

تحضير ودراسة الخواص البصرية لكاشف

(Cu-Si) الضوئي

صباح جميل مزهر

د. أسماء ستار جيد

الجامعة المستنصرية / كلية العلوم / قسم الفيزياء

الخلاصة:

في هذا البحث تم تحضير كاشف ضوئي على نمط اتصال معدن - شبه موصل باستخدام طريقة التبخير الحراري في الفراغ لتبخير معدن النحاس النقي على الوجه الأملس لشرائح السليكون نوع (n) ومعدن الألمنيوم النقي على الوجه الخشن لهذه الشرائح وبسبك (100 A°) ولكلا الوجهين بعد استخدام طريقة التتميش الكيميائي لتنظيف شرائح السليكون . جرى تليدين النماذج في فرن حراري بوجود النروجين و بدرجة حرارة (673 K) لمدة (15) دقيقة . تمت دراسة علاقة التيار الضوئي و الاستجابية الطيفية والقدرة المكافئة للضوضاء والكفاءة الكمية والكفاءة النوعية للكاشف المحضر مع الطول الموجي الساقط بدرجة حرارة الغرفة لتحديد أفضل منطقة طيفية يمكن ان يعمل فيها هذا الكاشف و إمكانية استخدامه في التطبيقات الالكترونية المناسبة .

المدخل :

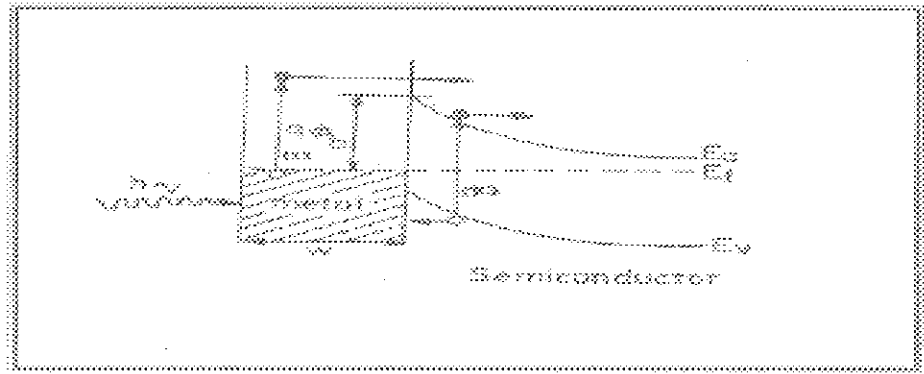
ظهر استخدام تكنولوجيا الفراغ في مجال أشباه الموصلات لتصنيع الكواشف الضوئية من خلال تبخير معدن مناسب على سطح مادة شبه موصلة لإيجاد نوعين من اتصال معدن مع شبه موصل ، هما الاتصال المقوم (Rectifying Contact) والاتصال غير المقوم (Nonrectifying Contact)، حيث أن الاتصال غير المقوم يمتلك مقاومة صغيرة ومنخفضة بصرف النظر عن قطبية الفولتية الخارجية المسلطة [1]. ان الأبحاث والدراسات تركز على تطوير كفاءة هذه الكواشف الضوئية وطرق تحضيرها لكي تكون ملائمة الاستعمال في مختلف الاستخدامات من خلال إيجاد مفهوم فيزيائي دقيق لطريقة تكون حاجز الجهد وانتقال التيار عبر طبقة الاستنزاف لاتصال المعدن مع شبه الموصل [2] ، حيث تعتمد هذه الكواشف في عملها على خلق حاملات الشحنة في أشباه الموصلات بسبب تهيجها وتحفيز الالكترونات للانتقال من حزمة التكافؤ (Valence Band) إلى حزمة التوصيل (Conduction Band) ومن المستويات الموضعية (Localized States) الى حزمة التوصيل اذ ان هذه المستويات الموجودة في أشباه الموصلات تلعب دورا مهما في تكوين حاجز الجهد.

الجانب النظري :

ان القياسات الكهروضوئية هي الطريقة المباشرة لتحديد ارتفاع حاجز الجهد المتكون نتيجة اتصال المعدن مع شبه الموصل ، فعند سقوط ضوء احادي اللون (Monochromatic Light) على سطح المعدن المرسب على شبه الموصل ، وعندما تكون طاقة الفوتونات الساقطة اكبر من ارتفاع حاجز الجهد واقل من فجوة الطاقة لشبه الموصل فان الفوتونات الساقطة ستعمل على تهيج الالكترونات من المعدن الى شبه الموصل عابرة حاجز الجهد ، وهذه العملية تسبب سريان التيار في الدائرة الخارجية ، وعند سقوط الضوء على الكاشف فان تولد التيار الضوئي يمر بمرحلتين :

1. عندما يكون ($h\nu > q\Phi_B$) فان زوج الكترون - فجوة في شبه الموصل يتولد ، وكما موضح بالشكل رقم (1) .

2. وعندما يكون الغشاء المعدني رقيق بشكل كافي و ($h\nu > E_g$) فان الكترونات ضوئية يمكن ان تتولد بالاعتماد على انتقال الالكترونات من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل .



الشكل رقم (1) : توليد زوج الكترون - فجوة في اتصال شبه موصل - معدن .

ان التيار الضوئي المتولد لكل فوتون ساقط (B) كدالة لطاقة الفوتونات الساقطة (hv) يعطى بموجب نظرية (Fowler) بالعلاقة التالية [3] :

$$B = C \left[\frac{\pi^2}{6} + \frac{\mu^3}{2} - \left(e^{-\mu} - \frac{e^{-2\mu}}{2^2} + \frac{e^{-3\mu}}{3^2} - \dots \right) \right] \dots (1)$$

حيث ان C ثابت و $\mu = \frac{h\nu - h\nu_0}{K_B T}$ و $h\nu_0$ تمثل طاقة العتبة و تساوي :

$$h\nu_0 = \Phi_B - \Delta \Phi_B$$

وبذلك فإن B تتناسب مع $(hv - h\nu_0)^2$ ، والرسم البياني بين \sqrt{B} و hv يعطي خط مستقيم تقاطعه

مع محور hv يساوي $h\nu_0$. ان الكواشف هي نبائط (Devices) يتم تصنيعها من أشباه الموصلات

مثل السليكون تقوم بتحويل الاشارات البصرية الى اشارات كهربائية وخلال هذه العملية يمر عمل الكاشف الضوئي بثلاث مراحل [3] :

1. توليد حاملات الشحنة بواسطة الضوء الساقط .
 2. نقل ومضاعفة الحاملات بأي من الآليات المسؤولة عن الكسب في التيار .
 3. تفاعل التيار مع الدائرة الخارجية لغرض تجهيز اشارة اخراج كهربائية .
- ولغرض الحصول على كاشف جيد يجب فهم ودراسة خواص الكاشف والتي تحقق افضل عمل للكاشف المحضر ، وهذه الخواص هي :

أولا - الاستجابية الطيفية (Spectral Responsivity) :

تعتبر الاستجابية الطيفية (R) خاصية مهمة من خواص الكاشف حيث انها تحدد كفاءة الكاشف في الكشف عن ضوء بطول موجي معين ، وان طيف الاستجابية الطيفية يحدد المنطقة الطيفية الجيدة لعمل الكاشف وتعرف بانها النسبة بين التيار او الفولتية الخارجة من الكاشف الى قدرة الاشعة الساقطة على وحدة المساحة وتقاس بوحدات (A/W او V/W) وفق العلاقة التالية [4] :

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{in}} \dots \dots \dots (2)$$

حيث ان I_{ph} هو التيار الضوئي المتولد و P_{in} هي كثافة القدرة للاشعة الساقطة .

ثانيا - الكفاءة الكمية (Quantum Efficiency) :

تعرف الكفاءة الكمية (η) بأنها عدد الكترون - فجوة المتولد لكل فوتون ضوئي ساقط على الكاشف [5] وتكتب بالشكل :

$$\eta = \frac{I_{ph} hc}{pq\lambda} \dots \dots \dots (3) \quad \text{لذلك فإن:}$$

$$\eta = \frac{Rhc}{q\lambda} \dots \dots \dots (4)$$

h : ثابت بلانك ، C : سرعة الضوء ، λ : الطول الموجي الساقط ، q : شحنة الإلكترون .

ثالثا - القدرة المكافئة للضوضاء (NEP):

تعرف (Noise Equivalent Power) بانها قدرة الاشارة الداخلة المطلوبة لإعطاء خرج مساوي للخرج الناتج من التفاوتات في الاشعة المحيطة (Background Fluctuation) :

$$NEP = \frac{I_n}{R} \quad \dots\dots\dots (5)$$

حيث (I_n) هو تيار الضوضاء ، وبذلك فان NEP تمثل أقل قدرة يمكن ان يكشف عنها الكاشف المصنوع [6 ، 7].

الكشفية الطيفية (D) :

تعتمد الكشفية الطيفية (Spectral Detectivity) على الضوضاء الناتجة في عملية الكشف وتعرف بانها نسبة الاستجابية الطيفية للكاشف (R) الى تيار الضوضاء ، أي انها تمثل مقلوب القدرة المكافئة للضوضاء :

$$D = 1/NEP \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$D = R / I_n \quad \dots\dots\dots (7)$$

وقد لوحظ ان الكشفية الطيفية تتناسب مع المساحة ، لذلك تعرف (D^*) بالكشفية النوعية (Spectral Detectivity) وتستخدم للمقارنة بين انواع مختلفة من الكواشف .

الجانب العملي :

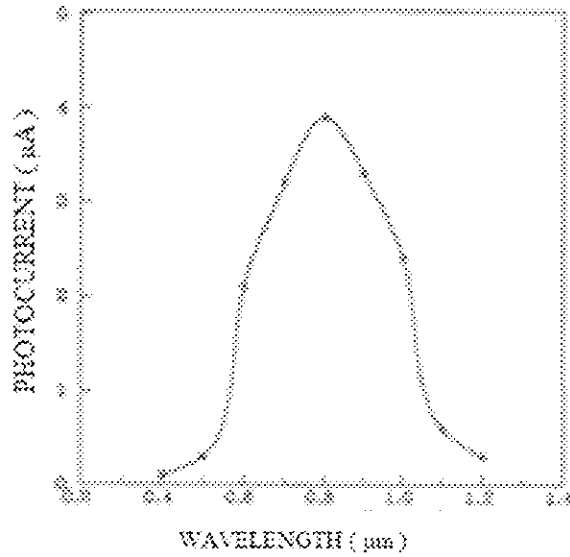
استخدمت شرائح السليكون (Si) نوع (n) والمحضرة بطريقة التنمية الفوقية (MBE) وذات اتجاهية [111] ومقاومية (3.2) أوم / سم ، وأجريت عملية التنظيف الكيميائي لسطوح الشرائح باستخدام محلول الإزالة المتكون من HF مخفف بالماء اللايوني بنسبة (1:10) ، واعتماد التحريك المستمر لإدامة اتصال المحلول مع الشريحة ولمدة نصف دقيقة ثم وضعت النماذج داخل ماء لاأيوني لغرض إزالة ايونات الفلورايد السالبة ووضعت النماذج في محلول أسيتون ثم ماء لاأيوني وتجفيفها بواسطة استخدام هواء حار .

باستخدام منظومة التبخير الحراري في الفراغ عند ضغط (2×10^{-5}) Torr ، تم تبخير الألمنيوم Al بنقاوة (99.99%) على الوجه الخشن للشرائح في مرحلة أولى لغرض عمل الاتصال الاومي ، حيث أن الألمنيوم له توصيلية جيدة وسهل الترسيب وله مقاوميه واطئة ($2.7 \mu\Omega.cm$) . وفي المرحلة الثانية جرى تبخير النحاس عالي النقاوة (99.99%) وبسمك (100 Å) على الوجه الآخر

تخصير وحراسة الخواص البصرية لكاشف (Cu-Si) الضوئي صباح جميل مزهر ، د. أسماء ستار جواد
للشرائح حيث تم عمل غشاء النحاس (Cu) على هذا الوجه ، وبعد إكمال عمليتي التبخير تؤخذ النماذج
وتعامل حرارياً في فرن خاص ويوجد النتروجين لمنع تكون الأكاسيد حيث تم تلدين النماذج بدرجة
حرارة (673 K) لمدة (15) دقيقة.

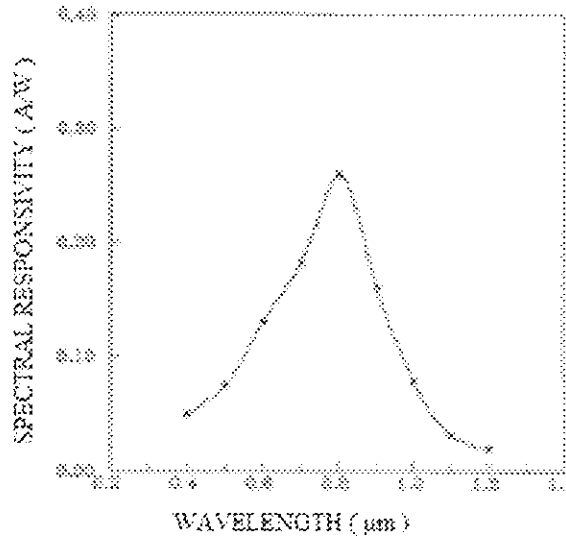
النتائج والمناقشة :

يوضح الشكل رقم (2) خواص التيار الضوئي كدالة للطول الموجي الساقط على الكاشف في درجة
حرارة الغرفة ويلاحظ حدوث زيادة في قيمة التيار الضوئي مع زيادة الطول الموجي الساقط والذي
يعود الى ان امتصاص الاشعة الساقطة يعتمد على طاقة الفوتونات ، فعندما تكون طاقة الفوتون الساقط
اكبر من فجوة الطاقة فان الفوتونات الممتصة تعمل على تهيج الالكترونات وتوليد ازواج الكترون -
فجوة ، وان الالكترونات تتحرك باتجاه شبه الموصل بينما تتحرك الفجوات باتجاه المعدن ويتولد تيار
ضوئي يمر في الدائرة الخارجية [3] . ان طبقة النحاس الرقيقة (100 \AA) تكون شبه شفافة للضوء
الساقط مما زاد من عملية امتصاص الفوتونات الساقطة وتهيج الالكترونات حيث ان التيار الضوئي
ينتج بصورة رئيسية من انتقال الالكترونات من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل وان التهيج الضوئي
يحصل في شبه الموصل وفوق حاجز الجهد عند الطبقة البينية لتمام النحاس مع السليكون . وبما ان
عمق الامتصاص (Penetration Depth) يزداد مع زيادة الطول الموجي الساقط ، فان الفوتونات
الساقطة تمتص داخل شبه الموصل حيث تخلق ازواج الكترون - فجوة وتزداد عملية فصل
حاملات الشحنة تدريجياً بفعل المجال الكهربائي الداخلي فيزداد التيار الضوئي الى ان يصل الى اعلى
قيمة له عند الطول الموجي ($0.8 \mu\text{m}$) وان عمليات اعادة الاتحاد بين ازواج الكترون - فجوة تكون
قليلة عند القمة ، ثم تبدأ قيم التيار الضوئي بالتناقص حيث تقترب طاقات الفوتونات الساقطة من طاقة
فجوة الحزمة ، وان عمليات فصل الحاملات تقل تدريجياً بسبب تناقص تأثير المجال الكهربائي
الداخلي وتقل عمليات الانتقال بين الحزم ويظهر تيار اعادة الاتحاد والذي يسبب تناقص قيم التيار
الضوئي الخارج الى ان تصل الى الطول الموجي القاطع λ_c حيث يقترب التيار الضوئي من التلاشي
وان معامل الامتصاص ينخفض مع زيادة الطول الموجي اضافة الى تأثير نفاذية النحاس المرسب [8].



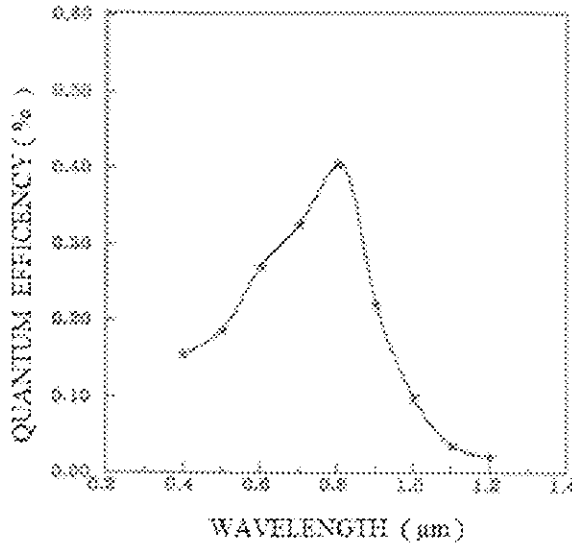
الشكل رقم (2) خواص التيار الضوئي كدالة للطول الموجي .

يوضح الشكل رقم (3) خواص الاستجابية الطيفية كدالة للطول الموجي الساقط والتي تبين سلوك الكاشف من خلال تغير الاستجابية الطيفية عند تغير الطول الموجي للإشارة الداخلة وتوضح أهمية عامل الامتصاص (α) كدالة مهمة للطول الموجي وان قيمته تكون كبيرة وبحدود ($\geq 10^5 \text{ cm}^{-1}$) عند الاطوال الموجية القصيرة حيث يكون الامتصاص ضمن هذه الاطوال الموجية جيد ثم يزداد مع زيادة الطول الموجي الساقط على الكاشف وتمتص فوتونات الاشعة الساقطة وتحدث استجابية أعلى ويزداد تهيج الالكترونات في حزمة التكافؤ الى ان تصل الى أعلى استجابية (0.27 A/W) عند الطول الموجي ($0.8 \mu\text{m}$) . ان شكل الاستجابية الطيفية عند الاطوال الموجية القصيرة يعتمد على السطح وان فوتونات هذه الاطوال الموجية تمتص بالقرب من السطح وتولد ازواج حاملات الشحنة ، وعند وصول هذه الحاملات الى الطبقة البينية فإنها تفصل بسبب حاجز الجهد لتساهم في عملية التوصيل ، بالإضافة الى ان الانعكاسية الطيفية للسليكون عند الاطوال الموجية القصيرة تعمل على تقليل الاستجابية الطيفية في هذه المنطقة [4] . و بعد ان تصل الاستجابية الطيفية الى اقصى قيمة لها تبدأ بالتناقص لتصل الى ادنى قيمة لها ، والسبب يعود الى ان الاستجابية تتناسب مع معدل الفوتونات الواصلة بطاقات اعلى من حافة الامتصاص لشبه الموصل . ان انخفاض استجابية الكاشف عند الاطوال الموجية العالية يعود الى انخفاض معامل الامتصاص (α) بسبب اقتراب طاقة الفوتونات الساقطة من قيمة فجوة الطاقة وبذلك فان الاستجابية الطيفية للكاشف تقترب من التلاشي بسبب الاقتراب من الطول الموجي القاطع (λ_c) [8، 9] .



الشكل رقم (3) الاستجابية الطيفية كدالة للطول الموجي .

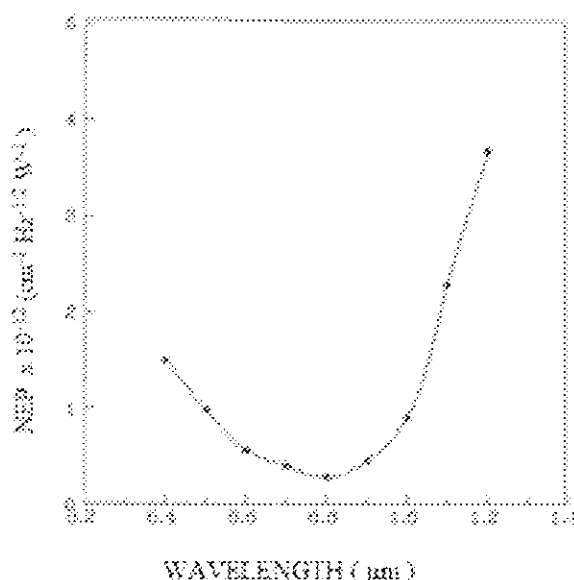
وفي الشكل رقم (4) لوحظ تغير الكفاءة الكمية للكاشف مع تغير الطول الموجي للأشعة الساقطة حيث كانت أقصى قيمة لها عند الطول الموجي (0.8 μm) ، ويلاحظ ان اقل قيمة تم ايجادها للكفاءة الكمية كانت بحدود (15.5%) عند الطول الموجي (0.4μm) ثم تزداد هذه الكفاءة مع زيادة الطول الموجي تبعا لزيادة الاستجابية الى ان تصل الى أعلى قيمة لها [4,9] .



الشكل رقم (4) يوضح الكفاءة الكمية كدالة للطول الموجي .

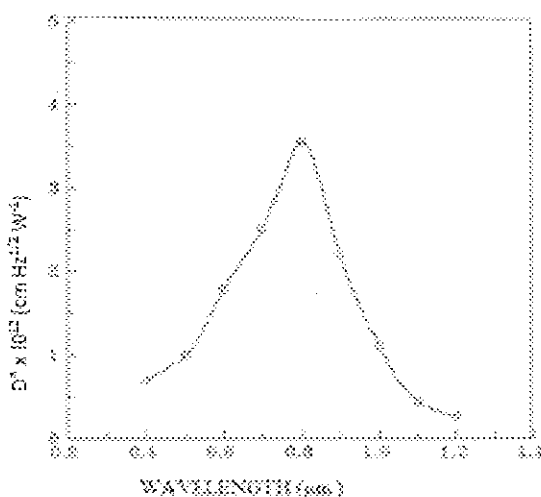
في الشكل رقم (5) نلاحظ القدرة المكافئة للضوء كدالة للطول الموجي الساقط على الكاشف وهو يشير الى ان أقل قدرة مكافئة للضوء في هذا الكاشف كانت بحدود ($0.27 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-1}\text{Hz}^{-1}$) عند الطول الموجي (0.8 μm) . ان المعادلة رقم (5) توضح ان NEP هي دالة للاستجابية الطيفية ولتيار الضوء الذي يعتمد على تيار الظلام I_d ، وبما ان الاستجابية ليست خاصية كشف

تحضير وحراسة الخواص البصرية لكاشف (Cu-Si) الضوئي صباح جميل مزهر ، د. أسماء ستار جواد
 فقط بل انها تعتمد على التوزيع الطيفي للمصدر ، فان NEP تعتمد كذلك على التوزيع الطيفي
 للمصدر [6,7] .



الشكل رقم (5) علاقة NEP مع الطول الموجي الساقط .

الشكل رقم (6) يشير الى زيادة الكشفية النوعية للكاشف مع تناقص NEP حيث ان أقل كشفية
 نوعية لهذا الكاشف كانت ($0.88 \times 10^{12} \text{cmHz}^{-1/2} \text{W}^{-1}$) عند الطول الموجي ($0.4 \mu\text{m}$) ثم تأخذ
 بالزيادة مع زيادة الطول الموجي حيث تزداد الاستجابة الطيفية الى ان تصل الى أفضل كشفية نوعية
 والتي كانت ($3.75 \times 10^{12} \text{cmHz}^{-1/2} \text{W}^{-1}$) عند الطول الموجي ($0.8 \mu\text{m}$) ، ثم تتناقص قيم (D^*)
 مع زيادة الطول الموجي الساقط على الكاشف وزيادة NEP بسبب تناقص قيم (R) في هذه المنطقة
 . [8,10]



الشكل رقم (6) يوضح علاقة (D^*) مع تغير الطول الموجي .

الاستنتاجات :

أظهرت نتائج البحث امكانية استخدام طريقة التبخير الحراري في الفراغ لتصنيع كاشف ضوئي على نمط اتصال معدن - شبه موصل يعمل بشكل جيد ضمن المنطقة المرئية من الطيف ، وكذلك أوضح البحث أهمية عملية التلدين الحراري بوجود النتروجين في تحسين خواص الكاشف من خلال منع عملية تكوين الاكاسيد وتحسين التوصيل الكهربائي بين المعدن وشبه الموصل لتسهيل انتشار ذرات المعدن خلال السليكون وجعلها تتصرف وكأنها مانحة او واهبة . تم الحصول على أعلى استجابة لهذا الكاشف وكانت (0.27 A/W) عند الطول الموجي (0.8 μm) وأفضل كسفية نوعية كانت ($3.75 \times 10^{12} \text{cm Hz}^{-1/2} \text{W}^{-1}$) عند نفس الطول الموجي في حين ان أقل قيمة للقدرة المكافئة للضوء كانت ($0.27 \times 10^{-12} \text{cm}^{-1} \text{Hz}^{-1/2} \text{W}$) عند نفس الطول الموجي أعلاه (0.8 μm) ، كذلك أظهر البحث امكانية تحسين عمل الكاشف لجعله يعمل في منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة من خلال تحسين خواص السليكون .

المصادر :

1. E. S. Yangs, "Microelectronic Devices", McGraw Hill Book company,(1988).
2. E. H. Rhoderick and R. H. Williams, "Metal – Semiconductor contacts", 2nd Edition, Oxford, (1988).
3. S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices" , 2nd Edition, John Wiley and Sons, (1981).
4. D. Budde, "Optical Detectors Measurements", vol. II, 2nd Edition, (1983).
5. T. Obta, K. Komeda, T. Nakao, H. Ueba, C. Tatsuyama, J. Appl. Phy. vol. 81, no. 1, (1997), 199.
6. M. L. Cohen, S. G. Louie, Phy. Rev. B, vol. 13, no. 6, (1976), 2461.
7. R. K. Willardson and A. C. Beer "Semiconductor and Semimetals" vol. 5,, Academic Press, (1970).
8. R. J. Keyes, "Optical and Infrared Detectors" vol. 19, (1980).
9. K. Z. Yahiya, Y.Z. Daood and S. D Ahmed, Eng. and Technology, vol. 25, no. 2, (2007), 176 – 182.
10. N. Habubi, R. A. Ismail and A. M. Ali, J. of College of Education, no. 3, (2012), 11 – 31.

Abstract :

In this paper, Photo detector was prepared on the metal – semiconductor contact pattern by using thermal evaporation in vacuum to vaporize pure copper on the smooth face of (n) type silicon wafers and pure aluminum on the rough side of that wafers with (100 Å) thickness for both sides after using the chemical etching method for silicon slides. The samples were annealing in presence of nitrogen at (673 K) for (15) minutes. The relation of Photocurrent, Spectral Responsevity, Noise Equivalent Power, Quantum Efficiency and Specific Detectivity were studied with incident wavelength at room temperature to determine which best spectral region that detector can be work and could use in the appropriate electronic applications.