تجربة رقم (٧)

اسم التجربة: النمط الكاوسي TEM_{oo}

الغرض من التجربة: دراسة ميزات الحزمة الكاوسية TEM_{oo}

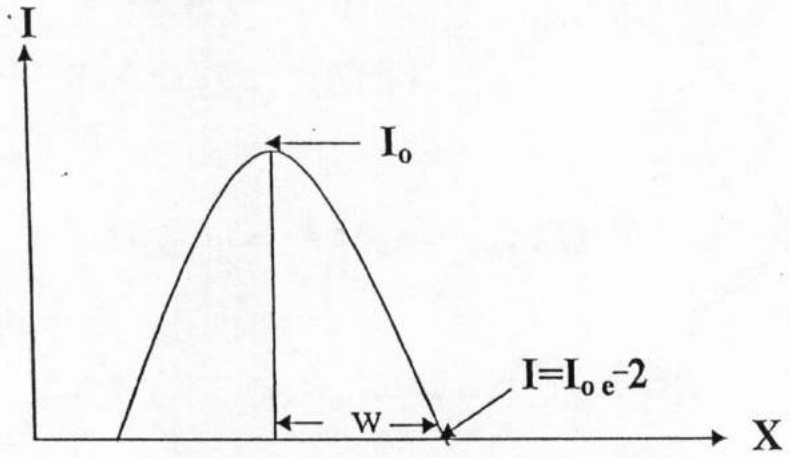
الأجهزة المستخدمة: جهاز ليزر He-Ne ، كاشف ضوئي، فولتميتر

النظرية

عندما يتذبذب شعاع الليزر في النمط TEM_{oo} عندئذ يقال إن الليزر يتذبذب بنمط مستعرض ، وعندما تأخذ الرمزان l و m القيم m=0، l=0 يدعى نمط الليزر بالنمط الكاوسي (Gaussian mode) أو النمط الأساسي (fundamental mode) . ان الشعاع الكاوسي ليس له حواف حادة لهذه حيث عندما يعين قطر الشعاع الكاوسي فهو قطر تقريبي لذا فان توزيع الشدة للمقطع العرضي للنمط TEM_{00} يعطى بالعلاقة التالية :-

$$I = I_o \exp(-2x^2/w^2) \text{----------} (1)$$

حيث I_o الشدة عند المركز(اعظم شدة) ، x المسافة من المركز ، w هي نصف قطر الشعاع (قيمة x التي تنخفض عندها الشدة إلى(e^{-2}) من قيمتها عند المركز) وكما موضح في الشكل رقم (1).



الشكل رقم رقم (١)

طريقة العمل

١- يثبت جهز الليزر على بعد مناسب من كاشف ضوئي يتحرك افقيا على مسطرة مدرجة بحيث نضمن سقوط اشعة الليزر قرب حافة الكاشف.

٢- يحرك الكاشف افقيا امام شعاع الليزر بمسافات صغيرة (2mm) وتسجل قيمة الشدة (I) عند كل ازاحة (x) الى ان تظهر حزمة الليزر من الحافة الاخرى للكاشف

٣- يرسم بيانيا بين قيم موضع الكاشف على المحور السيني وقيم الشدة الخارجة على المحور الصادي.

٤-تعين القيم I_o ، W ، x على الرسم البياني وتستخرج قيمها.

٥- تحسب قيمة I من المعادلة رقم (١).

أسئلة المناقشة :-

١- ماهي ميزات النمط TEM_{00}؟

٢- كيف يتم الحصول على النمط TEM_{00} فقط دون غيره من الانماط؟

تجربة رقم (٨)

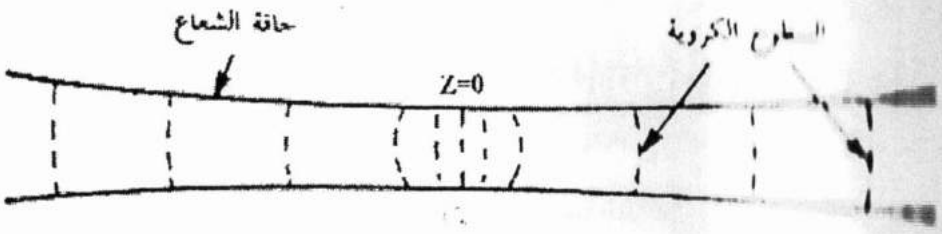
اسم التجربة: **تخصر الشعاع**

الغرض من التجربة: **قياس نصف قطر تخصر شعاع الليزر عند مركز المرنان**

الاجهزة المستخدمة: **ليزر هيليوم نيون ، شاشة بيانية ، مسطرة مترية.**

النظرية

ان شعاع الليزر هو شعاع متشاكه لهذا فان جميع مويجاته تكون بطور واحد . اذا اردنا ان نمثل النقاط التي تكون بطور واحد لجبهة الموجة بسطح ، يكون هذا السطح كرويا بالنسبة للشعاع الكاوسي TEM_{oo} . الشكل (١) يمثل شكل الشعاع الكاوسي داخل المرنان حيث يعبر عن قدرة البقعة كدالة للموضع $w_{(z)}$ وعلى امتداد محور المرنان (z) ومن هذا الشكل نلاحظ بان نصف قطر التكور يكون مساويا الى اللانهاية في منطقة تخصر الشعاع ويقل هذا التخصر تباعا كلما ابتعدنا عن هذه المنطقة ليبدا بالزيادة مرة اخرى .



الشكل (١)

ان اصغر حجم للبقعة يعرف بخصر الحزمة ويرمز له بالرمز (w_0) أي ان (w_0) يمثل قدرة البقعة عند الموضع Z=0 .

عند تطبيق نظرية الحيود في حسابات المرنان يمكن التوصل الى العلاقة التي تعبر عن قدر البقعة التي ترسمها الحزمة $w_{(Z)}$ في الموضع (Z) فاذا انتخبنا مركز المرنان ليمثل نقطة الاصل (Z=0) فان قدر البقعة عند نقطة تبعد بمسافة مقدارها Z عن مركز المرنان سوف يكون

$$w_{(Z)}=w_0[1+(2Z\backslash L)^2]^{1/2} \text{ ----------(1)}$$

حيث ان L هو طول المرنان

ان قدر البقعة عند مركز المرنان (Z=0) يساوي

$$w_0=(L\lambda/2\pi)^{1\backslash 2} \text{----------(2)}$$

حيث ان λ يمثل الطول الموجي للشعاع

يمكن اعادة كتابة المعادلة رقم (١) بالصيغة التالية:-

$$w(Z)=w_0[1+(\lambda Z/\pi w_0^2)^2]^{1/2} \text{ .....(3)}$$

يمكن تبسيط المعادلة رقم رقم (٣) لتصبح بالشكل التالي:-

يمكن ان تبسط المعادلة رقم (٣) لتصبح بالشكل التالي:-

$$w_o = [\ (w^2/2) + \{\ (w^4/4) - (\lambda^2 Z^2/\pi^2)\ \}^{1/2}\ ]^{1/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

طريقة العمل

١. يوضع جهاز الليزر على مسافات محددة من الشاشة ولتكن (50,100,150,200,250)cm

٢. يتم حساب قطر البقعة المضيئة (W) المتكونة على الشاشة عند كل مسافة ومن ثم يحسب نصف القطر (w).

٣. تستخدم المعادلة رقم (4)لحساب نصف قطر الشعاع (w_0) عند منطقة التخصر لكل قراءة ويؤخذ معدل القيم ($w_{o\ ave}$) ليمثل تخصر الشعاع عند مركز المرنان.

اسئلة المناقشة

١. ما هي العوامل التي تحدد قدر البقعة عند منطقة التخصر؟

٢. كم يساوي قطر تكور الشعاع الكاوسي عند منطقة التخصر؟

٣. ماهي العلاقة بين قطر تكور الشعاع وزاوية انفراجه؟

تجربة رقم (٩)

اسم التجربة ليزر الهيليوم نيون (He – Ne)

الغرض من التجربة ١- دراسة تركيب جهاز ليزر الهيليوم نيون .

٢- حساب قطر تكور مرايا المرنان.

النظرية:-

ليزر هيليوم نيون هو من أكثر أنواع الليزرات الغازية شيوعا وهو أول ليزر غاز تم تشغيله بموجة مستمرة وبطول موجي مقدارة (1.15 Mm) في عام 1960 من قبل (Javan) إن الوسط الفعال في هذا الليزر هو عبارة عن أنبوبة زجاجية تحتوي على خليط من غاز الهيليوم والنيون بنسبة (1-5)إلى (1-7).

بصورة عامة يتم تهييج الليزرات الغازية بطريقة التفريغ الكهربائي خلال ذرات الغاز وهناك طريقتان لحدوث عملية التفريغ الكهربائي أما بواسطة التردد الراديوي (RF) باستخدام أقطاب توضع على الجدار الخارجي للأنبوب وتجهز بقدرة كهربائية ترددها $30\ MH_Z$ أو بواسطة التفريغ الكهربائي المستمر الحاصل بين اقطاب داخلية وبتيار يتراوح بين (5 m A-50) وفي هذه الحالة يكون قطبا الكاثود والانود على شكل اسطوانة معدنية تلصق مع المرآة عند نهايتي الأنبوب .

إن المرنان يتكون من مرآتين يتم لصقهما عند نهايتي الأنبوب حيث يمثل تجويف الأنبوبة بين هاتين المرآتين تجويف المرنان ,إن هاتين المرآتين تكون أحداهما عاكسة كليا والأخرى عاكسة جزئيا لتمثل مرآة خرج الليزر وتطلى هاتين المرآتين بمادة معدنية تدعى (dichroic) ,ويتم طلائهما بعدة طبقات بحيث يكون سمك الطبقة الواحدة (λ 1/2).

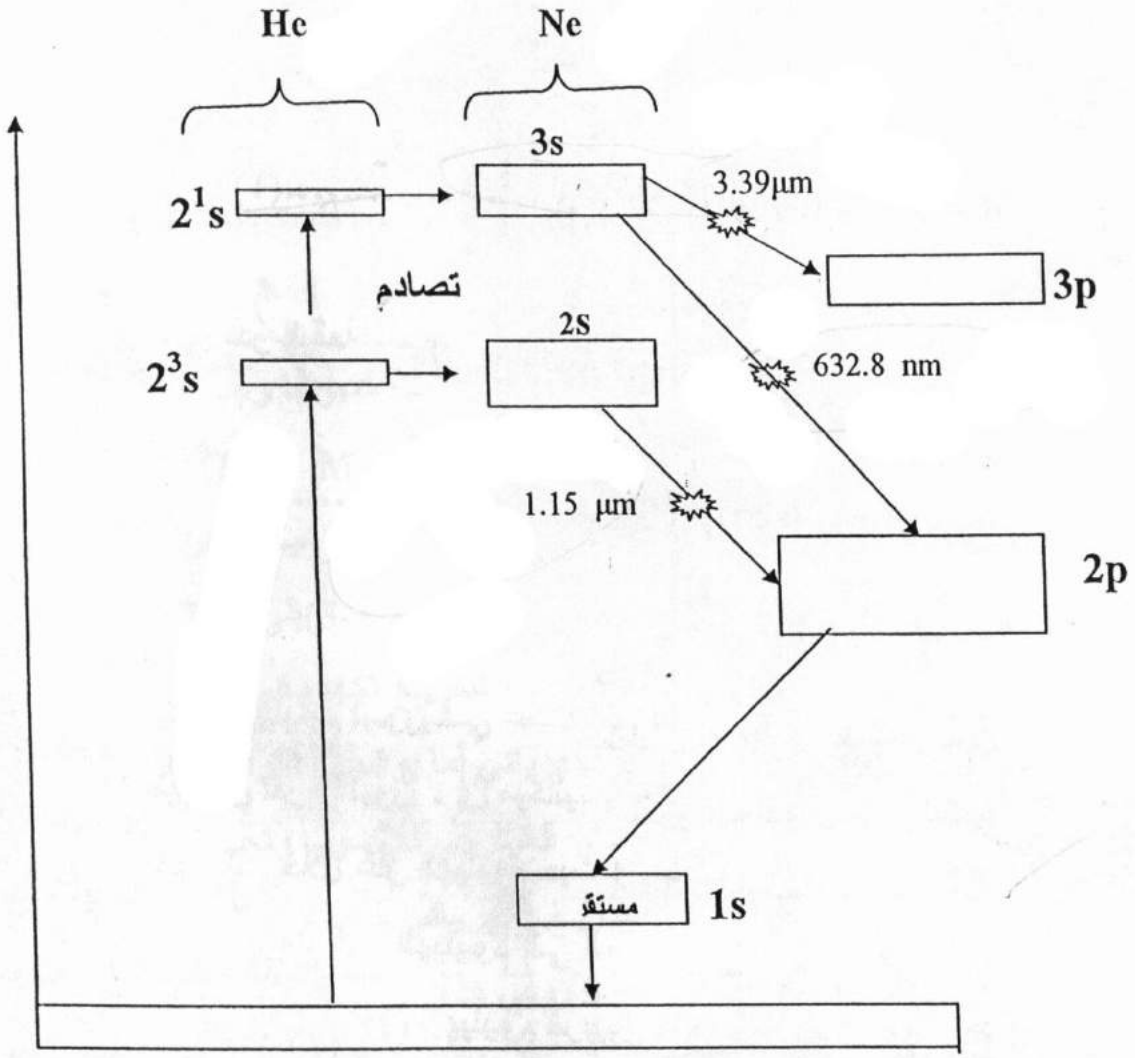
اذا كانت مرايا المرنان كروية وكان المرنان متحد البؤرة فيمكن حساب نصف قطر تكور المرأة(R) اذا علمت المسافة بين مراتي المرنان(L) كما في المعادلة التالية:-

$$R = Z\,[1+\{(\pi w_o^2)/(\lambda Z)\}] \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

حيث ان w_o يمثل قدر البقعة عند مركز المرنان وتساوي:-

$$w_o = [(\lambda L)/(2\pi)]^{1/2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

يعتمد ليزر الهيليوم نيون في عمله على حدوث التعداد المعكوس بين المستويين المتهيجين لذرة النيون ، إن ميكانيكية تشغيل ليزر الهيليوم نيون تعتمد على التفريغ الكهربائي خلال غاز الهيليوم حيث إن تصادم الالكترونات بذرات غاز الهيليوم سوف تصل ذرات غاز الهيليوم إلى الحالات شبة المستقرة $(2S^1,2S^3)$ وبكونا المستويان $(2S^3 , 2S^1)$ للهيليوم قريبين جدا من المستويين (3S,2S) للنيون على التوالي . وعندئذ فان ذرات الهيليوم المتهيجة(He^*)سوف تتصادم مع ذرات النيون (Ne)المستقرة حيث يتم تبادل الطاقة الداخلية (التصادم من النوع الثاني) بين الذرات بعملية انتقال الطاقة الرنيني فتكون نتيجة التصادم ذرات نيون مثيرة (Ne^*) حيث تصل فيه الذرات إلى مستويات الحالة الغير مستقرة (3S,2P) وذرات هيليوم مستقرة إن لهذا الليزر ثلاثة انتقالات اثنان منها يقع ضمن المنطقة تحت الحمراء والثالث يكون عند المنطقة المرئية كما في الشكل رقم (1).



الشكل رقم (١) انتقالات ليزر الهيليوم نيون

من الشكل رقم (١) نلاحظ إن الانبعاث المحفز قد تحقق بين مستويات (3S) ومستويات (3P) وبين مستويات (2S) ومستويات(2P) . إن الانتقال بين المستوي 3S والمستوي(3P)يكون ضمن الطول الموجي (3.39 μm)وينبعث الطول الموجي 632.8 nm عند الانتقال من المستوي (3S)إلى المستوي (2p)

أما الطول الموجي(1.15 µm) فهو يتحقق عند الانتقال من المستوي (2S)إلى المستوي (2p) .

إن الطول الموجي(632.8 nm)هو ضمن المدى المرئي حيث يعطي اللون الأحمر القاني إذ يتميز ليزر الهيليوم نيون بهذا اللون وهو شائع الاستعمال.

إن نشوء الطول الموجي(3.39 µm)يشارك نشوء الطول الموجي (632.8 nm) حيث نلاحظ من الشكل (١) إن كلاهما ينشا من الهبوط من نفس المستوى العلوي (3S) ولذا فان الانتقال (3.39 µm) سوف يؤثر على القدرة المتاحة للخط المرئي وفي الليزرات التي يراد لها إن تعمل بقدرة عظمى عند الخط (632.8 nm) يجب إخماد التذبذبات عند الطول الموجي (3.39 µm) وذلك عن طريق استخدام أجهزة أضافية.

<u>اسئلة للمناقشة</u>

١. هل إن ليزر الهيليوم نيون من منضومات المستويات الرباعية أم الثلاثية؟ وما الفرق بين المنظومتين؟
٢. إذا كانت انتقالات ليزر الهيليوم نيون تنشا من الانتقال من مستويات النيون فلماذا يستخدم غاز الهيليوم إذا ؟
٣. كيف يتم الحصول على طول موجي واحد فقط وهو الطول الموجي 632.8 nm فقط من خرج ليزر الهيليوم نيون؟
٤. ماهى مساوئ استخدام تقنية التردد الراديوي في عملية الضخ في الغاز ؟

تجربة رقم(١٠)

اسم التجربة ليزر شبه الموصل

الغرض من التجربة دراسة خصائص ليزر شبه الموصل وحساب تيار الانبعاث (تيار العتبة).

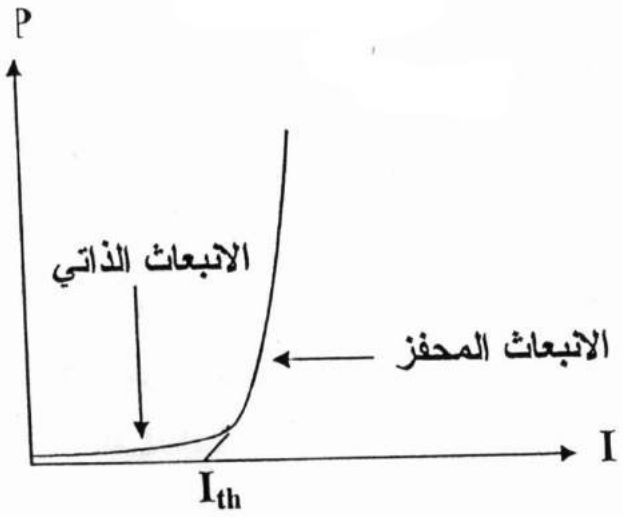
الاجهزة المستخدمة ثنائي ليزري، مجهز قدرة (4.5 V)، مقياس قدرة، جهاز ملي اميتر، جهاز فولتميتر.

النظرية

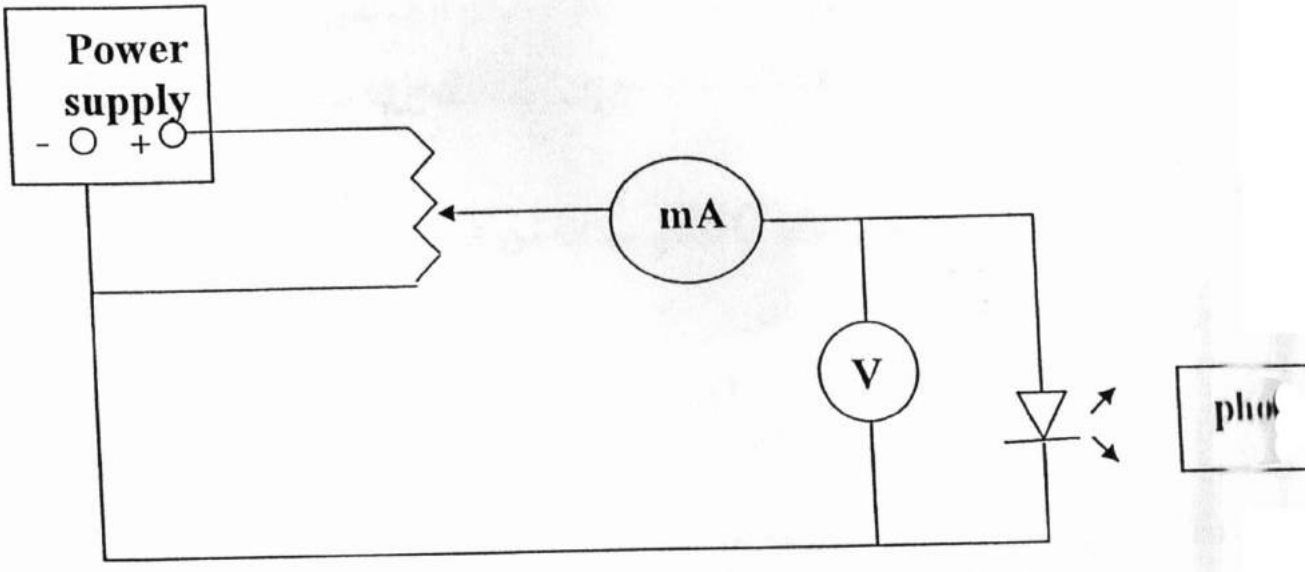
ان الوسط الفعال في ليزر شبه الموصل هو عبارة عن صمام ثنائي (diode) . يتم تهيج الثنائي عن طريق ربطه بالاتجاه الامامي حيث يؤدي هذا الربط الى انتقال الالكترونات باتجاه الملتقى (junction) وانتقال الفجوات بعكس اتجاه الالكترونات ليتم الالتحام في منطقة الملتقى ونتيجة لهذا الالتحام يبعث الثنائي ضوء الليزر بطاقة تساوي تقريبا طاقة الفجوة بين نطاقي الالكترونات والفجوات.

اذن للحصول على الاشعاع المحفز يجب ان تتحد الالكترونات بالفجوات بعدد يكفي لاحداث التوزيع العكسي حيث ان نسبة التوزيع العكسي تعتمد بصورة اساسية على قيمة التيار المار في شبه الموصل ولهذا سوف تعتمد على هذا التيار أيضا كمية الربح البصري.

اذا مر تيار ذا قيمة واطئة فعندئذ يكون فقط الانبعث الذاتي هو المهيمن على الاشعاع حيث يكون الاشعاع الناتج ضعيف ومن فعل الانباث الذاتي فقط. عند زيادة هذا التيار تدريجيا سوف يزداد الانبعاث الذاتي خطيا مع زيادة تيار التشغيل الى ان يصل الى قيمة معينة تعرف بشرط العتبة ويسمى التيار عند هذه القيمة بتيار العتبة (I_{th}) ليبدأ عندها الانبعاث المحفز بالنشوء ويزداد بسرعة كبيرة بزيادة التيار لينتج ضوء الليزر، كما موضح في الشكل رقم (١).



الشكل رقم (١) خصائص الثنائي الليزري



الشكل رقم (٢)

طريقة العمل

١- تربط الدائرة كما مبين بالشكل رقم (٢)

٢- تغير قيمة المقاومة المتغيرة للحصول على قيم الفولتية التالية (0,0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5)V وتسجل قراءة الاوم ميتر عند كل قيمة من قيم الفولتية وكذلك تسجل قراءة مقياس القدرة عند كل قيمة.

٣- يرسم بيانيا بين قيم I على المحور السيني وقيم P على المحور الصادي.

٤- تحدد قيمة تيار الانبعاث من الرسم ويناقش الرسم البياني.

أسئلة المناقشة

١- لماذا لانحتاج في ليزر شبه الموصل الى طلاء سطحي بلورة شبه الموصل بطبقة عازلة ليكونا مراتي فابري بيرو؟

٢- في أي من الليزرات تكون عملية الضخ اسهل ، ليزرات الغاز ام ليزرات شبه الموصل. ولماذا؟

٣- ماهي ابرز استخدامات ليزر شبه الموصل؟

تجربة رقم (١١)

اسم التجربة انتقال الشعاع بأوساط مادية مختلفة

الغرض من التجربة حساب معامل امتصاص ضوء الليزر من قبل

١- الغلاف الجوي ٢-الليف البصري

الاجهزة المستخدمة ليزر هيليوم نيون مختبري،كاشف ضوئي،الياف بصرية باطوال (100,150,200,250,300)cm، فولتميتر.

النظرية

إن انتقال شعاع الليزر خلال الوسط يفقد قسم من طاقته نتيجة امتصاص الوسط الناقل لطاقة الشعاع المار خلاله إضافة إلى خسارة التشتت من قبل ذرات ذلك الوسط. تعتمد مقدار خسارة الامتصاص على نوع مادة الوسط وعلى طوله وشكله، فعند أنتقال ضوء أليزر خلال الهواء سوف يعاني امتصاص اكبرفيما لو انتقل خلال ليف بصري بسبب اختلاف مادة الوسطين وتكيف الليف البصري لنقل الشعاع الضوئي بأقل خسارة ممكنة.

إن معامل امتصاص وسط ما يمكن حسابه من المعادلة التالية :-

$$I=I_o e^{-\alpha x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

حيث إن (I_o)هي شدة الشعاع الداخل إلى الوسط ، (I) هي شدة الشعاع الخارج من الوسط ، (α) معامل امتصاص الوسط ، (x) طول الوسط.

إن المعادلة رقم (١) مهمة جدا في تطبيقات نقل شعاع الليزر إلى مسافات طويلة إذ من خلالها يمكن معرفة شدة الشعاع اللازمة لنقله خلال وسط معين إلى المسافة المراد نقله إليها.

طريقة العمل

١- يوضع الكاشف محاذيا لفتحة خرج الليزر مباشرة وتقاس شدة الشعاع الليزر ولتكن (I_o)

١- يوضع الكاشف على الابعاد التالية من الليزر

(100,150,200,250,300)cm وعند كل بعد تقاس القدرة من الكاشف ولتكن (I).

٣- تحسب النسبة (I/I_o) لكل قيمة من قيم المسافة ويحسب كذلك $\ln (I/I_o)$

٤- يرسم بيانيا بين قيم المسافة (x) على المحور السيني وقيم $\ln(I/I_o)$ على المحور الصادي.

٥- يستخرج الميل والذي يمثل معامل امتصاص الغلاف الجوي.

٦- تعاد الخطوات من ٢ الى ٥ على ان يكون الوسط الناقل لضوء الليزر هو الليف البصري ولنفس المسافات السابقة.

أسئلة المناقشة

١- هل يختلف معامل امتصاص وسط ما باختلاف الطول الموجي للضوء المار من خلاله ام لا؟

٢- بماذا يفيدنا استعمال المعادلة رقم (١) في تطبيقات الليزر الصناعية؟

تجربة رقم (١٢)

اسم التجربة القدرة الضائعة في الالياف البصرية

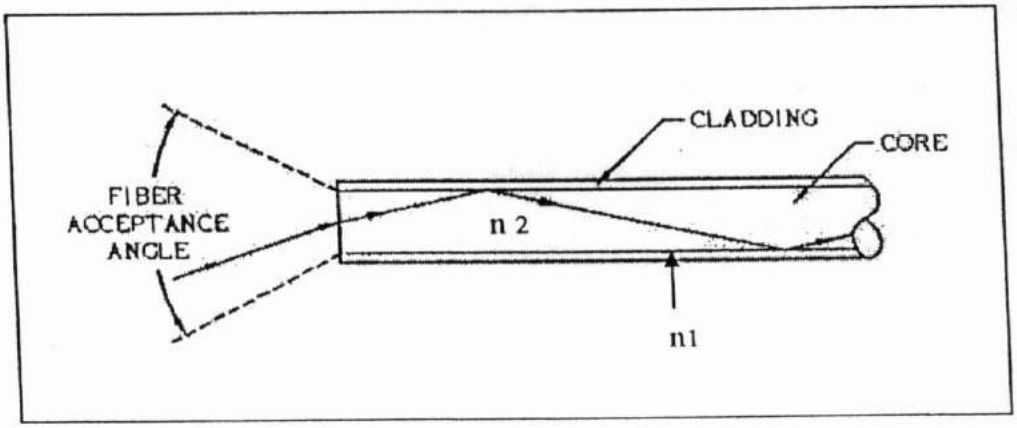
الغرض من التجربة حساب قدرة شعاع الليزر الضائعة في الليف البصري الناتجة من طي الليف البصري.

الاجهزة المستخدمة جهاز ليزر He-Ne ، مقياس قدرة، ليف بصري، قدمة.

النظرية

إن الألياف البصرية هي أوساط شفافة تقوم بنقل الحزمة الضوئية بخسارة قليلة جدا . يبين الشكل (١) تركيب الليف البصري الذي يتكون من لب زجاجي اسطواني الشكل يمتلك معامل انكسار مقداره (n_2) يكسى بطبقة أخرى من الزجاج تمتلك معامل انكسار اقل مقداره (n_1) ثم يغلف من الخارج فيبدو كاي كابل كهربائي .

أن عمل هذا الليف يستند إلى أسس الانكسار حيث إن الأشعة الساقطة على لب الليف تعاني انكساراً كليا عند الغطاء وستبقى بداخله لان لهذه الأشعة زوايا سقوط اكبر من الزاوية الحرجة لمادة اللب ذاته .



الشكل رقم (١) يوضح تركيب الليف البصري

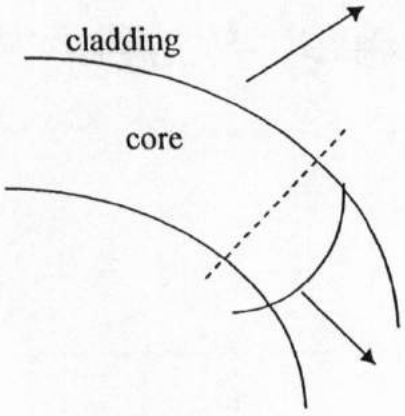
يعالي الضوء المنتقل خلال الليف البصري والتي تنتج من عدة عوامل:-

١- خسارة امتصاص مادة الليف.

٢- خسارة الاستطارة.

٣- الخسارة الناتجة من طي الليف البصري .

يعاني الشعاع داخل الليف خسارة ناتجة عن طي الليف بسبب اختلاف سرعة الضوء المنتقل خلال الليف حيث ان الشعاع ينتقل من لب الليف إلى غلاف الليف والتي تسبب انتقال شعاع الليزر خارج غطاء الليف والشكل (2) يوضح عملية خسارة انتقال الشعاع خارج غطاء الليف عند طي الليف البصري.



شكل رقم (2)

الشكل رقم (١) يوضح تركيب الليف البصري

طريقة العمل

١- تربط إحدى نهايتي الليف البصري الى فتحة خرج جهاز الليزر ومن ثم تربط الناهية الأخرى إلى مقياس قدرة لتعيين قدرة الشعاع ولتكن (p_o)

٢- يطوي الليف البصري بقطر معين وليكن (D_1) وتسجل قدرة الليزر(p) .

٣- تعمل خمسة طيات اخرى في الليف ولنفس قطر الطية الاولى وفي كل مرة تسجل قيمة القدرة الواصلة الى مقياس القدرة.

٤- تحسب الخسارة لكل طية (N) من المعادلة التالية :-

$$V= p-p_o \quad .....(1)$$

٥ – تعاد الفقرات من ٢ الى ٤ ولاقطار مختلفة D_2، D_3، D_4 ، D_5 .

٦- يرسم بيانيا بين قيم (D) على المحور السيني وقيم(V) المقابلة لكل قطر على المحور الصادي.

٧- يرسم بيانيا بين قيم (N) على المحور السيني وقيم (V) المقابلة لكل طية على المحور الصادي.

٨- تناقش النتائج.

أسئلة المناقشة:-

١- ماهي ابرز استخدامات الليف البصري ؟

٢- كيف يمكن تجميع عشرات الألياف في حزمة واحدة في منظومة الاتصالات البصرية ولا يحدث تتداخل للأشعة بين ليف وأخر ؟

تجربة رقم (١٣)

اسم التجربة حساب سمك قنينة زجاجية

الغرض من التجربة ١- قياس الزاوية الحرجة لانكسار ضوء الليزر في وسط زجاج _ هواء

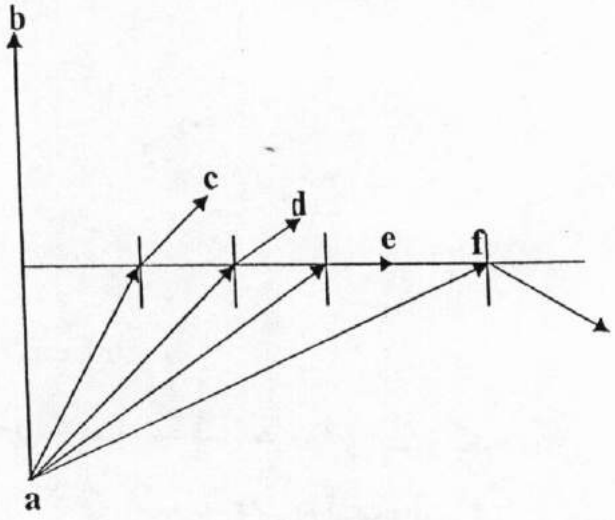
٢- حساب سمك قنينة زجاجية

الاجهزة المستخدمة جهاز ليزر مختبري مرئي، قنينة زجاجية، شاشة

النظرية

يمكن ان نعرف الزاوية الحرجة بانها سقوط في وسط اكبر كثافة ضوئية تقابلها زاوية انكسار في الوسط الاقل كثافة ضوئية مقدارها 90°.

لنفرض ان لدينا مصدر ضوئي (a) في وسط اكبر كثافة ضوئية كالماء تخرج منه الاشعة بزوايا سقوط مختلفة الى وسط اقل كثافة ضوئية كالهواء ، كما مبين في الشكل رقم (١).



الشكل رقم (١)

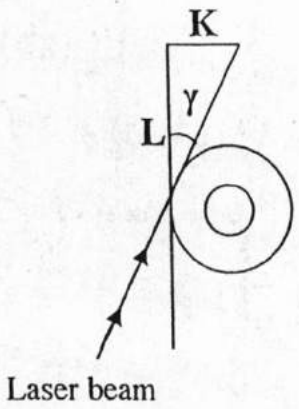
نلاحظ من الشكل رقم (1) ان الشعاع (ab) الساقط عموديا على السطح الفاصل ينفذ على استقامته دون ان يعاني أي انكسار والشعاع المائل (ac) ينكسر مبتعدا عن العمود كلما زادت زاوية الانكسار ويقترب الشعاع النكسر من السطح الفاصل كما في حالة الشعاع (ad) ولكن عندما تصل زاوية السقوط في الوسط الاكثر كثافة ضوئية الى قيمة معينة فان الشعاع يخرج منطبقا على السطح الفاصل أي تكون زاوية الانكسار تساوي 90° كما حدث للشعاع (ae) وتسمى زاوية السقوط في هذه الحالة بالزاوية الحرجة، اما اذا ازدادت زاوية السقوط في الوسط الاكبر كثافة ضوئية عن الزاوية الحرجة فان الشعاع سوف لاينفذ الى الوسط الاقل كثافة ضوئية بل يرتد في نفس الوسط الاول بحيث تكون زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس كما حدث للشعاع (af) ويكون الشعاع قد انعكس كليا.

ان العلاقة بين الزاوية الحرجة ومعامل الانكسار المطلق هي :-

$$n = 1/\sin \alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

حيث n هو معامل الانكسار المطلق و α هي الزاوية الحرجة

اذا سقط شعاع ضوئي كشعاع الليزر مثلا بزاوية حرجة على حافة قنينة زجاجية فسوف تتحقق ظاهرة الانكسار الكلي أي عدم وجود انعكاس للشعاع وعند اسقاط الشعاع المنكسر على شاشة يمكننا حساب الزاوية بين الضوء الساقط على القنينة والضوء المنكسر الخارج من القنينة والتي تمثل γ كما في الشكل رقم (٢).



الشكل رقم (٢)

من الشكل رقم (٢) نلاحظ بان ظل الزاوية يساوي:-

$$\tan \gamma = K / L \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

ان الزاوية (γ) تتناسب مع سمك القنينة وفقا للعلاقة التالية:-

$$T = r [1-(1/n) \sin (\alpha + \gamma / 2)] \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

حيث ان T هو سمك القنينة و r هو نصف قطرها و n هو معامل انكسار مادة القنينة.

طريقة العمل

١- ترتب اجزاء التجربة بحيث نضمن سقوط شعاع الليزر على حافة القنينة كما في الشكل رقم (٢).

٢- يحسب طول الشعاع المنكسر K الساقط على الشاشة.

٣- يتم قياس المسافة (L) بين نقطة تلامس شعاع الليزر على حافة القنينة والشاشة.

٤- تحسب الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المنكسر من المعادلة رقم (٢).

٥- تحسب الزاوية الحرجة من المعادلة رقم (١).

٦- يحسب سمك القنينة من المعادلة رقم (٣).

اسئلة للمناقشة

١- ماذا يحدث لو استخدم ضوء اعتيادي بدلا من ضوء الليزر المستخدم في التجربة؟

٢- هل تتغير قيمة الزاوية الحرجة ام لا فيما لو كانت القنينة مملوءة بالماء؟