دراسة توزيع القدرة الضوئية والمقطع العرضي في بقعة ضوء ليزر شبه الموصل باستخدام تقانة المعالجة الصورية

رغيد ميخائيل إبراهيم
جامعة الموصل / كلية التربية / قسم الفيزياء

تاريخ الاستلام 2006/7/9
تاريخ القبول 2006/9/4

Abstract

This article presents the use of image processing technique to study the effect of injection current on the optical power distribution and laser spot cross-section (profile) of semiconductor laser type (AlGaInP). The arranged optical system specially designed to this purpose had taken the 2-dimension picture of the laser spot at various values of injection current range ($0.7I_{th}$-$1.2I_{th}$). The images were then analyzed and performed using the computer software package (Matlab Version, 7) in order to get the 3-dimension photograph of the laser spot. This spot will translate the power distribution with color grade. Furthermore we found that intensity of the central mode and FWHM at different values of injection current. By using this technique we can observ beam profile and optical power distribution for laser beam immediately from different angles (4π).

Including this research analysis of efficiency of laser beam usage on the base of geometrical consideration. It has shown that the losses of laser energy in some types of material processing technologies can reach as high as level of (> 52%).

الملخص

تضمن هذا البحث اعتماد تقانة المعالجة الصورية (Image Processing) في دراسـة توزيع القدرة الضوئية والمقطع العرضي لليزر شبه الموصل من نـوع (AlGaInP) وبيـان تأثير تيار الحقن في كل منهما. هيئت منظومة ضوئية خاصة لهذا الغرض وسـجلت صـور ثنائية الأبعاد لبقعة ضوء الليزر ولقيم تيار حقن تراوحت ما بين ($0.7I_{th}$-$1.2I_{th}$). عولجـت هذه الصور حاسوبيا باستخدام البرنامج (Matlab Version 7) وتم الحصول على أشـكال ثلاثية الأبعاد لبقعة ضوء الليزر مبينا فيها توزيع القدرة الضوئية وبتدرج لوني فضلا عن ذلك

ومن خلال نتائج عملية المعالجة الصورية اوجدت قيمة كل من شدة النمط المركزي والعرض الكلي عند منتصف الشدة العظمى مبينا تأثير تيار الحقن فيهما. واعتمادا على هذه التقانة يمكن ملاحظة هيئة توزيع القدرة الضوئية لشعاع الليزر انيا من الزوايا جميعها (4π). وتضمن هذا البحث كذلك كفاءة استخدام شعاع ثنائي الليزر نظريا على أساس مجموعة مـن الاعتبـارات الهندسية, وقد لوحظ من خلال النتائج ان الخسارة في طاقة شعاع الليزر المستخدم في تقانات معالجة المواد تصل الى مستويات عالية ($> 52\%$).

المقدمة

تمتلك الليزرات صفات وخصائص مختلفة ومتعددة وإحدى هذه الصفات تتمثل بالنموذج الذي يتضمنه الخرج الليزري. اذ يمثل المقطع العرضي للشعاع Beam Profile أهمية كبيرة في استخدامات الليزر وتطبيقاته جميعا سواء كان ذلك في الطـب او الـصناعة او الأليـاف الضوئية او في عمليات الطباعة الليزرية وعمليات اللحيم والقطع وفي تطبيقات القدرة العاليـة مثل معالجة المواد, اذ يستفاد من جزء معين من طاقة شعاع الليزر, فضلا عـن اسـتخداماته بوصفه مصدراً للإضاءة في المجاهر والمجسات الضوئية, اذ يزودنا شكل المقطع العرضـي توزيع القدرة الضوئية للشعاع بمعلومات مفيدة بشان كيفية استخدام شعاع الليزر علـى نحـو فعال والى أقصى حد ممكن. كما ان المقطع العرضي يزودنا بالـصفات المميـزة والخاصـة بشعاع الليزر مثل وصف شكل الانتشار وجودة الشعاع Beam Quality والفائدة المرجـوة من الشعاع Utility Of The Beam [1]. فضلا عن ان المقطع العرضي يزودنا بالمعلومات الضرورية لكيفية استخدام المكونات الضوئية على نحو فعال في تحويل هيئة القدرة وتوزيعها في الشعاع الخارج[2]. واستناداً الى كل ما ذكر أنفا فان من الصعب بل ومن المستحيل وضع شعاع الليزر حيز الاستخدام دون معرفتنا هيئة المقطع العرضي وكيفية توزيع القدرة الضوئية في نموذج الخرج الليزري[3].

يمكن تعريف المقطع العرضي لشعاع الليزر بأنه وصف مميز لتوزيع الطاقة الإشعاعية عبر جبهة الموجة للشعاع الضوئي والتي يمكن ان تلاحظ بوصفها رسما بين الـشدة النـسبية لنقطة معينة عبر المستوي الذي يتقاطع مع مسار الشعاع الـضوئي. وفـي ليـزرات أشـباه الموصلات Semiconductor Laser يشكل الخرج الليزري شعاعاً ذا مساحة مقطع عرضي بيضوي, يكون معتمدا على تركيب نبيطة الليزر, ويأخذ توزيع المجال عبـر شـعاع الليـزر تشكيلا ذا تعريف محدد غالبا ما يشير الى أنماط الليزر[4]. وبذلك نجـد ان فهمنـا لـشروط الأنماط التي يسمح لها بالتذبذب وعددها وتوزيع المجال الناتج عنهـا هـو امـر ضـروري

وأساسي في تحديد هيئة الشعاع الخارج فضلا عن أهميته في عمليات تصميم ليزرات أشباه الموصلات وصناعتها ولاسيما تلك التي تعمل بنمط أساسي منفرد[5].

تتمثل القياسات الأساسية للمقطع العرضي لشعاع الليزر بالكميات التي تحدد عرض الشعاع وقطره, فضلا عن ان القياسات الأخرى المألوفة هي مستوى العرض الكلي عند منتصف الشدة العظمى Full Width at Half Maximum (FWHM) اذ تهبط القدرة الى منتصف الشدة العظمى, ان قياسات قطر الشعاع بوساطة أي من الطريقتين تسمح بتحديد صفات مهمة أخرى في الأنماط الإشعاعية الخاصة[5].

هناك عدة تقانات تستخدم لتحديد المقطع العرضي وقطر الشعاع الضوئي منها الشريط الفسفوري والأفلام الحساسة وشرائح الأشعة تحت الحمراء Infrared Cards وأوراق الحرق Burn Papers , وغيرها من التقانات والتي لا تزودنا بقيم عددية وبذلك فهي تقوم على التقدير الذاتي للصورة [6]. لذلك فقد اقتضت الحاجة للبحث عن تقانات أخرى أكثر دقة وموثوقية منها عملية استخدام الة التصوير ثم معالجة الصورة الناتجة حاسوبيا وبذلك نجد ان هذه التقانة هي المفضلة لانها تعطي أرقاماً صحيحة وحقيقية تجعل من الأسهل والأدق تحديد طبيعة الشعاع[7,8].

ان تحليل النتائج بطريقة النمذجة غير العددية Non-Numerical Sampling يقود الى اعتماد التقييم الذاتي ثم ظهور اراء مختلفة بشان شعاع الليزر, لكن استخدام تقانة مسح الصورة ثنائية الأبعاد للشعاع تزودنا بقياسات عددية (رقمية) متعلقة بشكل الشعاع وحالته الاهليليجية. فضلا عن ان استخدام هذه التقانة في تحديد المقطع العرضي يزودنا كذلك بقياسات دقيقة لنقاط متضمنة في داخل الشعاع واي خلل في المنظومة الضوئية[9].

المنظومة العملية

الشكل (1) يوضح المنظومة التجريبية المستخدمة لدراسة توزيع القدرة الضوئية وهيئة المقطع العرضي في بقعة ضوء الليزر, والتي تتالف من:

1- **مصدر لضوء الليزر:** والذي هو ليزر شبه موصل من نوع AlGaInP ذو التركيب المتباين المزدوج الشريطي و ذو قدرة خرج ضوئية ($P_{out} \leq 5$ mW) وطول موجي منبعث في المدى nm (680 - 630).

2- **مجهز التيار:** لتشغيل ثنائي الليزر والسيطرة على تيار الحقن تم تصميم دائرة إلكترونية خاصة لهذا الغرض والتي تعد مسيطرا انيا للتيار والفولتية. تصل دقة تغير التيار لهذه الدائرة الى (± 0.1 mA) ,والتي يتم مراقبته باستخدام المقياس الرقمي (DMM_1), ودقة تغير الفولتية الى (± 0.01 Volt).

3- **دائرة المسيطر الحراري:** لتثبيت درجة حرارة ثنائي الليزر خلال فترة التشغيل تم بنـاء دائرة الكترونية خاصة لهذا الغرض والتي تتحكم بعمل المبرد الكهروحراري مـن خـلال تحديد مقدار التيار الواجب امراره خلال هذه النبيطة والذي يتم مراقبته باستخدام المقيـاس الرقمي (DMM_2). ان دقة السيطرة على درجة الحرارة وتثبيتها باستخدام هـذه الـدائرة تصل الى ($\pm$ 0.1 ^{o}C) يتم مراقبتها باستخدام المقياس الرقمي (DMM_3).

4- مجزء الحزمة: وهو عبارة عن لوح زجاجي يقوم بتجزئة شعاع الليـزر الـى جـزئيين متساويين من حيث الشدة 50/50 جزء ينفذ ويسقط على حـاجز منفـذ Transmission Screen ومنه الى الة التصوير الرقمية Digital Camera والجزء الاخر ينعكس ويسقط على الكاشف الضوئي (P.D.) والذي يستفاد منه في تحديد مقدار الشدة الضوئية الـساقطة على الة التصوير الرقمية. يمتاز هذا المجزء بصغر الحجم وهو مربع الشكل ذو مـساحة سطحية (36 mm^2) اذ انه ملائم لمساحة بقعة الليزر فضلا عن انه مطلي بطلاء مضاد للانعكاس للاطوال الموجية في المدى nm(900 - 600).

5- الكاشف الضوئي: لكشف الإشارة الضوئية تم استخدام الكاشف الضوئي السلكوني نوع (FDS 100) ذو مساحة فعالة (13 mm^2) وحساسية كشف الأطوال الموجية ضـمن المدى nm (350-1100). كما تم تجهيز هذا الكاشف بدائرة محول تيار الـى جهـد يراقب باستخدام المقياس الرقمي (DMM_3).

6- الة التصوير الرقمية: استخدمت الة تصوير رقمية, من نـوع (Sony – S90) ذات قدرة تحليل مقدارها (5 mega-pixels resolution), لغرض تسجيل صور ثنائيـة الأبعاد لبقعة ضوء الليزر والتي يتم تحليلها فيما بعد حاسوبيا.

النتائج والمناقشة

تعد كثافة التيار من اهم العناصر في عمل ليزرات أشباه الموصلات اذ يتميز الإشـعاع المنبعث قبل حد العتبة باتساع الخط الطيفي بسبب الانبعاثات التلقائية غير المتشاكهة وبتجاوز حد العتبة يبدا الفعل الليزري بالظهور لان عمليات الانبعاث المحفز تكـون هـي المـسيطرة والسائدة والمسؤولة عن انبعاث معظم الفوتونات الضوئية, وبذلك يكون الربح الـضوئي ثـم القدرة الضوئية الخارجة من نبيطة ثنائي الليزر دالة لتيار الحقـن والتـي تعطـى بالعلاقـة الاتية[4].

$$P_{out} = \frac{h\nu}{2q}\frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_{int}}\left(I - I_{th} - \Delta I_L\right) \qquad (1)$$

اذ ان h : ثابت بلانك, ν : تردد الفوتون, q : عدد صحيح يأخذ قيماً زوجية وفردية تبعا للأنماط الجانبية من حيث كونها زوجية او فردية, α_m : خسائر المرايا, α_{int} : الخسائر الداخلية, I : تيار الانحياز, I_{th} : تيار العتبة, ΔI_L : مقدار الزيادة في تيار التسرب مع زيادة تيار الحقن. فضلا عن ان قيمة تيار الحقن تؤثر في عدد الأنماط المتذبذبة داخل التجويف التي يكون لكل واحد منها حد عتبة وقيمة تشبع خاصة بها. وهكذا نجد ان قيمة تيار الحقن لها تأثيرات في العديد من المعلمات التي تؤدي دورا مهما في تحديد هيئة المقطع العرضي لشعاع الليزر وتوزيعات القدرة الضوئية.

في بداية العمل التجريبي درست خواص ثنائي الليزر المستخدم قدرة- تيار والذي هو من نوع AlGaInP عند درجة حرارة (25^oC) ومن خلال منحنى الخواص استخرجت مجموعة من المعلمات التشغيلية متمثلة بتيار حد العتبة وكفاءة الميل وهي (13.5 mA) و (0.21 mW/mA) على التوالي.

باستخدام المنظومة التجريبية المبينة في الشكل (1) شغل ثنائي الليزر بالصيغة المستمرة Continuous Wave (CW) وعند درجة حرارة ثابتة (25^oC) وذلك من خلال تجهيزه بتيار انحياز مستمر وبقيم مختلفة شملت حالات ما قبل, وعند, وبعد العتبة وقد سجلت صورة البقعة الضوئية المقابلة لكل حالة باستخدام الة تصوير رقمية (Digital Camera). الشكل (2) يمثل صور بقعة الليزر المستحصلة عمليا ولقيم تيار حقن (10, 11, 12, 13, 14, 14.5, 15, 15.5) mA. وباستخدام تقانة المعالجة الصورية (Image Processing) والبرنامج الحاسوبي (Matlab Version 7) تم تحليل هذه الصور وإظهرت توزيعات القدرة الضوئية والمقطع العرضي في بقعة الليزر وعلى هيئة أشكال ثلاثية الأبعاد وبتدرج لوني يشير الى مقدار القدرة الضوئية في كل جزء من أجزاء البقعة الضوئية وكما موضح في الشكل (3).

ومن خلال نتائج عملية المعالجة الصورية أوجدت قيمة القدرة الضوئية للنمط المركزي ولقيم مختلفة من تيار الحقن وكما موضح في الشكل (4) الذي نجد من خلاله حدوث زيادة في القدرة الضوئية للنمط المركزي مع زيادة تيار الحقن وذلك بسبب زيادة عدد الحاملات المحقونة وثم زيادة عدد الفوتونات المتولدة والخارجة من نبيطة ثنائي الليزر. كذلك أوجدت قيمة العرض الكلي عند منتصف الشدة FWHM وذلك عن طريق معالجة صورة بقعة ضوء الليزر والحصول على اشكال ثنائية الابعاد لتوزيع الشدة الضوئية مع المقطع العرضي وللاتجاهين العمودي والموازي لمستوى ملتقى النبيطة (p-n) عند قيم مختلفة للقدرة الضوئية المنبعثة من ثنائي الليزر والمقابلة لقيم تيارات الحقن أنفة الذكر وكما مبين في الشكل (5)

الذي نجد من خلاله حدوث نقصان في قيمة العرض الكلي عند منتصف الشدة العظمى ولاسيما عند تجاوز منطقة حد العتبة اذ تحدث زيادة كبيرة في قيمة القدرة الضوئية المنبعثة بسبب تغلب عمليات الانبعاث المحفز على عمليات الانبعاث التلقائي.كما ويعزى الهبوط في قيمة FWHM بعد منطقة العتبة الى زيادة قدرة الأنماط المركزية وحدوث عملية تشبع في الأنماط الجانبية[4].

الحسابات النظرية للمقطع العرضي لبقعة ضوء ليزر شبه الموصل

ان بقعة ضوء ليزر شبه الموصل غالبا ما تأخذ الشكل البيضوي لذلك فان تحليل شعاع الليزر يجب ان يؤخذ بوصفه حالة خاصة[1]. وبالاستعانة بنموذج توزيع الطاقة الإشعاعية ذي الدالة الكاوسية, واعتبار قيمة الشدة القصوى (I_{max}) تمثل في هذه الحالة الطاقة العظمى في الشعاع الضوئي وهي (1), فان دالة الشدة بالاتجاه العمودي على مستوى الملتقى تعطى بالعلاقة الاتية[4]:

$$I(y)=\sqrt{\frac{2}{\pi\omega_o^2}}\exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_o^2}\right) \qquad (2)$$

اذا ان ω_o تمثل تخصر الشعاع الضوئي.

ولإيجاد مقدار الطاقة ($E_{y_1-y_2}$) المتمركزة في جزء حلقي من شعاع الليزر والمحدد بالدائرتين ذات القطر (y_1 , y_2) نكامل المعادلة (2) فنحصل على المعادلة الاتية[4]:

$$E_{y_1-y_2}=\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega_o}y_2\right)-\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega_o}y_1\right) \qquad (3)$$

وبفرض ان عمليات معالجة المواد باستخدام الليزر تتم بتسليط جزء معين من شدة الشعاع (I_h) وكما موضح في الشكل (6)، فاننا سوف ندخل العامل (h) والذي يمثل $h = (I_h / I_{max})$. وبذلك فان h تمثل مستوى العمل (Working Level) في شعاع الليزر وان مدى القيم التي يأخذها هذا العامل هي ($1 \rightarrow 0$). وباستخدام المعادلة (3) يصبح من السهل إيجاد العلاقات الخاصة بحساب الأجزاء المختلفة للطاقة في شعاع الليزر والمتمثلة بـ E_1 القمة (Apex) و E_2 الذيل (Tails) و E_3 المستطيل الفعال (Effective Rectangular) وكما ياتي:

$$E_1=\operatorname{erf}\left(\sqrt{-\ln h}\right)-\frac{2h\sqrt{-\ln h}}{\sqrt{\pi}} \qquad (4)$$

$$E_2=1-\operatorname{erf}\left(\sqrt{-\ln h}\right) \qquad (5)$$

$$E_3 = \frac{2h\sqrt{-\ln h}}{\sqrt{\pi}} \qquad (6)$$

$$E_1 + E_2 = 1 - \frac{2h\sqrt{-\ln h}}{\sqrt{\pi}} \qquad (7)$$

ان نتائج الحسابات باستخدام هذه المعادلات والمتعلقة بالليزر شبه الموصل هي كما موضح في الشكل (7) والتي لها أهمية كبيرة في بيان كفاءة استخدام شعاع الليزر. ففي حالة استخدام شعاع الليزر في تقانات معاملة الطبقات الرقيقة من المواد فان جزء الطاقة (E_1) سوف يمثل خسارة في طاقة الشعاع الضوئي لان هذا الجزء يتجاوز مستوى طاقة العمل (I_h) وبذلك فان كلا الجزئيين من الشعاع الضوئي والمتمثلين بـ (E_1 , E_2) سوف يمثلان خسارات الطاقة في الشعاع الضوئي, وبجمع هذين الجزئيين سوف نحصل على مقدار الخسارة الكلية في شعاع الليزر وكما هو واضح في الشكل (7) اذ نجد ان القيمة الدنيا لهذه الدالة هي (0.52) أي ان اقل خسارة في طاقة الشعاع هي (52%) في حين تكون أقصى قيمة مؤثرة من طاقة الشعاع هي (48%) من الطاقة العظمى لشعاع الليزر.

الاستنتاجات

1- أظهرت تقانة المعالجة الصورية دقة جيدة في تحديد توزيعات الطاقة في خرج ليزر شبه الموصل وبيان تأثير تيار الحقن في هذه التوزيعات. ففي مناطق التيار ما قبل العتبة نجد بان شكل التوزيع يكون عريضاً لانه ناتج من الانبعاثات التلقائية, وبزيادة قيمة تيار الحقن الى ما بعد حد العتبة تحدث زيادة كبيرة في قدرة الأنماط المركزية محدثة تناقصاً في قيمة عرض منحنيات توزيع الطاقة الضوئية.

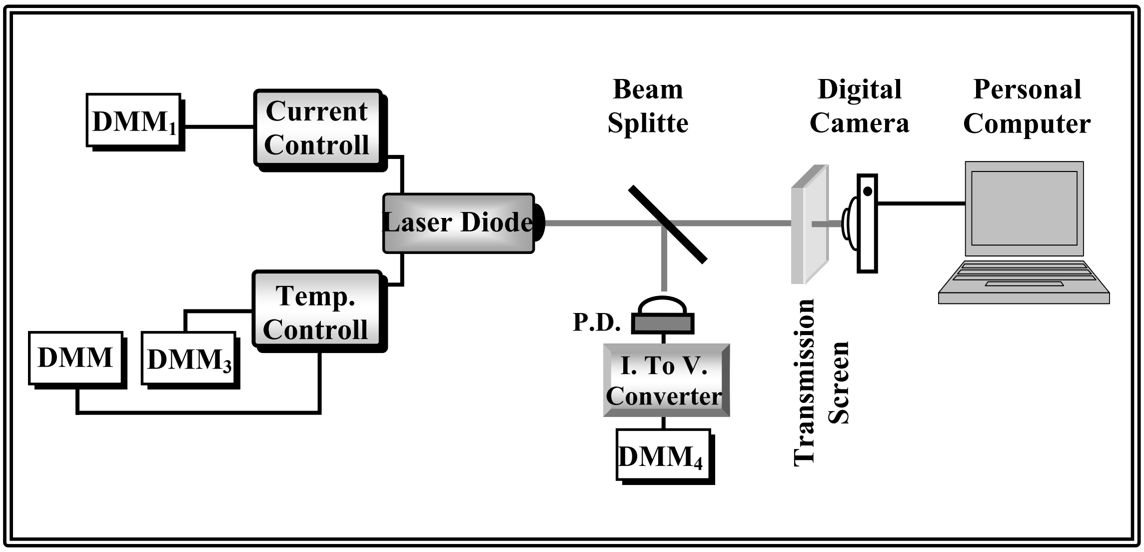
2- من الممكن استخراج قيمة FWHM وقدرة النمط المركزي وبمقادير عددية وبيان تأثير تيار الحقن دون الحاجة الى استخدام التقانات التقليدية المتمثلة بطريقة مسح مقطع البقعة بوساطة كاشف ضوئي مع فتحة صغيرة (Pinhole)[6] او المسح بوساطة حافة حادة[6].

3- من الممكن الحصول على صورة ثنائية الأبعاد لبقعة ضوء الليزر وعلى نحو آني متخطيا بذلك مشكلة تذبذب القدرة الضوئية المنبعثة نتيجة تباين تيار الحقن ودرجة الحرارة التي غالبا ما تحدث عند استخدام التقانات التقليدية.

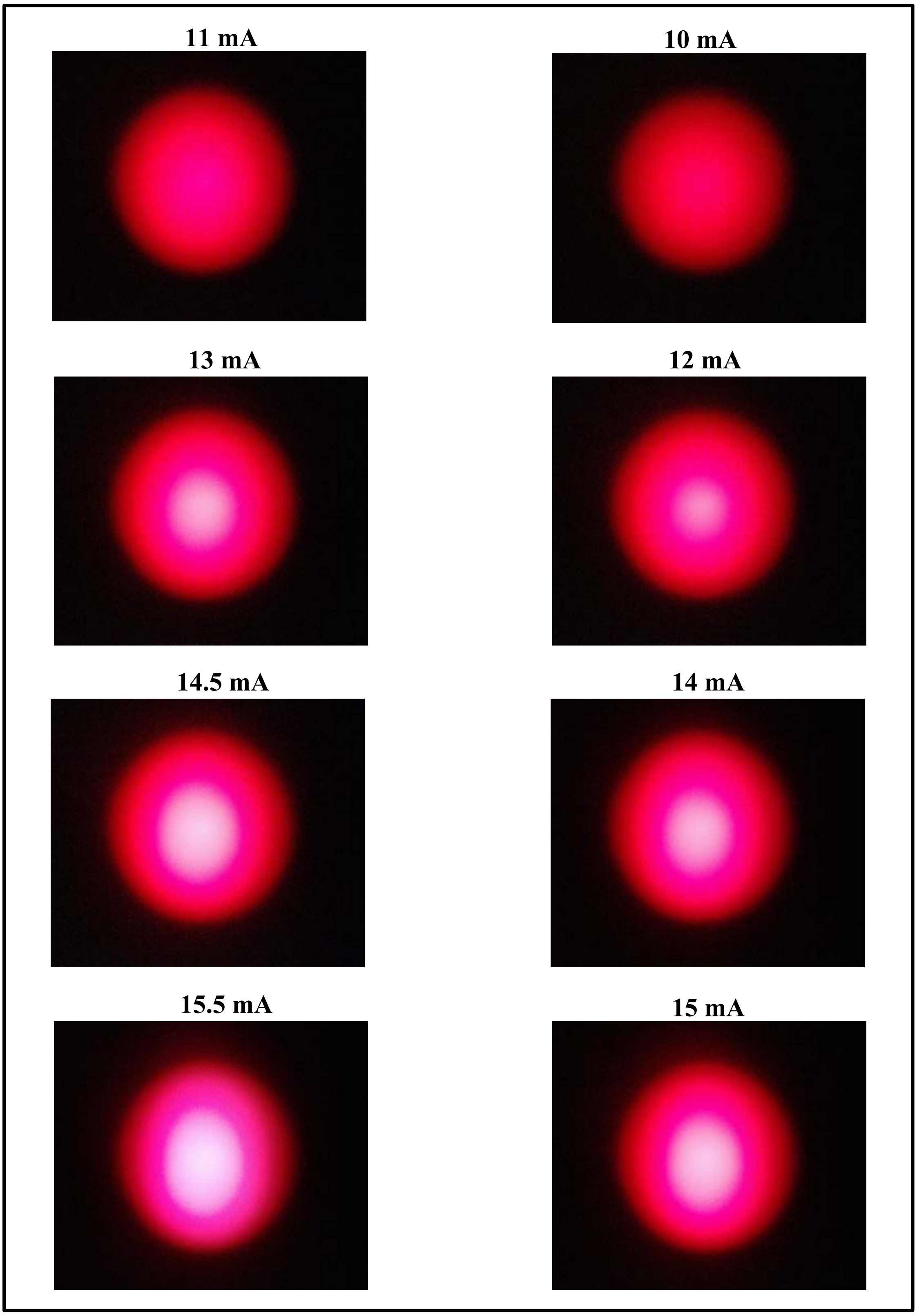
4- ان النتائج المستحصلة من الحسابات النظرية لشعاع ثنائي الليزر لها أهمية كبيرة في كفاءة استخدام شعاع الليزر، اذا ان هذه الطريقة تجعل من الممكن تحديد مقدار الخسارة في

شعاع الليزر, التي تصل في بعض الأحيان الى نصف الطاقة الكلية لشعاع الليزر. ليست هناك طريقة شاملة وعامة لزيادة كفاءة الشعاع, لكن كفاءة استخدام شعاع الليزر في عدد من أنواع التطبيقات مثل القطع واللحيم والتصوير المجسم يمكن زيادتها من خلال تحويل شكل توزيعات الشدة في الشعاع الضوئي من التوزيع الكاوسي الى التوزيـع المتجـانس الذي غالبا ما يدعى بـ القمة المسطحة (Flattop) اذ يكون المقطع المسطح فـي هـذه الحالة منطبقا على الجزء المؤثر من الشعاع الضوئي وبذلك فان كفاءة اسـتخدام شـعاع الليزر تصل تقريبا الى (100%).

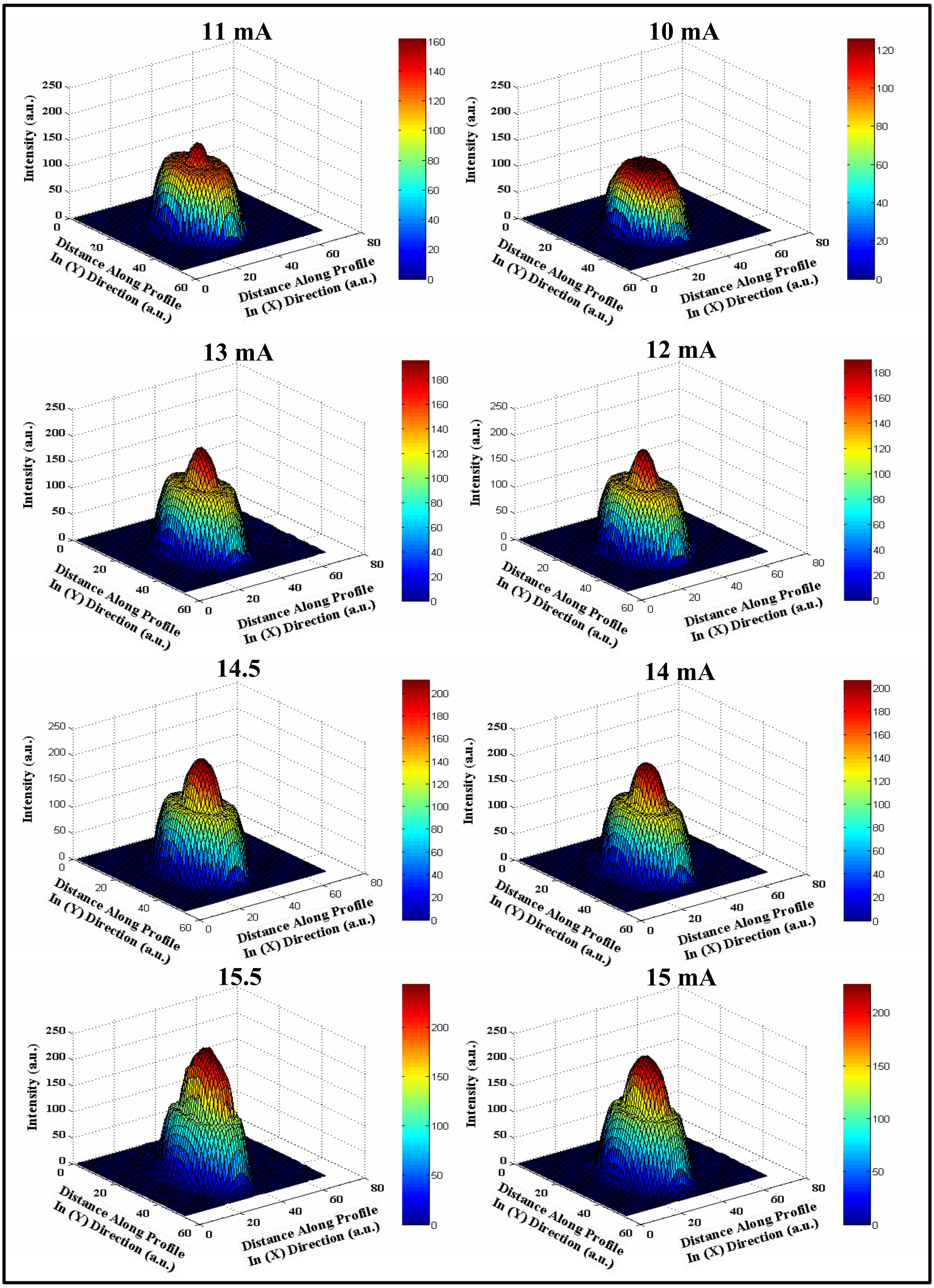
5- ان تقنية المعالجة الصورية زودتنا بدقة عالية في قياس الخصائص المتعددة لشعاع الليزر وبصورة متكاملة (مدمجة) بدلا من استخدام منظومات متعددة فضلا عن ان هذه التقنيـة تعرض وبوضوح حالات الانحراف في توزيعات الشدة عن الحالة المنتظمة.وبذلك فهـي تزودنا بتحليل كمي دقيق.



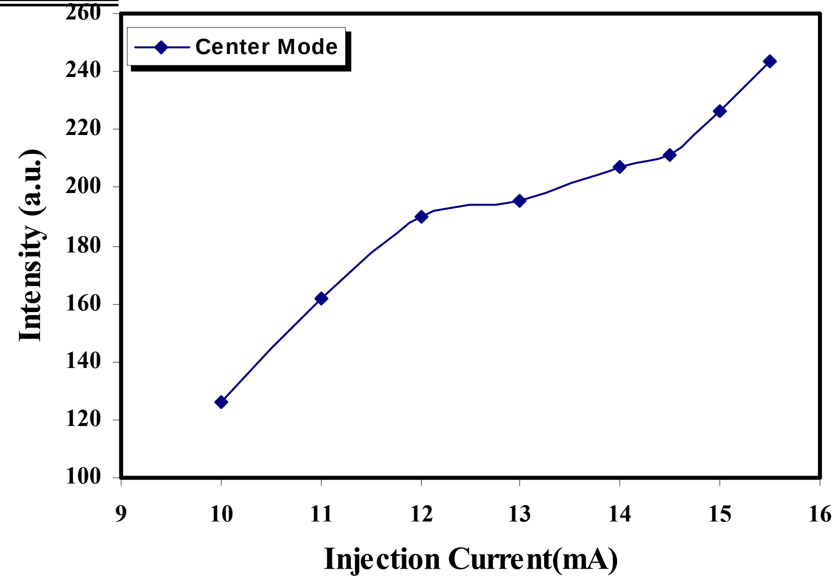
الشكل (1) المنظومة التجريبية المستخدمة في الدراسة



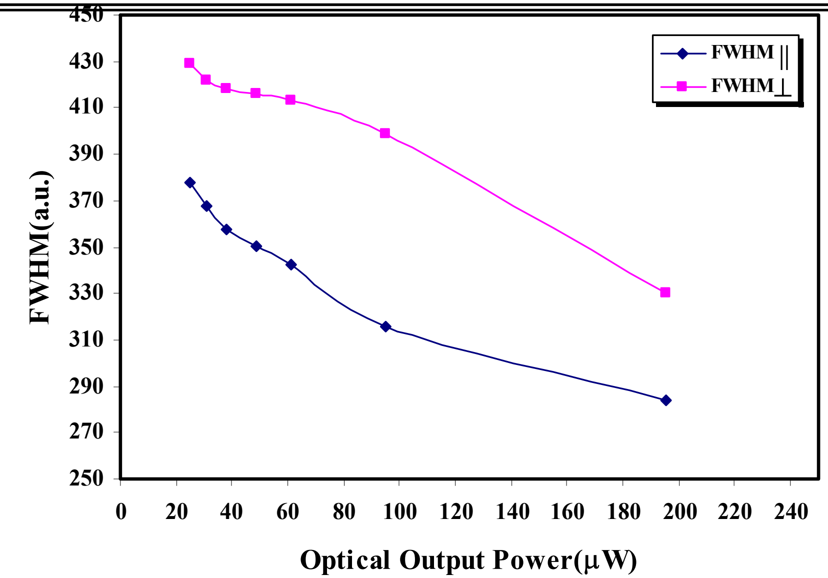
الشكل (2) صور بقعة ضوء الليزر عند قيم مختلفة من تيار الحقن



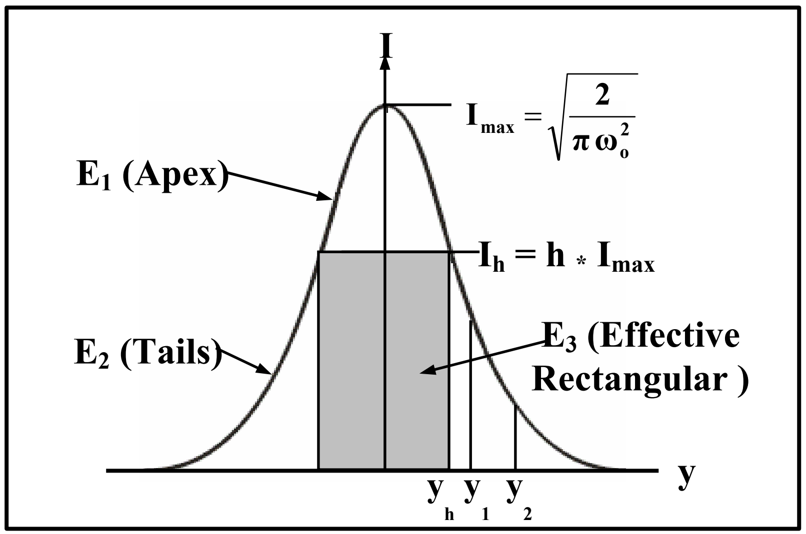
الشكل (3) نتائج عملية المعالجة الصورية لصور بقعة ضوء الليزر



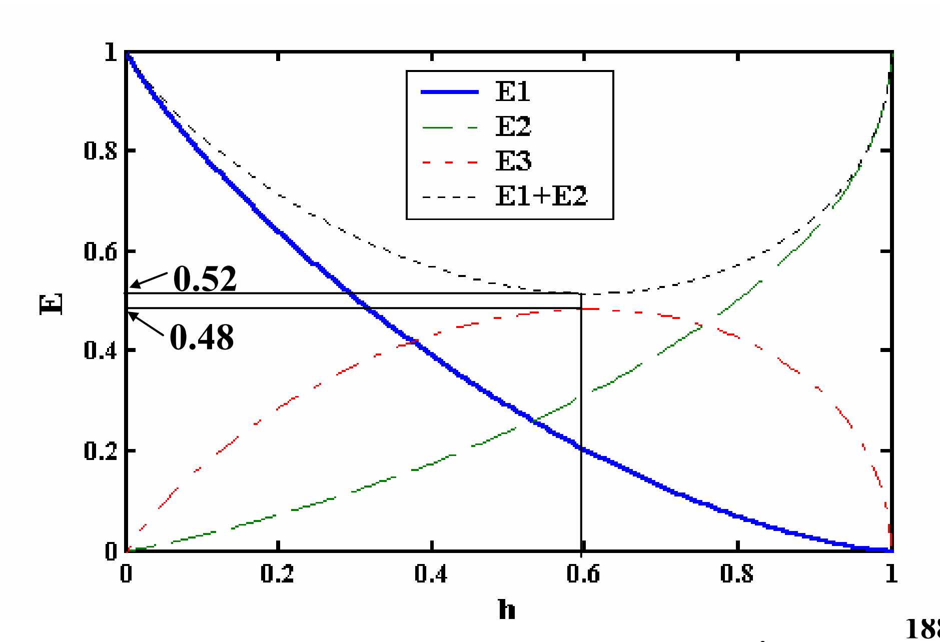
الشكل (4) شدة النمط المركزي بوصفها دالة لتيار الحقن



الشكل (5) العرض الكلي عند منتصف الشدة بوصفه دالة للقدرة الضوئية الخارجة



الشكل (6) مخطط توزيع الطاقة للدالة الكاوسية



الشكل (7) الأجزاء المختلفة من طاقة شعاع الليزر بوصفها دالة للعامل h

المصادر

1- F.M. Dickey, 1996 **"Gaussian Laser Beam Profile Shaping"** Optical Eng., Vol. 35, pp: 3285-3295.

2- K.-H. Brenner, 2003 **"Beam shapes with a soft flat-top"** Annual Report, Chair of Optoelectronics, University of Mannheim, pp.17-21.

3- F. M. Dickey, 2003 **"Laser Beam Shaping"** Optics and Photonics News, pp.30-35.

4- W. W. Chow & S. W. Koch, 1999 **"Semiconductor Laser Fundamentals"** Springer-Verlag Berlin Heidelberg,.

5- W. C. Chang, 2005 **"Principles of Lasers and Optics"** Cambridge University Press.

6- J. M. Liu, 1982 **"Simple Technique for Measurements of Gaussian Beam Spot Sizes"** Opt. Lett., Vol. 7, PP.196-198.

7- J. A. McAndrew, etal., 1991 **" A Beam Shaping System"** Proc.SPIE 1500, PP.172-179.

8- P.P. Banerjee, D. Cao, and T.-C. Poon, 1997 " **Basic Image Processing Operations**" Applied Optics, Vol. 36, pp: 3086-3089.

9- Yas A. Alsultanny, 2006 "**Laser Beam Analysis Using Image Processing**" Journal of Computer Science, Vol. 2, No. 1, pp: 109-113.