تأثير التغذية المرتدة الضوئية الخارجية على التحليل النبضي لليزر المضمن تضمينا نبضياً مباشراً

رغيد ميخائيل إبراهيم* قدامة عبد الجبار حامد**

مزاحم إبراهيم عزاوي* عبد الغفور إبراهيم عبد الله*

* قسم الفيزياء – كلية التربية – جامعة الموصل

** قسم التقنيات الإلكترونية – المعهد التقني – الموصل

تاريخ الاستلام 2005/2/16 تاريخ القبول 2005/7/17

ABSTRACT

The experimental investigation of the influence of optical feedback on the pulse analysis of GaAlAs laser diode is represented, with an experimental setup designed for this purpose. Optical feedback was constructed with a plane mirror facing the facet of the laser diode at a distance of (16 cm). Phase control and feedback rate were varied according to the external cavity length with the respect of laser diode cavity.

Many benefits can be obtained from this research , to improve laser light output with increasing the external differential quantum efficiency by (0.7 %), and threshold reduction by (0.5 mA) with Optical feedback furthermore the experimental result indict that there was a peak shift of the pulse distribution of the laser output towards high frequency by feedback rate was increased. Laser wavelength tuning can be interpreted from there experimental results in additional to the improvement of spectral characteristics with the reduction of FWHM and increase in the intensity of laser output.

الخلاصة

تم دراسة تاثيرات التغذية المرتدة الضوئية Optical Feedback على التحليل النبضي لليزر شبه الموصل نوع GaAlAs وذلك باستخدام منظومة ضوئية والكترونية صممت لهذا الغرض . يتم الحصول على هذه التغذية عن طريق اقرن احدى اوجه الليزر مع مرآة موضوعة على بعد (16 cm) والتي يتم التحكم من خلالها بطور وشدة الشعاع المرتد الى تجويف الليزر .

هنالك عدة فوائد مرجوة من التغذية المرتدة الضوئية والتي تضمنتها الدراسة والمتمثلة بتحسين خواص الخرج الليزري حيث لوحظ زيادة في قيمة الكفاءة الكمية بمقدار (0.7%) ونقصان في قيمة تيار

حد العتبة بمقدار (0.5mA) بوجود التغذية المرتدة الضوئية . فضلا عن ذلك فقد وجد ومن خلال النتائج المستحصلة من دراسة التوزيع النبضي حدوث زحف في قمم التوزيع النبضي نحو الترددات العالية بزيادة نسبة التغذية المرتدة الضوئية والتي تشير الى امكانية تنغيم الطول الموجي المنبعث من الليزر كما وجد تحسن في الخواص الطيفية متمثلا بنقصان العرض عند منتصف القمة وزيادة القدرة الخارجة .

المقدمة

هنالك اهتمام متزايد نحو حقيقة إن ليزر شبه الموصل Semiconductor Laser له سلوك مؤثر ومهم مع وجود التغذية المرتدة الضوئية (O.F.) Optical Feedback [1] . ويقصد بالتغذية المرتدة الضوئية في ليزرات أشباه الموصلات رجوع جزء من الضوء الخارج من تجويف الليزر الى داخل التجويف مرة أخرى بواسطة عاكس خارجي External Cavity قد يكون مرآة خارجية ذات انعكاسية (r) موضوعة على مسافة معينة من وجه الليزر او الانعكاس من نهاية الليف الضوئي او عن طريق الانعكاس من الآلات الضوئية المرافقة [2]. يوجد العديد من الفجوات الخارجية حيث تتجلى هذه الظاهرة في العديد من التطبيقات العلمية منها منظومات الألياف الضوئية إذ تعمل نهايتي الليف الضوئي على عكس جزء من ضوء الليزر الى داخل تجويف الليزر Laser Cavity [3] . وكذلك عند قراءة او تسجيل البيانات على الأقراص الليزرية فان أجزاء المنظومة الضوئية المرافقة لجهاز التشغيل تعمل على عكس جزء من شعا ع الليزر الى داخل التجويف فضلا عن الضوء المنعكس من سطح القرص أللليزري ، تدعى التغذية الضوئية لهذه الحالات بالتغذية المرتدة الضوئية غير المقصودة Unintentional Optical Feedback [4,5] ان الملاحظ ان سلسلة من المشاكل تظهر بسبب هذا النوع من التغذية المرتدة حيث عند تقارن الليف الضوئي مع ليزر شبه الموصل فانه يؤدي الى تقليل من استجابة التضمين Modulation Response Characteristics ويزيد من شدة الضوضاء Intensity Noise [1]. كما يمكن استخدام عدة عناصر بصرية لعكس ضوء الليزر مثل استخدام المرايا المستوية او المقعرة و كذلك محزز الحيود ، هذه الحالات تدعى بالتغذية المرتدة الضوئية المقصودة Intentional Optical Feedback [4,5] .ان اقتران ليزر شبه الموصل مع فجوة خارجية يوفر العديد من المزايا ذات الفائدة الكبيرة في العديد من التطبيقات العلمية . من هذه المزايا تقليل تيار العتبة , زيادة كثافة القدرة الضوئية المنبعثة , التحكم بعرض الخط الطيفي ، فضلا عن انتقاء الأنماط المرغوبة في طيف انبعاث الليزر , ومن جانب أخر ينتج عن هذه الحالة بعض الصفات غير المرغوبة فيها مثل كظهور حالات لا خطية في طيف انبعاث الليزر وكذلك عدم استقرارها[6]. ومن الملاحظ ان السلوك الديناميكي في ليزرات أشباه

الموصلات بوجود التغذية المرتدة الضوئية .O.F يعتمد بدرجة كبيرة على ثلاثة عوامل المتمثلة بانعكاسية العاكس وطول التجويف الخارجي فضلا عن تيار الحقن [7] .

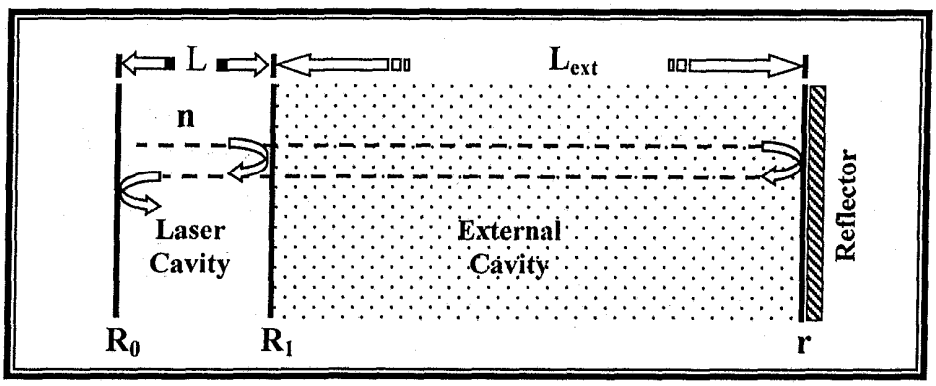
لتلافي جميع الحالات غير المرغوب بها وانتقاء المناطق المفيدة في عمل التغذية الضوئية والملائمة للتطبيقات العلمية فقد أنجزت العديد من البحوث والدراسات تم بموجبها تقسيم مناطق التغذية المرتدة الضوئية Feedback Regimes الى خمس مناطق معتمدا على قيمة التغذية المرتدة الضوئية $f_{external}$ والتي تعرف حسب المعادلة الاتية:- [6] .

$$f_{external} = \frac{p_{reflected}}{p_{emitted}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

ان الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة سلوك ليزر شبه الموصل بوجود التغذية المرتدة الضوئية المتعمدة وامكانية الاستفادة من التاثيرات الايجابية لهذه الظاهرة في تحسين خواص ثنائي الليزر فضلا عن امكانية توليف الطول الموجي للانبعاث الليزري . والذي له اهمية كبيرة في التطبيقات التكنولوجية وعلم الطيف.

الجزء النظري

ان وجود العاكس الخارجي يزيد من طول التجويف الطبيعي لليزر Normal Laser Cavity وهكذا فان التجويف يكون مكون من ثلاثة مرايا والمتمثلة بكل من نهايتي اوجه ثنائي الليزر والمنفصلة عن بعضها البعض بمسافة L ولهما قيم انعكاسية R_1 , R_0 والعاكس الخارجي والذي يبعد مسافة مقدارها L_{ext} عن احدى نهايتي اوجه الليزر و ذو انعكاسية مقدارها r وكما موضح في الشكل (1) . ان التحليل المبسط للتجويف ثلاثي المرايا Three Mirror Cavity مفيد في توضيح العديد من الحالات والظواهر التي تظهر بوجود التغذية المرتدة الضوئية .O.F والمتمثلة بظهور طيف شديد لانماط الفجوة الخارجية و عدم الاستقرار في الانماط الطولية والتقليل في عرض الخط الطيفي و تقليل في ضوضاء الطور.



الشكل (1) ثنائي الليزر مع تغذية ضوئية مرتدة

نفرض ان $r << R_1$ وهكذا فان الفجوة الخارجية يمكن اعتبارها كتشويش معتمدا على الطول الموجي من خلال ازاحة الطور في الفجوة الخارجية بالنسبة لفجوة الليزر وكذلك الانعكاسية المؤثرة الناشئة من انعكاسية المرآة الخارجية و وجه الليزر المقابل لها.

ان سعة الموجة المنعكسة A من الوجه ذو الانعكاسية R_1 تعطى كما ياتي[8] :-

$$A=\sqrt{R_1}+(1-R_1)\sqrt{r}\,e^{i\theta_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

اذ ان θ_1 تمثل شرط الطور لتكوين موجة واقفة في التجويف الخارجي وتعطى كما ياتي:-

$$\theta_1=4\pi L_{ext}/\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

λ تمثل الطول الموجي في الفضاء الحر

ان افتراض $r << R_1$ يسمح بكتابة إزاحة الطور من جراء التغذية المرتدة الضوئية بالصيغة الاتية:-

$$\theta=\theta_2+\frac{(1-R_1)\sqrt{r_1}\,\sin\theta_1}{\sqrt{R_1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

اذ ان θ_1 تمثل شرط الطور لتكوين موجة واقفة في تجويف الليزر وتعطى كما ياتي:-

$$\theta_2=4\pi nL/\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

اذ ان n معامل انكسار شبه الموصل .

وبذلك يمكن كتابة المعادلة (4) كما ياتي:-

$$\theta=\frac{4\pi nL}{\lambda}+\frac{(1-R_1)\sqrt{r}}{\sqrt{R_1}}\sin\left(\frac{4\pi L_{ext}}{\lambda}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

المعادلة (6) تستخدم بشكل واسع في معظم تأثيرات التغذية المرتدة الضوئية في ليزر شبه الموصل.

المنظومة العملية

الشكل (2) يوضح المنظومة العملية المصممة لدراسة التحليل النبضي لشعاع الليزر والتأثيرات الناجمة من جراء التغذية المرتدة الضوئية Optical Feedback. الليزر المستخدم لهذا الغرض هو من نوع Ga Al As ذو التركيب المتباين المزدوج الشريطي و ذو قدرة خرج ضوئية في مدى (P_{out} ? 5 mW) مع أطوال موجية nm (680 - 630). لتشغيل ثنائي الليزر والسيطرة على تيار الحقن تم تصميم دائرة إلكترونية خاصة لهذا الغرض وكما مبين في الشكل (3) ، تعد هذه الدائرة مسيطرا انيا للتيار اذ يتم التحكم بمقدار التيار و الفولتية في ان واحد . تتألف هذه الدائرة من عدة مراحل ، فالمرحلة الاولى تمثل مرحلة مجهز القدرة والمؤلفة من محولة خافضة للفولتية V-AC(12 → 220) وقنطرة رباعية تعمل على تحويل (AC → DC) ومنظم للفولتية (9 Volt Regulator) تليها مرحلة الإقران ومن ثم مرحلة تصحيح الخطأ ومرحلة السيطرة اليدوية المؤلفة من جزئين ، جزء السيطرة الاعتيادية (تغير بمقدار كبير) وجزء السيطرة الدقيقة ، تصل دقة تغير التيار لهذه الدائرة الى (± 0.1 mA) ودقة تغير الفولتية الى (± 0.01 Volt) تلي ذلك المرحلة الأخيرة والمتمثلة بمرحلة الإخراج المنظم.

بسبب تأثر ثنائي الليزر بدرجة الحرارة وبشكل كبير، والذي يؤدي الى تغير خواص الخرج الليزري و بالتالي تغير الكفاءة الكمية فضلا عن تغير مقدار تيار حد العتبة لثنائي الليزر ، تم بناء الدائرة الكترونية المبينة في الشكل (4) والتي تعمل على تثبيت درجة حرارة ثنائي الليزر خلال فترة التشغيل الى حد (± 0.1 °C) والتي تكون ملائمة لمجال عمل هذا البحث. ان العنصر الاساسي المستخدم في السيطرة على درجة الحرارة وتثبيتها والذي يعمل على تسخين او تبريد ثنائي الليزر وحسب الحاجة هو المبرد الكهروحراري (TEC) Thermo-Electric Cooler والذي يتم تثبيته بين قاعدة الليزر والمسرب الحراري Heat Sink . ومن العناصر الاخرى المهمة في عمل دائرة المسيطر الحراري هو المتحسس الحراري Thermistor والذي يتم تثبيته داخل قاعدة الليزر ويكون المسؤول عن تشغيل المبرد الكهروحراري TEC اعتمادا على درجة حرارة قاعدة الليزر .

ولغرض التشغيل النبضي لثنائي الليزر تم استخدم مولد النبضات Function Pulse Generator ذو مديات تردد MHz (50 - 0) والذي يمكن من خلاله التحكم بكل من سعة النبضة وعرضها وزمن تتابعها وتردد الموجات والتي يتم تضمين الليزر بها.

ولكشف الاشارة الضوئية تم استخدام الكاشف الضوئي السليكوني PIN نوع (FDS 100) ذو مساحة فعالة (13 mm^2) وحساسة لكشف الاطوال الموجية لمدى nm (1100 - 350) . ولتحليل الاشارة المستلمة بواسطة الكاشف الضوئي تم استخدم جهاز المحلل المتعدد القنوات (MCA) (Multi Channel Analyzer).

اما مجموعة التغذية المرتدة الضوئية فقد تضمنت الاجزاء الضوئية التالية :-

أ) العاكس الخارجي External Reflector : وهو عبارة عن مرآة مستوية مصنوعة من طبقات فضية متعددة Front Silvered Mirror تحتوي على غلاف داخلي من الالمنيوم و أكسيد السليكون مثبتة على قاعدة تحتوي على ثلاثة لوالب محورية خلفية تمكننا من تغير انحرافها باتجاهات و زواية مختلفة.

ب) مجزء الحزمة Beam Splitter : يقوم بتجزئة شعاع الليزر الى جزئين متساويين من حيث الشدة 50/50 جزء يسقط على الكاشف الضوئي PIN_1 والجزء الاخر على العاكس الخارجي و يسمى بالشعاع المنبعث Emitted Beam كذلك يقوم بشطر الشعاع المنعكس من العاكس الخارجي الى جزئين جزء يسقط على الكاشف الضوئي PIN_2 والجزء الأخر يدخل الى تجويف الليزر و يسمى بالشعاع المنعكس Reflector Beam وكما موضح بالشكل (2) . يمتاز مجزء الحزمة المستخدم بصغر الحجم وهو مربع الشكل ذو مساحة سطحية ($36\ mm^2$) حيث انه ملائم لمساحة بقعة الليزر فضلا عن انه مطلي بطلاء مضاد للانعكاس للاطوال الموجية في مدى (600 - 900)nm.

ج) الموهنات الضوئية Optical Attenuators : لغرض التحكم بمقدار التغذية الضوئية تم استخدم مجموعة من الموهنات الضوئية والتي تعمل على توهين اشارة نبضة الليزر دون التاثير على الطول الموجي للشعاع الضوئي.

الجزء العملي و النتائج

1- خواص القدرة الضوئية مع تيار الحقن وتاثيرات التغذية المرتدة الضوئية

تمثل دراسة الخواص القدرة الضوئية مع تيار الحقن في ليزرات اشباه الموصلات من الامور الاساسية والمهمة حيث يتم من خلالها تحديد العديد من المعلمات الاساسية لثنائي الليزر منها تيار حد العتبة ، الكفاءة الكمية الخارجية ، ومناطق العمل الخطية و غير الخطية.

لقد تم دراسة الخواص المبينة اعلاه لحالتين اولا: بدون وجود فجوة خارجية Without External Cavity ثانيا: بوجود فجوة خارجية With External Cavity وذلك لبيان التاثيرات الناجمة على هذه الخواص من جراء وجود التغذية المرتدة الضوئية .O.F. تم استخدم المنظومة الضوئية المبينة في الشكل (2) بعد ترصيف المنظومة ترصيفا ضوئيا فضلا عن تثبيت درجة حرارة

كبسولة الليزر خلال فترة اجراء القياسات عند (20 °C). في الحالة الاولى تم حجب المرآة باستخدام حاجز معتم وتم تغير قيم التيار وتسجيل قيم القدرة الضوئية المقابلة لها باستخدام الكاشف الضوئي PIN_2 ، اما في الحالة الثانية فقد تم رفع الحاجز من أمام المرآة والتي تبعد (16 cm) عن وجه الليزر المقابلة لها ومن ثم اعيدت الخطوات السابقة. والشكل (5) يبين القدرة الضوئية المنبعثة كدالة لتيار الحقن و لكلتا الحالتين ، ومن خلاله يمكن تحديد قيمة تيار حد العتبة والذي يمثل بداية ظهور انبعاث المحفز وذلك من خلال تقاطع امتداد الخط المستقيم المرسوم بمحاذاة المنطقة الخطية من المنحني مع احداثي التيار ، حيث وجد ان قيمة تيار حد العتبة والكفاءة الكمية كانت (9.5 mA) و (15.3 %) على التوالي في حالة عدم وجود تغذية ضوئية مرتدة ، وفي حالة وجود التغذية المرتدة الضوئية اصبحت قيم كل من تيار حد العتبة والكفاءة الكمية (9 mA) و (16 %) على التوالي . ان التناقص في قيمة تيار حد العتبة ناتج عن تناقص في انقلاب تعداد الحاملات كون التغذية المرتدة الضوئية تمثل تغذية إضافية للوسط الفعال والتي تعمل على تقليل قيمة تيار الضخ الكهربائي اللازم لحدوث انقلاب التعداد وحصول الانبعاث المحفز [9].ان قيمة تيار العتبة يعطى بالمعادلة الاتية:-

$$I_{th} = a\left(2\alpha L - 2\ln R_0 - \ln R_{eff}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

اذ ان a ثابت التناسب ، R_{eff} القدرة الفعالة للانعكاس وتعطى بالمعادلة الاتية:-

$$R_{eff} = \left[\frac{R_1 + r}{1 + R_1 r}\right]^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

وبذلك عند التغذية المرتدة الضوئية يكون التغير النسبي في تيار العتبة كما يأتي:-

$$\frac{\Delta I_{th}}{I_{th}} = \frac{\ln\left[1 - F_{trac}(1 - R_1)/R_1\right]}{2\alpha L - \ln R_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

كما ويمكن حساب قيمة الكفاءة الكمية الخارجية External Quantum Efficiency من خلال اخذ مقلوب ميل المنطقة الخطية من المنحني البياني المبين في الشكل (5) والذي يمكن من خلاله ملاحظة ازدياد قيمة الكفاءة الكمية الخارجية بسبب التغذية المرتدة الضوئية.

2- تأثير تيار الحقن على نسبة التغذية المرتدة الضوئية

باستخدام الترتيب التجريبي المبين في الشكل (2) تم دراسة تاثير قيمة تيار الحقن على قيمة نسبة التغذية المرتدة الضوئية وذلك من خلال قياس القدرة الضوئية لكل من الشعاع المنبعث والشعاع المنعكس والمتمثلة بقراءة الكاشفين PIN_2 و PIN_1 على التوالي و المقابلة لكل قيمة من قيم تيار الحقن وعليه فان PIN_2 / PIN_1 تمثل نسبة التغذية المرتدة الضوئية. الشكل (6) يوضح العلاقة بين هذه النسبة مع تغير تيار الحقن لثنائي الليزر والذي نجد من خلاله ان هذه النسبة تبقى ثابتة مع تغير قيمة تيار الحقن كون الزيادة الحاصلة في تيار الحقن تؤدي الى زيادة قدرة كلا الجزئين من اجزاء الشعاع الضوئي والذي يتم شطره الى قسمين بوساطة مجزء الحزمة.

3- تحديد مقدار التوهين الضوئي في مجموعة الموهنات

اجريت دراسة مقدار التوهين في الاشارة الضوئية نتيجة مرورها خلال الموهن الضوئي والعلاقة بين عدد الموهنات ومقدار التوهين الضوئي لأجل التحكم بالقدرة الضوئية المرتدة الى تجويف الليزر. الشكل (7) يمثل العلاقة العملية لمقدار التوهين مع عدد الالواح المستخدمة في الموهن الضوئي. فضلا عن ذلك تم بيان تاثير عدد هذه الموهنات على نسبة التغذية المرتدة الضوئية وكما موضح في الشكل (8) والذي يتبين من خلاله ان زيادة عدد الموهنات يؤدي الى نقصان في نسبة التغذية المرتدة الضوئية كون الموهنات تعمل على تقليل شدة الشعاع الضوئي المنعكس من المرآة إلى تجويف الليزر.

4- تأثير نسبة التغذية المرتدة الضوئية على التحليل النبضي

في هذا الجزء تم تشغيل الليزر تشغيلا مستمرا بتيار (9.7 mA) وضمن تضمينا مباشراً Direct Modulation بإشارة تضمين مربعة ذو تردد (5 kHz) ودورة فرض (11%) و المبينة في الشكل(9) كما و ثبتت درجة حرارة كبسولة الليزر خلال فترة اجراء القياسات عند (20 ^{o}C) بعدها تم تغير قيمة التغذية المرتدة الضوئية من خلال استخدام العديد من الموهنات الضوئية . الشكل (10) يبين التحليل النبضي لشعاع الليزر المستلم بواسطة الكاشف الضوئي PIN_2 من خلال جهاز المحلل المتعدد القنوات MCA عند استخدام اعداد مختلفة من الموهنات الضوئية . ومن خلاله نجد ان قمم التحليل النبضي تزحف نحو الترددات العالية الممثلة بأرقام القنوات المتزايدة نحو اليمين , عند نقصان عدد الموهنات المستخدمة وكما موضحة في الشكل (11) ، وهذا يبين ازدياد طاقة الفوتونات المنبعثة من الليزر ويعزى ذلك الى ان نقصان عدد الموهنات ينتج عنه زيادة في قيمة التغذية المرتدة الضوئية والتي تمثل تغذية إضافية للوسط مؤديا بذلك الى زيادة الكفاءة الكمية ومن ثم تقليل التأثيرات الحرارية فيزداد اتساع فجوة الطاقة للوسط الفعال.

الاستنتاجات

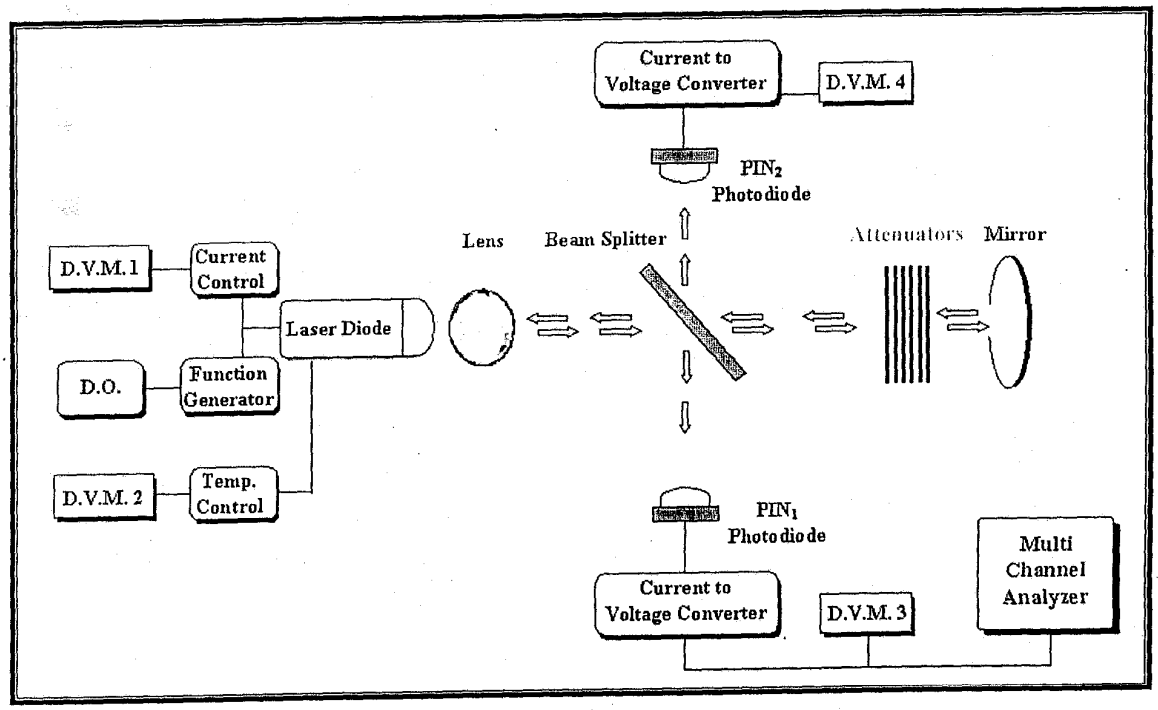
من خلال النتائج المستحصلة من هذه الدراسة توصلنا الى الاستنتاجات الاتية:-

1- امكانية تحسين الخواص الكهروضوئية لليزر شبه الموصل من جراء التغذيـــة المرتـــدة الضوئيـــة اذ لاحظنا نقصان في قيمة تيار حد العتبة وازدياد الكفاءة الكمية الخارجيـــة بوجـــود التغذيـــة المرتـــدة الضوئية.

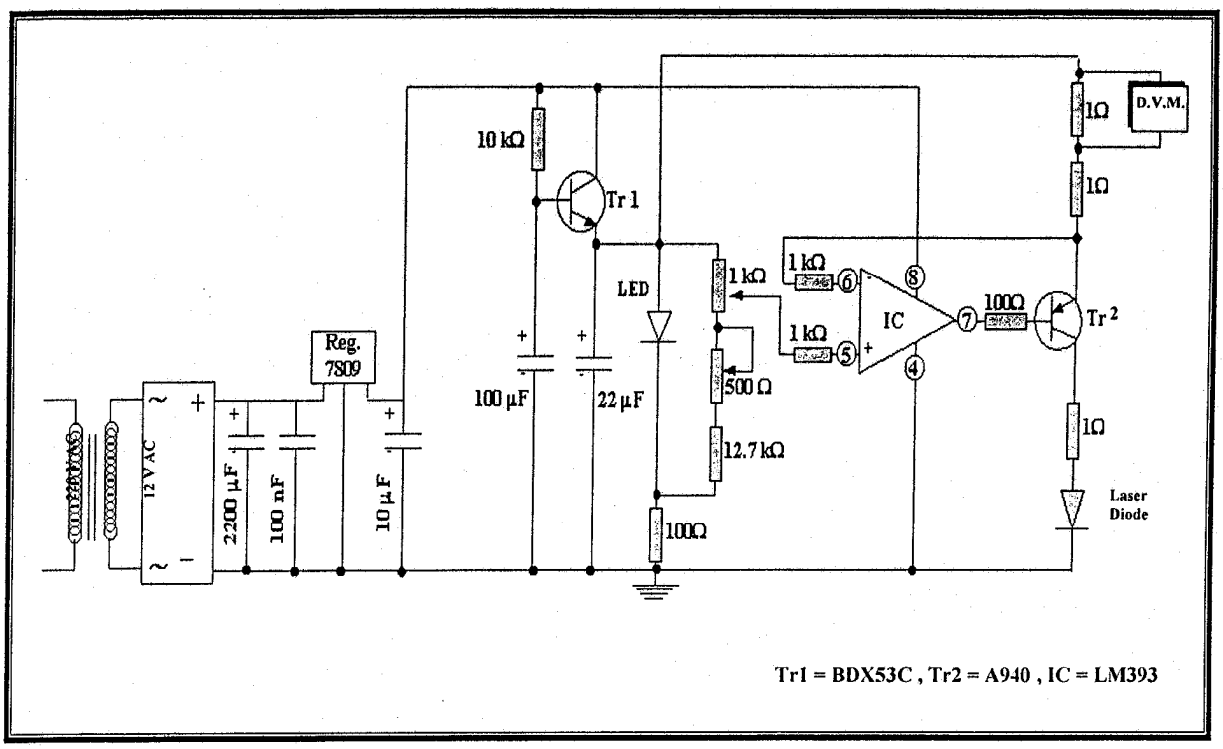
2- ثبات نسبة التغذية المرتدة الضوئية عند مستويات تيار حقن مختلفة كون التغيرات في تيار الحقن ينتج عنها تغيرات متساوية المقدار في كلا الجزئيين لشعاع الليزر.

3- تغير نسبة التغذية المرتدة الضوئية عند استخدام اعداد مختلفة من الواح التوهين والتي تكون مســؤولة عن تغير منطقة العمل لثنائي الليزر.

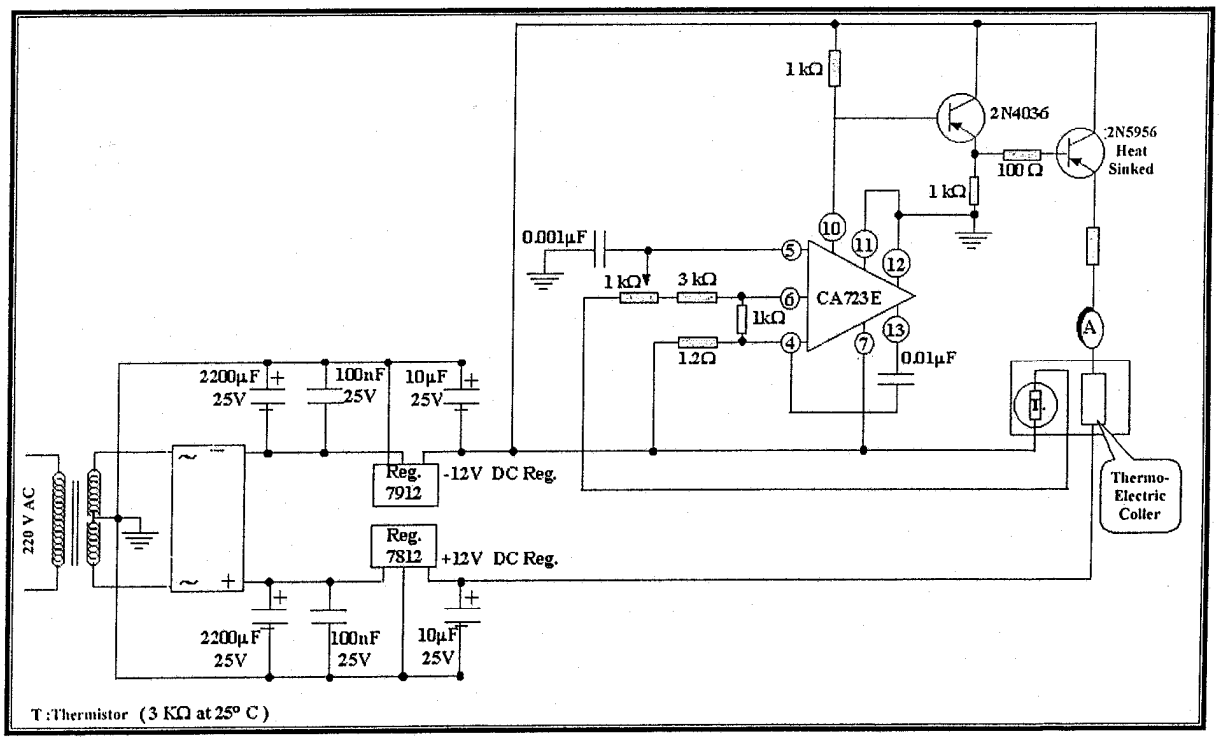
4- زحف قمم التحليل النبضي لشعاع الليزر نحو الترددات العالية بفعل التغذية المرتدة الضوئية تشير الى امكانية تنغيم الطول الموجي للخرج الليزري وهذه ميزة مهمة في العديـــد مـــن التطبيقـــات العمليـــة لليزرات اشباه الموصلات.



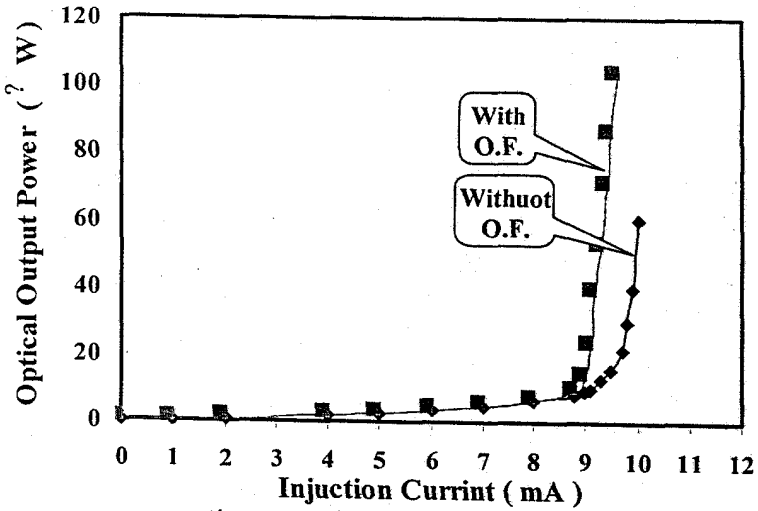
الشكل (2) المنظومة العملية المستخدمة في البحث



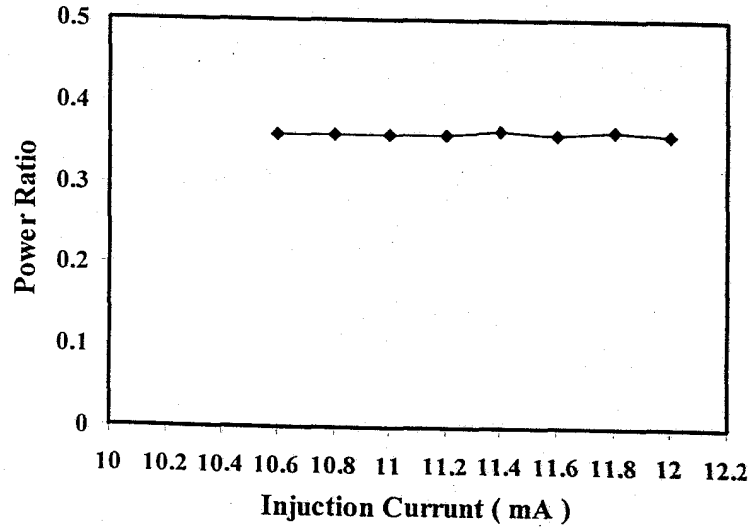
الشكل (3) دائرة مجهز التيار المستمر لثنائي الليزر



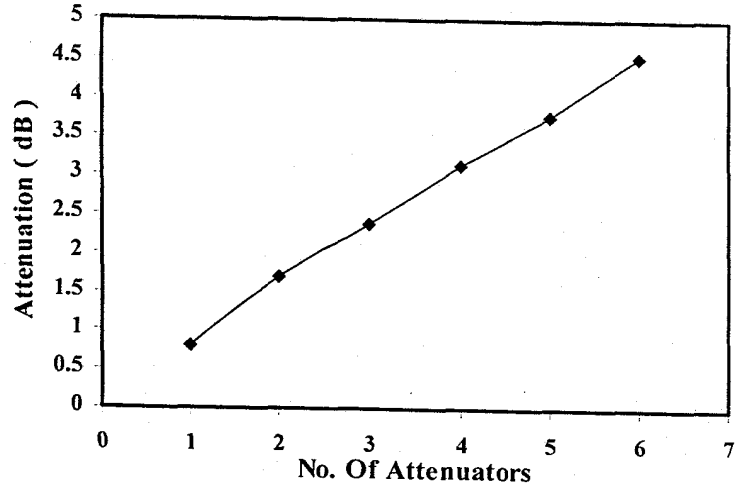
الشكل (4) الدائرة الالكترونية المستخدمة في السيطرة وتثبيت درجة حرارة الليزر



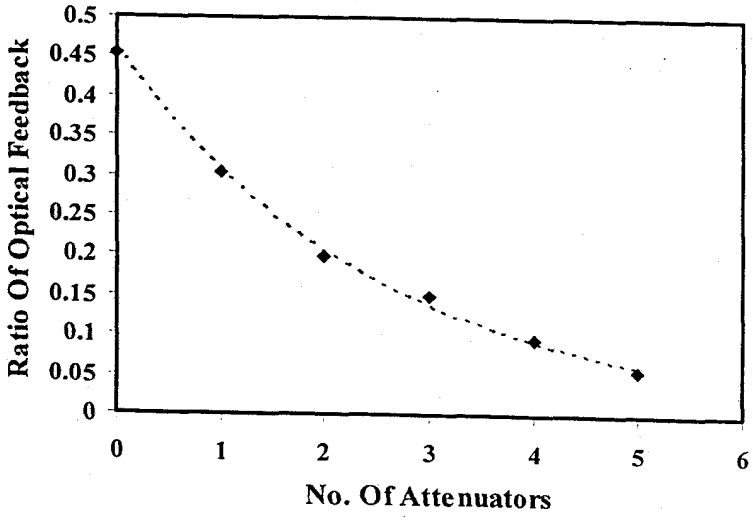
الشكل (5) العلاقة بين القدرة الضوئية الخارجة وتيار الحقن بوجود وعدم وجود تغذية ضوئية مرتدة



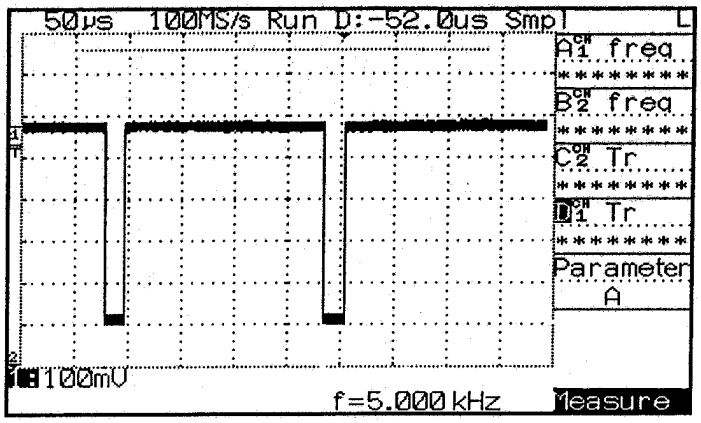
الشكل (6) العلاقة بين تيار الحقن ونسبة التغذية المرتدة الضوئية



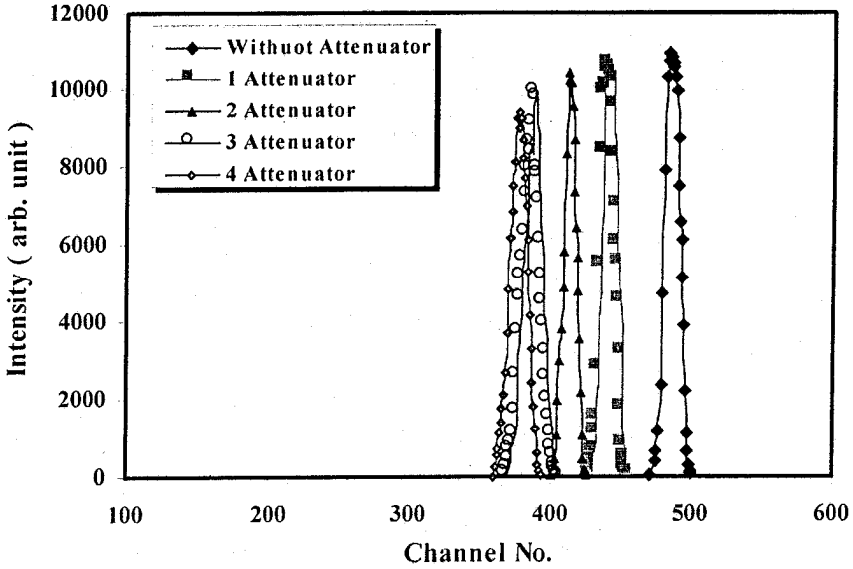
الشكل (7) العلاقة بين عدد الألواح المستخدمة في الموهن الضوئي ومقدار التوهين



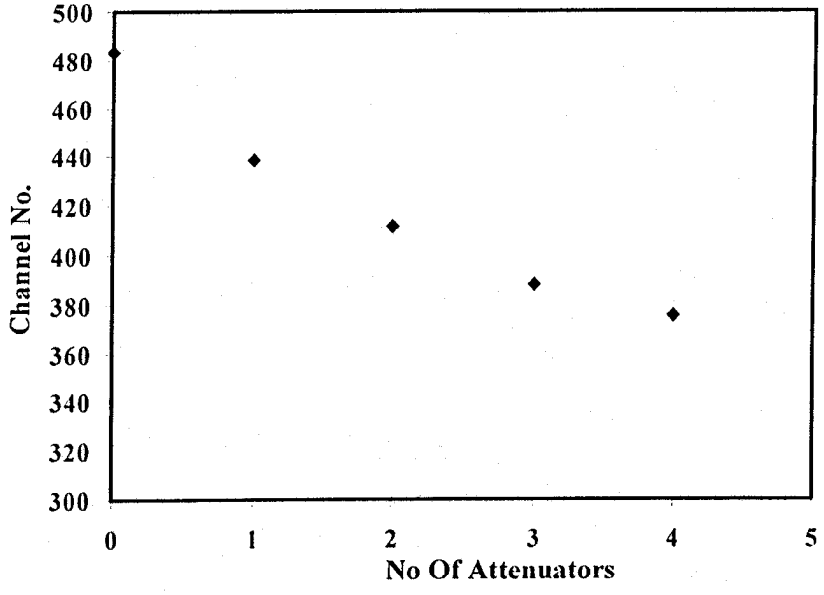
الشكل (8) العلاقة بين عدد الالواح المستخدمة في الموهن الضوئي ونسبة التغذية المرتدة الضوئية



الشكل (9) صورة النبضة المضمنة على ثنائي الليزر



الشكل (10) التحليل النبضي لشعاع الليزر كدالة لتغير عدد الواح التوهين الضوئي



الشكل (11) العلاقة بين عدد الموهنات وقيمة القناة عند القمة

المصادر

1- Brien D. O., Huyet G., and McInerney J. G., Physical Review, 64: 1-4 (2001).

2- Petermann K., IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 1:480-489 (1995).

3- Bayram S. B., and Chupp T. E., Review Of Scientific Instruments 73:4169-4171 (2002).

4- Masolleryz C., and Abrahamz N. B., Quantum Semiclass. Opt., 10:519–534 (1998).

5- Lang R. and Kobayashi K., IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-16:347-355 (1980).

6- Vicente De Vera E. G., and Bernabeu E., Electronics Letters, 25:976-978 (1989).

7- Sukow D. W., Hegg M. C., and Wright J. L., Optics Letters, 27:827-82, (2002).

8- Goldberg L., Taylor H. F., Dandridge A., Weller J. F., and Miles R. O. IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-18:555-564 (1982).

9- Dutta N. K., Olsson N. A., and Liou K. Y., Electronics Letters, 20:588-589 (1984).