**الفصل الخامس**

**خصائص أشعة الليزر**

المقدمة:

ان الدرجة العالية للصفات التي تمتلكها اشعة الليزر جعلت منه مصدراً ضوئياً مثالياً لكثير من التطبيقات الفيزيائية والتقنية، فاشعة الليزر تمتلك صفات تنفرد بها عن اي مصدر ضوئي طبيعي اخر كان او من صنع الانسان، ومن هذه الصفات:

النقاوة الطيفية، الأتجاهية، التشاكه (الزمني والفضائي)، التلألؤ، السطوع، الموالفة وتوليد نبضات شديدة القصر

1. النقاوة الطيفية:

تمتلك اشعة الليزر درجة الية من صفة احادية الطول الموجيولهذا تكون لاشعته نقاوة طيفية عالية. اما الكمية الفيزيائية التي تعبَر عن درجة هذه الصفة فهي تعريض خط الانبعاث (Δνo) او (Δλo) ويعتمد هذا المقدار على المصدر الضوئي ومستوى الطاقة الاعلى للانتقال ، ان تعريض خط الانبعاث الطيفي قد يمتد ليمثل نطاقاً عريضاً لبعض المواد وكذلك يمكن ان تتذبذب بعدد كبير من الصيغ داخل المرنان فتظهر هذه في نتاجه، الا اننا نتمكن من جهة اخرى من الحصول على نقاوة طيفية عالية بتشغيل ليزر الصيغة المفردة، مثل هذا الليزر تكون له نقاوة طيفية اعلى من جميع المصادر الضوئية الاخرى فقد يبلغ عرض خط الانبعاث (Δνo) والذي يتناسب عكسياً مع القدرة، ولحالات مثلى هيرتز واحد لاشعة تبلغ قدرتها واط واحد. عملياً يمكن الحصول على انبعاث ذو تعريض يتراوح تقريباً بين ( 50 – 1000) Hz فمثلاً لليزر تحت ضغط واطئ ليزر الهليوم: نيون يمكن الحصول على انبعاث تعريضه يتراوح (50-500) Hz اي ان النسبة $\frac{∆ν}{ν\_{o}}$ تتراوح بين (10-12-10-13) في حالة التشغيل النبضي يحدد تعريض خط الانبعاث بمقلوب امد النبضة (τp) فمثلاً في ليزر نبضي تكون :

(τp)=10-8 sec Δνo=100 MHz

من الواضح ان تتناسب درجة صفة احادية الطول الموجي تناسباً عكسياً مع عدد الصيغ التذبذبة.

1. الأتجاهية:

قد تكون هذه الصفة من أكثر صفات الليزر التي اعطت له مكانته واهميته. ان اجهزة الليزر (عدا ليز اشباه الموصلات) تبعث ضياءاً ذا درجة عالية من صفة الاتجاهية وحزماً ضوئية تتصف بزوايا انفراج صغيرة تقدر عادةً بحدود بضع (m rad) تعادل (10-3 زاوية نصف قطرية). تكمن اهمية هذه الصفة في امكانية تجميع الطاقة التي تحملها حزمة الليزر بسهولة وتركيزها على مساحة صغيرة، في حين يكون انبعاث طاقة المصادر التقليدية في جميع الاتجاهات (زاوية مجسمة مقدارها 4π من الزوايا نصف قطرية المجسمة) ولذا لا يمكن تحقيق تجميع كفوء للطاقة من المصادر التقليدية.

يعبر عن درجة صفة الاتجاهية بمقدار زاوية الانفراج وهي الزاوية المستوية المحصورة بين حافة الحزمة ومحورها، ولتعيين زاوية الانفراج Φ (بالتقدير الدائري) حسب قانون الحيود بالعلاقة:

$Φ=k\frac{λ}{D}$ ………(1)



شكل (1) زاوية الانفراج، الزاوية المستوية Φ بين حافة الحزمة ومحورها، اما حافة الحزمة فهو الموضع الذي تهبط عنده شدة الحزمة الى 1/e من قيمتها عند المحور

حيث D قطر فتحة الليزر و λ طول الموجة للاشعة، يكون المعامل k في معادلة الحيود من فتحة دائرية الشكل بالمفدار 1.22 ولتعيين قيمة k بدقة لحزمة ليزر يلزم معرفة طبيعة الحزمة وتوزيع الشدة لها، مثلاً ليزر يتذبذب بالصيغة TEMoo والتوزيع كاوسي الشكل فان قيمة k في هذه الحالة تساوي $\frac{2}{π}$ .



شكل (2) حزمة كاوسية حيث تهبط الشدة مع المسافة عن محور الحزمة وفق دالة اسية

يمكن ايضاً ربط زاوية الانفراج *Φ* بمقدار بقعة الليزر عند منطقة التخصر ωo بالعلاقة :

$Φ=\frac{λ}{πωo}=\frac{2}{π}\frac{λ}{2ωo}=0.64\frac{λ}{2ωo}$ …………(2)

وهذا التعبير يمثل نموذج حيود بفتحة تساوي *2ωo* بدلاً من D.

ان انفراج حزمة الليزر يميل الى الزيادة بزيادة قدرة النتاج وزيادة صيغ التذبذب للحزمة.

يمكن تقليص زاوية الانفراج لحزمة الليزر الى مقدار اصغر عن طريق توسيع الحزمة ويتم ذلك بمرور الحزمة بالاتجاه المعاكس من خلال تلسكوب، ان الحزمة ستتوسع بالمقدار f2/f1 وبهذا فان الانفراج الذي بتناسب عكسياً مع قطر الحزمة قبل وبعد استخدام المسدد كالاتي:

$\frac{D\_{1}}{D\_{2}}=\frac{f\_{1}}{f\_{2}}=\frac{Φ\_{1}}{Φ\_{2}}$ ……….(3)



شكل (3) رسم توضيحي يبين كيفية تسديد حزمة الليزر بواسطة تلسكوب قطر عدسته العينية D1 وبعدها البؤري f1 وقطر عدسته الشيئية D2 وبعدها البؤري f2.

ان صفة الاتجاهية لحزمة الليزر تجعل منه اجهزة دقيقة لتطبيقات عديدة ذات علاقة بالترصيف في مشاريع هندسية كمشاريع مد الانابيب والجسور والانفاق ، تدقيق وتشكيل هياكل الطائرات والسفن وغيرها من المشاريع التي تحتاج ترصيفاً ولمسافات طويلة.

1. التشاكه

لاشعة الليزر درجة عالية من صفة التشاكه، اي ان له درجة عالية من التشاكه الزمني والفضائي. اما المصادر التقليدية فيقال انها مصادر ضوئية غير متشاكهة.

يمكن ان نتصور بان ضوء الليزر عبارة عن امواج ذات تردد يقع تقريباً في حدود 1014Hz (بطول موجة تقدر ببضع مايكرومتر) لكي تتصف مثل هذه الامواج بصفة التشاكه يجب ان تحقق شرطان، الاول: ان يكون لها تقريباً قيمة واحدة للتردد، اي ان انتشار التردد حول هذه القيمة (تعرض الخط الطيفي لها) يكون صغيراً فاذا ما توفر هذا الشرط فيقال ان الضوء له درجة عالية من التشاكه الزمني، والثاني: يجب ان تحافظ جبهة الموجة على شكلها مع الزمن فاذا ما توفر هذا الشرط فيقال ان الموجة لها تشاكه فضائي ولكي يكون المصدر الضوئي ذو تشاكه تام يجب ان يكون له تشاكه زمنيتام وتشاكه فضائي تام.

* + 1. التشاكه الزمني

لكي ندرك مفهوم التشاكه الزمني لاشعة الليزر وعلاقته بتعريض خط الانبعاث الذي يمثل نتاجها لابد من ان نرجع الى عملية انبعاث الفوتونات من المستوى الاعلى الى المستوى الاوطأ للانتقال.

ان الذرة ان الذرة تبعث فوتوناً في زمن محدود وهو مايسمى متوسط زمن عمر المستوى الاعلى للانبعاث ($τ$) ولذرة بعيدة عن التأثيرات الخارجية يكون هذا الزمن في حدود (10-8 sec) لذا يمكن ان نتصور بان قطار الموجة الذي ينبعث خلال هذا الزمن يبدأ بشدة تساوي صفر من المستوى الاعلى وينتهي الى الصفر بوصول الذرة الى المستوى الاوطأ، هذا بالنسبة الى ذرة واحدة، ونظراً لتواجد اعداد كبيرة من الذرات في المستوى الاعلى حيث تضخ اليه باستمرار فهناك اعداداً كبيرة من هذا النموذج من الموجة، فلو فرضنا باننا نتمكن من مراقبة السعة والطور لمثل هذا القطار من الموجة فان الجهاز الذي سنوفره فرضاً سيكون قادراً على تتبع المراقبة لفترة لاتتجاوز الزمن ($τ$) يدعى هذا الزمن بزمن التشاكه للموجة.



شكل (4) قطار الموجة ضمن غلافه بزمن تشاكه يساوي ($τ$)

من هنا يتبين بان التشاكه الزمني يرتبط مباشرة بصفة احادية الموجة حيث يكون للموجة الكهرومغناطيسية التي لها زمن تشاكه ($τ$) تعريض يساوي ($τ$) اي ان:

$∆ν\_{o}=\frac{1}{τ}$ ………….(4)

فكلما كان متوسط زمن العمر اكبر كلما كان زمن التشاكه اطول. اما مسافة التشاكه (ζ) والتي تناظر هذا الزمن فتعطى بالعلاقة:

$ζ=c τ$ ……….(5)

حيث (c) سرعة الضوء، وان:

$ζ=\frac{c}{∆ν\_{o}}$ ………………..(6)

اما اذا كانت الذرة المحرضة تبعث قوتوناً بحضور ذرات او جزيئات اخرى (تعريض الضغط او التصادم) وكذلك تحت تأثير حركة ذرات او جزيئات اخرى (تعريض دوبلر) فان زمن التشاكه سيكون اصغر وبالتالي مسافة التشاكه ايضاً فقد تصل قيمة (ζ) الى اجزاء الميليمتر.

يمكن ان تكون مسافة التشاكه بضع مئات من الكيلومترات إلا ان انواع الليزر المتوفرة تجارياً يكون لها نتاج تتراوح مسافة التشاكه له من يضع سنتمترات الى عشرات الامتار.

* + 1. التشاكه الفضائي

في هذه الحالة، ليس من المهم مراقبة السعة والطور للموجة في موضع ما ضمن فترة زمنية معينة ولكننا نود مراقبة الطور للنقاط الواقعة على جبهة واحدة للموجة فاذا بقي فرق الطور بين اي نقطتين على الجهة الواحدة ثابتاً مع الزمن فيقال ان للموجة تشاكه فضائي، عموماً يكون هذا الزمن غير محدد لذلك يكون التشاكه الفضائي لنتاج الليزر تام تقريباً وعليه تكون مسافة التشاكه المناظرة غير محدودجة ايضاً على العكس من التشاكه الزمني الذي قد تكون مسافة التشاكه له قصيرة محدودة.

ان سبب كون المصادر التقليدية غير متشاكهة او ذي تشاكه ضعيف يقع في عملية انبعاث الفوتون ففي هذه المصادر يكون الانبعاث ذاتياً عشوائياً لاترتبط الموجات التي تمثل هذه الفوتونات ببعضها بعلاقة طور محددة في حين تكون الفوتونات المنبعثة نتيجة عملية الانبعاث المحفز مترابطة بشكل محدد لذا تكون الموجات التي تمثلها متحدة في الطور.

واخيرا يمكن ان نلخص التشاكه الزمني والفضائي كما يلي:

عندما نتكلم عن التشاكه الزمني فاننا نتكلم عن طور الموجة الكهرومغناطيسية في نقطة معينة في زمن (t) وبعد فترة زمنية لاحقة ($τ$) فاذا بقي فرق الطور ثابتاً ولأي زمن (t) فيقال بان للموجة تشاكه زمني للمدة ($τ$) او ان ($τ$) هو زمن التشاكه للموجة وقد يعبر عن التشاكه الزمني بمسافة تمثل طول قطار الموجة المناظر لزمن التشاكه.

من جانب آخر يتعلق التشاكه الفضائي بالطور النسبي لنقطتين واقعتين على جهة واحدة للموجة الكهرومغناطيسية فان بقي فرق الطور بين هاتين النقطتين ثابتاً مع الزمن وحدث هذا لاية نقطتين واقعتين على هذه الجبهة فيقال بان للموجة تشاكه فضائي خلال هذا الزمن او للمسار المناظر له.

1. التلألؤ

وهي ظاهرة خاصة بضوء الليزر حيث يمكن مشاهدة نموذج التلألؤ عند النظر الى الضوء المشتت عن سطح خشن كالجدار مثلاً او من خلال مشتت شفاف للضوء. يمكن وصف هذا النموذج للضوء المشتت على انه متألف من مجموعة عشوائية من بقع مضئة براقة وبقع سوداء داكنة فتظهر للمشاهد كنتوآت او حبيبات براقة متلألئة عشوائية التوزيع على خلفية داكنة.

ان السطح الخشن المضاء يمكن ان نعتبره كمجموعة كبيرة من مصادر نقطية وان الموجات المنبعثة عن هذه المصادر تختلف فيما بينها وبشكل عشوائي في الطور والسعة (غير متشاكهة) ولكن عندما يضاء مثل هذا السطح يضوء ليزر فان جميع هذه المصادر النقطية ستبعث موجات متشاكهة ولهذا فانها ستولد نموذج تداخل عشوائي في جميع النقاط مابين السطح والمشاهد لذا فان هذا التلألؤ لاينحصر عند السطح فقط.



شكل (5): (a) نموذج التلألؤ (b) اساس تكون هذا النموذج

تقع اهمية نموذج التلألؤ في موضوع التصوير المجسم حيث يمثل الهولوغرام صورة متأتية عن نموذج التلألؤ للسطح الطلوب تصويره.

1. السطوع:

يعتبر الليزر من المصادر الساطعةوذات شدة ضوئية عالية،فليزر الهليوم : نيون المختبري الذي قدرته لاتتجاوز ماي واط واحد يمثل مصدراً ضوئياً اسطع من الشمس، ولتوضيح هذه الحقيقة كالاتي: ان صفة السطوع كمية تعتمد على كيفية تسديد الضوء المنبعث من المصدر فضائياً وكذلك قدرة نتاج المصدروأخيراً استجابة الكاشف (العين مثلاً) للضوء.

للمقارنة بين سطوع المواد المصادر المختلفة، يؤخذ بنظر الاعتبار كيفية انتشار الضوء فضائياً من المصدر الضوئي، فالمصادر التقليدية والتي تستخدم للانارة تبعث الطاقة الى جميع الاتجاهات ضمن زاوية مجسمة مقدارها 4π زاوية نصف قطرية مجسمة.

في حين ينبعث ضوء الليزر ضمن حزمة ضيقةذي انفراج بسيط، لذا عند قياس الضوء يتم التعامل مع كمية تعبر عن شدة الضوء المنبعث خلال وحدة الزاوية المجسمة بدلاً من مفهوم شدة الضوء، هذه الكمية يطلق عليها بالسطوع يعرف سطوع مصدر ضوئي على انه مقدار الطاقة المنبعثة في وحدة الزمن ولوحدة المساحة من السطح ضمن وحدة الزاوية المجسمة، فاذا فرضنا بان (dA) تمثل قطعة صغيرة من سطح المصدر حول الموضع (O)، وان قدرة الضوء المنبعثة عن هذه المساحة خلال زاوية مجسمة مقدارها (dΩ) وحول اتجاه العمود (OO') على قطعة السطح المنتخبة هي dp فيمكن التعبير عن سطوع المصدر (B) عن الوضع (O) بالعلاقة:

$B=\frac{dp}{cosθ dA dΩ}$ …………(7)



شكل (6): سطوع السطح عند الموضع (O) لمصدر اشعاع كهرومغناطيسي

يقدر السطوع بوحدة (Watt/m2.sr) زاوية نصف قطرية مجسمة.

لمصدر ضوئي ذو قدرة بضع ملي واط فان سطوعه يفوق سطوع اسطع مصدر ضوئي تقليدي ويرجع سبب ذلك الى الدرجة العالية من صفة الاتجاهية التي تتميز بها حزمة الليزر.

1. الموالفة:

يمكن موالفة نتاج بعض انواع الليزر لغرض الحصول على اطوال موجية مختلفة تقع ضمن نطاق الانبعاث للوسط الفعال لليزر.

فمثلاً في الليزر السائل (ليزر الصبغة) يمكن موالفة نتاجه ضمن نطاق عريض من طول الموجة، يمكن ان يمتد ليشمل كامل المدى المرئي للاشعاع الكهرومغناطيسي.

1. نبضات شديدة القصر:

يمكن الحصول من ليزر مستمر ثابت الشدة (CW) او من ليزر نبضي على ليزر يعمل بنبضات ذي امد اقصر وقدرة ذروة اعلى باستخدام تقنية اقفال الصيغة يمكن الحصول على نبضات شديدة القصر وبحدود بيكو ثانية.

نعلم من الالكترونيات، باننا نتمكن من الحصول على نبضات في حدود نانوثانية، في حين غدا بالامكان باستخدام الليزر الحصول على نبضات اقصر بحوالي الف مرة حيث امكن توليد نبضات بحدود اعشار بيكوثانية. ان مثل هذا الامد القصير سيسمح بقياس زمن في هذا المدى او اقصر طالما ان سرعة الضوء تساوي (3x108 m/s) فالمسافة التي تقطعها نبضة بهذا القصر هي 0.3 mm فقط.