
توليد التوافقية الثانية Second-Harmonic Generation

تعد عملية توليد التوافقية الثانية (SHG) او ما تسمى بعملية مضاعفة التردد Frequency Doubling من اكثر الامثلة شيوعاً، واهمية في البصريات اللاخطية ، وتعد هذه مثالاً مباشراً وذات كفاءة عالية للبصريات اللاخطية (وتقاس الكفاءة من الشكل (13-19اذ انها تساوي النسبة بين القدرة الخارجة الى القدرة الداخلة)، وتعتمد هذه على عدة عوامل يمكن تلخيصها بالتناسب ادناه:

$$P_{sH} \alpha l^2 \frac{P_f}{A} \left[\frac{sin^2 \Delta\Phi}{(\Delta\Phi)^2}\right]$$

حيث تمثل P_{Sh} قدرة التوافقية الثانية ، و l طول البلورة ، و P هي القدرة الاولية الداخلة ، و A هي مقطع الشعاع المؤثر ، ويمثل المقدار المحصور بين القوسين معامل تطابقية الطور ، والذي يكون مقداره بين الصفر والواحد ، وغالباً ما يقرب الى الواحد، وهذا ما سنوضحه في الفقرة اللاحقة.

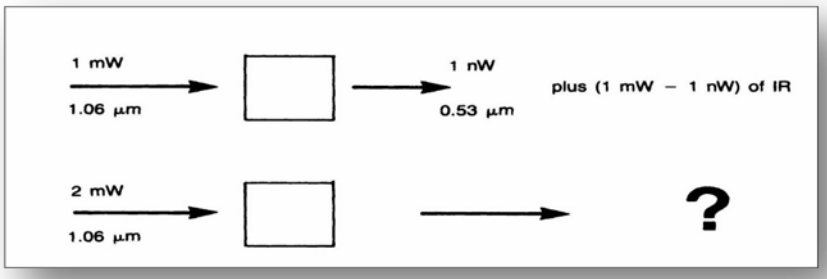
لننظر الان الى تأثير العوامل اعلاه في المتناسبة على كفاءة التحويل ولنلق نظرة على المثال الموضح في الشكل (13-5) اذ نلاحظ انه في تجربتين متشابهتين، استخدمت في الثانية بلورة بطول مساو لضعف طول البلورة المستخدمة في الاولى فاذا كانت كفاءة التحويل في الاولى التي استخدمت فيها بلورة ذات طول مقداره سنتمتر واحد ، هي: $10^{-6} = \frac{10^{-9}}{10^{-3}}$ فما هي الكفاءة لبلورة ذات طول مقداره 2



شكل 13- 5 :اذا ما ضوعف طول البلورة في الجزء العلوي من التجربة ، فكم سيكون مقدار الضوء الخارج؟

سنتمتر ؟ بطبيعة الحال لا نتوقع الحصول على قدرة مضاعفة من البلورة الثانية ، بل تكون القدرة مساوية اربعة امثال القدرة الخارجة من الاولى ، لتناسب القدرة مع مربع طول البلورة ، وبذلك نحصل على 4 نانو واط. من ضوء اخضر طوله الموجي هو0.532 نانومتراً، اما القسم الاخر من الضوء فلا يحصل فيه اي تغيير، وانما يمتص قسم منه ويتحول الى حرارة فقط . وبذلك نلاحظ اننا حصلنا على اربعة اضعاف القدرة من بلورة ذات طول مساو لضعف طول الاولى . ولكن يجب ان نعلم ان ثمن هذه البلورة يزيد كثيراً عن اربعة امثال ثمن الاولى.

اما في التجربة المبينة في الشكل (13-6) فقد استخدمنا بلورتين متساويتين في الطول (1سم) ولكننا استخدمنا قدرة مضاعفة في الجزء الثاني من التجربة ، فكم ستكون القدرة الخارجة من هذا الجزء من التجربة؟



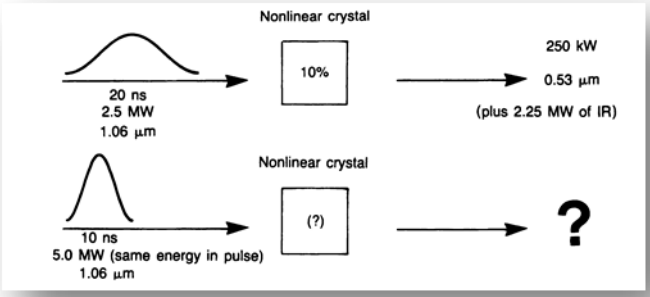
شكل 13-6: اذا ما ضوعفت القدرة الداخلة للجزء العلوي من التجربة ، فكم سيكون مقدار الضوء الخارج؟

كما في التجربة السابقة سنحصل على 4 نانو واط ، وذلك لتناسب القدرة الخارجة مع مربع القدرة الداخلة. استغلت الظاهرة السابقة مع الليزرات النبضية ، ففي التجربة الاولى المبينة في الشكل (13-7) استخدمت نبضة بقدرة مقدارها 2.5 ميكا واط (قدرة عظمى) ولمدة 20 نانو ثانية وبطول موجي مقداراه 1.06 مايكروميتر مع بلورة ذات كفاءة مقدارها 10%، وفي التجربة الثانية استخدمت الطاقة الداخلة ذاتها (2.5 ميكا واط) ولمدة 10 نانوثانية ، وبذلك حصلنا على زيادة في القدرة الى الضعف (2.5 ميكا واط *10 نانوثانية = 50 ملي جول). كم ستكون القدرة الخارجة للتوافقية الثانية ؟ كما لاحظنا سابقاً فعندما ضاعفنا القدرة الداخلة حصلنا على اربعة امثال القدرة الخارجة ، اي حصلنا على واحد ميكا واط. ويمكن النظر الى ذلك بطريقة اخرى فاذا ما لاحظنا المتناسبة التالية.

$$\frac{P_{sH}}{P_f} \alpha l^2 \frac{P_f}{A}\left[\frac{sin^2\Delta\Phi}{(\Delta\Phi)^2}\right]$$

يمكننا الان ملاحظة ان نسبة التحويل تتناسب مع الطاقة الداخلة ، وبمضاعفة القدرة الداخلة في التجربة فان كفاءة التحويل ستزداد الى الضعف ، اي تصبح 20% ، وال20% من ال5 ميكا واط هي واحد ميكا واط. اذا ما نظرنا الى الشكل (13-8) وافترضنا ان الشعاع المستخدم في التجربة الاولى ذا قطر واحد ملي متر ، وفي التجربة الثانية تم اقلال قطر الشعاع الى 0.5 ملي متر باستخدام عدسة ، فما هي

القدرة الخارجة ؟ مرة اخرى تكون القدرة 4 نانو واط . لماذا؟ لان القدرة الخارجة تتناسب عكسياً مع مساحة قطر الشعاع ، والمساحة A تتناسب مع مربع نصف القطر . هذه هي الامـور التـــي يجـــب ان تـؤخذ بنظر

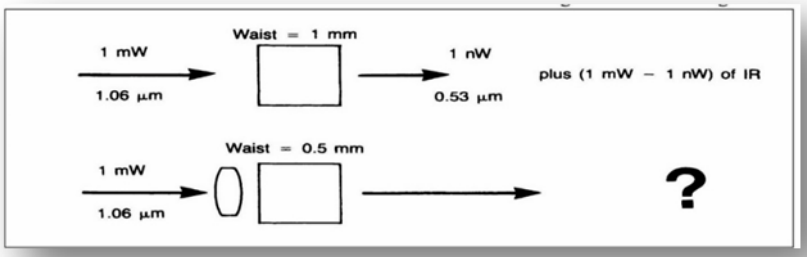


شكل 13-7 : اذا ما ضغطت طاقة النبضة في الجزء العلوي من التجربة ، فكم سيكون مقدار الضوء الخارج؟

الاعتبار عندما يتطلب الامر زيادة كفاءة التحويل، اذ يجب ان تستخدم بلورة اطول وان تزداد القدرة الداخلية وان تركز الاشعة على البلورة ، ولكن للأسف لهذه العوامل السابقة حدود فاذا ما زدنا القدرة او ركزنا الشعاع الى حد معين فان ذلك يؤدي الى تلف البلورة والتي تكون غالباً باهظة الثمن ، واذا ما ركنا الشعاع الكاوسي فانه سيعاني انفراجاً اكبر (راجع الفصل التاسع) وتأثير الشعاع المنفرج يقل كثيراً عن تأثير الشعاع المتوازي وبذلك حتى لو كانت الطاقة المركزة غير مؤثرة في البلورة فإنها تعاني من انفراجيه عالية نتيجة تركيزها هذا.

تطابقية الطور Phase Matching

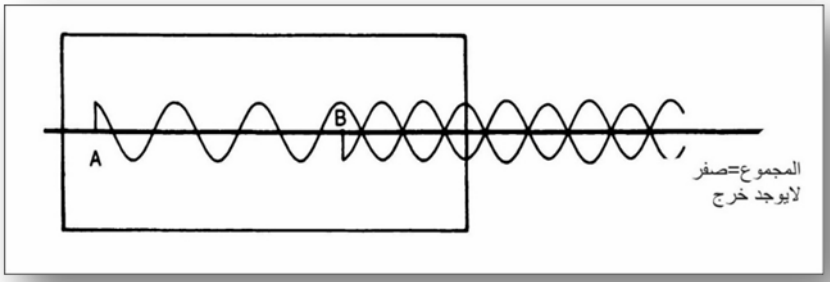
لا يمكن للمعاملات التي سبق ذكرها في الفقرة السابقة ان تحدث اي تغيير اذا ما كان الحد الخاص بتطابقية الطور مساوياً للصفر ، وتطابقية الطور هذه مرادفة لكل عملية غير خطية ، وما ستتم مناقشته هنا من منظور توليد التوافقية الثانية فقط وينطبق ذلك على العمليات غير الخطية الاخرى.



شكل 13-8 :اذا ما تم تركيز الشعاع في الجزء العلوي من التجربة بحيث اصبح قطره نصف ما كان عليه ،كم سيكون مقدار الضوء الخارج؟

لننظر اولاً الى المشكلة لنحاول ان نجد الحل لها بعد ذلك ، فاذا ما كانت موجة التوافقية الثانية المتولدة في الشكل (13-9) في النقطة B مختلفة في الطور عن الموجة المتولدة في النقطة A تماماً ، فأننا لا نحصل على اي ضوء للتوافقية الثانية، فإذا لم تكن البلورة ذات تطابق طوري ، فكل موجة متولدة فيها ستلاقي موجة اخرى مختلفة عنها في الطور بمقدار نصف طولها الموجي ، وبذلك لا نحصل على اي ضوء

خارج من الجهة الثانية للبلورة مهما ركنا الاشعة او زدنا من طول البؤرة. كيف تكون موجات التوافقية الثانية مختلفة في الطور عن بعضها ؟ اي كيف تكون الموجة في النقطة B مختلفة عن الموجة في النقطة A رغم انهما متولدتين من موجة واحدة محافظة على طورها خلال انتشارها (مرورها) في البلورة؟. الجواب عن ذلك هو " التشتت Dispersion ".فاذا ما تذكرنا ان معامـل انكسـار في البلـورة غيـر الخطيـة مختلف



شكل 13 – 9 : اذ لم تكن البلورة غير الخطية متوافقة بالطور ، فأن الضوء المتولد في نقطة يتداخل اتلافياً مع الضوء المتولد في نقطة اخرى.

للطولين الموجيين للموجتين ، على الرغم من ان الطول الموجي للموجة الناتجة هو نصف الطول الموجي للموجة الداخلة في الفراغ، ليس كذلك داخل البلورة ، على الرغم من ان التردد للموجة الناتجة مساوٍ الى ضعف التردد للموجة الداخلة ، وذلك كله بسبب التشتت (بمراجعتنا الى الاشكال 3-3 و3-4 سنتذكر مبادئ الطور) . وبذلك يعتبر التشتت المشكلة الاساسية المسببة للاختلاف بين الموجتين الابتدائية والثانوية في

داخل البلورة وفرق الطور هذا يزداد بحيث يصل الاختلاف بين الموجتين الى 180 درجة ، وعندها تكون الموجتان مختلفتين تماماً بالطور.

وفي حالات كثيرة تكون الموجة الثانوية مستقطبة بشكل عمودي على الاولى وبذلك يمكن استخدام البلورات الثنائية الانكسار كوسط بصري غير خطي اذ نعلم ان معامل الانكسار يعتمد فيها على الاستقطاب فباختيار مادة يكون معامل انكسارها الاعتيادي للموجة الاساسية مساوياً لمعامل انكسارها غير الاعتيادي للموجة الثانوية، يمكن الحيلولة دن حدوث مشكلة تطابق الطور الناتجة من التشتت وذلك حيث يكون معامل الانكسار مساوياً للحالتين ، وبذلك لا تحصل عملية التشتت .

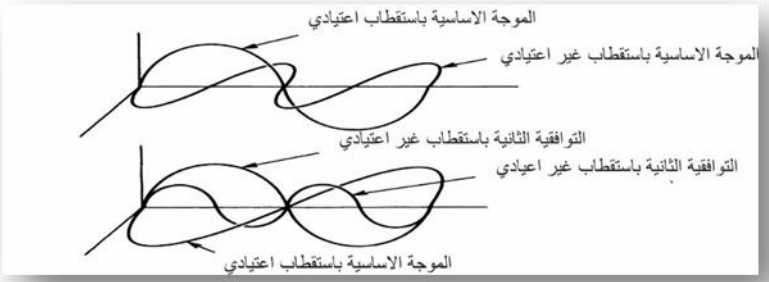
بطبيعة الحال لن تجد بلورة غير خطية تحقق معاملات انكسارها هذه المتطلبات وفي الحقيقة يجب ان نجد لكل حالة وسيلة تؤدي الى تطابقية الطور في البلورة غير الخطية. ولذلك تستخدم وسيلتان عادة، وهما: التنظيم الحراري والتنظيم الزاوي. ولنبدأ ببلورة معاملاتها تلائم متطلباتنا ونبدأ بتسخينها او تبريدها لحين الحصول على المعاملات التي تلائمنا تماماً، وفي التنظيم الزاوي نغير وضعية البلورة نسبة الى شعاع الليزر الساقط عليها ، حيث يعتمد معامل الانكسار غير الخطي على زاوية انتشار الشعاع ويمكن تنظيمه الى ان تساوي للتوافقية معامل الانكسار الاعتيادي للموجة الابتدائية.

تنطبق المناقشات السابقة لعملية ملاءمة الطور على نوع واحد من انواع مطابقات الطور . وهناك نوع اخر من الصعب شرحه الان ، اذ ان تمت مناقشته هنا هو تطابقية الطور النوع الاول حيث يكون الشعاع الابتدائي في الاستقطاب الاعتيادي للبلورة غير الخطية وتولد التوافقية الثانية في الاستقطاب غير الاعتيادي. اما في النوع الثاني فان الشعاع الابتدائي قد انقسم اساساً الى شعاع مستقطب اعتيادي وشعاع مستقطب غير اعتيادي ، ولتفسير هذا الامر يتطلب اللجوء الى الرياضيات العالية حيث لا يمكن تفسيره بالصورة التي فسرنا بها النوع الاول ، وفي بعض الحالات ، كما في SHG مع ليزرات الحالة الصلبة العالية القدرة ، تكون للنوع الثاني كفاءة اكبر بكثير من النوع الاول، ويوضح الشكل (13-10) وضعية المجال الكهربائي للنوعين.

ونلاحظ في الجدول ادناه بعض انواع المواد المستخدمة للحصول على تطابقية الطور لل SHG لشعاع الليزر ذي الطول الموجي الذي مقداره واحد مايكرون (وانواع اخرى من المواد غير الخطية).

وهناك عدة اشياء ينبغي ملاحظتها في هذا الجدول ، اولاً المواد التي لها خاصية غير خطية تكون غالية الثمن وتتلف بسهولة، وبذلك تستخدم فقط مع الليزرات الواطئة القدرة ، ويمكن الحصول على اغلب هذه البلورات بشكل بلورات هيدروجينية او بشكل بلورات استبدلت بها ذرة الهدروجين بذرة ديتيريوم ، وعملية التبديل هذه تزيد من خصائص البلورة غير الخطية ، وتقلل من امتصاصها للأشعة تحت الحمراء

ولكنها تقلل من خصائصها البصرية . ويقاس الحد الاصغر للقدرة المدمرة للبلورة للنبضات التي نحصل عليها من الليزرات المنظمة الكفاءة بطول لا يتجاوز عدة نانو ثانية، وللنبضات التي نحصل عليها من الليزرات المحددة النمط



شكل 13-10 : للنوع المتوافق الاول (الاعلى) ، الضوء الابتدائي مستقطب اعتيادياً ، بينما الضوء الثانوي مستقطب بصورة غير اعتيادية اما المتوافق الطور الثاني ، (الاسفل) فالضوء الابتدائي مستطب وسطياً بين الاتجاه الاعتيادي والاتجاه غير الاعتيادي ، بينما الضوء الثانوي فمستقطب بصورة غير اعتيادية.

بطول لا يتجاوز عدة بيكو ثانية ، وهذا يتغير من بلورة الى اخرى وبذلك تعد الارقام المبينة في الجدول التالي ارقاماً تقريبية.

التوافقيات الاعلى Higher Harmonics

يمكن الحصول على الضوء ذي التوافقية الثالثة ، بالطريقة السابقة نفسها التي حصلنا منها على الضوء ذي التوافقية الثانية ، كما في الشكل (13-11 أ).

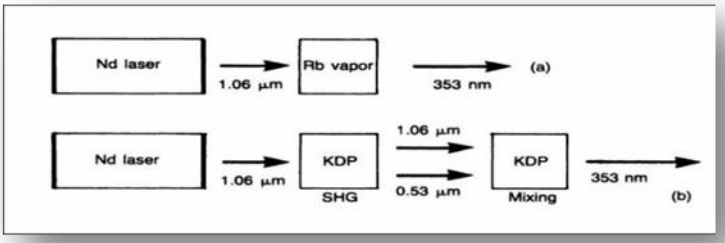
ولكن تطابقية الطور تجعل عملية الحصول على الضوء ذي التوافقية الثالثة . من بلورة واحدة وبمرحلة واحدة صعبة جداً ، وبذلك تستخدم

نوع البلورة	غير خطيتها النسبية	اقل قدرة مدمرة MW/cm
KDP (بوتاسيوم داي هايدروجين فوسفيت). فوسفات البوتاسيوم ثنائي الهدروجية	1	400
KDP*P (بوتاسيوم داي ديتيريوم فوسفيت). فوسفات البوتاسيوم ثنائي الديتيريوم	1.06	400
CDA(سيزيو داي هايدروجين ارسنايت) .زرنيخات السيزيوم ثنائية الهدروجين	0.92	300
CD*A (سيزيوم داي ديتيريوم ارسنايت) زرنيخات السيزيوم ثنائية الديتيريوم	0.92	300
ADP (امونيوم داي هايدروجين فوسفيت)	1.2	
LiNbO3 (ليثيومنيوبايت)	13.4	400
BSN (باريوم صوديوم نيوبايت)	38	

مرحلتان لذلك ،اذ يتم الحصول على التوافقية الثانية من البلورة الاولى

(شكل 13-11 ب) ومن ثم يتم دمجها مع التوافقية الثانية للبلورة للحصول على التوافقية الثالثة. ويمكن باستخدام الاسلوب السابق

الحصول على التوافقيات الرابعة ، والخامسة والسادسة ، وهكذا ، ولكن كفاءة هذه العمليات قليلة جداً ، وتم عملياً الحصول على التوافقيات ولغرض البرهنة على خصائص الاوساط غير الخطية فقط ، وليس لأجل الحصول على ضوء بهذه الصفات ، حيث تكون القدرة الخارجة ضعيفة جداً ولا يمكن الاستفادة منها.

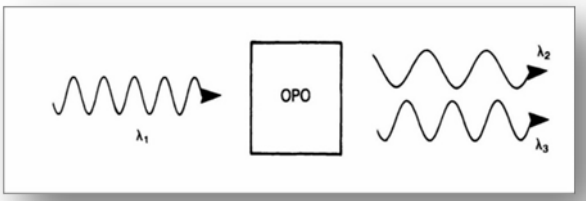


شكل 13-11: (ا) توليد التوافقية الثالثة بمرحلة واحدة

(ب) توليد التوافقية الثالثة بمزج التوافقية الثانية مع الاشارة الداخلة

تذبذب المعاملات البصرية
Optical Parametric Oscillation

في العمليات غير الخطية ، وكما ناقشنا ذلك سابقاً تتم عملية دمج الطاقة لفوتونين في فوتون واحد اكبر طاقة (اقصر طولاً موجياً) . ويمكن ان تكون هذه العملية بصورة معكوسة ايضاً ، فيمكن ان تقسم طاقة فوتون بين فوتونين جديدين ، وهذه تسمى ب " تذبذب المعاملات البصرية OPO " كما موضح ذلك في الشكل 13-12 .



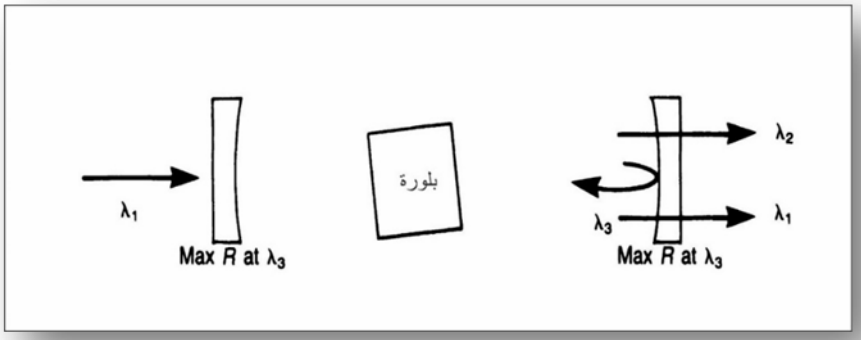
شكل 13-12 : يتم توليد طولين موجيين من موجة واحدة باستخدام عملية تذبذب المعاملات البصرية.

ومن قانون حفظ الطاقة ، نحصل على:

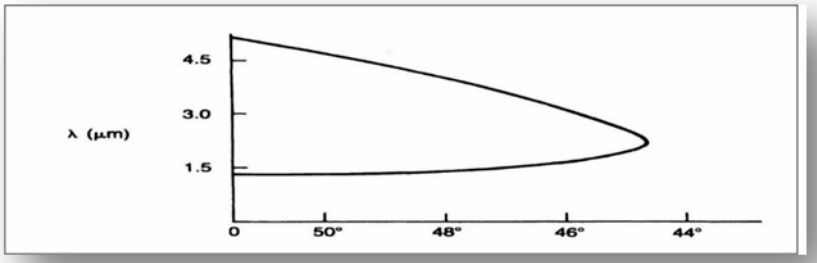
$$\frac{hc}{\lambda_1} = \frac{hc}{\lambda_2} + \frac{hc}{\lambda_3}$$

يمثل تذبذب المعاملات البصرية (OPO) مذبذب (مرنان) لكنه ليس كأي مثال من الامثلة التي ذكرناها والتي استخدمنا فيها الخاصية غير الخطية ، اذ يجب ان يحتوي ال OPO على مرآة كما في الليزر للحصول على مرنان ضوئي (ولكن ما يحدث في ال OPO هو الظاهرة غير الخطية فقط وليس حصول عملية انبعاث محفز)، ونلاحظ في الشكل (13-13) ال OPO الاحادي حيث نحصل على طول موجي واحد منه فقط ، ويسمى الوسيط idler وينعكس من المرآة، وفي المرنان الثنائي تنعكس كلتا الموجتين المضخمة والوسيط idler ، وتمر الاشارة فقط . ما الذي يتحكم بالطول الموجي الخارج (λ_2 لل OPO في الشكل (13-14)؟. من المعادلة السابقة يمكن الحصول على :

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1}$$



شكل13-13 : ينعكس طول موجي واحد فقط من المرآة عند وضع OPO داخل المرنان.



شكل 13-14 : منحني التنغيم لبلورة الليثيوم- نيوبايد LiNb3 المستخدمة ك OPO .

ولا يمكن الحصول على قيمة محددة ال λ_2 ،حيث يمكن ل λ_3 ان تأخذ اي قيمة . هل هذا يعني انه يمكننا ان نحصل على ضوء بعدة اطوال موجية؟ الجواب نعم ، ولكن في كل مرة نحصل على طول موجي واحد

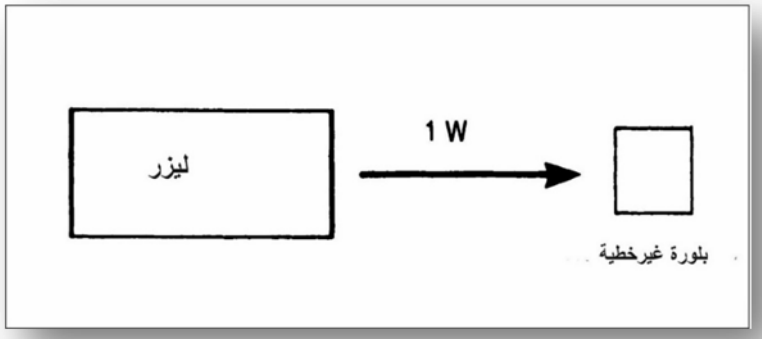
فقط ، حيث تكون عملية توافق الطور لطول موجي واحد فقط في الوقت الواحد، ويكون تنغيم ال OPO للحصول على الطول الموجي المطلوب، وهذا ما يجعل لل OPO اهمية بالغة في هذا المجال ، فاذا ما احتجنا الى ضوء ذي طول موجي مقداره 1.48 مايكرومتر مثلاً ، امكننا الحصول عليه من ليزر النديميوم /ياك باستخدام ال OPO ، ويمكن التحكم بالطول الموجي المتوافق الطور بالتحكم بدرجة حرارة البلورة غير الخطية ، او زاوية دخول الشعاع اليها ، كما نلاحظ ذلك في الشكل (13-14) حيث يوضح المنحنى البياني العلاقة بين الزاوية والطول الموجي لبلورة OPO المصنوعة من نيوبايد الليثيوم LiNbO3 والمضخة بواسطة شعاع ليزر النديميوم / ياك ، فاذا ما كانت الزاوية (نسبة الى المحور البصري للبلورة) هي 46 درجة ، فان الطول الموجي للاشارة، والطول الموجي الوسيط idler هي 1.6 و 3.1 مايكرون تباعاً. (ويمكن اعتباراي واحد منها هو الاشارة ، والاخر هو الوسيط).

الاسئلة

1- ما الطول الموجي للتوافقية الثانية لليزر الياقوت ؟ وما الطول الموجي للتوافقية الثالثة لليزر النديميوم / ياك؟

2- اذا ابدلت البلورة الثانية ذات ال3 سم المبينة في الشكل (13-5) بأخرى ذات طول مقداره سنتمترين. كم ستكون التوافقية الثانية التي ستتولد؟

3- ينتج الليزر المحدد النمط المبين في الشكل ادناه واطاً واحداً من الطول الموجي الاساسي. وتنتج 10 ملي واط من التوافقية الثانوية من البلورة غير الخطية اذا ما تمت زيادة القدرة المجهزة للبلورة نحصل على 15 ملي واط من الموجة الثانوية . احسب التغير الابتدائي في زمن النبضة الناتج من جراء زيادة القدرة؟



4- هل يمكن الحصول على اشارة ذات طول موجي قدره 750 نانومتر من ليزرالنديميوم / ياك ال OPO ؟ افترض ان

تردد الليزر قد ضوعف وتم الحصول على ضوء بطول موجي مقداره 530 نانومتر. فهل يمكن استخدام هذا الضوء للحصول على الاشارة ذات ال 750 نانومتر باستخدام ال OPO ؟ما هو الطول الموجي الوسيط بهذه الحالة؟

5- تتولد ال OPO عندما تكون اشارتها والاشارة الوسيطة بالطول الموجي نفسه. ما الطول الموجي عندما يضخ ال OPO بليزر النديميوم / ياك المضاعف للتردد.

الفصل الرابع عشر

انواع الليزرات Survey of Lasers

تطرقنا فيما سبق الى مبادئ الليزر، والانواع المختلفة منها ، وسنتطرق في هذا الفصل الى الانواع المهمة منها ببعض التفصيل ، مراعين بذلك تطبيق المبادئ التي درسناها في الفصول السابقة على الحالات المختلفة.

اكثر انواع الليزرات شيوعاً بالتأكيد هو ليزر الهليوم – نيون He-Ne* الذي وجدت لشعاعه الاحمر الساطع العديد من التطبيقات ، فنراه يستخدم الان في المخازن التجارية لقراءة الاسعار المسجلة على البضائع، وفي المنازل في اجهزة فيدو الاسطوانة، والطابعات الليزرية، وفي اجهزة الترصيف والموازنة ، وغيرها من الاجهزة الكثيرة وسنلقي نظرة على عمل هذا النوع وكذلك خواصه التي نستفيد منها في تطبيقاتنا العملية.

وندرس ايضاً الليزرات الجزيئية ، ونأخذ ليزر ثاني اوكسيد الكاربون CO_2 مثالاً لها ، ولهذا العديد من التطبيقات الصناعية ، والطبية ، وكذلك سنتطرق الى ليزرات الحالة الصلبة، والتي تشكل النوع الثالث من انواع الليزر، وثم ليزرات الصبغة والليزرات الايونية.

ليزر هليوم – نيون Helium – Neon Lasers

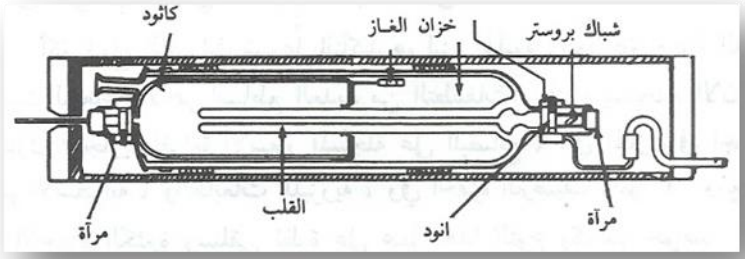
يعد ليزر الهليوم - نيون من اول الليزرات الغازية ، ويستخدم التيار

الكهربائي في عملية الضخ ، ليعطي شعاعاً احمر اللون بطول موجي قدره 632,8 مايكرومتر اعتيادياً ، وكذلك اشعة تحت الحمراء بطول موجي قدره 1,5 و 3,39 مايكرومتر ، ويصمم الجهاز بحيث لا يحصل التضخيم سوى بالطول الموجي الاول ، ويمثل لنا الشكل (14-1) مخططاً لأنبوب ليزر الهليوم – نيون . تضخ الطاقة في الغاز بواسطة التفريغ الكهربائي، حيث يستخدم جهد عال يقدر بعدة الاف من الفولتات لذلك ، وبتيار قليل (عدة ملي امبيرات) يسلط بين الكاثود الاسطواني الشكل ، والانود الابري ، ليحدث التفريغ الكهربائي في الانبوب الداخلي الصغير ، والذي يدعى القلب او المحور Core فقط ، وذلك لتركيز الطاقة في المنطقة التي يتذبذب ضمنها الشعاع ذهاباً وايابا بين المرآتين، ولا تزيد الكفاءة الكهربائية لهذا النوع من الليزرات على 0,1 % اعتيادياً.

تنتقل الطاقة من الالكترونات الناتجة عن مرور التيار في الغاز الى ذرات الغاز ، فعندما يصطدم احد الالكترونات السريعة بذرة في المستوي الارضي للطاقة فان جزءاً من طاقته الحركية ينتقل الى الذرة لتنقله الى مستوى طاقة اعلى (متهيج) ،ولكن عملية التوزيع العكسي للغاز لا تتم بهذه الطريقة بصورة مباشرة ، حيث ان لذرات النيون امكانية قليلة جداً لامتصاص الطاقة من الالكترونات فقط ، اما ذرات الهليوم ذات المقطع

---

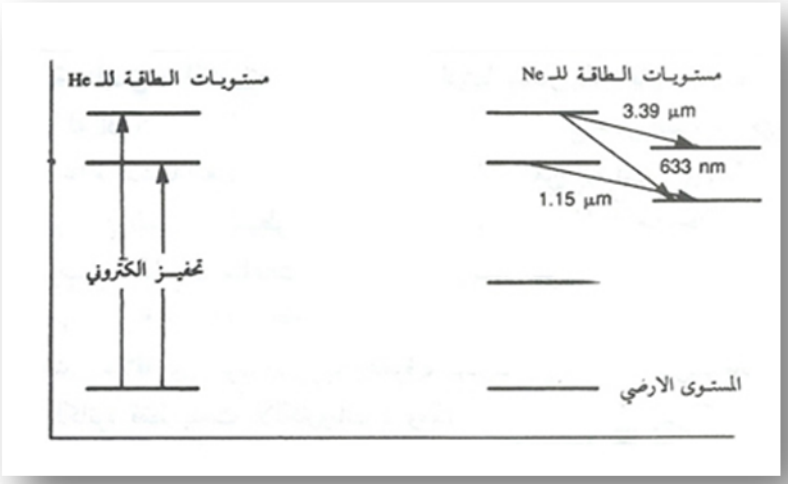
* هذا الكلام كان في بداية الثمانينات من القرن الماضي قبل انتشار ليزرات اشباه الموصلات (دايود ليزر) كما هي الان وحلت محل ليزر الهليوم نيون وغيره من الليزرات كالاركون مثلا في بعض الاستخدامات وليس جميعها طبعا.



شكل 14-1 : مخطط ليزر الهليوم نيون

التصادمي الكبير ، فلها احتمالية اكبر للتصادم مع الالكترونات ،لذلك ستنتقل طاقة التيار اليها بسهولة ،وبكمية كبيرة، ولحسن الحظ فان الطاقة العليا للهليوم تجاوز (تقارب) المستويات العليا للنيون ، وبذلك يمكن للطاقة ان تنتقل من ذرات الهليوم الى ذرات النيون نتيجة اصطدامها بها ، لتنقلها من المستوى الارضي الى مستوى اعلى. نلاحظ في الشكل (14-2) مخططاً لمستويات الطاقة لكل من الهليوم والنيون. وبعد ان تنتقل الطاقة الى ذرات النيون ، وتصبح هذه في مستويات عليا يمكن ان تسلك احدى الطرق الثلاثة المبينة في الشكل لتعود الى المستوى الاول ، وباختيار المرنان المناسب يمكن اختيار اي من الطرق السابقة ، اذ يمكن اختيار انعكاسية المرآتين بحيث تكون قليلة جداً للأشعة تحت الحمراء ليكون التضخيم مقتصراً على الاشعة المرئية، او بالعكس . ومن ثم تنتقل الذرات من المستوى الاول الى المستوى الارضي انتقالاً تلقائياً Spontaneous Transition .

تتراوح قدرة ليزر الهليوم نيون التجارية بين اجزاء الملي واط الواحد، والخمسين ملي واط ، وفي الانواع ذات الاستخدامات الخاصة والتي تزيد قدرتها على ذلك يظهر لنا شعاع في مدى الاشعة تحت الحمراء حيث



شكل 14-2 : مستويات الطاقة في ليزر الهليوم نيون

مهما قلت انعكاسية المرايا لهذه الاشعة فيمكن ان نحصل على ربح ولو بشكل ضئيل جداً، لذلك تستخدم قطع من المغانط الثابتة على طول الانبوب للإقلال من التضخيم الحاصل في الاشعة تحت الحمراء ، وذلك بالاعتماد على ظاهرة زيمان Zeeman Effect ، لنحصل على الشعاع الاحمـر (632,8 نانومتر) فقط.

وتستخدم في اغلب ليزرات الهليوم – نيون التجارية مرايا داخلية ملتصقة على الانبوب مباشرة ، وتستخدم مع بعض الانواع المرايا

الخارجية ،وفي هذه الحالة يتطلب وجود شبابيك غير عاكسة في نهاية الانبوب ، ولذلك توضع هذه بزوايا خاصة تسمى زوايا بروستر Brewster Angles (راجع الفصل الثالث) وتفضل المرايا الداخلية لكونها اكثر ثباتاً واتزاناً ، ولكن تستخدم الانواع الخارجية منها مع الليزرات ذات القدرة العالية وذات الاستخدامات الخاصة.

ليست عملية لصق المرايا بالأنبوب بالعملية السهلة ، اذ يجب ان تلصق بحيث تكون متوازية تماماً . وكانت المواد الراتنجية Epoxy تستخدم سابقاً في عملية اللصق ، لكنه اتضح اخيراً ان نفاذيتها لبخار الماء عالية جداً، حيث يمكن له ان يتسرب الى داخل الانبوب مع الزمن ويقلل عمر الليزر، حتى في حالة عدم استخدامه لذلك استعيض عنها بلحام من الصلب. والمشكلة التي لم يكن من السهولة السيطرة عليها هي تسرب ذرات الهليوم من خلال جدران الانبوب هذا وان ساعات العمل المحددة لهذ النوع من الليزرات هي بين 15,000 و20,000 ساعة واكثر الاجزاء تعرضاً للتلف هو الكاثود ، حيث ان هناك علاقة بين طول الانبوب وعمره، فاذا ما كان الانبوب طويلاً فان جزءاً من الكاثود فقط يبعث الالكترونات، وهذا ما يؤدي الى تلفه بسرعة ، اما اذا كان الانبوب قصيراً فان الكاثود بأجمعه يبعث الالكترونات مما يزيد من عمره، ولكن هذا يكون على حساب القدرة التي تقل تبعاً لذلك.

الليزرات الجزيئية Molecular Lasers

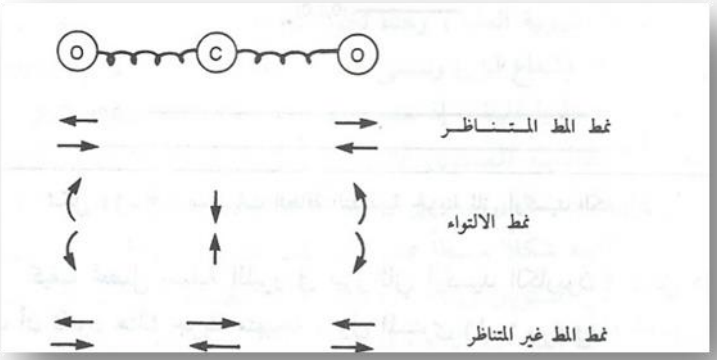
تعتمد اغلب انواع الليزرات على عملية التوزيع العكسي لمستويات

الطاقة الالكترونية للحصول على الانبعاث المحفز الذي يؤدي للحصول على شعاع الليزر، وكما بينا سابقاً في الفصل السادس فأن للجزيئات مستويات طاقة خاصة بها (غير المستويات الالكترونية) ، فهناك ليزرات تعمل على مستويات الطاقة الدورانية او التذبذبية اضافة للمستويات الالكترونية.

وتعد ليزرات ثاني اوكسيد الكاربون من اهم هذه الليزرات من الناحية الاقتصادية ، وهذه تعتمد في عملها على المستويات التذبذبية لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون، لذلك يجب علينا معرفة انماط التذبذب للجزيئة اذا ما اردنا ان نفهم عمل الليزر. الشكل (14-3) يوضح مخططاً لأنماط التذبذب لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون. تكون ذرة الكاربون في نمط المط المتناظر Symmetric Stretch مستقرة وتتحرك ذرتا الاوكسجين نحو الداخل والخارج ، وبالطور نفسه ، بذلك يبقى مركز الكتلة للجزيئة ثابتاً. اما في نمط الالتواء Bending فتتحرك ذرتا الاوكسجين نحو الاعلى في الوقت الذي تتحرك فيه ذرة الكاربون نحو الاسفل ، وتتحرك نحو الاسفل في الوقت الذي تتحرك فيه ذرة الكاربون نحو الاعلى ، وبذلك يبقى مركز الكتلة للجزيئة ثابتاً ايضاً . اما في نمط المط غير المتناظر Asymmetric Stretch فإن الذرات تتحرك بصورةغير متناظرة كما في الشكل ويبقى موقع مركز الكتلة ثابتاً ايضاً.

من الضروري ان نتذكر ان كمية الطاقة في كل من هذه الانماط تكون محددة بكميات ثابتة، وهذه تختلف من نمط الى اخر . ويمثل

الشكل (14 -4) مخططاً لهذه المستويات، وللأنماط الثلاثة ، والارقام المبينة مع كل مستوى تبين موقع ذلك المستوى ، فالنمط (1,0,0) مثلاً يمثل المستوى

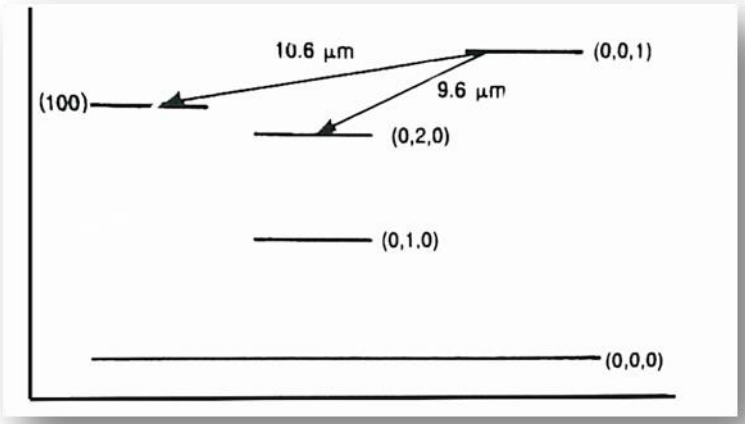


شكل 14-3 :جزيئة ثاني اوكسيد الكاربون ، وانماط التذبذب

المحفز الثاني لنمط المط غير المتناظر، وبطبيعة الحال يكون المستوى (0,0,0) هو المستوى الارضي للأنماط الثلاثة.

نلاحظ في الشكل (14-4) المستويات المحفزة الاربعة الدنيا فقط ، والتي تحصل فيها عملية الليزر ، اما المستويات المحفزة العليا فان الجزيئة تتذبذب بها بأكثر من نمط واحد في الوقت الواحد. فتتلوى الجزيئة في المستوى (1,5,0) بصورة سريعة، وكذلك تنمط بصورة متناظرة ، ولكن ببطء .

كيف تحصل عملية الليزر في ليزر ثاني اوكسيد الكاربون؟ لأجل ذلك يجب ان تكون هناك جزيئة متهيجة ، وفي المستوي (0,0,1) وهذه تحصل على طاقتها نتيجة اصطدامها بجزيئة للنيتروجين حاصلة على طاقتها من جراء اصطدام الكترون سريع بها ناتج من عملية التفريغ



شكل14-4 : مستويات الطاقة التذبذبية لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون

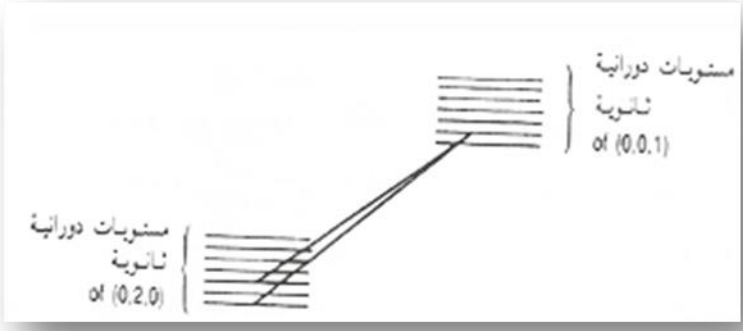
الكهربائي في الغاز ، اذ تعمل جزيئات النتروجين عمل ذرات الهليوم – نيون . في المستوى المتهيج هذا فقط يمكن لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون ان تحفز على اطلاق فوتون، ويكون الفوتون بطول موجي قدره 10,6 مايكرومتر، لتنتقل الى المستوي الأوطأ (1,0,0)، وكذلك يمكن لها ان تحفز لأطلاق فوتون بطول موجي قدره 9,6 مايكرومتر، لتنتقل الى المستوى (0,2,0) .

ومن ثم تنتقل الجزيئة الى المستوى الارضي (0,0,0) من كلا المستويين تلقائياً . ويمكن ان يتم اختيار احد الطوليين الموجيين السابقين باختيار المرنان المناسب.

يستخدم في ليزر ثاني اوكسيد الكاربون خليط من ثلاث غازات ، هي ثاني اوكسيد الكاربون ، والنتروجين ، والهليوم ، وكما لاحظنا سابقاً تقوم جزيئات النتروجين بنقل الطاقة الى جزيئات ثاني اوكسيد الكاربون، اما الهليوم فيستخدم في الخليط للمحافظة على درجة حرارته حيث ان معامل التوصيل الحراري له عالٍ وبذلك ينتقل الحرارة الزائدة نحو الخارج.

المستويات التي نراها في الشكل (14-4) هي مستويات طاقة تذبذبية للمستوى الالكتروني الارضي ، وهناك مجموعة من المستويات التذبذبية للمستويات الالكترونية العليا ، وهذه تكون مزاحة قليلاً ، ويمكن الحصول منها على انبعاث محفز (شعاع ليزر) وتسمى هذه بالنطاق المتسلسل Sequence Band ولكن اهميتها التجارية قليلة ، اذ تعتمد الليزرات التجارية كافة على الانتقال بين المستويات التذبذبية للمستوى الالكتروني الارضي. لا نلاحظ في الشكل (14-4) المستويات الدورانية على الرغم من اهميتها في عمل ليزر ثاني اوكسيد الكاربون لكونه شكلاً مبسطاً يمثل المستويات التذبذبية ، فعندما تنتقل جزيئة ثاني اوكسيد الكاربون من المستوي (0,0,1) الى المستوى (0,2,0) بصورة اكثر تفصيلاً ، حيث نلاحظ المستويات الدورانية الثانوية للمستويات التذبذبية، فعندما

تنتقل جزيئة ثاني اوكسيد الكاربون من المستوي (0,0,1) الى المستوي (0,2,0) فهي تنتقل من مستوى دوراني محدد في المستوى التذبذبي (0,0,1) الى مستوى دوراني محدد ايضاً في المستوى التذبذبي (0,2,0)، وبطبيعة الحال لا يمكن انتقال الجزيئة الى اي مستوى دوراني في المستوى (0,2,0) حيث تحدد ذلك قوانين الانتخاب (الانتقال) Selection Rules (المعتمد على قوانين حفظ الطاقة). اذ يجب ان يتغير العدد الكمي الدوراني بمقدار واحد عند الانتقال ، فعند انتقال جزيئة من المستوي التذبذي (0,0,1) الى المستوى التذبذبي (0,2,0) ، يجب ان يكون انتقالها الى المستوى السادس او الثامن.



شكل 14-5 :المستويات الدورانية الثانوية في المستويين التذبذبيين (0,0,1)، (0,2,0).

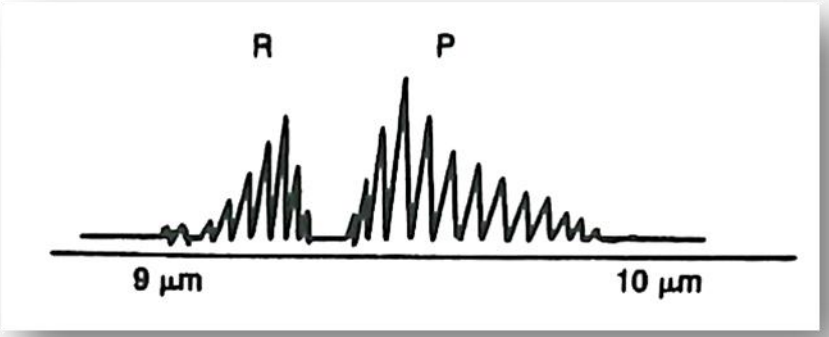
يفسر لنا الشكل (14-6) ما تقدم حيث نلاحظ في طيف جزيئة ثاني اوكسيد الكاربون حالتين الاولى : يبدأ فيها العدد الكمي بالنقصان ،

وتسمى R حيث يمثل الانتقال من المستوى الدوراني الاول في المستوى التذبذبي (0,0,1) الى المستوى الدوراني (صفر) في المستوى التذبذبي (0,1,0). والثانية يكون الانتقال بزيادة العدد الكمي بواحد للمستوي الدوراني ويسمى P . اذ يمكن لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون ان تعطي قدرة عالية تصل الى حد 20 كيلو واطاً او اكثر وبسهولة لذلك اصبحت لها اهمية خاصة من الناحية التجارية والعملية ، اما كفاءتها فتصل الى حد 10% وبذلك تعد من اكثر الليزرات كفاءة (*) واما استخداماتها فهي عديدة فهي تستخدم في القطع واللحام والتثقيب الدقيق والمعالجات الحرارية ، اضافة لاستخداماتها الطبية والبحثية . من الليزرات البحثية الحديثة والتي وجدلها العديد من التطبيقات ليزرات الاكزايمر Excimer، والتي تحضر فيها جزيئة من ذرات لا يمكن لها ان تتحد وتكون جزيئة في الظروف الاعتيادية ، فتحضر مثلاً جزيئة من احدى ذرات الغازات الخاملة ، كالاركون ، وذرة من الهالوجينات ، كالفلور ، لتكون جيئة فلوريد الاركونArF . كيف يحصل ذلك ؟! نعلم جميعاً ومنذ الدراسة الثانوية انه لا يمكن اطلاقاً للعناصر الخاملة ان تتحد مع بعضها او مع ذرات اخرى لتكون جزيئات . وهذا صحيح ، لأنه لا يمكن لها ان تكون جزيئات مستقرة في المستويات العليا للطاقة .

يمكننا ملاحظة هذه العملية في الشكلين(14-7 أ و 14- 7 ب)، فاذا

(*)تصل الكفاءة في الانواع المطورة حديثاً من ليزرات ثاني اوكسيد الكاربون الى حد 35% ،وهذه تعتبر عالية جداً (المترجم).

ما كانت الذرتين في المستوى الارضي (المستقر) – وليست هناك طاقة مضافة اليهما ، فانهما تتنافران، وتزداد قوة التنافر هذه كلما اقتربنا من بعضهما (الشكل 14 – 7أ) ، وبذلك يكون اتحادهما لتكوين جزيئة مستحيلاً .اما اذا اضيفت كمية من الطاقة الخارجية اليهما، كالإلكترون



شكل 14- 6 : غصنا ال R وP للانتقال (0,0,1) الى (0,2,0) في جزيئة ثاني اوكسيد الكاربون

ذي سرعة عالية مثلاً ، فيمكن بذلك اتحادهما للحصول على جزيئة كما في الشكل (14-7ب) وهذه الجزيئة تكون في مستوي الكتروني متهيج وتبقى مستقرة طالما بقيت في هذا المستوى، ولكن لهذا المستوي عمر.

14-1:ليزر ثاني اوكسيد الكاربون من نوع موجه الموجة Wave Gide يعطي قدرة تصل الى عشرة واط ، على الرغم من ان طوله لا يتجاوز 30 سم.

Life time حيث ستنتقل الى المستوي الارضي تلقائياً، كما نلاحظ ذلك في الشكل (14- 7ج).

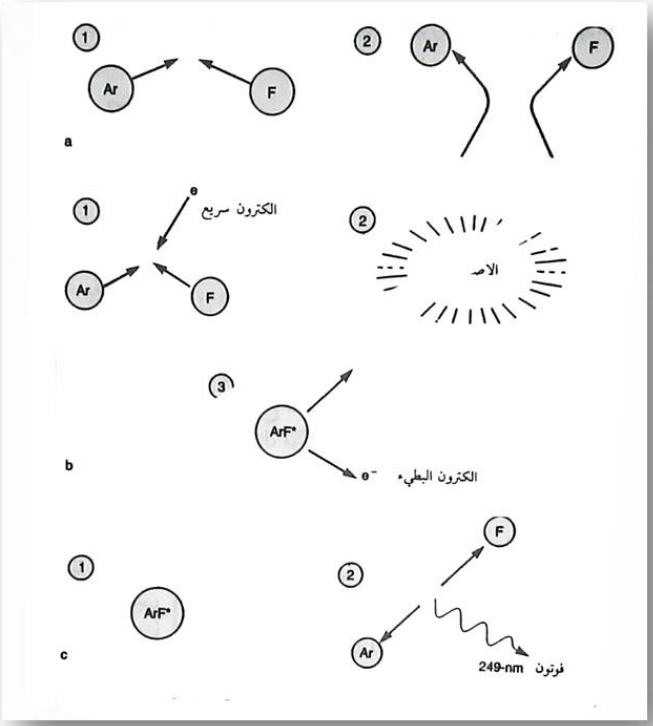
ويمكننا الحصول على التوزيع العكسي في حالة وجود مجموعة من ذرات الاركون وذرات الفلور ، حيث يكون هناك عدد كبير من جزيئات فلوريد الاركون نسبة الى عدد ذرات الاركون ، وبذلك يمكننا الحصول على الانبعاث المحفز ، كما نحصل عليه من اي توزيع عكسي اخر ، هذا ما يحدث فعلاً في ليزر الاكزايمر، ونلاحظ في الجدول ادناه عدداً من ليزرات هاليدات الغازات النبيلة والاطوال الموجية التي تبعثها.

فلوريد الاركون	ArF	193 نانومتر
فلوريد الكربتون	KrF	249 نانومتر
كلوريد الزنون	XeCl	308 نانومتر
فلوريدا لزنون	XeF	350 نانومتر

من الجدول السابق يمكن التكهن بأهمية ليزر الاكزايمر ، اذ تمثل هذه الليزرات مصدراً جيداً للأشعة فوق البنفسجية ذات الشدة العالية ، وقبل اكتشاف هذا الليزر كان الحصول على اشعة ليزر في المدى الفوق البنفسجي من الاشعة يتم باستخدام المواد البصرية غير الخطية ، التي تحول اشعة الليزرات المرئية الى الفوق بنفسجي ،وهذه طريقة معقدة ، ومكلفة ،اضافة الى ان كفاءتها قليلة.

وهناك ليزرات اكزايمر استخدمت جزيئات الليزرات النبيلة او اكاسيدها، مثل:

Ar2	125	نانومتر
Kr2	146	نانومتر
KrO	558	نانومتر



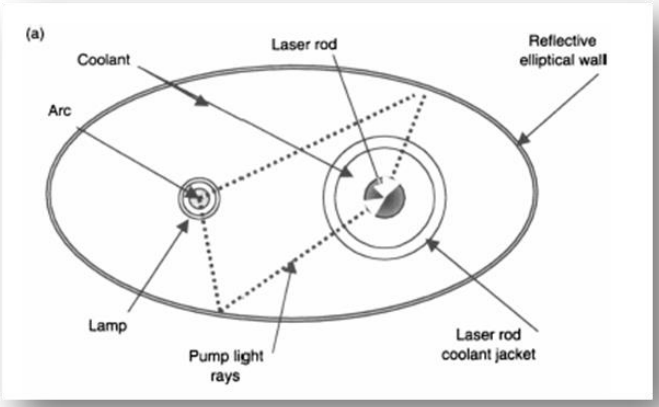
شكل 14-7 : (أ) يتنافر الفلور والاركون عادة ، ولا يمكن ان يكونا جزيئة ولكن اذا ما اضيفت طاقة اليهما يمكنان يكونا جزيئةArF.
(ب)نحصل على جزيئة ArF في المستويات المتهيجة فقط.
(ج)عندما تعود جزئية ArF الى المستوى الارضي فأنها تبعث طاقة على شكل فوتون.

ليزرات الحالة الصلبة Solid – State Lasers

تكون الذرات في ليزرات الحالة الصلبة مرتبطة مع بعضها بقطع شفافة من مادة تسمى المضيف Host ، واكثر هذه المواد شعبية هي النيوديميوم Nd المرتبطة ببلورات الياتيريوم المنيوم كرانايت ،

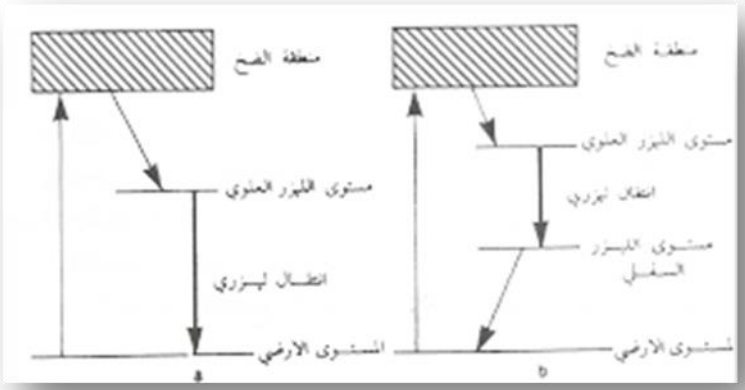
Yattrium Aluminum Granet (YAG). والنيودميوم مع الزجاج Glass ، والكروم مع الياقوت Cr: Ruby . ونحصل من النديميوم على طول موجي قدره 1,06 مايكرومتر، والكروم مع الياقوت 694,3نانومتراً . وتصنع المادة الوسطية الرابطة والتي اسميناها بالمضيف Host على شكل قضبان اعتياديا" بشكل وحجم مشابه لشكل وحجم قلم الرصاص الاعتيادي. ويستخدم الضخ الضوئي لتجهيز هذه الليزرات بالطاقة اللازمة للحصول على عملية التوزيع العكسي ، وفي بعض الانواع يلف المصباح الهالوجيني الوهاج على قضيب الليزر بشكل حلزوني، ولكن النوع الاكثر استخداماً هو ما نلاحظه في الشكل (14-8) حيث يكون المصباح الهالوجيني على شكل قضيب ايضاً يوضع بجوار قضيب الليزر، بحيث يكون كل منهما في بؤرة من بؤرتي الفجوة التي تكون على شكل قطع مكافئ وكما نعلم فان الاشعة الصادرة من احدى بؤرتي القطع المكافئ تتركز في بؤرته الثانية ، وبذلك تتركز الاشعة الصادرة من المصباح جميعها في قضيب الليزر.

نلاحظ في الشكل (14-9 أ) مخططاً مبسطاً لمستويات الطاقة في بلورة الكروم / الياقوت ، وفي الشكل (14-9 ب) مخططاً لبلورة النديميوم/ياك او النديميوم/ الزجاج لاحظ ان للياقوت ثلاث مستويات للطاقة ، في حين ان للنديميوم اربعة مستويات ، وهذه الليزرات تختلف عما لاحظناه في



شكل 14-8 : فجوة الضخ الضوئي لليزرات الحالة الصلبة ، على شكل قطع مكافئ

ليزري الهليوم – نيون وثاني اوكسيد الكاربون، حيث تمتص ايونات الكروم او النيودميوم الطاقة مباشرة دون الحاجة الى وجود مادة وسيطة لها. اما الزجاج، او الياك فليس الا وسطاً لمسك الايونات . يستخدم الماء في تبريد بلورات ليزرات الحالة الصلبة ، حيث يمرر بأنابيب زجاجية تحيط ببلورة الليزر ، اذ تؤدي الحرارة الزائدة الى حدوث تصدعات في البلورة ، وبذلك نحصل على انكسارية مزدوجة Birefringes لها تؤدي الى نقص كبير في الطاقة، وخاصة في الليزرات المستقطبة (ذات الاشعة المستقطبة). وعملياً هذه التصدعات تقلل من قدرة الليزر بمعامل مقداره 2 . وتؤدي الاجهادات الناتجة من الحرارة الزائدة الى جعل قضيب الليزر يعمل عمل عدسة ضيقة ايضاً، وبذلك يركز الشعاع المار من خلاله ، وهذا التركيز يكون بطبيعة الحال غير منتظم ، بحيث يؤدي الى الاقلال



شكل 14-9 : مخطط لمستويات الطاقة :أ- الكروم : الياقوت. ب- النديميوم /ياك اوزجاج

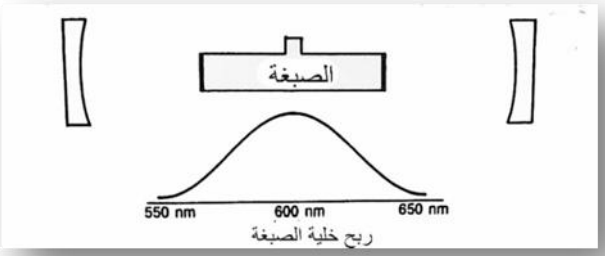
من فعالية المرايا الخارجية. ويعتمد مقدار التركيز هذا على موقع الاجهاد في القضيب، ومقدار الاستقطاب للشعاع ، وكذلك على مقدار الطاقة المستخدمة في عملية الضخ وبصورة عامة لا يمكن تصحيح هذا التأثير بصرياً، لذلك يؤدي هذا الى الاقلال من قدرة الليزر الخارجة وتتركز استخدامات ليزرات الحالة الصلبة في المجالات العسكرية، فتستخدم في مقدرات المدى Rangefinders وتحديد الاهداف Target Designators وتستخدم كذلك في المجالات الصناعية كمعالجة المعادن، وفي المجالات الطبية والسريرية ، وفي مجالات الابحاث الصرفة ايضاً.

ليزرات الصبغة العضوية Organic Dye Laser

ناقشنا في الفصل الثالث عشر المنظومات غير الخطية، والتي يمكن بواسطتها التحكم بالطول الموجي لشعاع الليزر الخارج (اي يمكن تنغيم الطول الموجي) ، توفر لنا ليزرات الصبغة هذه الخاصية ايضاً ، حيث

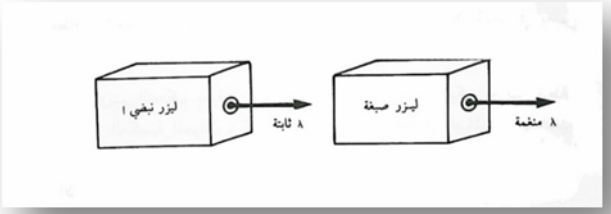
يمكن تنغيم الطول الموجي للشعاع الخارج منها ، وتستخدم جزيئات المواد العضوية كوسط فعال فيها ، وتكون هذه مذابة في وسط مائي . تكون هذه الجزيئات طويلة ولها العديد من مستويات الطاقة الدورانية ، والاهتزازية لكل مستوى طاقة الكتروني. وتكون هذه المستويات متقاربة مع بعضها البعض بشكل يظهر المستوى الالكتروني وكانه مستوى واحد عريض (سميك)،فعندما تنتقل جزيئة من هذا المستوى العريض الى مستوى اوطأ منه ، يعتمد الطول الموجي للضوء الخارج على نقطتي البدء والنهاية لهذين المستويين ، ونتيجة لذلك يكون عرض نطاق الشعاع المنبعث كبيراً جداً ، بحيث يصل الى حد 100 نانومتر في بعض انواع ليزرات الصبغة، كما موضح في الشكل (14-10).

ويتم التحكم بعرض النطاق في ليزر الصبغة بالتحكم بعرض نطاق التغذية العكسية للمرنان ، كما لاحظنا ذلك في الفصل العاشر . وتستخدم لذلك المواشير او المحززات او المرشحات المزدوجة الانكسارية ، وغيرها من الاجزاء البصرية للإقلال من عرض نطاق التردد في هذا النوع من الليزرات وتكون النقطة الجوهرية في هذه الليزرات موجودة في هذا ، فنظراً لكون عرض نطاق التردد لليزر الصبغة كبيراً ، يمكن تنغيم شعاع الليزر على التردد المطلوب ، فاذا ما وضعنا موشوراً او اكثر في الليزر المبين في الشكل (14-10) امكننا الحصول على عرض نطاق اقل من ال 100 نانومتر.



شكل 14-10: يكون عرض النطاق في الربح لليزر الصبغة ك بيراً جداً ، ويمكن تنغيم الشعاع الخارج خلال عرض النطاق هذا.

تضخ الطاقة في ليزرات الصبغة بطريقة ضوئية غالباً ، وتستخدم المصابيح الوهاجة ، او الليزرات لذلك شكل (14-11) ، وكما هو الحال في عملية الضخ الضوئي في الانواع الاخرى من الليزرات ، يتوجب



شكل 14-11 : يستخدم شعاع الليزر في عملية ضخ الطاقة في الليزر الصبغة

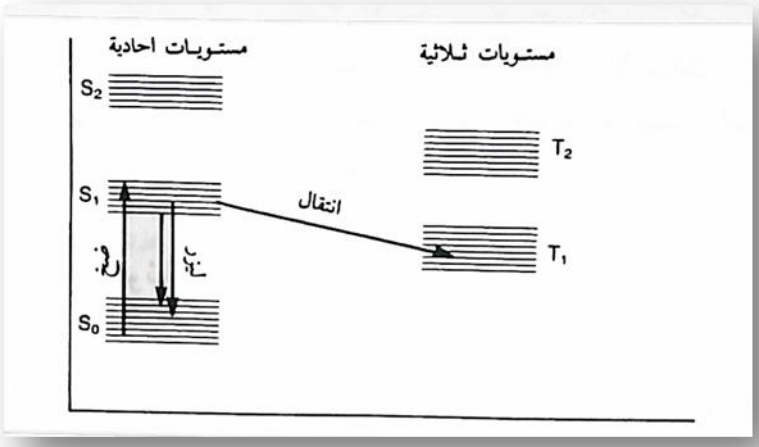
استخدام طول موجي اقصر من الطول الموجي للشعاع الصادر من الليزر (هل تعلم لماذا؟) . فتستخدم ليزرات تقع اطوالها الموجية في

المدى فوق البنفسجي عندما يراد الحصول على شعاع ازرق من ليزر الصبغة مثلاً، وهكذا.

يوضح الشكل (14-12) مستويات الطاقة في الليزر الصبغة ، لاحظ ان هناك نوعين من مستويات الطاقة ، طاقة احادية Singlet واخرى ثلاثية Triplet وهذه ناتجة من عملية البرم Spin للإلكترونات، وليس من الضروري التعمق في فهم تفاصيل هذا الموضوع من جانب الميكانيك الكمي لفهم عمل ليزر الصبغة ، وبدلاً من ان تكون هذه المستويات ضيقة وحادة ، نراها عادة ما تكون عريضة ، وذلك لاحتوائها على عدد كبير من المستويات التذبذبية والدورانية الثانوية.

يوضح لنا السهم في الشكل (14-12) الطريق الاعتيادي الذي يسلك عند حصول عملية الليزر في الصبغات العضوية ، وعندما تكون المادة في حالة توازن حراري فان جزيئاتها تكون في مستويات قريبة من المستوى الارضي الاحادي S_0. وعند امتصاصها لفوتون ناتج من عملية الضخ الضوئي فأنها تقفز نحو المستويات الاعلى قرب المستوى المتهيج الاول S_1 . وبطبيعة الحال سوف تفقد الجزيئة بعضاً من طاقتها عندما تنتقل الى المستويات التذبذبية الدنيا في المستوى S_1 الى ان تحفز المستوى S_0 وبذلك تطلق فوتوناً محفزاً ، ويعتمد الطول الموجي لهذا الفوتون على موقع الانتقال في المستوىS_1 والمكان الذي انتقل اليه في المستوى S_0 .

المشكلة الاساسية في ليزرات الصبغة هي انتقال الجزيئات الى المستوى T_1 الثلاثي بدلاً من بقائها في المستوى S_1 الاحادي ، لحين تحفيزها على



شكل 14-12 : مستويات الطاقة في ليزر الصبغة.

الهبوط الى المستوى الارضي . اذ ان وجود الجزيئات في المستوى T_1 يعتبر من الامور السيئة للغاية ، حيث تفقد الجزيئات الكثير من طاقتها دون اطلاقها لأي فوتون محفز (فوتون ليزر) ، وبذلك تقل كفاءة المنظومة ، وتكون هذه سريعة ومؤثرة اذا ما هبطت جزيئات كثيرة الى المستوى T_1 ، ومن مشاكل هذا المستوى طول عمره ، لان الجزيئات تفضل البقاء فيه . ومن الامور الاخرى المؤثرة وجود مستوى ثلاثي اخر فوق المستوى T_1 في كثير من الجزيئات ، ويسمى بالمستوى T_2 ، فاذا ما كانت المسافة بين المستويين T_1، T_2 مقاربة للمسافة بين المستويين

S_0، S_1 ، فان عملية الضخ للمستوى T_1 تكون بالنتيجة مؤثرة في ميكانيكية الحصول على شعاع الليزر.

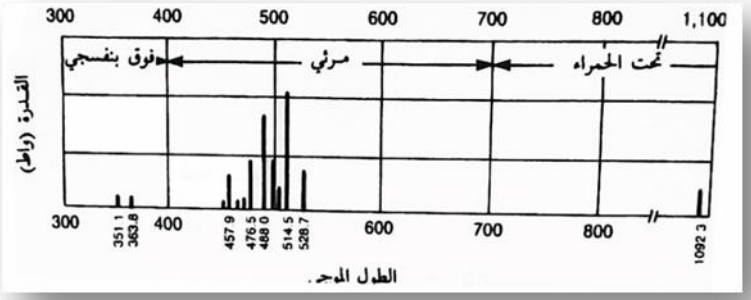
ومن المشاكل الاخرى للمستوى T_1 كون الجزيئات في هذا المستوى قليلة الاستقرار الكيميائي ، وبذلك فان الضخ اليه يؤدي الى الاقلال من عمر الصبغة. وقد تم حل هذه المشاكل بوضع مواد مساعدة تمتص الطاقة من هذا المستوى. وتحتوي اغلب الصبغات على هذه المواد .ولكن هذه المواد غالباً ما تؤدي الى حصول بعض المشاكل ولكن تأثيرها اقل من تأثير المشاكل السابقة.

تستخدم ليزرات الصبغة بصورة واسعة في مجالات الابحاث ،اذ يعد طولها الموجي القابل للتنغيم ادة فعالة في دراسة الاطياف والكيمياء الضوئية. وكذلك تستخدم في عملية فصل النظائر ، وخاصة نظائر اليورانيوم.

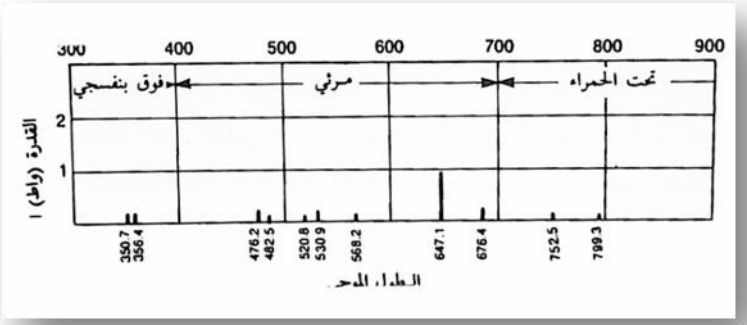
الليزرات الايونية Ion Lasers

تعتبر الليزرات الايونية من اكثر الليزرات ذات الاشعة المرئية قدرة اذ يمكننا الحصول على ليزر ذا شعاع مستمر ذي قدرة 20 واطاً من الاسواق العالمية بسهولة ، وتجارياً هناك نوعان اساسيان منها: ليزر الاركون ، وليزر الكربتون ، ويمكن الحصول من هذين الليزرين على اكثر من طول موجي، فكل خط من الخطوط التي نلاحظها في الشكلين

(14-13) و (14- 14) ناتج عن الانبعاث من الوسط الفعال . والاطوال الموجية الاكثر شيوعاً والناتجة من ليزر الاركون هي



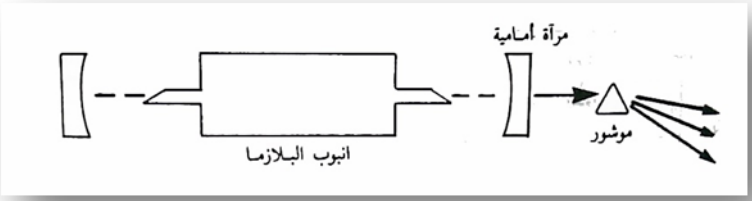
شكل14-13: الأطوال الموجية التي يمكن الحصول عليها من ليزر الاركون.



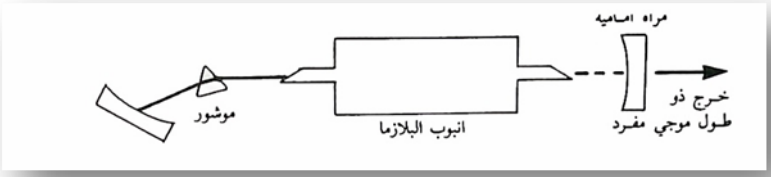
شكل 14-14: الأطوال الموجية التي يمكن الحصول عليها من ليزر الكربتون.

الازرق 488 نانومتر والاخضر 514.5 ، واما اقوى الاطوال الموجية في ليزر الكربتون فهو الاحمر 647.1 نانومتر ويمكن الحصول منه على اطوال موجية (الوان) في الوقت نفسه من الليزر الايوني اذا لم يتم تحديد الطول الموجي المطلوب، كما موضح ذلك في الشكل (14-

15). وتستخدم المواشير لتحديد الطول الموجي المطلوب، كما مبين في الشكل (14-16).



شكل 14-15: إذ لم تحدد عملية التغذية العكسيةفي المرنانو يتذبذب الليزر الأيوني بعدد من الاطوال الموية في الوقت ذاته

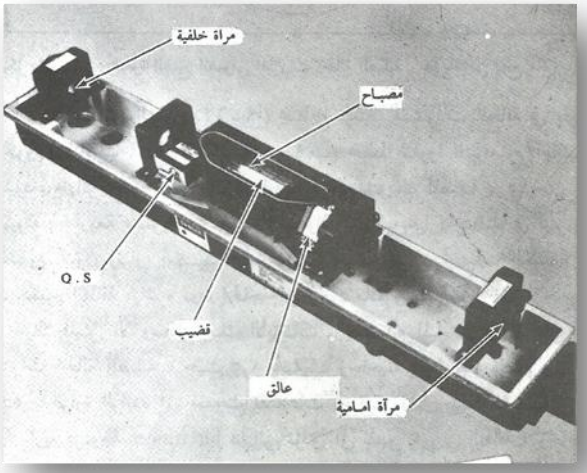


شكل 14-16 : يمكن تحديد تذبذب الليزر الايوني بطول موجي واحد ، بتحديد التغذية العكسية في المرنان.

وتختلف الليزرات الايونية عن الليزرات الغازية السابقة الذكر حيث انها تعمل في مدى الجهد الواطئ نسبياً (بضعة الاف من الفولتات) والتيار العالي (عشرات الامبيرات) ، حيث يكون هذا التيار ضروري لتأيين الغازات المستخدمة في انبوبة البلازما . وتصل كثافة التيار الى حد مئات او الاف الامبيرات في السنتمتر المربع الواحد ، وهذه الكثافة

العالية تحتاج الى تصاميم خاصة للأقطاب Electrode وكذلك لمنظومة التبريد ، التي تستخدم الماء غالباً .

تؤدي كثافة التيار العالي في انبوب البلازما الى دفع الايونات نحو الكاثود لتتعادل ، فاذا لم نتمكن من اعادة هذه الايونات الى داخل البلازما فانها ستتجمع حول الكاثود لتمنع عملية استمرار التفريغ الكهربائي. ولكل مصمم طريقته الخاصة في اعادة هذه الايونات الى الوسط البلازمي. وتستخدم في اغلب الانواع من هذه الليزرات ملفات كهربائية تلف حول الانبوب لغرض زيادة التيار الكهربائي فيه ، يتم ذلك بتوليد مجال مغناطيسي طولي في البلازما، حيث هذا الى تجمع الالكترونات والايونات، داخل الانبوب ، دون ان تصطدم بجدرانه.



صورة 14-3: صورة داخلية لليزر الايوني

الاسئلة

1- ليزر هليوم- نيون ذو قدرة 2 ملي واط ، يسحب تياراً مقداره 5 ملي امبير، باستخدام جهد قدره 1600 فولت .احسب كفاءة الليزر (ملاحظة: القدرة تساوي حاصل ضرب الجهد*التيار)

2- كم عدد الانماط التذبذبية الممكنة في جزيئة ثنائية الذرة كجزيئة H_2 ؟

3- اشرح لماذا يؤدي الانكسار المزدوج في قضيب الليزر والحاصل من جراء الحرارة العالية الى فقدان كمية من القدرة الخارجة ،في الليزرات المستقطبة؟

4- اشرح لماذا يجب ان يكون الطول الموجي لليزر المستخدم في عملية ضخ الطاقة في الليزر الصبغة اقصر من الطول الموجي لليزر الصبغة ذاته؟

الفصل الخامس عشر

الهولوغرافي Holography

الهولوغرافي ما هو الا تكنيك جديد في التصوير الفوتوغرافي، اذ نحصل منه على اشكال (صور) اكثر حيوية مما نحصل عليه من عملية التصوير المستخدمة للكاميرا الاعتيادية ، حيث يتم في الهولوغرافي تسجيل الطور اضافة الى السعة، في حين تتم في التصوير الاعتيادي عملية تسجيل السعة للأشعة الضوئية فقط. وكما سنلاحظ فان هذا الفرق سوف يقودنا للتعرف على خصائص الاشكال التي نحصل عليها من الهولوغرافي.

نوضح في هذا الفصل كيف يصور الهولوغرام ، وكيف نحصل على الصور والاشكال منه ، ومن ثم نتطرق الى بعض تطبيقاته في المجالات الصناعية والعلمية.

كيف يعمل الهولوغرافي How Holography Works

نلاحظ في الشكل (15-1) جسماً مضاء بشعاع غير متشاكه ، ونشاهد الجسم بعد ان تركز عدسة العين الاشعة المنعكسة منه لتكون صورة (شبحاً) للجسم على شبكية العين . وبالطريقة نفسها يمكن تكوين صورة للجسم على اللوح الحساس (الفلم) باستخدام الكاميرا ، والصورة الناتجة ماهي الا تسجيل لمعلومات – جزء من المعلومات- عن الجسم والتي

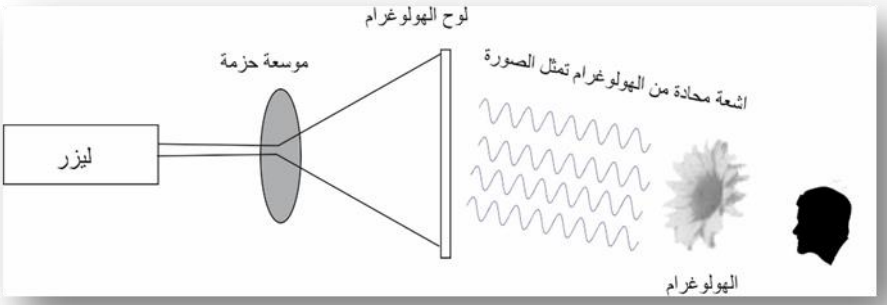
يتضمنها الشعاع المنعكس منه . ويسجل اللوح الفوتوغرافي المعلومات التي تمثل سعة * الموجات الضوئية المنعكسة من الجسم.

شكل 15- 1 :نشاهد الاجسام نتيجة انعكاس الاشعة الضوئية عنها.

من جانب اخر يسجل الهولوغرام المعلومات الكاملة التي يحتويها الشعاع المنعكس عن الجسم حيث يسدل السعة والطور للموجه المنعكسة من الجسم، فنحصل من الهولوغرام على الموجات الضوئية نفسها التي نحصل عليها من الجسم ، كما نلاحظ ذلك في الشكل (15-2) ، حيث يضئ شعاع الليزر الهولوغرام من الجهة الخلفية له ، وبذلك يصدر الهولوغرام موجات مشابهة لتلك التي يصدرها الجسم باتجاهنا تماماً ، وبذلك نشاهد صورة الجسم بأبعادها الثلاثة وكذلك يمكن مشاهدته من زوايا مختلفة.

---

* يذكر المؤلف السعه دائما وترجمناها كما هي لكن في الحقيقة ما يسجل هو الشدة والمساويه لمربع السعه

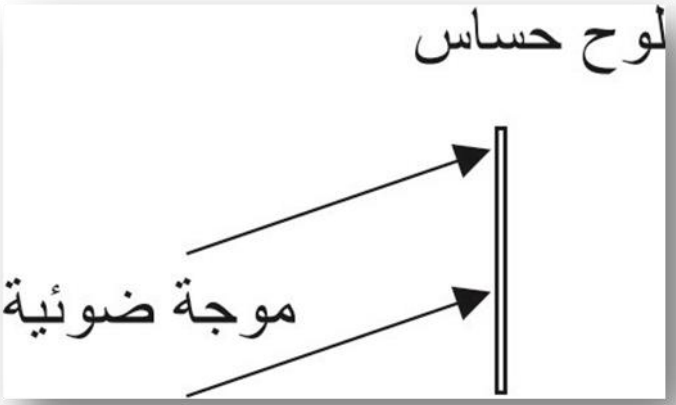


شكل 15-2 : اذا ما اضيئ الهولوغرام بشعاع ليزر فان الموجات الضوئية التي تصلنا تكون مشابهة لتلك التي تصلنا لو كانت لجسم حقيقي.

كيف يتكون الهولوغرام؟ وكيف يمكن له ان يسجل ومن ثم يعرض كلاً من السعة والطور للموجات الضوئية.

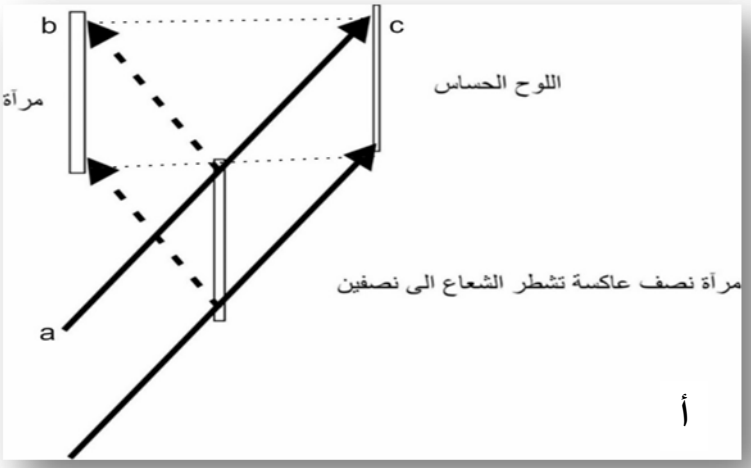
ليس من الصعب تسجيل سعة الموجات الضوئية ، اذ يتم ذلك في عملية التصوير الاعتيادية ، كما نلاحظها في الشكل (15-3) ، حيث هناك لوح فوتوغرافي يعرض الى موجة مستوية . ماذا يحصل للوح بعد اجراء عمليات المعالجة الكيمياوية له؟ بطبيعة الحال سوف يتحول الى لوح اسود اللون ، وتعتمد درجة اسوداده على شدة الاشعة الساقطة، وبذلك نكون قد سجلنا شدة هذه الاشعة (الموجات المستوية) ولكن ليس طورها.

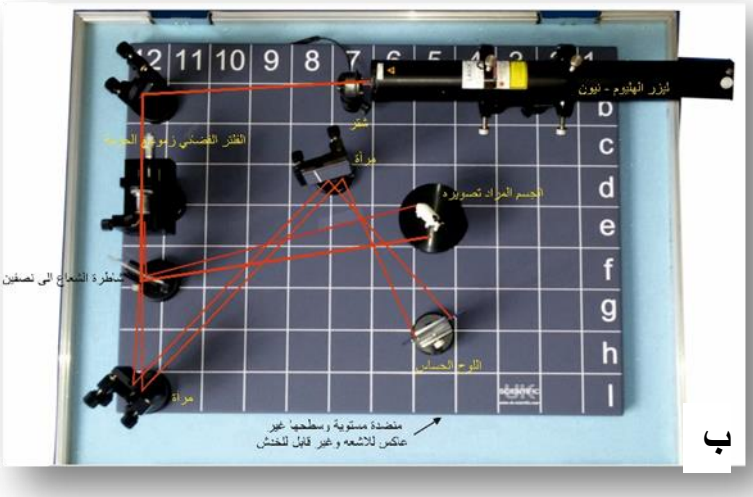
تستخدم ظاهرة التداخل لتسجيل طور الموجات . فللحصول على هولوغرام يجب تسجيل طور الموجات اضافة الى سعاتها، وذلك يتطلب اضافة مرآتين احدهما نصف عاكسة واخرى عاكسة كلياً الى المنظومة المبينة في الشكل (15-3) لتصبح بالشكل المبين في الشكل (15-4)، اذ



شكل 3-15 : اذا ما تعرض لوح حساس الى موجة مستوية ،فانه يتحول الى لوح اسود اللون وبذلك يكون قد سجل سعة الموجة المستوية.

تنقسم الموجة الساقطة لينعكس جزء منها على المرآة ويسقط على اللوح الحساس، لنحصل على تداخل بين الموجتين ، ويحصل التداخل نتيجة لوجود فرق بالطور بين الموجتين الواصلتين الى النقطة c مثلاً (وكذلك النقاط الاخرى) على اللوح الحساس ، حيث يمكن للأشعة الذهاب من النقطة a الى النقطة b ومن ثم الى c او مباشرة من النقطة a الى c. اذا كان فرق المسافة بين المسارين مساوياً لعدد صحيح من الاطوال الموجية ، نحصل بذلك على تداخل بناء Constructive ، اما اذا كان فرق المسافة بين المسارين مساوياً لعدد صحيح من الاطوال الموجية مضافاً اليه نصف طول موجة فان ذلك يؤدي الى الحصول على تداخل هدام Destructive .





شكل 15-4 : تسجيل الهولوغرام لموجة المستوية أ.مخطط لذلك

ب. صورة للمنظومه من شركه uk-scientificالبؤيطانية

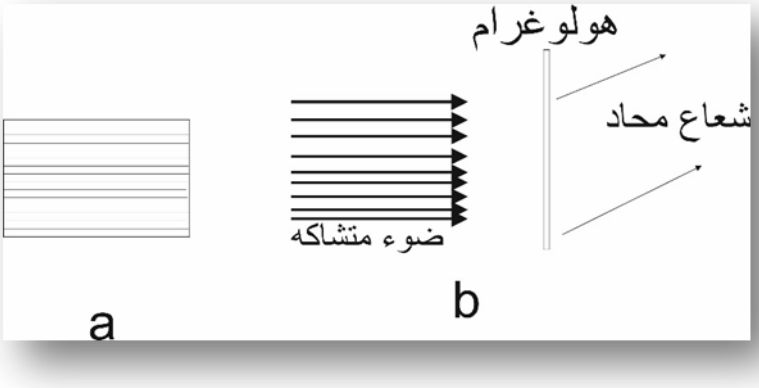
وهذا صحيح بالنسبة لجميع النقاط الاخرى على اللوح الحساس . بعد اجراء عمليات المعالجة الكيمياوية نحصل على الهولوغرام الذي يبدو

كما في الشكل (15-5) ، مكوناً من سلسلة من الخطوط المستقيمة المتجاورة. لنأخذ هذا الهولوغرام ونضيئه بشعاع ليزر متشاكه ، فسنلاحظ ان قسماً من الشعاع سوف يحيد (شكل 15-5ب)، (اذا لم تعلم لماذا راجع تجربة يونك " الحيود من شقين" في الفصل الرابع ، والظاهرة الصوتية Acousto- Optic في الفصل الحادي عشر)، والنقطة الجديرة بالاهتمام هي ان الشعاع المحاد هذا يكون نسخة مشابهة تماماً للموجة المستوية التي استخدمت في عملية تسجيل الهولوغرام، حيث تم تسجيل طور الموجة اضافة الى سعتها، وتم استرداد ذلك في الموجة المحادة .

في الواقع ان الحصول على الهولوغرام لموجة مستوية ليس بالشيء المثير لذلك سنحاول تسجيل هولوغرام لموجة منعكسة عن جسم ،وابسط الامثلة على الاجسام هي النقطة ، ونلاحظ في الشكل (15-6 أ) عملية تسجيل هولوغرام لهذا الجسم . كما في التجربة السابقة فان جزءاً ، من شعاع الليزر يذهب مباشرة الى اللوح الحساس ليتداخل مع الشعاع الاخر المنعكس من الجسم ،وبعد اجراء المعالجات الكيمياوية ، نحصل على خطوط غير متجانسة وغير متناسقة على اللوح، اذا ما اضيئ الهولوغرام هذا بشعاع متشاكه (كما في الشكل 15-6 ب) فأننا نحصل على الموجة المنعكسة من الجسم نفسها.

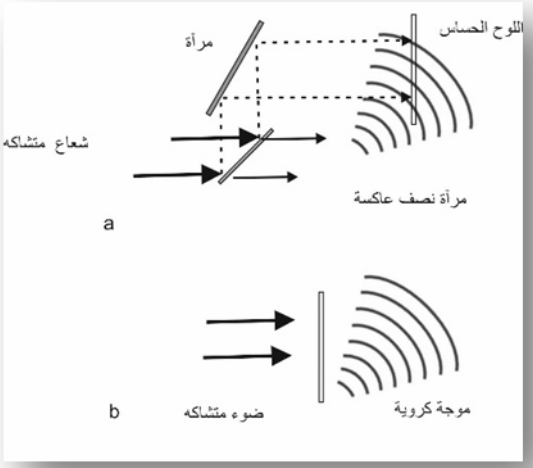
اما الان فيمكننا الحصول على هولوغرام لجسم كبير ، اذ يتكون الجسم من مجموعة من النقاط ، نلاحظ في الشكل (15-7) الشعاع المنعكس من

كل نقطة من نقاط الجسم المضاءة يتداخل على اللوح الفوتوغرافي مع الاشعة المنعكسة من المرآتين مباشرة الى اللوح الفوتوغرافي ، وشكل التداخل هذا من الدقة بحيث يصـعب مشــاهدته بالعين المجردة ، فعندما ننظر الى الهولوغرام باستخدام الضوء الاعتيادي نشاهد خطوطاً ودوائر متعرجة دقيقة وعندما يضاء بشعاع متشاكه شكل (15-8) فالأشعة المحادة منه تكون شبحاً يمثل الجسم ، وعند النظر اليه نتصور وكأننا ننظر الى الجسم الحقيقي، حيث ان الاشعة المكونة له تشابه الاشعة المنعكسة من الجسم تماماً. نلاحظ مما تقدم ان مبدأ الحصول على الهولوغرام بسيط . حيث ينقسم الشعاع الى شعاع مصدر Reference



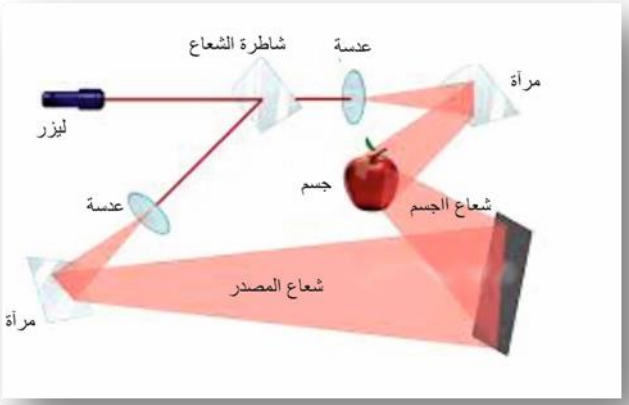
شكل 15-5 : يمثل شكل التداخل او الهولوغرام الذي حصلنا عليه في الشكل السابق ، سلسلة من الخطوط المستقيمة المنتظمة (أ)، وعندما يضاء الهولوغرام بشعاع ضوئي متشاكه (ب) نحصل على الموجة المستوية السابقة.

يوجه مباشرة الى اللوح الحساس ،وشعاع الجسم Object حيث يوجه



شكل 15-6: (أ)مخطط يمثل عملية تسجيل الهولوغرام لنقطة.

(ب)نحصل على الاشعة ذاتها المنعكسة من النقطة ، كما لو كانت النقطة موجودة في مكانها.



شكل 15-7:تسجيل الهولوغرام لجسم حقيقي يمثل بتسجيل الاشعة المنعكسة من كل نقطة من نقاط الجسم

الى الجسم لينعكس منه الى اللوح الفوتوغرافي وبتداخل هذين الشعاعين على اللوح نحصل على الهولوغرام ، وبالحفاظ على المبدأ السابق يمكن

شكل 15-8 :عند اضاءة الهولوغرام بشعاع متشاكه نحصل على اشعة تشابه تماماً تلك

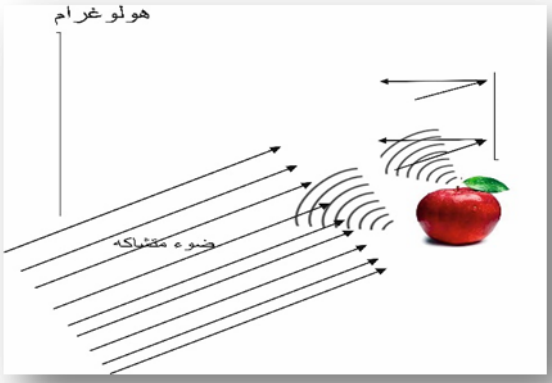
استعمال اي تنظيم للحصول على الهولوغرام، وما يوضحه الشكل (15-9) مثال على ذلك.

التطبيقات الصناعية للهولوغرافي

Industrial Holographic Application

تستخدم منظومات الهولوغرافي بكثرة في خطوط الانتاج في الصناعة حيث يتم فحص المنتوج للتأكد من خلوه من العيوب التي لا يمكن مشاهدتها بالعين المجردة . على الرغم من وجود اكثر من طريقة تستخدم الهولوغرافي في الفحص ، لكن جميعها تعتمد على المبدأ نفسه ، حيث

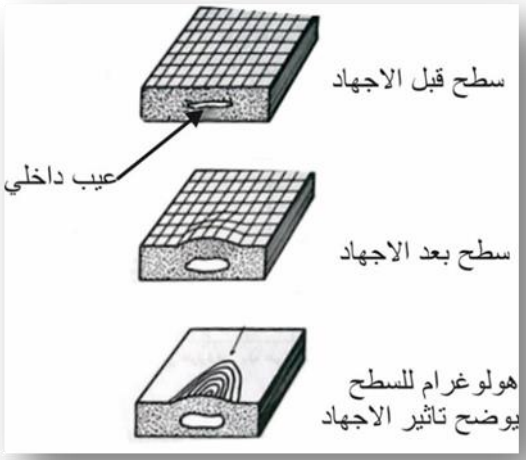
يسجل هولوغرامان للجسم ومن ثم ينظر اليهما معاً ، واي اختلاف يحصل للجسم في الفترة بين تسجيل الهولوغرامين يظهر على شكل



شكل 15-9 :مثال على تنظيم اخر لعملية تسجيل الهولوغرام ، وفيه اضيء الجسم من الامام.

اهداب تداخل لاحظ الشكل (15-10) والذي فيه قطعة من المعدن المحتوية على عيب داخلي.

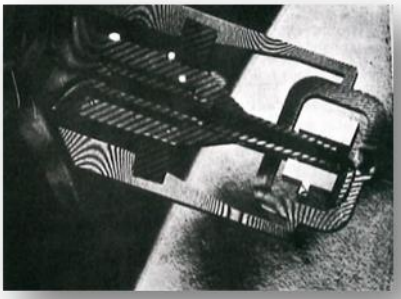
فاذا ما عرضت القطعة الى اجهاد فان تغيراً طفيفاً سوف يحصل في السطح الخارجي لها، ونحصل على الاجهاد باستخدام ماسك يضغط على القطعة، فاذا ما حصلنا على هولوغرام للقطعة قبل الاجهاد ، واخر بعده ووضعنا احدهما فوق الاخر تماماً فأننا نحصل على اهداب تداخل في منطقة التشوه الحاصل في السطح او بالأحرى في منطقة وجود العيب الداخلي، وهذا التغير او التشوه الحاصل في سطح القطعة لا يمكن اكتشافه بالعين المجردة حيث انه لا يتجاوز اجزاء المايكرون غالباً.



شكل 15 -10 : الكشف عن العيوب الداخلية بواسطة الهولوغرافي.

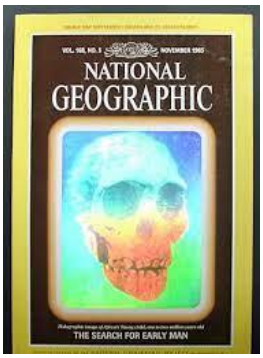
ويستخدم الهولوغرافي كذلك في دراسة وتحليل الاهتزاز للأجسام الميكانيكية ،مثالاً على ذلك راس القراءة والتسجيل المغناطيسي المستخدم مع الاسطوانات المغناطيسية في الحاسبات الالكترونية ، والذي يتحرك بسرعة عالية ومن ثم يتوقف فجأة، هذا التوقف يؤدي الى حصول اهتزاز عال في هذا الرأس مما يؤثر في مكوناته ، تأثيراً سيئاً للغاية، اذا لم يكن تصميمه متقناً ، لذلك يستخدم الهولوغرافي اداة لتحليل انماط الاهتزاز في رأس التسجيل هذا ، كما موضح ذلك في الشكل (15-11) .في هذه الحالة يسجل هولوغرامان بسرعة عالية ولا يفصل بينهما سوى وقت قصير واهداب التداخل التي نراها نتيجة جمع الهولوغرامين مع بعضهما تبين ثبات رأس التسجيل ، حيث توضح الاهداب على عرض الذراع "نمط الانحناء التذبذبي Bending Vibration Mode " . وعدم وجود

اهداب على طول الذراع يدل على وجود حركة التواء Torsion قليلة جداً فيه.



شكل 15-11 : اهداب التداخل الناتجة من جمع هولوغرامين ، لراس التسجيل في جهاز قارئ اسطوانات الخاص بالحاسبات الالكترونية.

.



* نشرت N.G صورة لجمجمه وجدت في افريقيا بشكل صورة هولوغرام ثلاثيه الابعاد على غلاف احد اعدادها لغرض دراستها من اكبر عدد من الباحثين

الهولوغرام الدائري 360 درجه يصنع بلف الجسم باللوح الحساس من جميع الجهات لنحصل على هولوغرام ثلاثي الابعاد تماما.

وظهر الان الهولوغرام الرقمي والقديوي .

الفصل السادس عشر

دراسة الاطياف Spectroscopy

دراسة الاطياف باستخدام اشعة الليزر حقل واسع من المعرفة ، كتبت فيها العشرات بل المئات من الكتب والمقالات ، والابحاث ، ويعقد سنوياً الكثير من المؤتمرات حول هذا الحقل من المعرفة، ويعمل فيه الاف من الفيزيائيون والكيمياويين ، وما سنتطرق اليه في هذا الفصل ما هو الا خدش بسيط للسطح الخارجي للموضوع ، وعلى الرغم من ذلك فان هذا الفصل يعد من الفصول المهمة في الكتاب ، فسنتعلم فيه مبدا المطياف الليزري، والمصاعب التي تواجه العاملين فيه ، ومن ثم سنتطرق الى مثالين فيه، هما: المطياف غير المتأثر بظاهرة دوبلر Doppler Free Spectroscopy ومطياف رامانRaman Spectroscopy فاذا ما تعلمنا التكنيك الذي سنوضحه في هذا الفصل فأننا نكون مؤهلين للدخول، والمشاركة في تطوير ذلك.

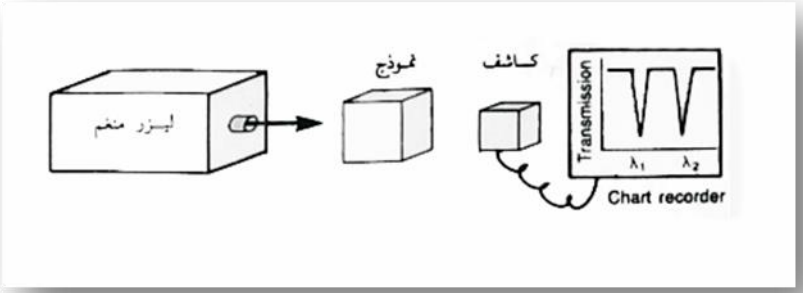
ما هو علم الاطياف الليزري ؟

What is Laser Spectroscopy ?

علم الاطياف ، في ابسط صورة، هو العلم الذي يرسم لنا صورة لمستويات الطاقة للذرات والجزيئات ، وبتعريف اكثر دقة ، هو العلم او الاداة التي توضح لنا الخصائص الكيمياوية والفيزيائية للنموذج المفحوص، وعلى الرغم من كون مبدأه بسيطاً ، لكنه يعد من الدراسات

او العلوم المعقدة عملياً، حيث نعلم ان لكل ذرة او جزيئة مئات من مستويات الطاقة.

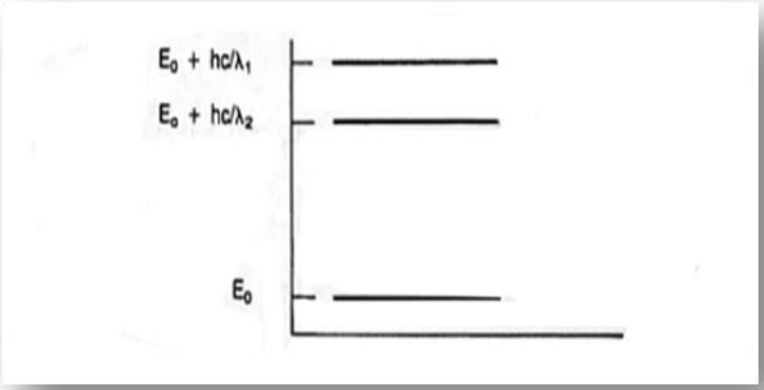
يوضح الشكل (16-1) تجربة لمطياف ذري بسيط ، اذ يضاء النموذج بشعاع ليزر يمكن تنغيم طوله الموجي ، ويسجل بعد ذلك الضوء النافذ من خلال النموذج كدالة للطول الموجي لشعاع الليزر . ولنفترض اننا حصلنا على اشارة لطوليين موجيين مختلفين ، كما في الشكل . كيف يفسر لنا هذا مستويات الطاقة لذرات او جزيئات النموذج المستخدم؟



شكل 16-1 :عند تنظيم الطول الموجي لليزر يمتص النموذج طوليين موجيين مختلفين

الجواب موضح في الشكل (16-2)، اذ يمكن ان نستنتج ان للمادة مستويين للطاقة، طاقتهما مساوية لطاقة الفوتونات التي امتصت. الموضوع بسيط جداً، اليس كذلك ؟ ولكن ما الذي يجعل علم الاطياف معقداً؟

هناك اشياء كثيرة، احدهما ما نسميه ب "تعريض دوبلر Doppler

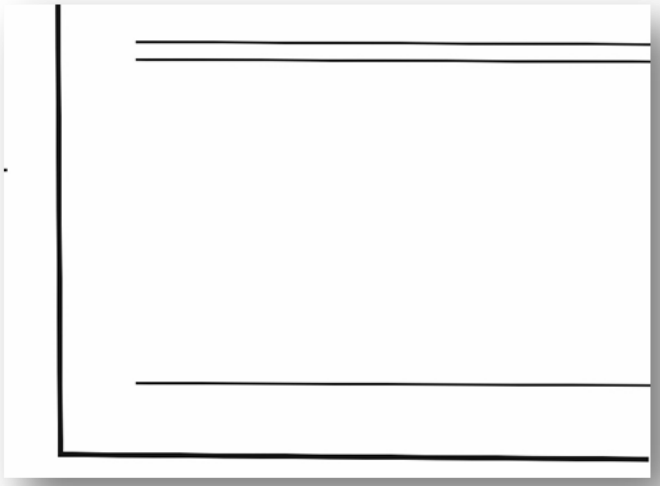


شكل 16-2: تبين المعلومات التي حصلنا عليها من التجربة في الشكل السابق ان للنموذج مستويين طاقة.

Broadening " فاذا ما اردنا ان نوضح ، ونميز مستويين للطاقة متقاربين جداً في غاز معين ، فستظهر لنا المستويات كما في الشكل (16-3) ، وبافتراض ان الجميع في حالة سكون ، وعرض نطاق شعاع الليزر ضيق جداً ايضاً، كيف سيكون شكل الرسم البياني الذي سنحصل عليه من التجربة الموضحة في الشكل (16-1)؟. ما سنحصل عليه هو مشابه للشكل في (16-4 أ) ولكن كما نعلم ان الذرات في الغاز تكون في حالة حركة مستمرة وتصطدم مع بعضها ومع جدران الاناء الحاوي لها، وعند اصطدام فوتون ما بها وهي في حالة حركة ، تعاني من ازاحة دوبلر (راجع الفصل العاشر، والذي لاحظنا فيه ان الفوتون المنطلق من ذرة متحركة يحصل فيه انحراف دوبلر ، وهذا يحصل ايضاً في عملية الامتصاص).

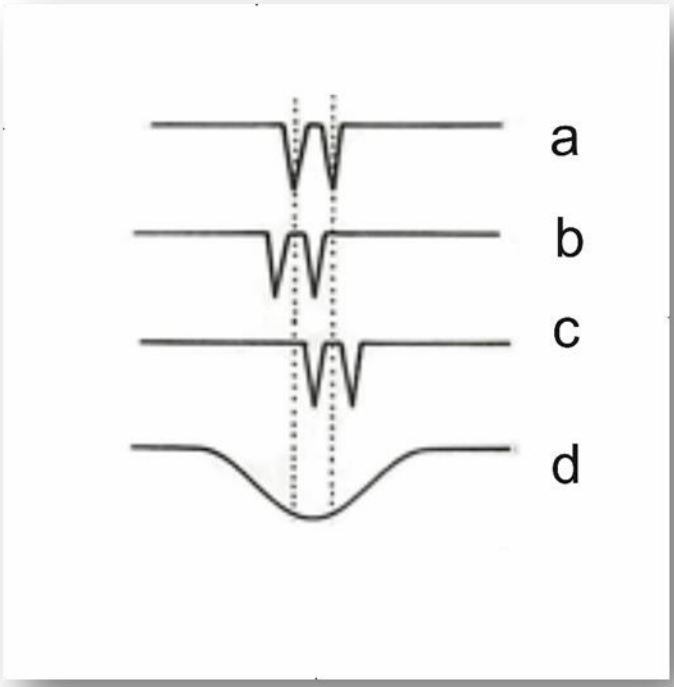
وبذلك تعاني بعض الذرات من انحراف كالذي يوضحه الشكل (16-4 ب) ، ويعاني بعض اخر من انحراف كالذي يوضحه الشكل (16- 4 ب) ويعاني بعض اخر منها كالذي يوضحه الشكل (16-4ج) وذلك نتيجة الحركة بالاتجاه المعاكس . ويوضح لنا الشكل (16-4 د) الشكل الذي سنلاحظه فعلاً والناتج من عملية الجمع للشكلين السابقين . وبذلك وبدلاً من ان نحصل على خطين منفردين نحصل على خط واحد عريض يغطي الانتقالين ، وبذلك لا نحصل على اجابة دقيقة من هذه التجربة، فلا يمكن لنا ان نعرف ما اذا كان هناك مستوى طاقة واحد او مستويين او اكثر من ذلك. اما المشكلة الاخرى التي تواجه الباحثين في هذا المجال ، فهي الاشارات الضعيفة الصادرة من الانتقالات ، وذلك لامتصاص هذه او اطلاقها الى مقادير قليلة جداً من الطاقة ، وهذه الاشارات الضعيفة ، يمكن لها ان تضيع خلال الضوضاء المصاحب للتجربة. ويوضح لنا الجزء الاعلى من الشكل (16-6) الاشارة الصادرة من احدى التجارب، في حين يوضح الجزء الاسفل الضوضاء المصاحبة للتجربة والتي تسمى " الخلفية Back Ground" ، والناتجة من مصادر الضوضاء في المختبر، والضوضاء الناتجة من الحرارة المتولدة في الكاشف Detector والاشارات التي تمتصها الاسلاك ، والناتجة من مصادر الضوضاء الكهربائية الناتجة من المحركات الكهربائية او السيارات المارة في الشارع المجاور، وغيرها من المصادر الاخرى، وبإضافة هذه بعضها

لبعض تصبح بشكل بحيث تطغى على الاشارة بدرجة يصعب فصلهما عن بعضهما.



شكل 16-3 :من الصعوبة التمييز بين مستويي طاقة متقاربين، كالذي نلاحظه ذلك في الشكل 16-4 .

اما الامور التي تجعل علم الاطياف من العلوم الشقية والجديرة بالدراسة فهي امكانية استخدامه في دراسة الانتقالات السريعة جداً (تستخدم لذلك ليزرات محددة النمط وبنبضات قصيرة جداً لا تزيد على بعض الاجزاء من البيكو ثانية) وفصلها عن بعضها ، وخاصة عند الحاجة الى دراسة هذه الانتقالات في ظروف معينة، كأن تكون داخل اسطوانة الاحتراق الداخلي لمحرك ، او في مصانع استخراج الغاز من الفحم.



شكل 16-4 :ينحرف الامتصاص لمستويات الطاقة المبينة في الشكل 16-3 نتيجة تأثير دوبلر نحو الطول الموجي الاقصر (ب) ، ونحو الاطول (ج) او دون ان يعاني اي انحراف كما في (أ) معتمداً على حركة الذرات ، بينما سيكون الامتصاص للمجموع هو كما مبين في (د).

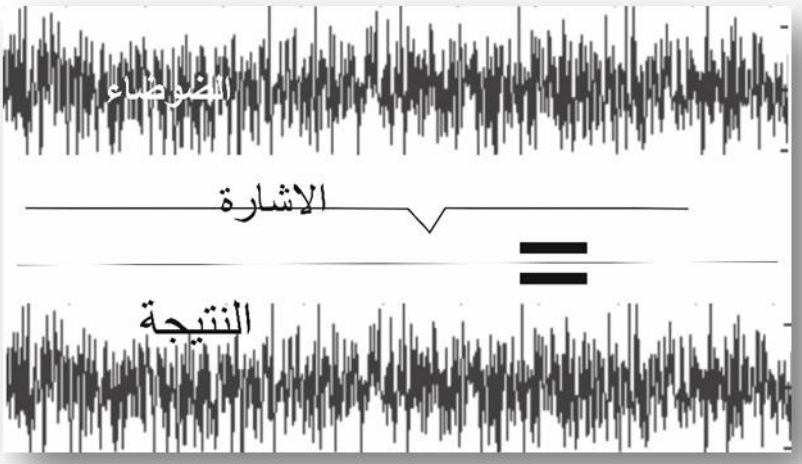
المطياف الخالي من تأثير دوبلر
Doppler-Free Spectroscopy

يعد انتشار دوبلر وكما بينا في الفقرة السابقة . مؤثراً فعالاً في دقة المطياف الليزري ، اذ يظهر مستويا الطاقة المتجاوران كمستوى واحد. وبذلك ظهرت عدة طرق لحل هذه المشكلة . ولحل اي مشكلة يجب اولا معرفة السبب لها فاذا ما علمنا ان انتشار دوبلر يظهر نتيجة حركة الذرات والجزيئات تحت الدراسة، فان اول ما يمكن عمله هو الاقلال من

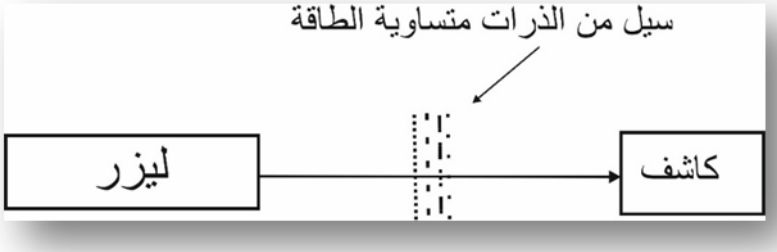
هذه الحركة بسحب الطاقة الحركية على الجذر التربيعي لدرجة الحرارة، فبذلك لا يؤثر الاقلال من درجة الحرارة بشكل كبير في الطاقة الحركية، وكذلك تؤدي عملية تبريد النموذج الى حصول عملية تضبب على شبابيك الخلية التي تحتوي على النموذج مما يعيق دخول شعاع الليزر اليها ، وخروج الاشارة لو امعنا النظر في الموضوع للاحظنا ان الذرات والجزيئات لا تتحرك باتجاه واحد ، ولو تحركت باتجاه واحد لما حصلت ظاهرة دوبلر هذه ، ولذلك تجري عملية دراسة الاطياف لشعاع (سيل) من الذرات او الجزيئات كما موضح ذلك في الشكل (16-6) ، حيث تسير جميع الذرات باتجاه واحد ، وبسرعة واحدة وبذلك تعاني جميعها من انحراف دوبلر واحد ولا تحصل في النتيجة ظاهرة انتشار دوبلر.

حصلنا في هذه العملية على نتائج جيدة جداً مقارنة بالنتائج السابقة ولكن لم تكن النتائج مثالي، حيث لا يمكن ان نحصل على خط منفرد يمثل مستوى معيناً مثلاً ليمثل الطاقة (وللسبب نفسه لم نستطع الحصول على خط منفرد يمثل الطول الموجي لليزر) وهذا المبدأ يسمى مبدأ اللاحدية Uncertainty Principle .

عملية الحصول على سيل من الذرات او الجزيئات مكلف وخاصة اذا كانت المواد المطلوب دراستها ثمينة ، لأننا نحتاج في هذه العملية الى كمية كبيرة منها لغرض الدراسة، ودراسة الانتقالات السريعة غير ممكن بهذه الطريقة ايضاً ، اذ تنتقل الذرات الى مستويات اوطأ قبل تفاعل شعاع الليزر معها.



شكل 16-5: اذا كانت الاشارة ضعيفة فان الضوضاء الناتج في التجربة يغطي عليها.



شكل 16 – 6 : لا يعاني امتصاص الذرات التي تتحرك باتجاه عمود على شعاع الليزر من انحراف دوبلر

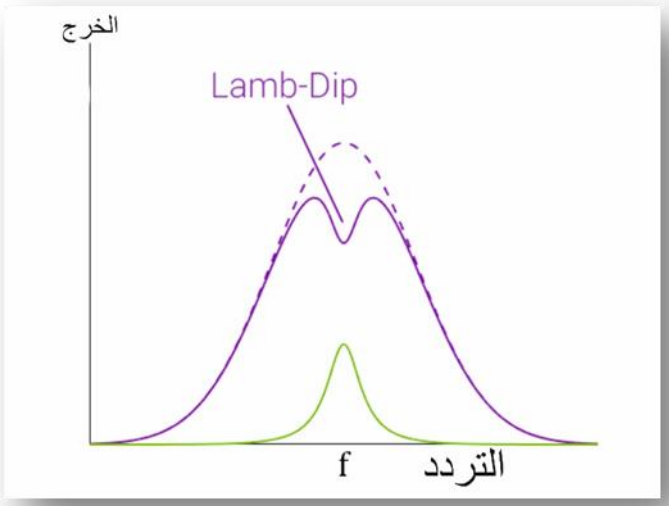
هناك طرق اخرى يمكن اجراء دراسة الاطياف الخالية من تأثير دوبلر، ولكن قبل مناقشتها من الضروري دراسة ظاهرة معروفة في الليزرات الغازية، وهي " حفرة لامب Lamb Dip " .

تظهر حفرة لامب هذه عندما يقلل عرض النطاق لشعاع الليزر الغازي ذي النمط الطولي الذي ينغم (بتغيير طول المرنان مثلاً)على طول عرض النطاق هذا . القدرة الخارجة من الليزر تتغير مع الطول الموجي كما في الشكل (16-7) ، الذي نلاحظ فيه حفرة لامب في اعلى المنحنى.

وفهم سبب هذه الحفرة سيؤدي الى فهم مبدأ المطياف الخالي من تأثير دوبلر الذي سنناقشه ، اذ لا يحتوي عرض النطاق المسبب من ظاهرة دوبلر في ليزر لا يحتوي على هذه الحفرة في الوسط. ولكن الحفرة موجودة هناك وذلك بسبب سير الضوء باتجاهين في داخل المرنان (يفضل مراجعة الفصل العاشر).

لمعرفة سبب حفرة لامب * دعنا نفكر ماذا يحدث اذا ما نغم الليزر على التردد F_1 الذي يبعد قليلاً عن التردد الوسطي في الشكل (16-7)، وهناك مجموعتان من الذرات في الوسط تشاركان في عملية الليزر هذه: الذرات التي تسير باتجاه المرآة الامامية، والذرات التي تسير باتجاه المرآة الخلفية وبالسرعة نفسها للأولى ، لماذا؟ لندرس اولاً الذرات التي تسير باتجاه المرآة الامامية وهذه تطلق فوتوناتها بتردد منحرف قليلاً

• الدكتور ولس لامب الحاصل على جائزة نوبل في الفيزياء, كان استاذي في مادة فيزياء الليزر وشرح لنا بالتفصيل كيف لاحظ هذه الحفرة الصغيرة والتي لاحظها الكثير من قبله لكن لم يهتمو بها معتبريها خطأ في القياس ليس اكثر. لكن لامب اهتم بها ودرسها بالتفصيل ووضح سبب وجودها . وكانت نصيحته الشهيرة لنا " لا تصحح نتيجه حصلت عليها بل ادرسها جيدا واعد القياسات مرة تلو المرة واعط تفسيرا للنتائج التي قد تقودكم الى النوبل ". المترجم



شكل 16-7 :اذا ما نغم ليزر احادي التردد على طول عرض نطاق الربح فيه نلاحظ حفرة لامب.

نحو الاسفل ، وبالاتجاه المعاكس للمرآة الامامية (يعاني تردد صافرة القطار القادم نحونا انحرافاً نحو الاعلى ، وتردد القطار المدبر انحرافاً نحو الاسفل ، هذا مبدأ ظاهرة دوبلر في الصوت)، ولكون الليزر منغماً لتحصل عملية التغذية العكسية فيه للتردد المنحرف نحو الاعلى فقط، وتحفز بذلك الذرات للانبعاث بهذا التردد المنحرف نحو الاعلى فقط ، وتحفز بذلك الذرات للانبعاث بهذا التردد المنحرف فقط. والحالة ذاتها تحصل لمجموعة الذرات التي تتحرك بالاتجاه المعاكس اذ انها تحفز للانبعاث بتردد مزاح نحو الاعلى ايضاً اي F_1 . وهناك طاقة مدورة داخل المرنان تضاف لكلتا المجموعتين من الذرات، اما الذرات الاخرى

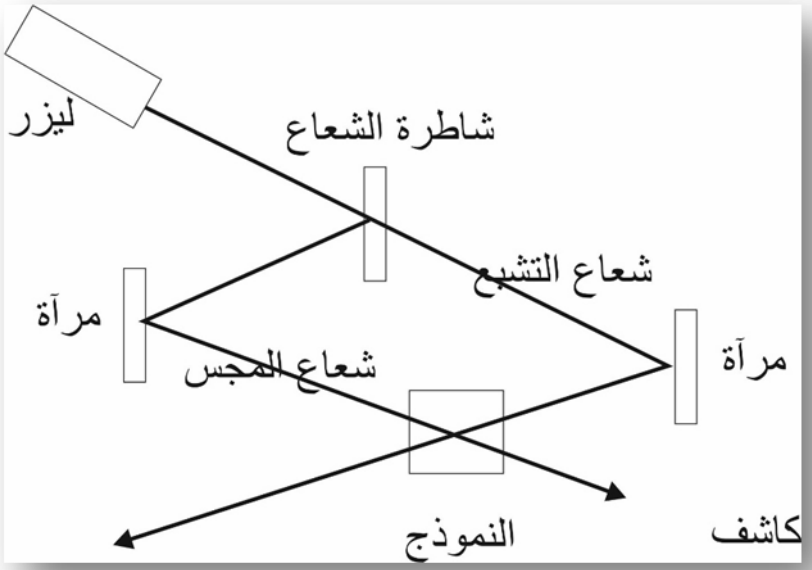
والتي تتحرك بسرع مختلفة فلا تحفز على الانبعاث اطلاقاً. ماذا يحدث اذا نغم الليزر الى تردده الوسطي F_0 ؟

هناك الان مجموعة واحدة من الذرات يمكنها المشاركة في العملية، وهذه هي الذرات الواقفة (او المتحركة بالاتجاه العمودي على محور المرنان) وبذلك يكون عدد الذرات التي ستشارك في هذه العملية قليلاً، وعندها تقل الطاقة عند هذا التردد، التردد الوسطي.

اذا فهمنا حقيقة سبب حفرة لامب ، نكون على استعداد لفهم اهم تكنيك لا يحتوي على تأثير دوبلر ، ويسمى هذا "مطياف التشبع Saturation Spectroscopy " والمخطط لهذه التجربة موضح في الشكل (16-8) اذ تقوم المرآة نصف المفضضة بفصل الشعاع الى شعاعين ذوي عرض نطاق ضيق ، احدهما ذو قدرة عالية ويسمى " اشعاع الاشباع Saturation Beam " والاخر ضعيف ويسمى " شعاع المجس Prob Beam " وهذان الشعاعان يمران بعد ذلك في

النموذج الغازي المراد فحصه، وباتجاهين متعاكسين، ومن ثم تقاس طاقة شعاع المجس بعد خروجه من النموذج باستخدام كاشف.

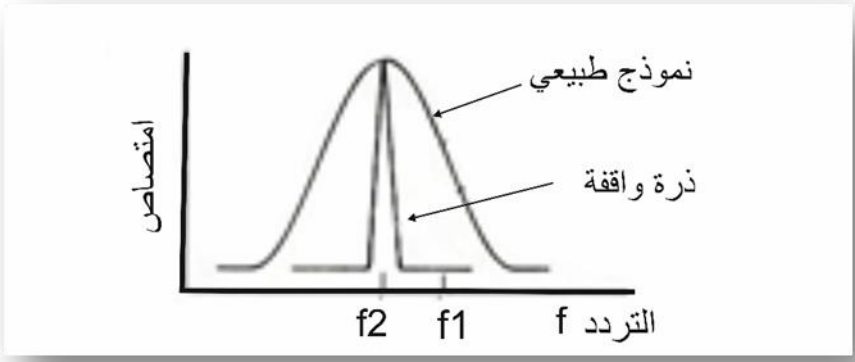
نلاحظ في الشكل (16-9) النتيجة التي يجب ان نحصل عليها من مطياف الامتصاص للذرات ذات انتشار دوبلر ، واخرى بدونه ، في نموذج ما فإذا استطعنا فحص الذرات غير المتحركة فقط في النموذج



شكل 16-8 :مخطط تجربة مطياف التشبع.

ونترك الاخرى فإننا سنحصل على المنحنى الموضح في الشكل (16-9)، ولكن في المطياف الاعتيادي كالذي موضح في الشكل (16-1) نكون مضطرين على فحص الذرات جميعها ،وبذلك ستكون النتيجة كالمنحنى العريض المبين في الشكل (16-9).

وفائدة مطياف التشبع، هي الحصول على هذه النتيجة ، فهو يسمح لنا بفحص (النظر الى) الذرات غير المتحركة(او تلك التي تكون حركتها باتجاه عمود على محور المرنان)، والتي لا تؤدي الى حصول ظاهرة انتشار دوبلر.



شكل 16-9: طيف مجموعة من الجزيئات في نموذج غازي ،وطيف جزيئة واحدة ساكنة

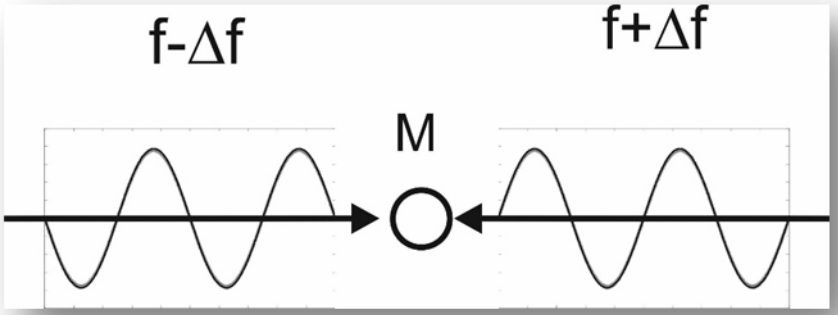
للوقوف على مطياف التشبع، يجب ان نتذكر ما يحصل عندما ينغم ليزر ذو عرض نطاق ضيق ، او اضيق من عرض نطاق الامتصاص غير الدوبلري في الاقل ، قليلاً عن الخط الوسطي F_0 بحيث ان F_1 هذه تساوي F_0+F وكما في الشكل (16-9) ، ففي خلية كهذه هناك بعض الذرات التي تتحرك باتجاه اليسار وبسرعة مناسبة بحيث يمكن لها امتصاص الضوء ذي التردد الجديد ويبين لنا الشكل (16-10) احدى هذه الذرات ، اذا ما كان الشعاع ذا شدة عالية فيمكن له ان يغطي عملية الانتقال ، وهذا يعني انه اذا كانت هناك اعداد كافية من الفوتونات بحيث تكفي لذرات المتحركة بالسرعة السابقة، فعندها يمكن لهذه الفوتونات ان تمتص من قبل الذرات ليصبح عددها في المستوي الاسفل، وهذا يعني ان للفوتونات في هذا الشعاع احتمالية 50-50% لكي تمتص و50-50 % لكي تحفز ذرة لأطلاق فوتون اخر، وبالمحصلة تكون هناك اعداد من

الفوتونات الخارجة نسبة للداخلة ، وبذلك يكون الامتصاص مقصورBleached .

ماذا يحدث لشعاع المجس عندما تذهب هذه جميعاً؟ ليس جميع الذرات التي امتصت الاشعة من الشعاع الرئيسي غير قادرة على امتصاص الاشعة من شعاع المجس ، اذ ان هذه الذرات تمتص الاشعة القادمة من جهة اليسار ، وذات التردد F-ΔF كما الشكل (16-10)، وتردد شعاع المجس هو F+ΔF وبذلك يمتص شعاع المجس من قبل مجموعة اخرى من الذرات، وتكون عادة تلك التي تتحرك باتجاه اليمين ،وبالسرعة المناسبة لذلك، ولا يمتلك شعاع المجس الضعيف العدد الكافي من الفوتونات لتكفي جميع الذرات لأجل الانتقال .

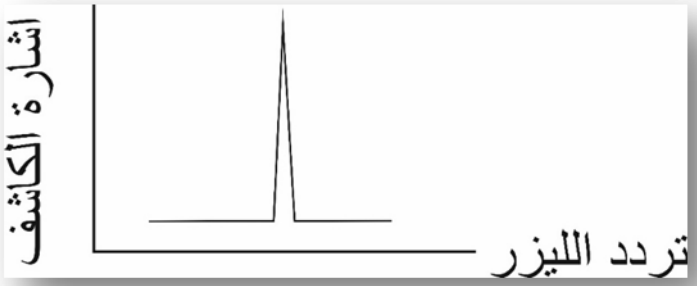
لننغم الليزر في الشكل (16-9) الان الى التردد الوسطي F_0 ، في هذا الوقت تتشبع الذرات غير المتحركة بهذا التردد ، اذا كانت شدة الشعاع كافية ، ولكن هذه هي ذرات التردد التي ستمتص شعاع المجس. اذا ما نغم الليزر للامتصاص ضمن عرض النطاق الخالي من تأثير دوبلر، فان الذرات نفسها تمتص شعاع التشبع وكذلك شعاع المجس ، ولما كان شعاع المجس مقصوراً لامتصاص هذه الذرات ، فلا يمكنها امتصاص شعاع

المجس وبذلك يمر شعاع المجس نحو الكاشف دون اي اعاقة، وبذلك عندما نستخدم مطياف التشبع ، فان المعلومات التي نحصل عليها تمثل الاشارة في الكاشف كدالة لتردد الليزر كما في الشكل (16-11).وفي



شكل 16-10 : ذرة تتجه نحو اليسار، تمتص من جهة اليمين تردد مزاح نحو الاعلى، ومن جهة اليسار تردد مزاح نحو الاسفل.

الحقيقة فان المنحنى الذي نحصل عليه يمثل تماماً الامتصاص عديم التأثير الدوبلري للنموذج.



شكل 16-11:تمثل الاشارة في الكاشف في التجربة المبينة في الشكل 16-8 ،امتصاص غير متأثر بإزاحة دوبلر ، في النموذج

مطياف رامان Raman Spectroscopy

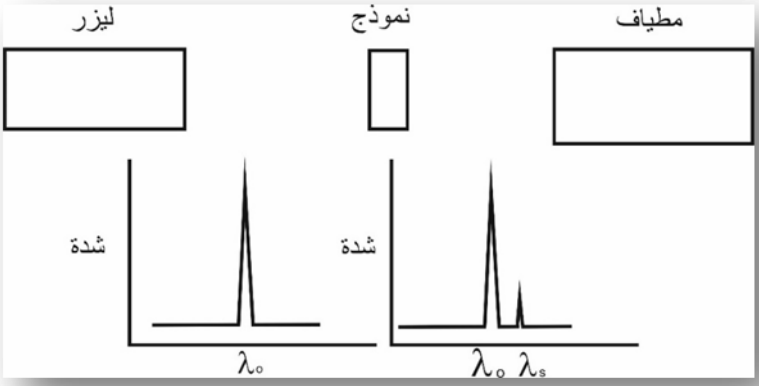
يعد مطياف رامان اداة فعالة في دراسة مستويات الطاقة الدورانية والتذبذبية للجزيئات ، التي لا يمكن لها امتصاص بطرق الامتصاص

والانبعاث الاعتيادية فيتضمن تشتت رامان تأثيراً جديداً للضوء ضمن دراستنا هذه، حيث ينتقل جزء من طاقة الفوتون الى (او من) الطاقة التذبذبية / او الدورانية للجزيئة.

قبل مناقشتنا لمطياف رامان، لنلق نظرة بسيطة على مبدا انتشار رامان البسيط ، الذي يعتمد عليه مبدأ مطياف رامان. اذا ما تذكرنا من الفصل السادس ، ان للجزيئات مستويات تذبذبية ،ودورانية كما يمثل الفوتون كمية من الموجات (الطاقة) الضوئية ، يمثل الفونون Phonon كمية محددة من الطاقة الدورانية او التذبذبية .وفي انتشار رامان ، نحصل على فونونات التذبذب والدوران عندما يتحول قسم من طاقة الفوتون المار خلال النموذج الى طاقة تذبذبية او دورانية للنموذج (بمعنى اخر يمكن للفوتونات ان تباد اذا ما اضيفت طاقتها الى الفوتونات المارة خلال النموذج).

يوضح الشكل (16-12) مبدا تشتت رامان ، اذ تنقسم طاقة الفوتون الداخل بين الفوتونات الخارجة ، والفوتونات الحاصلة في الوسط ، واعتيادياً فان قسماً قليلاً جداً من طاقة الفوتونات المارة خلال النموذج تنتقل الى الفونونات ،وبذلك يكون الطول الموجي للفوتونات الخارجة اطول قليلاً من الطول الموجي للفوتونات الداخلة.

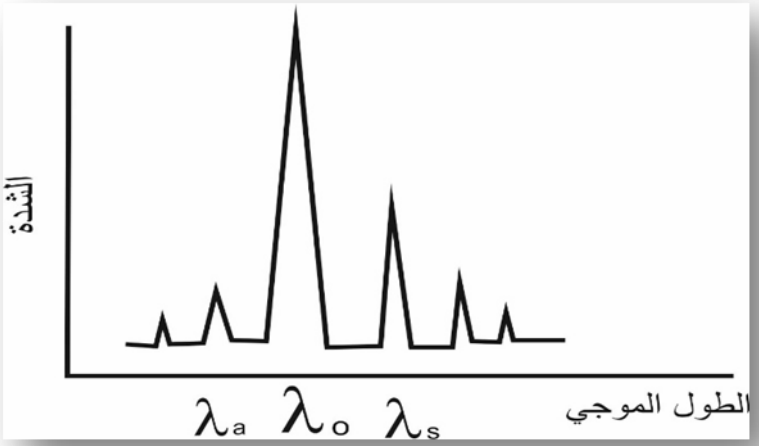
فعندما نتكلم عن الفونونات المتكونة نتيجة لطاقة الفوتونات ن فإننا نتكلم عن الجزء الاساسي من مطياف رامان والذي تنطبق عليه قاعدة ستوك



شكل 16-12 : في مطياف تشتت رامان التلقائي . تفقد قسم من الفوتونات المارة من خلال النموذج قسماً من طاقتها لأنماط التذبذب والدوران للنموذج.

(علاقة تربط بين الطول الموجي للضوء المنبعث مع الضوء الباعث). وفي هذه الحالة يكون الطول الموجي للفوتونات الخارجة اطول من الطول الموجي للفوتونات الداخلة ،اذ يتحول قسم من طاقة هذه الفوتونات الى الفونونات ن ولكن اذا ما كانت هناك اصلاً فونونات(حرارية) في الوسط فيمكن ان تضاف طاقتها الى طاقة الفوتونات، وبذلك يكون الطول الموجي للفوتونات المتشتتة اقصر من الفوتونات الداخلة، ولا تنطبق على هذا الجزء قاعدة ستوك وبذلك يسمى Unti-Stoke . وهذا يكون عادة اضعف من الجزء السابق والذي تنطبق عليه قاعدة ستوك Stoke ، اذ ان هناك اعداداً اقل من الفونونات الحرارية التي تسبب تشتت الضوء، وفي الواقع فالأمر اكثر تعقيداً من ذلك حيث يمكن للفوتون الواحد ان يتفاعل مع اكثر من جزيئة واحدة خلال مروره في الوسط المشتت ، فاذا

ما تشتت الضوء بواسطة جزيئتين ، فاقداً لطاقته وباعثاً لفونون في كل مرة، فان طوله الموجي سيقل مرتين عن المعتاد ،وهذا الضوء الناتج يسمى بمركبة ستوك الثانوية لتشتت رامان ، ويمكن لتجربة تشتت رامان المبينة في الشكل (16-12)ان تغطي كل الطيف للضوء المتشتت كما موضح ذلك في الشكل (16-13).



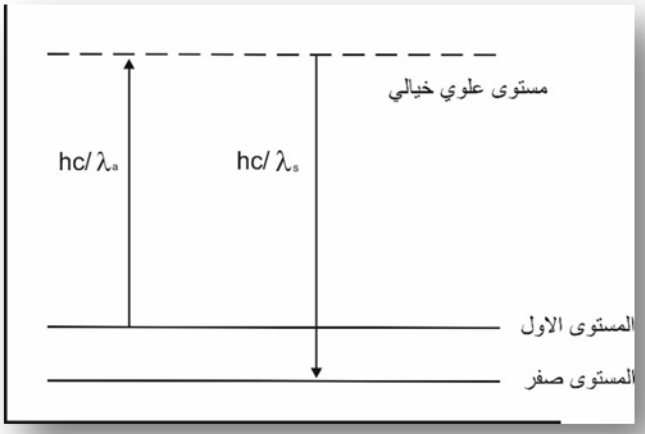
شكل 16-13 :لشعاع رامان المنتشر من نمط تذبذبي عدد من المركبات الخاضعة لقاعدة ستوك ، وعدد من المركبات الاخرى الغير خاضعة.

لنلق الان نظرة على تجربة رامان التلقائية ، والموضحة في الشكل (16-12) حيث يشعع النموذج بضوء الليزر ذي الطول الموجي λ_0 ، وتضاف اليه مركبة من خلال البلورة بطول موجي λ_S . فاذا ما تذكرنا ان الهدف منكل تجربة هو دراسة المستويات الطاقية للنموذج ،فماذا يمكن ان نستنتج من طيف رامان بالنسبة لمستويات الطاقة للنموذج؟.

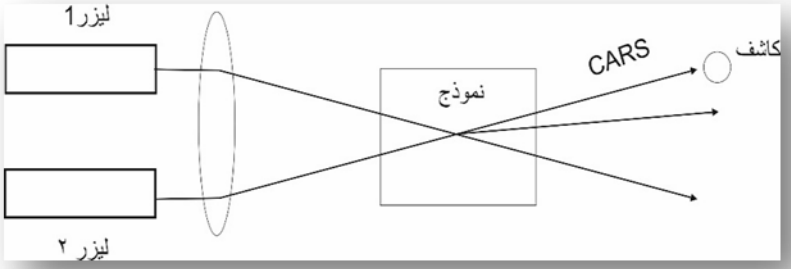
يوضح الشكل (16-14) الجواب على ذلك ، اذ يوضح الشكل المستوى التذبذبي الارضي (المستوي صفر)، والمستوى التذبذبي الاول (المستوى1) ، ومستوى افتراضي ، حيث ان هذا المستوى ليس بمستوى طاقة حقيقي، ولا يمكن ان نجد الجزيئة فيه ، ولا يمكن ان يكون سوى ان نتصور وجوده.

ففي انتشار رامان تمتص الجزيئة الفوتون ذا الطاقة h_c/λ_0 مباشرة، وتطلق الفوتون ذا الطاقة h_c/λ_s ، والطاقة الخارجة والمساوية ل($h_c/\lambda_0 - h_c/\lambda_s$) تبقى في النمط التذبذبي للجزيئة . وهذه العملية موضحة بالسهم الموجه نحو الاعلى (للامتصاص) والموجه نحو الاسفل (للانبعاث) في الشكل (16-14). ومن قياس فرق الطول الموجي في الشكل (16-12) يمكن حساب طاقة المستوى التذبذبي الاول في الشكل (16-14) .

وهذا هو هدف التجربة ، حيث نستنتج منه شكل مستويات الطاقة للجزيئة وفي تجربة انتشار رامان الحقيقية يكون طيف الضوء المتشتت اكثر تعقيداً مما يبدو في الشكل (16-12)حيث تكون هناك مركبات ناتجة من التشتت من المستويات الاعلى من المستوى التذبذبي الاول ، وثمة سبب اخر يؤدي الى تعقيد الطيف الموضح في الشكل (16-12) او ينتج اذا ما كانت الدقة عالية بشكل بحيث يمكن مشاهدة المستويات الدورانية في المستوى التذبذبي ،ولنتذكر ان الشكل (16 -14) هو شكل مبسط للمستويات التذبذبية، ولا يوضح المستويـــات الدورانية. واذا ما



شكل 16-14 : مستوى طاقة تذبذبين في النموذج في الشكل 16-1.فعند حصول تشتت رامان ، فان النموذج يمتص فوتون ذا طاقة مساوية الى hc/λ_0 وثم يطلق فوتون ذا طاقة مساوية الى hc/λ_S .



شكل 16-15 : تجربة انتشار رامان المتشاكهة والغير خاضعة لمبدأ " ستوك " (CARS).

اردنا ان نتذكر تأثير المستويات الدورانية في المستويات التذبذبية فيجب ان نعود الى الفصل الرابع عشر ونلقي نظرة الى مستويات الطاقة

التذبذبية، وتأثير المستويات الدورانية فيها في جزيئة ثاني اوكسيد الكاربون وحتى لوكان انتشار الضوء الساقط نتيجة مستوى تذبذبي واحد ودونان يكون هناك مستوى دوراني ، فلا يكون الطيف الذي نحصل عليه بسيطاً كما في الشكل (16-12) حيث ، كما علمنا سابقاً ان للفوتون الواحد امكانية على التفاعل السابقة والخاضعة لقانون ستوك او تلك التي تكون خاضعة لقانون ستوك . من الضوء المتشتت ،وكما في الشكل (16-13).

وتكلمنا فيما سبق عن تشتت رامان التلقائي وتطبيقاته ،ولكن هناك انواع من تشتت رامان المتشاكه والذي يمكن ان يمتص بواسطة الليزرات ذات القدرة العالية ، وهذه يمكن استخدامها لدراسة المستويات التذبذبية / الدورانية ،والتي لا يمكن الكشف عنها باستخدام تشتت رامان التلقائي. والفرق العملي بين مطياف رامان المتشاكه، ومطياف رامان التلقائي، اذ يتطلب في المتشاكه وجود ليزر اخر ينغم الى طول موجي مختلف ، ففي تشتت رامان المتشاكه يثير الضوء من كلا الليزرين النمط التذبذبي/ الدوراني للجزيئة في النموذج. فعندما تتذبذب الجزيئة ، فالمجال الكهربائي لها ينكمش ويتمدد ،وهذه المجالات المتذبذبة تتفاعل مع الضوء القادم من الليزر الثاني لتعطي شعاعاً متشاكهاً ذا طول موجي ثابت (في تشتت رامان التلقائي يتفاعل شعاع الليزر مع التذبذب الحراري- ليس الليزري- للجزيئة ، وبذلك يكون الشعاع الخارج غير متشاكه). يعد مطياف رامان المتشاكه والذي لا يخضع لقانون ستوك من

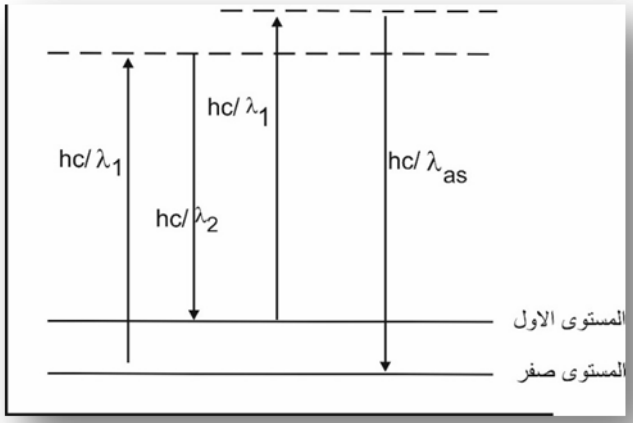
افضل الانواع ويرمز له CARS وهي الاحرف الاولى من Coherent Anti-Stoke Raman Scattering.

ويوضح الشكل (16-15) المخطط للتجربة ،حيث يتقاطع شعاعاً الليزر في النموذج ، ويوضح الشكل (16-16) النتيجة التي نحصل عليها، حيث يسبب كل فوتون من الفوتونين القادمين من كل من الشعاعين، نمط تذبذبياً اذا ما كان فرق الطاقة بين الفوتونين مساوياً الى طاقة النمط، وهذه يتشتت فوتون اخر من الجزيئة المتذبذبة ممتصاً طاقتها التذبذبية كما موضح في السهمين الاخرين في الشكل.

وبذلك يمكن وصف عمل التجربة المبينة في الشكل (16-16) بالشكل التالي: ينغم احد الليزرين او كلاهما للحصول على اشارة في مستقبل ال CARS وعند حصول هذه الاشارة يكون هناك نمط تذبذبي في جزيئة النموذج ذات الطاقة المساوية تماماً لفرق الطاقة بين الفوتونين في الليزرين . وتذكر ان هذا هو هدف المطياف : لمعرفة ماذا يشبه شكل مستويات الطاقة. ماهي مزايا ال CARS والانواع الاخرى من مطياف رامان المتشاكه على مطياف رامان التلقائي ؟ ابرز هذه المزايا ، هو كون الاشارة تخرج على شكل شعاع ، بدلاً من ان تكون بشكل اشعة منتشرة

بكل الاتجاهات كما في التشتت التلقائي ، وهذا يعني ان من السهولة جمع الضوء الناتج كله وتوجيهه نحو الكاشف وبمعنى اخر ان كفاءة هذا

تكون اكبر بكثير من كفاءة المطياف التلقائي، وتصل عملياً الى حد 510 مرات مما نحصل عليه من المطياف التلقائي.



شكل 16 - 16 : في ال CARS ، فوتونا ليزر ينتجان نمط ترددي يؤدي الى تشتت فوتون ليزري ثالث.

الاسئلة

1- هل يمكن ان تجد طريقة لاستخدام مطياف رامان التلقائي لقياس درجة حرارة النموذج؟ (ملاحظة: لماذا تكون المركبات التي لا ينطبق عليها قانون ستوك اضعف من تلك التي تخضع لقانون ستوك؟).

ثبت المصطلحات

Absorption	امتصاص
Acousto-optic	صوتو- بصرية
Active medium	وسط فعال
Alignment	ترصيف ،موزارت
Amplitude	سعة
Aperture	فتحة
Axial modes(longitudinal modes)	انماط طولية
Band width	عرض النطاق
Beam	شعاع
Beam propagation	انتشار الشعاع
Beam splitter	شاطرات الشعاع
Beam waist	تخصر(خصر) الشعاع
Birefringer	بلور ثنائية الانكسار
Birefringent filter	مرشح مزدوج (ثنائي الانكسار)
Boltzmann law	قانون بولتزمان
Bore	قلب
Boundary conditions	شروط حدودية
Bragg cell	خلية براك
Brewster Angle	زاوية بروستر
Brewster Window	شباك بروستر
Brightness	اضاءة
Broadening	انتشار
CARS	مختصر لمقياس رامان المتشاكه وغير الخاضع لقانون ستوك
Cathode	كاثود (مهبط)
Cavity	حجرة ، فجوة
Cavity damping	افراغ الفجوة
Circular polarization	استقطاب دائري
Circulating power	قدرة مدورة

Collision cross section	المقطع العرضي للتصادم
Coherency	تشاكه
Spatial Coherency	تشاكه فضائي
Temporal Coherency	تشاكه زماني
Coherent length	طول التشاكه
Collision broadening	انتشار ناتج من التصادم
Collision cross section	مقطع التصادم
Conservation	حفظ
CW (Continues Wave)	موجة مستمرة
Darkness	سواد
Detraction	حيود
Developing	تطوير ، معالجة كيمياوية
Directionality	اتجاهية
Dispersion	انتشار
Divergence	انفراج
Divergent angle	زاوية الانفراج
Doppler effect	تأثير دوبلر
Duality	ازدواجية
Duty cycle	دورة عمل
Electric discharge	تفريغ كهربائي
Electro-optics	كهرو-بصرية
Efficiency	كفاءة
Emission	انبعاث
Energy	طاقة
Energy levers	مستويات الطاقة
Etalon	اتلون (مرشحة مزدوجة)
E.V (electron volt)	الكترون فولت(وحدة طاقة)
Fabry perot interferometer	متداخلة فبري بيروت
Flash tube	مصباح وهاج(وماض)
Free electron laser	ليزر الالكترون الحر
Frequency	تردد
Frequency tuning	تنغيم التردد
Fringes	اهداب

Bright Fringes	اهداب مضيئة
Dark Fringes	اهداب مظلمة
FWHM (Full Width Half Maximum)	العرض الكامل لنصف الموجة
G - parameters	المعاملات G
Gain	ربح
Gaussian beam	شعاع كاوسي
Greating	محزز
Ground state	المستوى الارضي
Harmonic	توافقية
Second Harmonic	التوافقية الثانية
Higher Harmonic	التوافقيات الاعلى
Holography	هولوغرافي
Homogeneous broadening	انتشار متجانس
Huygens principles	مبدأ هايجنز
Index of refraction	معامل الانكسار
Idler	الموجة الوسيطة
Intensity	شدة
Inhomogeneous	انتشار غير متجانس
Interference	تداخل
Constructive Interference	تداخل بناء
Distractive Interference	تداخل هدام
Interferometer	جهاز قياس التداخل
Kerr cell	خلية كيرل
Lamp dip	حفرة لامب
Lower laser level	مستوى الليزر السفلي
Level	مستوى
Energy Level	مستويات الطاقة
Life time	عمر المستوى
Line width	عرض الخط
Longitudinal modes	انماط طولية
Loss	خسارة

Maser	الميزر
Metastable	غير مستقر
Meter	متر
Miro Meter	مايكرومتر
Peco Meter	بيكومتر
Nano Meter	نانومتر
Mircrowaves	موجات مايكروية
Modulator	محمل
Mode Locking	محدد النمط
Monochromatic	احادي اللون
Monochrometer	مطياف
Nedemuom YAG (Nd-YAG)	النيودميوم/ياك
Non liner optics	البصريات غير الخطية
Normal mode	النمط الاعتيادي
Oscillator	مذبذب
Output	خرج
Phase matching	توافقية الطور
Phonon	فونون
Photon	فوتون
Potential	جهد
Power average	معدل القدرة
Circulating Power	القدرة المدورة
Power density	كثافة القدرة
Maximum power	اقصى قدرة
Population	توزيع
Population inversion	توزيع عكسي
Propagation	انتشار
P.R.F (Pulse Repetition Frequency)	عدد النبضات في الثانية
Pumping	ضخ
Q.M (Quantum Mechanics)	ميكانيك الكم
Q.S(Q. Switching)	تنظيم الكفاءة

Raman Spectroscopy	مطياف رامان
Refractive index	معامل الانكسار
Resonator	مرنان
Resonance	رنين
Road	قضيب
Rotational energy level	مستويات الطاقة الدورانية
Round trip gain	الربح المدور
Round trip loss	الخسارة المدورة
Ruby	الياقوت (الروبي)
Saturation	تشبع
Saturation gain	الربح المشبع
Saturation loss	الخسارة المشبعة
Selection rules	قوانين الانتخاب
Singlet state	المستوى الاحادي
Slit	شق
Double Slit	شق مزدوج
Solid angle	زاوية مجسمة (صلبة)
Spatial	فضائي
Spatial distribution	توزيع فضائي
Spectra width	عرض الطيف
Spontaneous emission	انبعاث تلقائي
Spot size	قطر النقطة (الشعاع)
Stable	متزن
Stability	اتزان
Stimulated emission	انبعاث محفز
TEM (Transvers Electric Mode)	نمط كهربائي مستعرض
Thermal broadening	انتشار ناتج من زيادة درجة الحرارة
Threshold	تشبع
Triplet stats	مستوى ثلاثي
Uncertainty principle	مبدأ اللاحدية
Unsaturated gain	ربح غير مشبع
Unstable	غير متزن

Unstable resonator	مرنان غير متزن
Vibrational energy level	مستوى طاقة تذبذبية
Waist	خصر (اقل قطر للشعاع)
wave	موجة
Wave front	جبهة الموجة
Wave length	الطول الموجي
Wavelets	مويجات
Wave plate	لوح الموجة
Quarter wave plate	لوح ربع طول الموجة
Half wave plate	لوح نصف طول الموجة
Longitudinal wave	موجات طولية
Plane wave	موجة مستوية
Spherical wave	موجة كروية
Transvers wave	موجة مستعرضة
YAG (Yttrium Aluminum Garnet)	الياك
Zeeman effect	تأثير زيمان

فهرست الكتاب

الموضوع	الصفحة
ـ المترجم	1
ـ مقدمة المؤلف	3
ـ مقدمة المترجم	5
ـ الفصل الاول	
نظرة عامة على تكنلوجيا الليزر	7
ـ الفصل الثاني	
طبيعة الضوء	12
الموجات الكهرومغناطيسية	12
ثنائية الجسيم – الموجة	18
ـ الفصل الثالث	
معامل الانكسار، الاستقطاب وشدة الاضاءة	29
انتقال الضوء ـ معامل الانكسار	29
الاستقطاب	34
مركبات الاستقطاب	39
زاوية بروستر	44
شدة الاضاءة	46
ـ الفصل الرابع	
التداخل	50
ما التداخل الضوئي	50

امثلة ضوئية على التداخل الضوئي 53
تجربة يونك ذات الشق المزدوج 54
المتداخلات المتوازية 59
ـ الفصل الخامس
اشعة الليزر 66
احادية اللون 66
الاتجاهية 68
التشاكه 78
ـ الفصل السادس
الذرات ، الجزيئات ومستويات الطاقة 82
مستويات الطاقة الذرية 82
الانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز 86
مستويات الطاقة الجزيئية 88
بعض المعالجات الدقيقة 93
ـ الفصل السابع
توزيع الطاقة والحصول على الليزر 99
توزيع بولتزمان 99
التوزيع العكسي 103
الليزر 106
ليزرات المستويات الثلاث والمستويات الاربعة 112
ميكانيكية الضخ 114
ـ الفصل الثامن

مرنان الليزر 119
لماذا المرنان 120
القدرة المدورة 122
الربح والخسارة 124
المرنان غير المستقر 128
- الفصل التاسع
انماط التذبذب (المرنان) 132
التوزيع الفضائي للطاقة 132
انماط المرنان المستعرضة 136
انتشار الشعاع الكاوسي 139
حالة الاستقرارية 148
الانماط الطولية 152
- الفصل العاشر
تضييق عرض نطاق التردد لشعاع الليزر 159
قياس عروض نطاق التردد لشعاع الليزر 160
مسببات عرض النطاق 164
الاقلال من عرض نطاق شعاع الليزر 169
الليزر احادي النمط 176
- الفصل الحادي عشر
تنظيم معامل النوعية(الكفاءة). 184
قياس خرج الليزر النبضي 184
تنظيم معامل الكفاءة (النوعية 187

طرق التحكم بمعامل النوعية 191
التحكم الميكانيكي بمعامل النوعية 191
التحكم باستخدام الاجهزة الصوتية بمعامل الكفاءة 193
تنظيم معامل الكفاءة باستخدام الاجهزة الكهروبصرية 195
تنظيم معامل النوعية باستخدام الصبغة 200
ـ الفصل الثاني عشر
افراغ الحجرة وتثبيت النمط 204
افراغ الحجرة 205
افراغ الحجرة الجزئي 210
تثبيت النمط (مجال الزمن) 213
تثبيت النمط (مجال التردد) 219
تطبيقات الليزرات المثبتة النمط 221
انواع الليزرات المثبتة النمط 222
ـ الفصل الثالث عشر
البصريات اللاخطية 224
ماهي البصريات اللاخطية 225
توليد التوافقية الثانية 230
تطابقية الطور 234
التوافقيات الاعلى 239
تذبذب المعاملات البصرية 241
ـ الفصل الرابع عشر
انواع الليزرات 247

ليزر الهليوم – نيون 247
الليزرات الجزيئية 251
ليزرات الحالة الصلبة 261
ليزرات الصبغة العضوية 264
الليزرات الايونية 268
ـ الفصل الخامس عشر
الهولوغرافي 273
كيف يعمل الهولوغرافي 273
التطبيقات الصناعية للهولوغرافي 281

ـ الفصل السادس عشر
دراسة الاطياف 285
ما هو علم الاطياف الليزري 285
المطياف الخالي من تأثير دوبلر 290
مطياف رامان 299
ـ ثبت المصطلحات 309
ـ الفهرس 315