

- [6] R. A. Ismail, "Study of induced diffusion and defects in germanium by pulsed laser", Ph.D. Thesis, University of Technology (1995).
- [7] M. Bass, "Laser Materials Processing", North-Holland Pub. Co. (1983), Ch.7.
- [3] W. K. Hamoudi and R. O. Dala Ali, *J. Eng. Technol.*, 19, 125-135 (2000).
- [4] W. K. Hamoudi and R. O. Dala Ali, *J. Eng. & Technol.*, 35, 1-6 (2000).
- [5] J. M. Poate and W. Moyer, "Laser Annealing of Semiconductors", Academic Press (1982), 6-183.

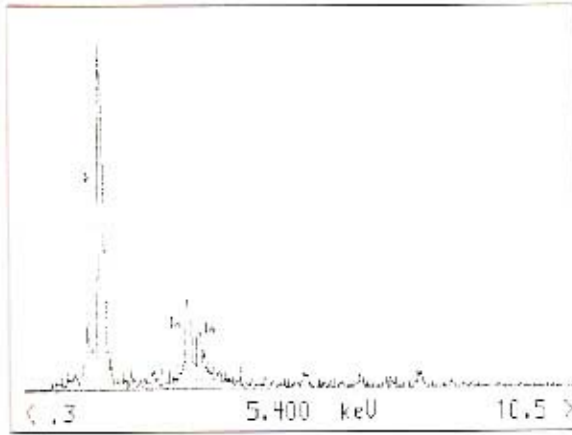
---

جرى تكويم هذه المقالة من قِبل مقيمين في قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية / الجامعة التكنولوجية ، بغداد ومعهد التيزر للدراسات العليا / جامعة بغداد ، بغداد ، العراق

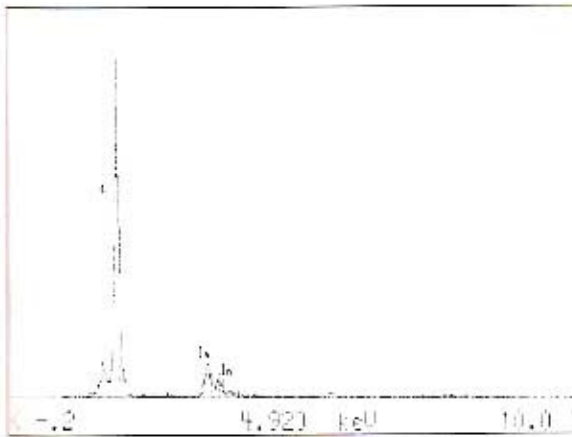
---

### **Structural Characteristics Study of Indium Diffusion in Silicon Using a Pulsed Nd:YAG Laser**

In the current study, a pulsed Nd:YAG laser was employed to induce indium diffusion in silicon by laser irradiation of a thin indium film deposited on silicon. The work was aimed to study the structural characteristics changes of the irradiated region resulting from varying laser pulse energy within the range (0.25-0.53)J and varying silicon temperature from 300K to 373K during laser irradiation. Optical and scanning electron microscopes were used for the surface topography study of the samples. The study showed formation of linear cracks, protrusions and craters depending on the laser energy used. The indium diffusion depth within the silicon was determined using an energy dispersive spectra (EDS). This was done when illuminating at the laser melting threshold at substrate temperature of 373K and when illuminating at higher laser energy and substrate at room temperature (300K). the diffusion depth increased and the impurity concentration at the surface decreased as laser energy got higher. Higher substrate temperature helped increasing the impurity concentration at the surface.

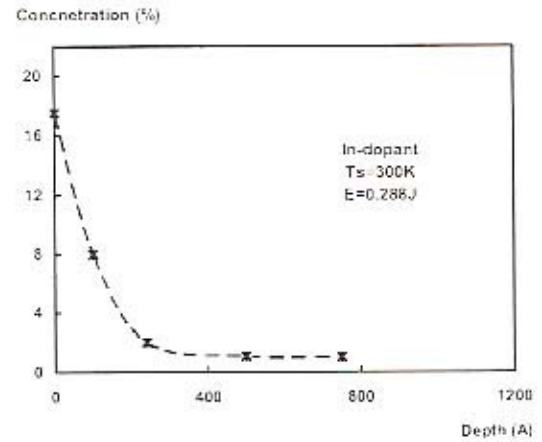


(a)

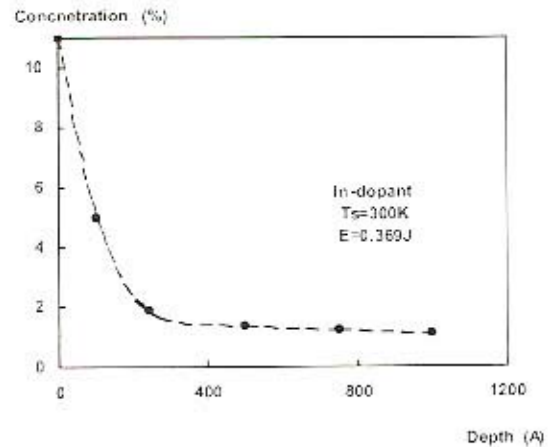


(b)

شكل (12) طيف الأشعة السينية المميزة من جهاز EDS للسيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة تشعيع (0.288J) ودرجة حرارة الغرفة: (a) عند حافة النظرية و (b) عند مركز النظرية



شكل (10b) تغير النسبة المئوية للإنديوم مع العمق عند التشعيع بطاقة 0.288J عند درجة حرارة الغرفة

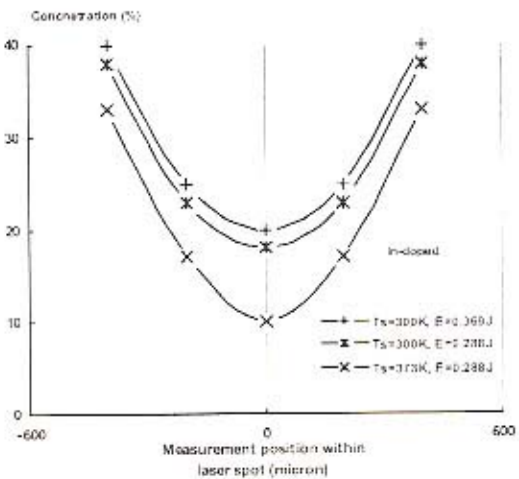


شكل (10c) تغير النسبة المئوية للإنديوم مع العمق عند التشعيع بطاقة 0.369J عند درجة حرارة الغرفة

١٠- (المستنتاجات)

مما سبق يتضح لنا أن العيوب التركيبية تتغير تبعاً لتغير طاقة التشعيع حيث ظهرت شقوق خطية عند التشعيع بطاقات واطنة بسبب الصدمة الحرارية، أما عند زيادة الطاقة، فيظهر تركيب خلوي تتجمع الشوائب عند حافته وينشأ من التبريد السريع. عند الطاقات الأعلى يظهر نكوء بسبب التبريد السريع الحاصل للجزء الخارجي من المنطقة المشععة ويزيادة الطاقة بمقدار أكثر يظهر المنقعر بسبب ارتفاع درجة حرارة السطح إلى درجة حرارة التبخير فتتدفق المواد خارجاً كذلك فإن عمق انتشار الشوائب ازداد عند زيادة طاقة التشعيع إلا أن التركيز عند السطح يقل عند التشعيع بطاقة أعلى من العتبة في حين أن زيادة درجة حرارة القاعدة أدى إلى زيادة التركيز عند السطح.

١١- (الصور)



شكل (11) هيئة توزيع الإنديوم (النسبة المئوية) على طول مسافة البقعة الليزرية عند ظروف تشعيع مختلفة

[1] J. F. Ready, "Industrial Applications of Lasers", Academic Press (London) (1997), 419, 428.  
 [2] A. Mousa and R. A. Ismail, *J. Eng. & Technol.*, 15(3), 82 (1996).

نتائج التحليل الكمي والنوعي للعناصر:

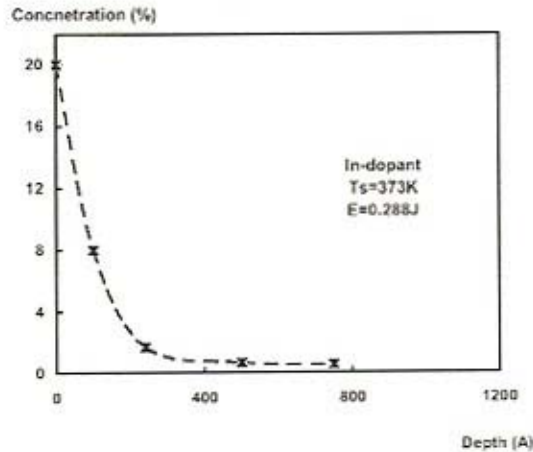
بعد فحص التحليل الكمي والنوعي للعناصر الداخلة ضمن تركيب المنطقة المشععة واحد من الفحوصات المهمة لمعرفة هيئة توزيع الشوائب المنتشرة كدالة للعمق وكذلك على امتداد قطر أثر البقعة الليزرية. يوضح الشكل (10) تغير النسبة المئوية للإنديوم مع العمق عند التشعيع بطاقات مختلفة عند درجة حرارة الغرفة. يظهر من الشكل (10a) أن أقصى نسبة مئوية هي عند السطح وبعدها تتناقص بشكل أسي مع عمق الانتشار وهذا ما يتفق مع الصيغة الرياضية الآتية [7]:

$$C_i(z,t) = \frac{N_0}{\sqrt{\pi D_i t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4D_i t}\right) \quad (1)$$

حيث  $C_i$  هو تركيز الشوائب المنتشرة حرارياً و  $z$  العمق و  $N_0$  تركيز الشوائب الابتدائية عند السطح ( $cm^{-3}$ ) و  $D_i$  معامل الانتشار للطور السائل و  $t$  زمن الانصهار.

يمكن أن يعزى الاختلاف في توزيع النسبة المئوية للشوائب إلى معامل التوزيع السطحي لأن الذرات الشائبة تنتشر خلال طبقة السيليكون المنصهرة باتجاه شعاع الليزر، وعند الوصول إلى أقصى عمق تبدأ عملية التصلب داخل السيليكون باتجاه السطح. إن أول طبقة متصلبة تحجز كمية من الذرات الشائبة تركة المتبقي يتحرك إلى الطبقة اللاحقة (باتجاه السطح). إن قيمة معامل انغزال الإنديوم هي أقل من واحد وعليه فإن الذرات لشائبة سوف تتجمع عند السطح وتعاين الانحدار كلما اتجهنا داخل السيليكون. عند زيادة طاقة التشعيع إلى (0.37J) زاد عمق انتشار الشوائب مع عمق الانصهار ولكن النسبة المئوية للإنديوم عند السطح قلت بمقدار (1.66) لقيمتها عند التشعيع بطاقة (0.29J) كما موضح بالشكل (10b)، ويعزى ذلك إلى تكون عيوب تعمل على اقتناص الشوائب. يظهر الشكل (10c) زيادة النسبة المئوية للإنديوم بسبب تغير سرعة إعادة التصلب حيث تتناقص عند تسخين القاعدة مما يؤدي إلى انغزال الشوائب عند السطح.

يوضح الشكل (11) هيئة توزيع الإنديوم على امتداد طول أثر البقعة الليزرية وتكون نسبته المئوية أقل ما يمكن عند المركز ثم تبدأ بالتزايد عند ابتعادنا عنه. يعود سبب ذلك إلى التوزيع الكاوسي (توزيع غير منتظم) لشدة نبضة الليزر إذ تكون الشدة أعظم ما يمكن عند المركز وتقل عند الأطراف ومن الشكل نلاحظ أن النسبة المئوية للإنديوم عند المركز عند التشعيع بطاقة (0.29J) وبدرجة حرارة قاعدة (373K) تزيد بمقدار (1.13) على قيمتها عند التشعيع بنفس الطاقة ولكن عندما تكون القاعدة بدرجة حرارة الغرفة بسبب تناقص سرعة إعادة التصلب. الشكلان (12a) و (12b) بينان أطوال الأشعة السينية المقاسة بجهاز (EDS) عند مركز الضربة وحافتها على التوالي للسيليكون المشاب بالإنديوم بطاقة (0.288J) عند درجة حرارة الغرفة.



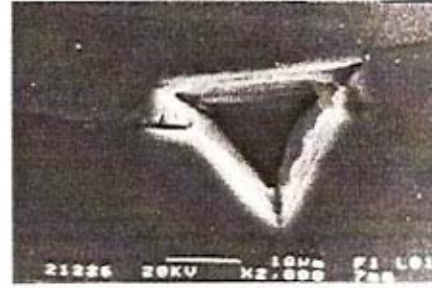
شكل (10a) تغير النسبة المئوية للإنديوم مع العمق عند التشعيع بطاقة 0.288J عند درجة حرارة 373K

عند زيادة الطاقة إلى (0.495J) ارتفعت درجة الحرارة إلى درجة التبخير وقذفت المواد مكونة نغراً مركزياً كما موضح بالشكل (7) يزداد عمقه بزيادة طاقة التشعيع.



شكل (7) النغرة المتكون في السيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة 0.495J عند درجة حرارة الغرفة

من العيوب التركيبية الأخرى الناتجة عن عملية التشعيع هو الانخلاع الموضح بالشكل (8) الذي يتولد نتيجة التسخين السريع والتبريد المفاجئ والذي بدوره يؤدي إلى تولد تدرج حراري عالٍ ينتج عنه إجهادات حرارية ميكانيكية تعمل على تكون الانخلاع [7]. الشكل (9) يوضح صور العينات المشععة بطاقات عالية الانصهار وبدرجات حرارة قاعدة مختلفة للسيليكون المشاب بالإنديوم.



شكل (8) صورة للانخلاع الناتج



شكل (9) المنطقة المشععة في السيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة عالية الانصهار (0.27J) و (0.252J) ودرجة حرارة القاعدة (a) 323K و (b) 373K

تشعيع مختلفة كدالة للعمق لمعرفة توزيع الإثابة على طول المنطقة المشععة.

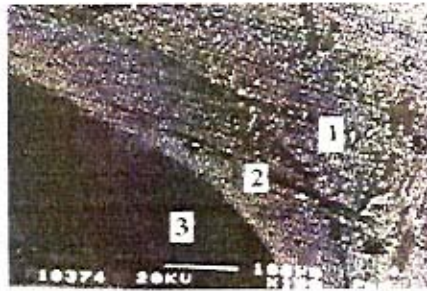
#### 4- النتائج والناقده

لتحقيق فحص طوبوغرافية السطوح المشععة مجهرياً:

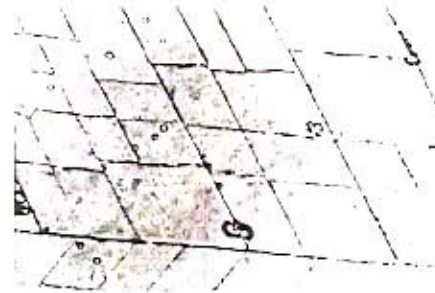
تم استخدام المجهرين الإلكتروني الماسح والضوئي المذكورين سابقاً لفحص طوبوغرافية السطوح المشععة التي كانت تتغير تبعاً لتغير طاقة شعاع الليزر. عند تشعيع السيليكون المشاب بالإنديوم بطاقة (0.252J) ظهرت شقوق خطية حادة يزداد عددها كلما زادت طاقة التشعيع وتتقاطع مع بعضها البعض مكونة زوايا بقيم ثابتة ( $20^{\circ}$ - $60^{\circ}$ ) كما موضح في الشكل (1). يمكن تفسير الية تكون هذه الشقوق على أساس الصدمة الحرارية (Thermal Shock) التي تنشأ بسبب التدرج الحراري المصاحب للمنطقة المشععة بالليزر والذي يسبب إجهادات ضاغطة تنتهي بظهور هذه الشقوق.



شكل (3) المنطقة المشععة للسيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة عتبة الانصهار (0.288J) عند درجة حرارة الغرفة

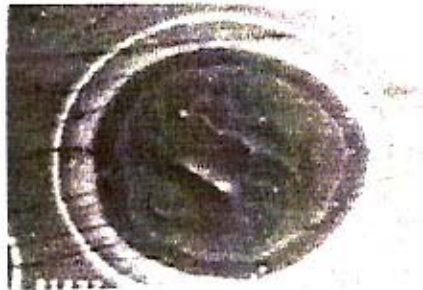


شكل (4) صورة SEM للسيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة (0.288J) عند درجة حرارة الغرفة (1) المنطقة غير المشععة، (2) منطقة التأثير الحراري، (3) المنطقة المتصلية



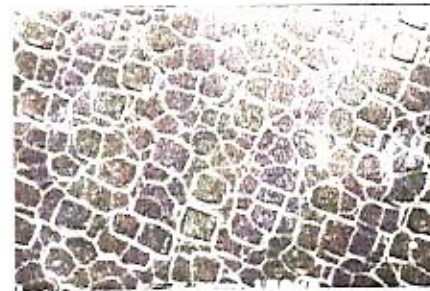
شكل (1) صورة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وتظهر فيها الشقوق الخطية المكونة في السيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة (0.252J) عند درجة حرارة الغرفة

عند زيادة طاقة التشعيع إلى (0.27J) ظهر تركيب خلوي ضمن المنطقة المتصلية وكما موضح في الشكل (2) وهذا يعود إلى عدم الاستقرار لحدة الفاصل خلال عمليتي الانصهار والتبريد السريع [5]. عند التشعيع بطاقة (0.288J) حدث الانصهار المتجانس وهذه الطاقة تسمى عتبة الانصهار كما في الشكل (3).



شكل (5) صورة SEM للتواء المتكون في السيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة (0.315J) عند درجة حرارة الغرفة

عند التشعيع بطاقة (0.405J) ظهرت فجوة مركزية محاطة بدوائر متحدة المركز، كما موضح بالشكل (6)، والتي نشأت بسبب التداخل بين شعاع الليزر المساقط وشعاع المستطار من مراكز الاستطارة (ذرات عالقة على سطح العينة) [6].



شكل (2) تركيب خلوي المتكون في السيليكون المشاب بالإنديوم عند بطاقة (0.27J) عند درجة حرارة الغرفة



شكل (6) صورة SEM للوالب متحدة المركز المتكونة في السيليكون المشاب بالإنديوم عند طاقة (0.405J) عند درجة حرارة الغرفة

عند إجراء المسح الكامل للمنطقة المشععة ظهرت منطقة التأثير الحراري الناتجة من الانتشار الحراري الجانبية والموضحة في الشكل (4) حيث أن الشكل يقسم إلى ثلاث مناطق الأولى هي المنطقة غير المشععة والثانية هي منطقة التأثير الحراري أما الثالثة فهي المنطقة المتصلية ويظهر الشكل (5) التواء المتكون عند التشعيع بطاقة (0.315J) الذي يعزى إلى التبريد السريع الحاصل للجسيم الخارجى للمنطقة المشععة حيث يؤدي التوصيل إلى تولد ضغط على المناطق المتصلية مصدرة من الداخل تدفع هذه المناطق إلى الأعلى مكوناً التواء.

## دراسة الخصائص التركيبية لانتشار الإنديوم في السيليكون بواسطة ليزر النيديميوم-ياك النبضي

وليد خلف حمودي\*  
رنا أسامة مهدي

\* قسم العلوم التطبيقية  
الجامعة التكنولوجية  
بغداد - العراق

### الخلاصة

في هذه الدراسة، تم عملياً توظيف ليزر النيديميوم-ياك النبضي للحصول على الانتشار المحث للإنديوم في السيليكون من خلال ترسيب غشاء رقيق من هذه المادة على سطحه وتشعيعها بالليزر. تركّز الاهتمام حول دراسة تغير الخواص التركيبية للمنطقة المشعّة الناتجة من تغير طاقة نبضة الليزر ضمن المدى  $J(0.25-0.53)$  ودرجة حرارة القاعدة من  $300K$  إلى  $373K$  أثناء عملية التشعيع. استخدم المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني الماسح لدراسة طوبوغرافية السطوح المشعّة التي أظهرت شقوقاً خطية وتنوّعات وتفرّع حسب قيمة طاقة النبضة المستخدمة. حددت هيئة توزيع الشوائب (عمق الشوائب) بتوظيف جهاز EDS عند التشعيع بطاقة عتبة الانصهار وبدرجة حرارة القاعدة ( $373K$ ) ولطاقة أعلى من عتبة الانصهار عند درجة حرارة الغرفة أيضاً، فلإدراك عمق الانتشار وتناقص تركيز الشوائب عند السطح بزيادة طاقة النبضة بينما أدى رفع درجة حرارة القاعدة إلى زيادة تركيز الشوائب عند السطح.

Keywords: Laser-Induced Diffusion, Indium-Doped Silicon, Nd:YAG Laser

استلام: ٥ آب ٢٠٠٤ ، تصحيحات: ١٠ أيلول ٢٠٠٤ ، قبول: ١٨ أيلول ٢٠٠٤

(500µm) وبمقاومية كهربائية ( $5\Omega.cm$ ). غسلت العينات أولاً بالماء الفاتر وغمرت في محلول الإيتانول في جهاز النذبات فوق الصوتية (Ultrasonic) لمدة (10) دقائق لتنظيفها ومن ثم جففت بالهواء الساخن لإجراء عملية التنميش الكيميائي. استخدم خليط (CP4) المكون من حامض الخليك ( $CH_3COOH$ ) و حامض النتريك ( $HNO_3$ ) و حامض الهيدروفلوريك (HF) وينسب حجمية (2:3:2) على التوالي حيث وضعت العينات داخل هذا الخليط لمدة أربع دقائق لأجل إزالة طبقة الأوكسيد فوق الشرائح وكان تركيز الحوامض المستخدمة هو (70%) حامض النتريك و (99%) حامض الخليك و (49%) حامض الهيدروفلوريك علماً أن سمك الطبقة المرألة يعتمد على زمن التنميش الكيميائي (زمن بقاء العينة داخل الخليط).

بعد الانتهاء من عملية التنميش، غسلت العينات بحول الإيتانول لإزالة الحوامض المتبقية على السطح وبعد ذلك جففت الشرائح. تم ترسيب غشاء رقيق من مادة الإنديوم على شرائح السيليكون لعملية الانتشار المحث. تم ترسيب غشاء من الإنديوم بسمك (30nm) على شرائح السيليكون باستخدام منظومة التبخير الحراري نوع (Balzers BAE 370) عند فراغ ( $10^{-7} Torr$ ) وثبتت العينات على ألواح زجاجية أبعادها  $1x1cm^2$  لمنع حركة العينة أثناء التشعيع بالليزر. استخدم المجهر الضوئي (Metallux 3) لفحص العينات المشعّة بالليزر وتم مشاهدة أثر نبضة الليزر من تصوير العيوب التركيبية المصاحبة لعملية التشعيع. استخدم المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) من نوع (Stereo Scan 240) لدراسة طوبوغرافية سطوح العينات. تم استخدام مطياف مفرق الطاقة (EDS) (Energy) (Link Analytical AN1000) Spectra Dispersion نوع (SEM) لمعرفة النسب المئوية للعناصر الداخلة في تركيب طبقة (InSi) المتكونة في ظروف

١- (المقدمة)

لقد نظّافرت الجهود العملية في توسيع أفق تطبيقات الليزر في العديد من الجوانب العلمية، وقد شمل جانباً منها تطبيقات الليزر في مجال الصناعات الإلكترونية بغية تحقيق أبعاد دقيقة يصعب الوصول إليها بالتقنيات القديمة العاملة في هذا المجال.

تباين استخدام الليزر في الصناعات الإلكترونية تبعاً للمنتج والغاية المطلوبة في هذا الاستخدام حيث يعتمد بعض الباحثين على التعامل مع المادة شبه الموصلة وشعاع الليزر بصورة مباشرة كعملية التخديش والتقليب لشرائح المسوك شبيهة الموصلة [1]. فسي حين استخدم الآخرون تقنية الانتشار المحث بالليزر في صناعة ثنائيي الوصلة وترانزستور الأغشية الرقيقة والخلايا الشمسية [2]. قام الباحثون [3,4] بإثابة مادة السيليكون بشوائبي السيليكون والإنديوم من خلال عملية الانتشار المحث بعد توظيف ليزر النيديميوم ودرسوا أفضل الظروف للاستفادة من هذه الدراسة عند تصنيع المكونات الإلكترونية. فسي هذا البحث تم ترسيب غشاء رقيق من الإنديوم فوق السيليكون ومن ثم تشعيع العينات بطاقات مختلفة من ليزر النيديميوم-ياك النبضي ودراسة الخصائص التركيبية كدالة لطاقة الليزر ودرجة حرارة القاعدة.

٢- (المخارج العلمية)

في هذا البحث، استخدمت شرائح من السيليكون أحادية البلورة من النوع المانح (n-type) ذات اتجاهية بلورية (111) وبسمك