تحسين خصائص الاتصال كادميوم–سيليكون باستخدام تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما

أفنان كمال يوسف *

تاريخ التسلم: 2005/3/15
تاريخ القبول: 2005/10/20

الخلاصة

في هذا البحث، استخدمت تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما لتصنيع اتصال مابين الكادميوم والسيليكون ومقارنة النتائج المستحصلة مع نفس الاتصال المصنع باستخدام تقنية التبخير الحراري في الفراغ. أظهرت النتائج أن اتصال كادميوم–سيليكون يكون ذا خصائص أومية مع اختلاف طبيعة التوصيل الكهربائي للقاعدة السيليكونية فيما يكون الاتصال المصنع باستخدام التقنية الثانية مماثلاً (شوتكي). بلغت قيمة المقاومة النوعية للاتصال حوالي ($7.3\Omega.cm^2$) و($6.9\Omega.cm^2$) لكلا حالتي السيليكون المانح والقابل، على التوالي. تعد تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما إحدى تقنيات صناعة الاتصالات الاومية والنبائط الالكترونية ذات الأبعاد الكبيرة والتي تستخدم في منظومات الطاقة الشمسية والعارضات المسطحة كبيرة الحجم.

Enhancement of Cadmium-Silicon Contact Characteristics Using Plasma-Assisted Sputtering Technique

Abstract

In this work, cadmium-silicon contacts were produced by plasma-assisted sputtering (PAS) technique and compared to those produced by vacuum thermal evaporation (VTE). Results explained that the contact produced by PAS technique had ohmic characteristics although the conductivity type of silicon substrate changes. Whereas the contact produced by VTE technique is rectifying or Schottky contact. The values of specified contact resistance was ($7.3\Omega.cm^2$) and ($6.9\Omega.cm^2$) for n-type and p-type substrates, respectively. The PAS is one of the promising techniques employed to produce large-scaled ohmic contacts and electronic devices those used in solar energy systems and large flat displays.

المقدمة

يمثل الاتصال الاومي أحد أهم أجزاء النبائط الالكترونية إذ يمثل واجهة (Interface) ما بين مصدر التيار او الفولتية المسلطة على النبيطة وخصائص التركيب شبه الموصل الذي تصنع منه الغالبية العظمى من الالكترونيات. يمتاز هذا الاتصال بممانعة واطئة جداً – إلى حد الإهمال – لمرور التيار خلال النبيطة وتقاس جودة الاتصال الاومي بمقدار المقاومة النوعية للاتصال إذ كلما كانت هذه المقاومة قليلة كانت جودة الاتصال عالية [1].

على الرغم من أن التكنولوجيا الالكترونية تتوجه نحو تقليل أبعاد الأجهزة والمنظومات الالكترونية من خلال العمل على تقليل أبعاد النبائط والأجزاء الإلكترونية باستخدام تقنيات مطورة أو مستحدثة لهذا الغرض، إلا أن تطبيقات أخرى كثيرة لا تزال بحاجة إلى أجزاء ونبائط إلكترونية ذات أبعاد كبيرة (VLSI) وكبيرة جداً

* قسم العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية، بغداد

https://doi.org/10.30684/etj.24.8B.4
2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq
This is an open access article under the CC BY 4.0 license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

(ULSI) ومن هذه التطبيقات منظومات الطاقة الشمسية والعارضات المسطحة التي توضع على واجهات المباني والملاعب والساحات العامة، إذ يعتبر حجم المنظومة المطلب الأول ويتقدم على النوعية الفائقة كما هو الحال في المنظومات ذات الأبعاد الصغيرة [2].

لقد مثلت العديد من التقنيات كالإنتشار السطحي (Shallow Diffusion) وإعادة الإنماء السبائكي (Alloy Regrowth) والتنمية الفوقية المضاعفة (Double Epitaxy) والزرع الأيـوني (Ion Implantation) والإنتشار المحثث بالليزر (Laser-Induced Diffusion) حلولاً لإنتاج الاتصالات الاومية بأبعاد دقيقة (Micro-scale) وفائقة الدقة (Nano-scale)، إلا أن هذه التقنيات تصبح مكلفة جداً إلى حد إمكانية توظيفها إذا أريد الحصول على اتصالات أومية بأبعاد كبيرة (Large-scale). لذلك يتم اللجوء إلى تقنيات أخرى بعضها أصبح تقليدياً كالتبخير الحراري في الفراغ (VTE) وبعضها مطوّر مثل ترسيب البخار الكيمياوي (CVD) وأخرى أستحدثت خلال العقدين الماضيين كالاجتثاث المعزز بالبلازما (PAS) أو الحزمة الأيونية (IBS) (Ion Beam Sputtering) الجزيئية (MBS)(Molecular Beam Sputtring) [3-4]. لقد مكنت هذه التقنيات من معالجة وإنتاج عينات وتراكيب ذات أبعاد تصل إلى حوالي ($1m^2$) وبنوعية مقبولة في الغالب وتكون أحياناً ممتازة [5].

يحتوي التفريغ الكهربائي للغاز على جسيمات مشحونة وأخرى متعادلة وهذه الجسيمات تلعب أدواراً مختلفة ومترافقة في نشوء العمليات الكيميائية والفيزيائية داخل حيز التفريغ وكذلك في تفسير الظواهر المرافقة أو الناجمة عن هذه العمليات. لقد دأبت الدراسات المتعلقة بخصائص التفريغ الكهربائي للغازات على تفسير ظاهرة انتقال المادة بأستخدام التفريغ بين قطبين كهربائيين. ففي عام 1962 أظهرت دراسة عملية أنه يمكن تسليط مجال كهربائي داخل أنبوب زجاجي لتوليد الجسيمات الفعالة التي تحتاجها عملية ترسيب الأغشية الرقيقة على قواعد بلورية بأستخدام البلازما [6]، فيما بينت دراسة عملية أخرى إمكانية استخدام هذا المبدأ في تطبيقات الالكترونيات الدقيقة وخاصة تقنيات الاشابة والانتشار [7-8].

إن استخدام البلازما في عمليات الترسيب الضرورية في مجال صناعة الدوائر الالكترونية الدقيقة لم يتم توظيفه بشكل نمطي إلا بعد ظهور منظومات المعالجة التجارية [9]. ومنذ ذلك الحين انتقلت عمليات المعالجة التي تستخدم فيها البلازما من مرحلة البحث والتطوير إلى مرحلة تصنيع وإنتاج الدوائر المتكاملة. في هذا البحث، جرى تصنيع اتصال ما بين الكادميوم والسيليكون باستخدام تقنيتين هما التبخير الحراري في الفراغ (VTE) والاجتثاث المعزز بالبلازما (PAS) والمقارنة بينهما من حيث الخصائص الكهربائية للاتصالات الناتجة.

الجزء العملي

أستخدمت قواعد من السيليكون المانح (n-type) أحادي البلورة ذي الاتجاهية البلورية (111) بمقاومية كهربائية (5 Ωcm) وأخرى من السيليكون القابل (p-type) ذي الاتجاهية البلورية (100) بمقاومية كهربائية (1-3 Ωcm). جرى غسل العينات أولاً بالماء الفاتر ثم غمرت في محلول الايثانول في جهاز الذبذبات فوق الصوتية (Ultrasonic) لمدة 10 دقائق لغرض تنظيفها ومن ثم تجفيفها بالهواء الساخن لإجراء التنميش الكيمياوي لها.أستخدم محلول CP4 والمؤلف HNO_3:HCl:CH_3COOH من بنسب حجميه (3:3:1) لمدة 5 دقائق إذ غمرت العينات فيه لإزالة الاكاسيد من سطح العينات. جرى بعد ذلك غسل العينات بالايثانول لإزالة الحوامض المتبقية على السطح ومن ثم جففت لتصبح مهيئة لعملية الترسيب.

جرى استخدام عينات من الكادميوم عالي النقاوة (99.999%) على شكل قطرات صلدة لغرض ترسيب أغشية رقيقة منه على القواعد السيليكونية لعمل الاتصال موضوع البحث. أستخدمت منظومة الاجتثاث المعزز

بالبلازما لإجراء عملية الترسيب وتصل درجة الفراغ في حجرة التفريغ إلى حوالي (10^{-10}mbar). وتم بعد ذلك وضع عينة الكادميوم على جفنة (Boat) من الموليبدنوم وتوضع هذه الجفنة على قطب الأنود للمنظومة وهذا القطب مصنوع من مادة الفولاذ المقاوم للصدأ، فيما توضع القاعدة السيليكونية المراد ترسيب غشاء الكادميوم عليها على مسافة (15cm) من الجفنة وبشكل عمودي. بلغت فولتية التفريغ الكهربائي ($15kV_{DC}$) فيما تصل قيمة التيار إلى حوالي (3A). أستخدم غاز الأركون بضغط (1mbar) للحصول على بلازما التفريغ الكهربائي إذ يتم تشغيل المنظومة لفترات تصل إلى 10 دقائق قبل أن يتم رفع العينات وإجراء القياسات عليها. بلغ سمك الغشاء المرسب باستخدام منظومة البلازما 500nm. وتم قياسه باستخدام وحدة السمك (Thickness Monitor)الملحقة بالمنظومة بنسبة 1-2%. اما قياس السمك في الغشاء المرسب باستخدام منظومة التبخير الحراري فيعتمد على الطريقة الوزنية. التبخير الحراري في الفراغ نوع (Balzers BAE-370) تعمل بضغط فراغ حوالي (10^{-6}mbar) ويتم فيها تبخير الكادميوم ومن ثم تكثيف البخار على القاعدة السيليكونية عند درجة حرارة الغرفة. بلغت مساحة الاتصال في كلا التقنيتين ($0.1cm^2$). يكون معدل الترسيب باستخدام منظومة البلازما 500nm وفق مواصفات المنظومة.

شملت أجهزة القياس المستخدمة مقياس التيار نوع (KEITHLY-616)ومقياس سعة-جهد نوع (*hp*/4192 ALF) مع مجهز فولتية مستمرة (5V).

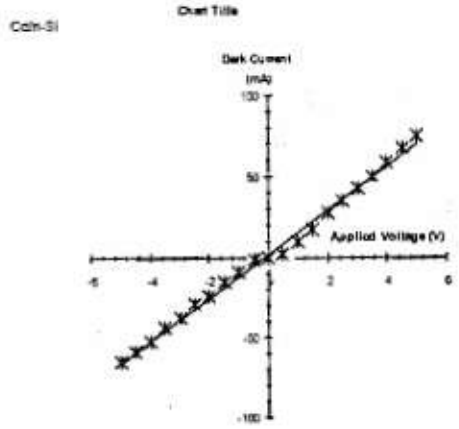
توصف منظومات الترسيب باستخدام البلازما بانها كفوءة وذات نسب خطأ قليلة مقارنة بتقنيات الترسيب الاخرى وتكون نسبة الخطأ في حالة منظومة التبخير الحراري أعلى قليلا بسبب عدم ضمان تبخير جميع العينة بشكل متجانس على سطح القاعدة.

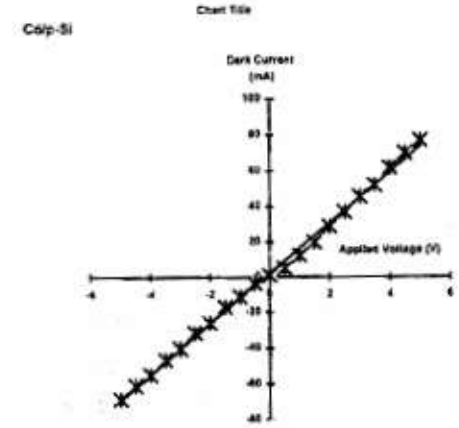
النتائج والمناقشة

يمثل الشكل (1) خصائص تيار-جهد للعينات الثلاثة المصنعة، ويلاحظ أن الاتصال المصنع باستخدام تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما (PAS) يكون ذا مقاومة نوعية أقل من الاتصال المصنع باستخدام تقنية التبخير الحراري في الفراغ (VTE)، إذ يلاحظ أن الأول يكون ذا خصائص أومية، كما في الشكلين (1a) و (1b) فيما تكون خصائص الاتصال المصنع بأستخدام تقنية التبخير الحراري في الفراغ (VTE) مطابقة لاتصال شوتكي بين معدن وشبه موصل كما في الشكل (2). يمكن أن يعزى سبب عدم تحقيق الخصائص الاومية في حالة الاتصال المصنع بأستخدام تقنية التبخير الحراري في الفراغ (VTE) إلى أن هذه التقنية غير قادرة على جعل المسافة ما بين سطح الكادميوم وسطح السيليكون أقل من أو تساوي المسافة ما بين ذرات السيليكون، وهو شرط الحصول على الاتصال الاومي. كذلك تلعب عملية تهيئة العينات ودرجة الفراغ المستخدمة دوراً مهماً في ذلك.

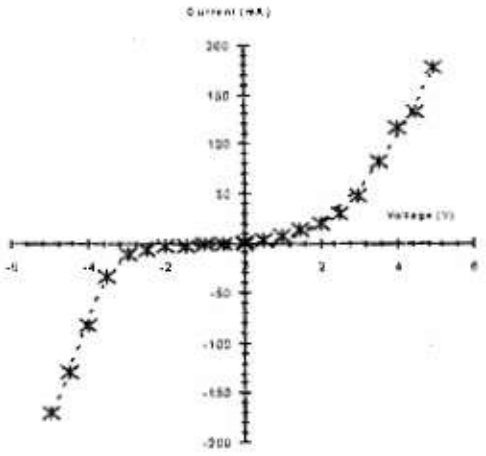
إن السلوك الاومي لاتصال معدن-شبه موصل يعتمد بشكل كبير على مقدار الفرق ما بين دالة الشغل للمعدن (وتساوي حوالي 4.6eV في حالة الكادميوم) والإلفة الإلكترونية لشبه الموصل (وتساوي 4.6eV في حالة السيليكون). وهذا هو سبب التماثل في الخصائص الأومية للاتصال المصنع على قاعدتي السيليكون المختلفتين بطبيعة التوصيل الكهربائي. أما الفرق الضئيل في قيمتي المقاومة النوعية للاتصال ما بين الحالتين فإنه يعزى الى إمتلاك معدن الكادميوم إلكترونين في الغلاف الأخير ($5s^2$) يمكن أن يساهم بهما في عملية التوصيل الكهربائي، لذا فإنه يميل إلى المشاركة مع شبه موصل قابل (p-type) أكثر من ميله للمشاركة مع شبه موصل مانح (n-type).وبما أن قيمة تيار الإلكترونات المنتقلة من المعدن إلى شبه الموصل تتناسب عكسيا مع قيمة حاجز الجهد (Potential Barrier) فإن زيادة قيمة التيار الإلكتروني من الكادميوم إلى شبه الموصل القابل (p-type

(Silicon تقلل من قيمة حاجز الجهد (Φ_{BP}) وبالتالي تقل المقاومة النوعية للاتصال.





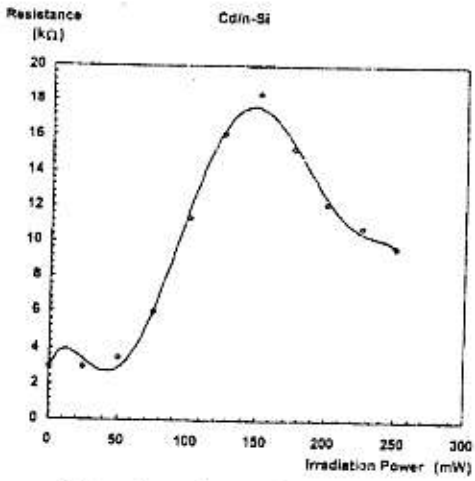
شكل (1) خصائص تيار-جهد لاتصال Cd-Si المصنع باستخدام تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما على قاعدة من النوع المانح (أعلى) وعلى قاعدة من النوع القابل (أدنى)



شكل (2) خصائص الاتصال كادميوم-سيليكون مانح المصنع باستخدام تقنية التبخير الحراري في الفراغ

بلغت قيمة المقاومة النوعية للاتصال المصنع باستخدام تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما (PAS) حوالي ($7.3\,\Omega.cm^2$) و($6.9\,\Omega.cm^2$)، على التوالي، فيما يكون الاتصال المصنع باستخدام تقنية التبخير الحراري في الحراري (VTE) اتصالاً ممانعاً (Rectifying) أو اتصال شوتكي.

يوضح الشكل (3) تغير المقاومة الكلية للاتصال المصنّع على قاعدة من السيليكون المانح باستخدام تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما (PAS) مع تغير شدة الضوء الساقط على طبقة الكادميوم المرسبة. يلاحظ أن مقاومة الاتصال تكون ثابتة عند القيم الواطئة للشدة ثم تزداد بشكل سريع وتبلغ أقصى قيمة لها حوالي ($18.5k\,\Omega.cm^2$)، لتهبط بعدها تدريجياً مع ازدياد شدة الضوء الساقط. لأجل فهم سلوك المقاومة الكلية للاتصال مع تغير شدة الضوء الساقط، جرى تمثيل قيم التوصيلية (σ) كدالة لشدة الضوء الساقط على العينة نفسها أعلاه.

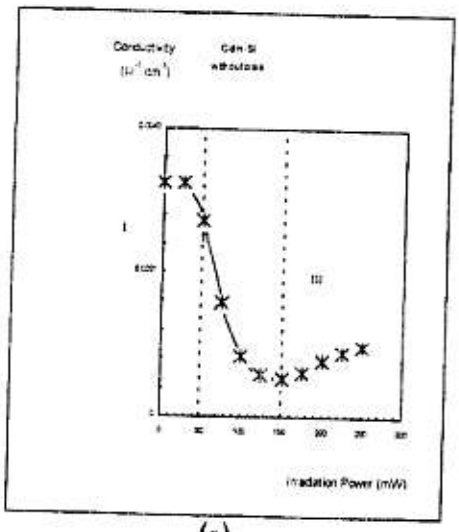


شكل (3) تغير مقاومة الاتصال مع قدرة التشعيع الساقطة للعينة المصنعة باستخدام تقنيـــة PAS على قاعدة من السيليكون المانح

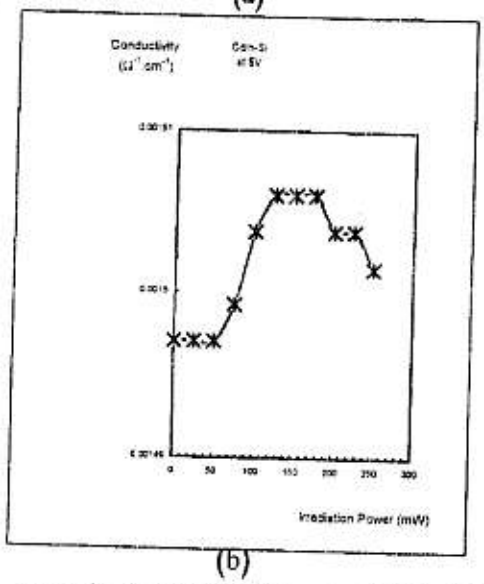
تتميز على المنحني ثلاث مناطق: في المنطقة الأولى لا تمتلك شدة الضوء الساقط تأثيرا على التوصيلية لأنها أقل من حد العتبة اللازم لاختراق طبقة المعدن من قبل الفوتونات الساقطة. أما في المنطقة الثانية فإن طبقة المعدن تبدأ بامتصاص طاقة الضوء الساقط وتحويلها إلى طاقة حركية لذراتها، لذلك يقل معدل سريان التيار الإلكتروني من المعدن إلى شبه الموصل وتهبط التوصيلية. في المنطقة الثالثة تبدأ شدة الضوء الساقط بتجاوز قيمة دالة الشغل للمعدن وتحفز الإلكترونات على الانتقال إلى شبه الموصل فتزداد التوصيلية بشكل تدريجي. أجريت القياسات السابقة على العينة بدون وجود جهد انحياز بين طرفيها، كما في الشكل (4a).

في الشكل (4b)، يختلف سلوك التوصيلية الكهربائية للعينة في حالة وجود جهد انحياز (5V) عن الحالة السابقة، إذ تكون قيمة التوصيلية ثابتة عند القيم الواطئة لشدة الضوء الساقط ثم تزداد بشكل سريع لتبلغ قيمة مستقرة تبدأ بعدها بالهبوط تدريجياً من جديد. يعزى هذا السلوك إلى تأثير جهد الانحياز على حركة الإلكترونات من المعدن إلى شبه الموصل، فعندما تسقط فوتونات الضوء على منطقة الاتصال فإنها تزيد من الطاقة الحركية للإلكترونات تحت تأثير جهد الانحياز فيزداد

معدل سريانها إلى أن تصل إلى حد معين لا يستطيع شبه الموصل عنده استيعاب توافد المزيد من هذه الإلكترونات ضمن الطبقة السطحية منه فيلجأ إلى إمرارها إلى الطبقات الداخلية منه والتي تستوعب هذه الإلكترونات بشكل كامل. لذلك تهبط قيمة التوصيلية إذ تصبح أعداد الإلكترونات المنتقلة من المعدن إلى شبه الموصل غير كافية لسد حاجة الطبقات الداخلية لشبه الموصل حتى مع ازدياد شدة الضوء الساقط.



(a)

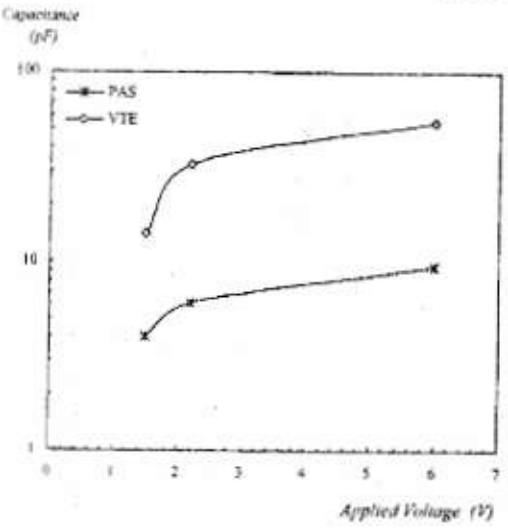


(b)

شكل (4) تغير توصيلية منطقة اتصال كادميوم-سيليكون مانح المصنع باستخدام تقنية PAS في حالة عدم وجود انحياز (أعلى) وفي حالة وجود انحياز (أدنى)

هذه الحالة تماثل التأثير الثرموديناميكي للمبدد الحراري (Heat Sink) الذي يلعبه حجم المادة (Bulk) في حالة تشعيعها بمصدر حرارة محدود كالليزر.

جرى قياس سعة الاتصال كدالة للفولتية المسلطة، وكما مبين في الشكل (5)، إذ يلاحظ أن سعة الاتصال المصنع باستخدام تقنية التبخير الحراري في الفراغ (VTE) أكبر بكثير من سعة الاتصال المصنع باستخدام تقنية الاجتثاث المعزز بالبلازما (PAS).



شكل (5) تغير قيمة سعة الاتصال للعينتين المصنعتين باستخدام تقنيتي PAS و VTE مع الفولتية المسلطة على طرفي الاتصال

إن سبب ذلك هو أن البلازما التي تعزز عملية الاجتثاث تحث عدد أكبر من ذرات الكادميوم على المشاركة بالكترونات الأغلفة الخارجية في زيادة عدد حاملات الشحن الأغلبية في المادة المانحة (وهي الإلكترونات) فتسبب بذلك تقليل قيمة جهد البناء الداخلي فتزداد تبعاً لذلك حركة الحاملات من شبه الموصل إلى المعدن ويقل من جديد تركيز الحاملات وتزداد قيمة جهد البناء الداخلي مما يسبب تقليل قيمة السعة داخل منطقة النضوب. إن درجات الحرارة التي تصل إليها منظومة الاجتثاث المعززة بالبلازما (PAS) تكون أكبر من تلك التي يتم الوصول إليها في منظومة التبخير الحراري في الفراغ (VTE) بسبب القدرة الداخلة الأكبر. علاوة على ذلك، فإن درجة الحرارة في منظومة البلازما تتحدد أساساً بدرجة حرارة الالكترونات الموجودة في البلازما نفسها والتي تصل إلى حوالي (8eV) [10] مما يدعم عملية انتقال الطاقة الحركية من الكترونات البلازما إلى الالكترونات في ذرات الكادميوم.

الاستنتاجات

مما سبق يمكن استنتاج أن استخدام تقنية الاجتثاث المعززة بالبلازما (PAS) يجعل من الممكن تصنيع اتصالات أومية من خلال ترسيب طبقة أو أغشية رقيقة من المعدن على سطح القاعدة شبه الموصلة وبمواصفات جيدة وأبعاد كبيرة، فيما يكون الاتصال المصنع من نفس المعدن على نفس القاعدة شبه الموصلة اتصالاً ممانعاً (أو ثنائي شوتكي) إذا أستخدمت تقنية التبخير الحراري في الفراغ (VTE). يمكن أن يكون التركيب المصنع بأستخدام تقنية VTE أكثر ملائمة لنبائط التحويل الكهروضوئي كالخلايا الشمسية فيما يكون الاتصال المصنع باستخدام تقنية PAS أومياً وهو أحد أهم أجزاء النبائط الإلكترونية.

المصادر

[1] K. Ikossi-Anastasiou, A. Ezias and A.K.Rai, *IEEE Trans. Electron. Devices*, 35(11), 1786 (1988).

[2] S. Sherman, S. Wagner, J. Mucha and R.A. Gottscho, *J. Electrochem. Soc.*, 144(9), 3198 (1997).

[3] D.R. Biswas, "Deposition processes for films and coatings", *J. Mater. Sci.*, 21, 2217 (1986).

[4] **Fundamentals of Ion Beam Sputtering**, *internet literature* (2004).

[5] X. Liu, C. Li, S. Han, J. Han and C. Zhou, *Appl. Phys. Lett.*, 82(12), 1 (2003).
[6] G.S. Anderson, *J. Appl. Phys.*, 33(10), 2991 (1962).
[7] L.L. Atl, S.W. Ing, Jr. and K.W. Laendle, *J. Electrochem. Soc.*, 110, 465 (1964).
[8] S.W. Ing, Jr. and W. Davern, *J. Electrochem. Soc.*, 111, 120 (1964).
[9] A.R. Reinbergh, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 9, 341 (1979).
[10] N.C.M. Fuller, V.M. Donnelly and I.P. Herman, *J. Vac. Sci. Technol.*, A20(1), 170 (2002).