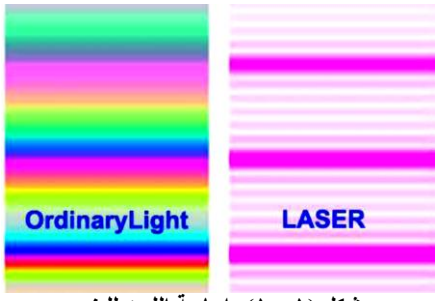
١-٦) خواص الليزر Laser Properties

يتميز ضوء الليزر على أنواع الضوء الصادر عن المصادر الطبيعية كالشمس والمصابيح التقليدية والصناعية كالمصابيح الكهربائية بعدة خصائص مهمة تؤهله لاستخدامه في كثير من التطبيقات، ومن أهم هذه الخصائص ما يأتي:

١) احادية اللون Monochromaticity:

احادية الطول الموجي (او احادية التردد) تعني ان ضوء الليزر له طول موجي واحد فقط وتردد منفرد.



شكل (١-١٠): احادية اللون لليزر

حيث أن ضوء الليزر يتكون من حزمة ضيقة جداً من الترددات الضوئية بعكس أنواع الضوء الأخرى التي تتكون من طيف واسع جداً من الترددات ولذا فإنها تبدو للعين كضوء أبيض يحتوي على جميع ألوان الطيف المرئي بينما يبدو ضوء الليزر بلون واحد فقط عالي النقاء. وتستغل هذه الخاصية في استخدام ضوء الليزر كحامل للمعلومات بدلا من الحاملات الراديوية خاصة في أنظمة اتصالات الألياف الضوئية التي تتطلب وجود مصادر ضوئية أحادية اللون أي أن عرض نطاق ترددات ضوئها غاية في الصغر.

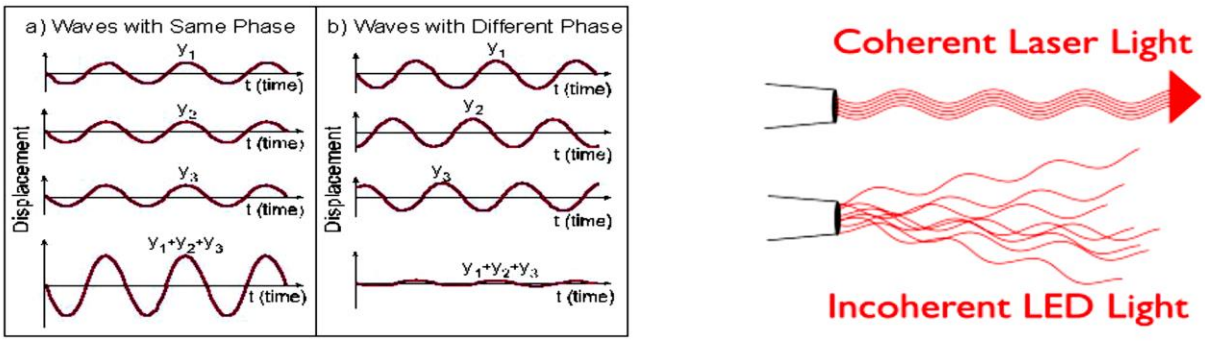
٢) النقاوة الطيفية Spectral Purity

ان لأشعة الليزر نقاوة طيفية عالية نظراً لامتلاكها صفة احادية الطول الموجي، اما الكمية الفيزيائية التي تعبر عن درجة النقاوة الطيفية فهي تعريض خط الانبعاث ΔV_o ويعتمد هذا المقدار على المصدر الضوئي ومستوى الطاقة الاعلى للانتقال. ان تعريض خط الانبعاث الطيفي يتناسب عكسياً مع القدرة، قد يمتد ليمثل نطاقاً عريضاً لبعض المواد وكذلك يمكن ان تتذبذب بعدد كبير من الصيغ داخل المرنان. في حالة التشغيل النبضي يحدد تعريض خط الانبعاث بمقلوب امد النبضة τ_p، فمثلاً في ليزر نبضي يكون:

$$\tau_p = 10^{-8}\ sec \quad , \quad V_o = 100\times10^{6}\ Hz$$

٣) التشاكه (الترابط) Coherence:

يعني ان الفرق بين اي نقطتين على موجة شعاع الليزر يكون ثابت عند حركة الشعاع زمانياً ومكانياً. ان الترددات التي يتكون منها شعاع الليزر لها نفس الطور ونفس الاستقطاب وتستغل هذه الخاصية للحصول على أشكال تداخلية لا يمكن الحصول عليها من خلال استخدام أنواع الضوء الأخرى. ويستخدم التداخل الضوئي في أشعة الليزر في تطبيقات لا حصر لها كما في قياس المسافات والتداخل الضوئي والسرعات ودراسة تركيب المواد والتصوير ثلاثي الأبعاد.



شكل (١-١١): تشاكه ضوء الليزر

لكي تتصف الموجات الضوئية بصفة التشاكه يجب ان يتحقق شرطان هما:

- الشرط الاول: ان يكون لها تقريباً قيمة واحدة للتردد، أي ان انتشار التردد حول هذه القيمة (تعريض الخط الطيفي لها) يكون صغيراً جداً، فإذا توفر هذا الشرط فإن الموجة لها تشاكه زمني.
- الشرط الثاني: ان تحافظ جبهة الموجة على شكلها مع الزمن، فإذا توفر هذا الشرط فإن الموجة لها تشاكه فضائي.

ولكي يكون المصدر الضوئي ذو تشاكه تام يجب ان يكون متشاكه زمانياً ومكانياً.

✓ <u>التشاكه الزمني</u>: تبعث الذرة فوتوناً في زمن محدود وهو ما يسمى بمتوسط زمن عمر المستوى الاعلى للانبعاث τ، ولذرة بعيدة عن التأثيرات الخارجية يكون هذا الزمن في حدود (10^{-8} sec) لذا يمكن ان نتصور ان الموجة تنبعث خلال هذا الزمن بشدة ابتدائية تساوي صفر من المستوى الاعلى وينتهي الى الصفر بالوصول الى المستوى الاوطأ. ولوجود اعداد كبيرة من الذرات في المستوى الاعلى (بسبب استمرار الضخ اليه) فإن هناك اعداد كبيرة من نماذج هذه الموجة. ولو فرضنا امكانية مراقبة السعة والطور لمثل هذه الموجات فإن تتبع هذه المراقبة سيكون لفترة لا تتجاوز الزمن τ_c والذي يسمى بزمن تشاكه الموجة. يرتبط التشاكه الزمني مباشرة بخاصية احادية الموجة حيث يعطى تعريض خط انبعاث الموجة التي تمتلك زمن تشاكه مقداره τ_c بالعلاقة الآتية:

$$\Delta V_0 = \frac{1}{\tau_c} \quad \text{..... (1-9)}$$

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

$$\zeta = c\tau_c \quad \text{..... (1-10)}$$

$$\zeta = \frac{c}{\Delta V_0} \quad \text{..... (1-11)}$$

حيث ان تمثل c سرعة الضوء. اما اذا كانت الذرة المحفزة تبعث فوتوناً بوجود ذرات وجزيئات اخرى، فإن زمن التشاكه سيكون اصغر، وبالتالي فإن مسافة التشاكه قد تصل الى اجزاء الميليمتر. يمكن ان تكون مسافة التشاكه بضع مئات من الكيلومترات، الا ان انواع الليزر المتوفرة تجارياً يكون لها نتاج تتراوح مسافة التشاكه له من بضع سنتيمترات الى عشرات الامتار.

- ✓ **التشاكه الفضائي: في هذه الحالة فإنه ليس من المهم مراقبة السعة والطور للموجة في موضع ما ضمن فترة زمنية معينة، ولكن المهم هو مراقبة الطور للنقاط الواقعة على جبهة واحدة للموجة، فإذا كان فرق الطور بين اي نقطتين على الجبهة الواحدة ثابتاً مع الزمن فإن للموجة تشاكه فضائي. ان زمن هذا النوع من التشاكه غير محدد لذلك يكون التشاكه الفضائي لنتاج الليزر تام تقريباً، وعليه تكون مسافة التشاكه المناظرة غير محدودة ايضاً على العكس مما في حالة التشاكه الزمني الذي تكون مسافة التشاكه له محدودة فقد تكون قصيرة جداً.**

ان سبب كون المصادر التقليدية غير متشاكهة او ذات تشاكه ضعيف هو عمليات انبعاث الفوتون، ففي هذه المصادر يكون الانبعاث ذاتياً (تلقائياً) عشوائياً، ولا ترتبط الموجات التي تمثل هذه الفوتونات ببعضها بعلاقة طور محددة. اما الفوتونات المنبعثة نتيجة عمليات الانبعاث المحفز فتكون مترابطة بشكل محدد، لذلك فإن الموجات التي تمثلها تكون متحدة الطور.

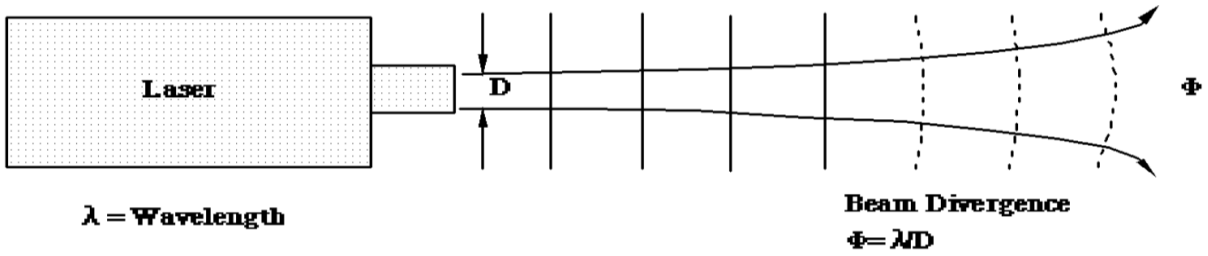
وأخيراً يتضح مما سبق فيما يخص التشاكهين ان التشاكه الزمني مرتبط بطور الموجة الكهرومغناطيسية في نقطة معينة في زمن t، وبعد فترة زمنية لاحقة τ، فإذا بقي فرق الطور ثابتاً ولأي زمن t فيقال بأن للموجة تشاكه زمني للمدة τ، أو ان τ هو زمن التشاكه للموجة، وقد يعبر عن التشاكه الزمني بمسافة تمثل طول التشاكه المناظر لزمن التشاكه. من جانب آخر يتعلق التشاكه الفضائي بالطور النسبي لنقطتين واقعتين على جهة موجة واحدة للموجة الكهرومغناطيسية، فإذا بقي فرق الطور بين هاتين النقطتين ثابتاً مع الزمن فيقال بأن للموجة تشاكه فضائي خلال هذا الزمن او للمسار المناظر له.

٤) الاتجاهية Directionality:

وهي أن شعاع الليزر له زاوية انفراج غاية في الصغر بحيث يمكنه أن يسير لمسافات طويلة دون أن تتشتت طاقته، فعلى سبيل المثال فإن زاوية انفراج شعاع ليزر هيليوم-نيون تبلغ جزئين من عشرة آلاف جزء من الدرجة. إن قطر شعاع هذا الليزر يبلغ ملليمترين عند خروجه من الليزر، بينما سيكون قطره خمسة ملليمترات فقط بعد أن يسير ألف كيلومتر. وتتحدد زاوية انفراج شعاع الليزر من عدة عوامل أهمها: (عرض الشعاع عند خروجه من المصدر وطول موجة الاشعاع) حيث تتناسب عكسياً مع عرض الشعاع الابتدائي وطردياً مع طول الموجة أي أن الزاوية تقل مع زيادة عرض الشعاع ونقصان طول الموجة. لضوء مثالي التشاكه بحزمة قطرها D فإن زاوية انفراج حزمته هي Φ بسبب الحيود. يمكن القول انه يعبر عن الاتجاهية بمقدار زاوية الانفراج (وهي الزاوية المحصورة بين حافة الحزمة ومحورها) ومن قانون براغ نجد:

$$\Phi = \frac{\beta\lambda}{D} \quad \text{.....(1-12)}$$

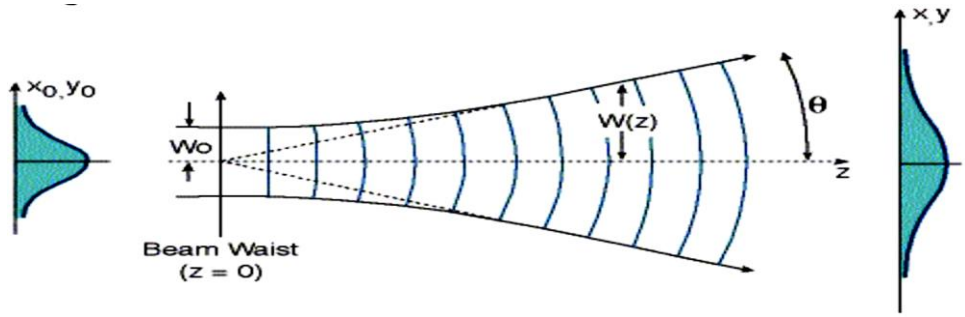
حيث λ تمثل الطول الموجي لحزمة الليزر، β معامل يعتمد على توزيع السعة للضوء المستخدم وقطر حزمته وتقع قيمته ضمن مدى العدد (1). تستغل خاصية الاتجاهية في تطبيقات كثيرة كقياس المسافات البعيدة والقريبة على السواء والتأثير على الأهداف بدقة متناهية.



شكل (١-١٢): زاوية انفراج حزمة الليزر

يمكن ربط Φ بمقدار بقعة الليزر Spot عند منطقة التخصر بتعبير يمثل نموذج حيود بفتحة تساوي $(2\omega_o)$ بدلاً من D:

$$\Phi = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} = \frac{2\lambda}{2\pi\omega_0} = 0.64\frac{\lambda}{2\omega_0} \quad \text{.....(1-13)}$$



شكل (١-١٣): هبوط شدة الحزمة مع زيادة البعد عن محورها

ان انفراج حزمة الليزر يميل الى الزيادة بزيادة قدرة الانتاج وزيادة صيغ التذبذب للحزمة. يمكن تقليص زاوية انفراج الحزمة الى مقدار اصغر وذلك بتوسيع الحزمة، ويتم ذلك بمرورها بالاتجاه المعاكس من خلال تلسكوب. ان الحزمة ستتوسع بالمقدار (f_1/f_2)، لذا فإن الانفراج الذي يتناسب عكسياً مع قطر الحزمة قبل وبعد استخدام مسدد التلسكوب سيكون كالآتي:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad \text{..... (1-14)}$$

شكل (١-١٤): مخطط توضيحي يبين كيفية تسديد حزمة الليزر بواسطة تلسكوب قطر عدسته العينية D_1 وبعدها البؤري f_1 وقطر عدسته الشيئية D_2 وبعدها البؤري f_2

ان صفة الاتجاهية لحزمة الليزر مهمة لاستخدامه في اجهزة دقيقة لتطبيقات عديدة ذات علاقة بالترصيف في مشاريع هندسية كثيرة كمشاريع مد الانابيب والجسور والانفاق وتدقيق شكل هياكل الطائرات والسفن وغيرها من المشاريع التي تحتاج ترصيفاً ولمسافات طويلة.

❖ مثال: جد زاوية الانفراج لليزر طول موجته (1.06×10^{-3} mm) وقطر حزمته (3 mm) ومعامل انتشاره (1.1).

الحل:

$$\Phi_d = \frac{1.1\times1.06\times10^{-3}}{3} = 3.89\times10^{-4}$$

٥) السطوع Brightness:

يعبر عن صفة السطوع بكونها كمية تعتمد على كل من كيفية تسديد الضوء المنبعث من المصدر فضائياً وقدرة انتاج المصدر واستجابة الكاشف للضوء. للمقارنة بين سطوع المواد للمصادر المختلفة يؤخذ بنظر الاعتبار كيفية انتشار الضوء فضائياً من المصدر الضوئي، فالمصادر التقليدية التي تستخدم للإنارة تبعث الطاقة الى جميع الاتجاهات ضمن زاوية مجسمة مقدارها 4π، في حين ينبعث ضوء الليزر ضمن حزمة ضيقة بانفراج بسيط.

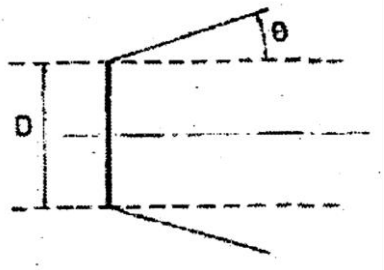
يعرف السطوع B بأنه القدرة المنبعثة P عن وحدة مساحة السطح A لكل وحدة زاوية مجسمة Ω:

$$B = \frac{P}{A\Omega} \quad \text{.....(1-15)}$$

اما سطوع حزمة ليزر قدرتها P ومساحة مقطعها الدائري $\pi D^2/4$ (حيث ان D قطر مقطعها الدائري) والزاوية المجسمة لإصدارها $\pi\Phi^2$ (حيث ان Φ زاوية انفراج الحزمة وهي صغيرة جداً) فيمكن حسابه من المعادلة:

$$B = \frac{4P}{(\pi D\lambda)^2} \quad \text{.....(1-16)}$$

ان كثافة قدرة شعاع الليزر في وحدة المساحة عالية جداً وتسمى بالشدة Intensity.



شكل (١-١٥): سطوع حزمة ليزر

٦) التلألؤ Luminescence:

يمكن مشاهدة نموذج التلألؤ عند النظر الى الضوء المشتت عن سطح خشن كالجدار مثلاً، ويكمن وصف هذا النموذج للضوء المشتت على انه مكون من مجموعة عشوائية من بقع مضيئة براقة وبقع سوداء داكنة. يمكن اعتبار السطح الخشن بأنه مجموعة من الكبيرة من مصادر نقطية، وان الموجات المنبعثة عن هذه المصادر تختلف فيما بينها وبشكل عشوائي في الطور والسعة (غير متشاكهة). ولكن عندما يضاء هذا السطح بضوء ليزر فإن جميع هذه المصادر النقطية ستبعث موجات متشاكهة، ولهذا فغنها ستولد نموذج تداخل عشوائي في جميع النقاط ما بين السطح والمشاهد. لهذه الخاصية اهمية في موضوع التصوير المجسم حيث يمثل الهولوغرام احد التطبيقات التي تعتمد على خاصية التلألؤ للسطح المطلوب تصويره.

٧) الشدة العالية High Intensity:

إن شعاع الليزر له مقطع عرضي صغير جدا قد لا يتجاوز في بعض أنواعه عدة مايكرومترات مربعة، وبما أن جميع الطاقة الضوئية الصادرة عن الليزر رغم قلتها تتركز ضمن هذا المقطع الصغير فإنه بالإمكان الحصول على شدة إضاءة قد تزيد بملايين المرات عن شدة الضوء الصادر عن الشمس أو المصابيح الكهربائية ولهذا فيمكن لشعاع الليزر أن يسير لمسافات طويلة جدا. وتستغل هذه الخاصية في حفر وقطع ولحام المواد بدقة كبيرة وفي إجراء العمليات الجراحية ومعالجة كثير من أمراض العيون والجلد.

٨) توازي الحزم الضوئية Collimation:

ان التشتت في حزمة الليزر يكون معدوماً كما انها بطبيعتها تكون مركزة دون الحاجة لاستخدام عدسات، وقطرها قد يصل لقطر الدبوس، ويمكنها ان تنتقل الى مسافات طويلة بفقد قليل في الطاقة خصوصاً اذا انعدم وجود مواد ممتصة في مسارها.

٩) الموالفة Tuning:

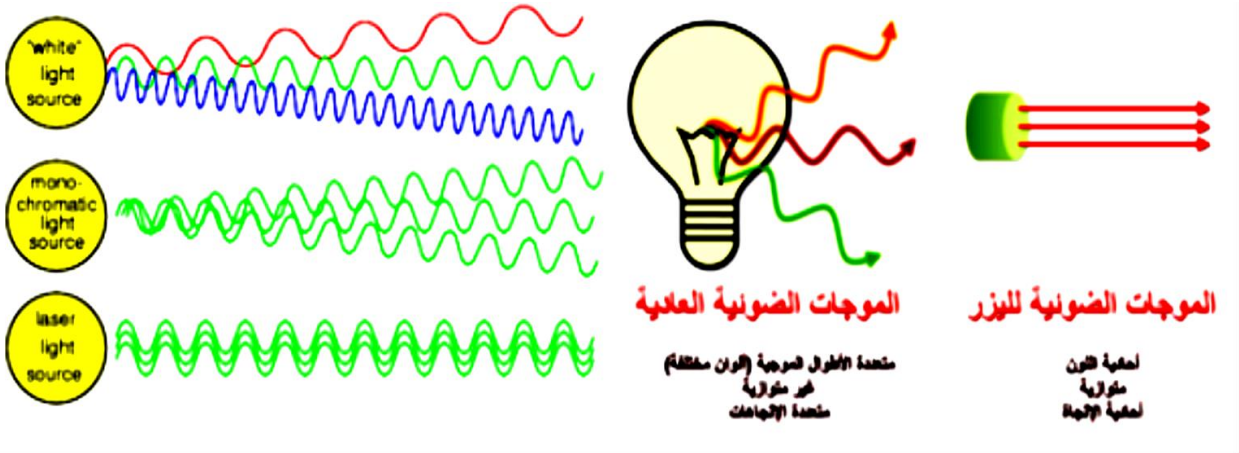
يمكن موالفة نتاج بعض انواع الليزر لغرض الحصول على اطوال موجية مختلفة تقع ضمن نطاق الانبعاث للوسط الفعال لليزر، فمثلاً في الليزر السائل (ليزر الصبغة) يمكن موالفة نتاجه ضمن نطاق عريض يمكن ان يمتد ليشمل كامل المدى المرئي للإشعاع الكهرومغناطيسي.

١٠) نبضات شديدة القصر Ultra-Short Pulses:

بالإضافة الى الليزر المستمر CW ثابت الشدة فإنه يمكن الحصول على ليزر نبضي ومن الممكن ان يعمل بنبضات ذات امد قصير جداً وقدرة ذات ذروة اعلى باستخدام تقنية اقفال الصيغة، حيث يمكن الحصول على نبضات شديدة القصر وبحدود بيكو ثانية. لنبضات الليزر اشكالاً متعددة ومعدلات تكرار مختلفة، ويمكن التحكم بجهاز الليزر بحيث يتم إطلاق الضوء على شكل نبضات بمعدلات محددة ويمكن كذلك التحكم بعرض النبضة الضوئية، ومن خلال تقليل عرض النبضة فإنه يمكن الحصول على شدة ضوء عالية جداً ولكن لفترات زمنية قصيرة جداً مهما كانت كمية الطاقة التي تحملها النبضة، وتستخدم هذه الخاصية في تطبيقات لا حصر لها كإذابة أو تبخير المعادن أو قطع ولحام مختلف أنواع المواد أو إجراء العمليات الجراحية أو تسريع التفاعلات الكيميائية وحتى النووية.

١١) اشعة متراصة Close Beam:

بمعنى أنها تبقى محافظة على سماكتها حتى بعد أن تقطع مسافة معينة. ويؤدي تراص وتجانس أشعة الليزر الى امتلاكها كثافة عالية من الطاقة. يمكن أن ينتج ضوء الليزر تأثيرات نسيجية مختلفة اعتماداً على طول الموجة وكثافة الطاقة، ومدة التعرض، والخواص الامتصاصية للنسيج المستهدف.



شكل (١-١٦): تراص حزمة الليزر

ومن خصائص الليزر في المجال الطبي **الانتقائية (النوعية)** حيث أن لكل ليزر يوجد نسيج أو عدة أنسجة يؤثر فيها الليزر بشكل نوعي دون أن يؤثر على سواها، ويؤدي هذا التأثير لإنتاج حرارة عالية في النسيج المستهدف وهذه الحرارة هي التي تعطي الليزر خواصه العلاجية، ويعتمد عمل الليزر على طول موجة، ولون النسيج المستهدف وحجمه. كذلك من خصائصه **الأمان** في حال استخدامه في المكان المناسب من الجسم من قبل طبيب مختص خبير متفهم لتأثيرات الليزر النوعية على الأنسجة وقادر على حماية نفسه وحماية مريضه من تأثيرات الليزر غير المرغوب فيها.

وبما أن أشعة الليزر عبارة عن أشعة ضوئية مركزة، فإنها تخضع لقوانين الضوء من حيث الانعكاس والانكسار والحيود بواسطة المرايا والعدسات والمواشير الزجاجية، وقد تم استخدام أشعة الليزر في تشكيل صور رائعة باستخدام العدسات والمرايا والألياف البصرية Fiber Optics.