مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية – سلسلة العلوم الأساسية المجلد (30) العدد (3) 2008
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Basic Sciences Series Vol. (30) No. (3) 2008

دراسة الخصائص الكهرضوئية للسيلكون المهدرج غير المتبلور وإمكانية استخدامه في طبقات التصوير الكهربائي

الدكتور حسن عبد الكريم سليمان*

(تاريخ الإيداع 20 / 2 / 2008. قُبِل للنشر في 2008/8/31)

□ الملخّص □

قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير ضغط المزيج الغازي المكوّن من الهيدروجين والأرغون على الخصائص الكهربائية والضوئية للأفلام الرقيقة (ذات السماكة الأكبر من $7\mu m$) المحضرة من السيلكون المهدرج غير المتبلور (*a-Si:H*) وأشكال دخول الهيدروجين فيها. ودرسنا أيضاً أثر زيادة سماكة طبقات السيلكون المهدرج غير المتبلور على كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية. وعيَّنا القيمة الحدية لضغط المزيج الغازي الموافقة للقيمة العظمى لنسبة الناقلية الضوئية إلى الناقلية المظلمة، والتغير الحاد في متحولات الناقلية المظلمة، ومعطيات أطياف امتصاص الأشعة تحت الحمراء لهذه الطبقات. أضف إلى ذلك قمنا بحساب طاقة يورباك للأفلام الرقيقة *a-Si:H* ، واستنتجنا عدم إمكانية استخدامها في طبقات التصوير الكهربائي أحادية التركيب لأنها لا تتصف بالمقاومة النوعية المظلمة اللازمة لذلك. وأخيراً حصلنا على منحني التفريغ في حالة الظلام لطبقات التصوير الكهربائي ثلاثية التركيب حيث ازداد الكمون الأولي للشحَن بمقدار V 68 وتجاوز زمن التفريغ s 10 عند زيادة سماكة طبقات كربيد السيلكون المهدرج غير المتبلور (*a-SiC:H*) من القيمة $1\mu m$ إلى $2\mu m$.

الكلمات المفتاحية: طبقات التصوير الكهربائي – الأفلام الرقيقة – السيلكون (كربيد السيلكون) غير المتبلور المهدرج – المقاومة النوعية – ضغط المزيج الغازي – الناقلية الضوئية– الناقلية المظلمة.

* أستاذ مساعد – قسم الفيزياء– كلية العلوم– جامعة تشرين– اللاذقية– سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية – سلسلة العلوم الأساسية المجلد (30) العدد (3) 2008
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Basic Sciences Series Vol. (30) No. (3) 2008

The Study of Photoelectrical Properties of Amorphous Hydrogenated Silicon and Possibility of Using it in Electrophotography Layers

Dr. Hasan Abdulkarim Souleman *

(Received 20 / 2 / 2008. Accepted 31/8/2008)

□ ABSTRACT □

In this research, we studied the effect of the pressure of a mixture of Argon-Hydrogen gas on the electrical properties and photo-properties of thin films (thickness $> 7\mu m$) prepared from amorphous hydrogenated silicon (a-Si:H) and the forms of the incorporation of hydrogen to it. Also, we studied the influence of increasing the thickness of a-Si:H layers on the density of localized states in energy gap. Then, we determined the critical value of the gas mixture pressure, which is consistent with maximum value of the ratio of the photoconductivity to dark conductivity, the critical change of dark conductivity parameters and, IR-absorption spectrum data of these layers. Also, we calculated Urbach's energy of a-Si:H thin films and concluded the impossibility of using them in single structured electrophotography layers, because they don't have the required enough dark specific resistance. Finally, we were able to get the discharge curve in the darkness case of the triple structured electrophotography layers, where the initial discharge potential increased by 68 V and the discharge time overreached 10 s for this curve, when the thickness of amorphous carbide silicon (a-SiC:H) layers increased from $1\mu m$ to $2\mu m$.

Key words: electrophotography layers - thin films - amorphous hydrogenated silicon (silicon carbide)-specific resistance-pressure of the gas mixture- the dark conductivity – the photoconductivity.

*Associate Professor, Physics Department, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تتميز الأفلام الرقيقة *Thin Films* المصنوعة من السيلكون المهدرج غير المتبلور (*Amorphous Hydrogenated Silicon* (*a-Si:H*) بجملة مواصفات تجعل إمكانية استخدامها كنواقل ضوئية بينية *Interface Photoconductors* للمعلومات واعدةً، لاسيما كطبقات تصوير كهربائي *Electrophotography Layers*، إلى جانب استخداماتها المعروفة في دارات التحكم بكواشف البلورات السائلة على أساس الترانزيستور الحقلي من النوع معدن – عازل – نصف ناقل وفي صناعة الخلايا الشمسية [1,2,3,4]. ومن هذه المواصفات نذكر الحساسية الطيفية العالية التي تتمتع بها مادة طبقات التصوير الكهربائي (السيلكون المهدرج غير المتبلور) في مجال الأشعة المرئية الموافق للأطوال الموجية $(0.4-0.8)\mu m$، وثابت عزلها الكهربائي الكبير نسبياً مقارنةً مع ثابت العزل الكهربائي للسلينيوم $(\varepsilon_{Si}=11, \varepsilon_{Se}=6)$ الذي يؤدي إلى تخفيض نصف قطر مدى التفاعل الكولوني بين الشحنات الكهربائية، وإمكانية التحكم بانزياح مستوى فيرمي في فجوتها الطاقية ليس فقط على حساب التطعيم وإنما عند تطبيق حقول كهربائية أيضاً، إضافةً إلى المقاومة الكيميائية لمادة الأفلام الرقيقة المكوِّنة لطبقات التصوير الكهربائي، وعدم سُمِيَّتها، ومتانتها الميكانيكية العالية، واستقرارها الحراري (حتى درجات حرارة الحصول على المادة التي تبلغ $(300-350)°C$). يمكن لهذه المزايا التي تتصف بها مادة السيلكون المهدرج غير المتبلور أن تزيد من سرعة معالجة المعلومات بشكل حقيقي وأن تؤمن ثبات طبقات التصوير الكهربائي المصنوعة منها أمام عدد مرات التصوير أو الطباعة [1]. غير أن استخدام السيلكون المهدرج غير المتبلور في التصوير الكهربائي يترافق بجملة صعوبات مرتبطة قبل كل شيء بمقاومته النوعية المنخفضة التي تتأرجح عادة بين $10^7\ \Omega.cm$ و $10^9\ \Omega.cm$ مما لا يسمح بالحصول على قيم مقبولة لزمن تناقص الكمون السطحي لشَحن تلك الطبقات في حالة الظلام. ورغم تمكن الباحثين *Le-Comber* و *Spear* في [5] من زيادة المقاومة النوعية لمادة السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* بتطعيمها – بذرات الأوكسجين والبور – بمقدار تأرجح بين 20 و 30 ضعفاً، إلا أن هذه الزيادة لم تكن كافية حتى من أجل طبقات *a-Si:H* التي بلغت سماكاتها $20\mu m$.

أضف إلى ذلك يمكن زيادة زمن تناقص الكمون السطحي للشحن في حالة الظلام عند الانتقال من نظام الطبقة الواحدة المكوَّنة من السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* إلى نظام التراكيب المتعددة الطبقات *Multilayer Structures* التي أساسها السيلكون المهدرج غير المتبلور نفسه حيث تؤدي كل طبقة فيها وظيفة محددة. وذلك بتكوين مجموعة من الخلائط الصلبة (*a-SiY:H*) بطريقة الاستبدال (يرمز Y إلى نوع ذرات الاستبدال ذات الهيئة الهرمية كالكربون C، والجرمانيوم Ge مثلاً). حيث يسمح دخول تلك الذرات بالتحكم بالخصائص الطيفية للطبقات وحساسياتها الضوئية، وبعرض الفجوة الطاقية والناقلية النوعية للمادة، وصلابتها السطحية.

تتلخص فكرة التصوير الكهربائي الجاف في أن الناقل الضوئي البيني للمعلومة (أي للصورة) هو طبقة من مادة نصف ناقلة غير متبلورة حساسيتها الضوئية عالية ومقاومتها النوعية كبيرة (أكبر من $10^{12}\ \Omega\, m$) تترسب على ركيزة ناقلة كهربائياً. يُشحن سطح هذه الطبقة بشحنة موجبة حتى تكوين كمون أولي ما بقيمة مناسبة (تفوق $0.5\ kV$) بوساطة أسلاك معدنية لها شكل التاج وموصولة بمصدر جهد عالي، ومن ثم تسلط كمية مناسبة من الضوء على السطح المشحون لتكوين منحني التغير الزمني للكمون، أي تكوين صورة كهرساكنة مخفية وذلك على حساب الناقلية الضوئية لذلك السطح حتى نهاية مدة التعرض للضوء. تجري بعد ذلك عملية تظهير الصورة المخفية بحبيبات البودرة

السوداء المشحونة سلبياً والتي تنجذب تحت تأثير الحقل الكهربائي إلى طبقة نصف الناقل المشحون إيجابياً، ثم تُنقل الصورة الناتجة إلى ورق الطباعة وبعد ذلك تُثبت حبيبات البودرة السوداء عليها بالضغط الحراري [2].

أهداف البحث وأهميته:

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير أحد متحولات تقانة تحضير السيلكون المهدرج غير المتبلور (*a-Si:H*) المتمثل هنا في ضغط المزيج الغازي هيدروجين – أرغون على الخصائص الكهربائية والضوئية للأفلام الرقيقة التي تأرجحت سماكاتها بين $7\,\mu m$ و $20\,\mu m$ واحتمال استخدامها كطبقات تصوير كهربائي، وتحليل معطيات أطياف امتصاص الأشعة تحت الحمراء. وتتجلى الأهمية التطبيقية لهذا البحث في إمكانية استخدام الأفلام الرقيقة المحضرة من مادة السيلكون المهدرج غير المتبلور في مختلف أجهزة التصوير الكهربائي الجاف والطابعات التي تُعنى بتسجيل المعلومات الضوئية، ومعالجتها، وثم إخراجها، وكذلك في مجال الخلايا الشمسية كونها تتصف بحساسية ضوئية عالية.

طريقة البحث والمواد المستخدمة:

استخدمنا في هذا البحث أفلام رقيقة مصنوعة من مادتي السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* وكربيد السيلكون المهدرج غير المتبلور (*a-SiC:H*) *Amorphous Hydrogenated Carbide*. تم الحصول عليها في مختبر فيزياء وتقانة المواد الكهربائية في معهد الطاقة بموسكو في وقت سابق حيث اعتمدت القياسات التي أجريت على العينات المدروسة في البحثين [6,7] المتعلقين بدراسة توزيع كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية $[N(E)]$ *Distribution of Localized in Energy Gap Density of States* للسيلكون المهدرج غير المتبلور وكربيد السيلكون المهدرج غير المتبلور. وأجري هذا البحث في جامعة تشرين خلال الفترة من 2006/6/30 إلى 2007/9/30.

تم تحضير الأفلام الرقيقة من مادة السيلكون المهدرج غير المتبلور بطريقة الرشق في حالة التواترات العالية *High Frequency Sputtering* في جو بلازمي مكون من الأرغون والهيدروجين بنسبة $(Ar/H_2 = 7/1)$ حيث تم رشق هدف له شكل قرص مصنوع من مادة السيلكون الأحادي المتبلور *Mono-crystalline Silicon* وقطره $15\,cm$. وقد بلغت سرعة ترسيب هذه الأفلام الرقيقة من ذلك الهدف $3\,\mu m/h$ عندما كانت الاستطاعة النوعية للتفريغ عالي التواتر *Specific Discharge Power* مساويةً $W_s = 2.8\,W/cm^2$ [6,7]. وتم تحضير عينات كربيد السيلكون غير المتبلور المهدرج *a-SiC:H* بطريقة الرشق المشترك لهدف من السيلكون وضعت على سطحه شريحة كربونية، حيث تغير تركيز ذرات الكربون في الأفلام الرقيقة الناتجة بالتحكم بنسبة مساحة شريحة الكربون إلى مساحة قرص السيلكون اللتان تعرضتا لعملية الرشق (نرمز لهذه النسبة بالرمز A). وبقيت جميع متحولات تقانة تحضيرها ثابتة وبلغت درجة حرارة الركيزة $T_S = 400\,°C$ *Temperature Substrate*، وطاقة التفريغ $W = 500\,W$، وضغط المزيج الغازي $P = 4\times10^{-3}\,mm.Hg$، وتأرجحت قيمة النسبة A بين 0.11 و 0.44. كما تأرجحت سماكة عينات *a-Si:H* بين القيمتين $7\,\mu m$ و $20\,\mu m$ وعينات *a-SiC:H* بين القيمتين $1\,\mu m$ و $2\,\mu m$ [7].

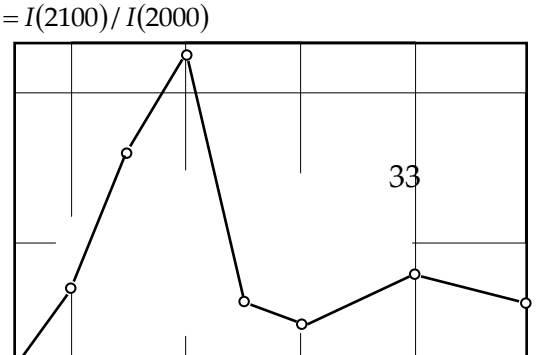
تتطلب تراكيب التصوير الكهربائي الأحادية الطبقة المصنوعة من السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* أن تتصف مادتها بمقاومة نوعية عالية كفاية (أكبر من $10^{12}\,\Omega.cm$). وهذا ما لم يتحقق في هذا البحث كما سنرى

لاحقاً. ولهذا السبب تم اللجوء إلى تحضير تراكيب تصوير كهربائي متعددة الطبقات أساسها أفلام رقيقة سميكة (من مادة السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H*) وذات حساسية ضوئية عالية كفاية في المجال المرئي للطيف الكهرطيسي. يمكن تحقيق ذلك بزيادة سرعة ترسيب *Deposition Speed* (r) أفلام السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H*. ولكن بيَّن الباحثون في [1,9] أنه رغم أن زيادة طاقة التفريغ W حتى قيمة حدية ما ($W = W_c$) تؤدي إلى زيادة سرعة الترسيب r وتحسين نوعية أفلام السيلكون المهدرج غير المتبلور لاسيما ارتفاع نسبة ناقليتها الضوئية إلى ناقليتها المظلمة (σ_{ph}/σ_d) عند درجة حرارة الغرفة، إلا أن الاستمرار في زيادة طاقة التفريغ W وسرعة الترسيب r، يجعل متحولات الأفلام الرقيقة رديئة جداً. ولقد تبين في [1,7,8] أن بنية تشكل *Morphology* سطح الأفلام الرقيقة يتغير في مجال القيم الحدية لمتحولات تقانة تحضير العينات المدروسة، ثم إنه في هذا المجال تحديداً تتشكل الأفلام الرقيقة المتميزة بقيمة عظمى للنسبة σ_{ph}/σ_d وبقيمة صغرى للناقلية المظلمة. يمكن وضع هذه النتيجة التجريبية كأساس للبحث عن الشروط المثلى للحصول على الأفلام الرقيقة السميكة من مادة السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H*: فمن أجل طاقة تفريغ W عظمى يجب البحث عن قيمة حدية لدرجة حرارة الركيزة (T_s^c) عند ثبات ضغط الخليط الغازي P أو عن قيمة حدية لضغط الخليط الغازي(P^c) عند ثبات درجة حرارة الركيزة T_s.

من الطبيعي جعل درجة حرارة الركيزة التي تترسب عليها أفلام السيلكون المهدرج غير المتبلور أكبر ما يمكن ($T_s = 400\,°C$)، وذلك لتأمين عمليات استرخاء التركيب الذري*Atomic Structure Relaxation* للأفلام الرقيقة المترسبة بأكبر سرعة يمكن أن تحققها تقانة التحضير. وهكذا نجد أن الاعتبارات المشار إليها أعلاه تسمح بتثبيت قيمتي متحولين (درجة حرارة الركيزة T_s وطاقة التفريغ W) من أصل ثلاثة متحولات تتحكم بعملية تحضير الأفلام الرقيقة السميكة من السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* وبتحويل مسألة اختيار الشروط المثلى للحصول على هذه الأفلام إلى البحث عن الضغط الحدي للمزيج الغازي P^c الموافق للثنائية $W = 500\,W$ و $T_s = 400\,°C$.

عُيِّنت القيم الحدية لضغط المزيج الغازي P^c استناداً إلى التغير الحاد الحاصل في متحولات الناقلية المظلمة(σ_d)–العامل الأسي للناقلية المظلمة (σ_0) *Exponential Factor of Dark Conductivity* وطاقة تنشيطها (E_a) *Activation Energy*– للسيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* الذي تم الحصول عليه من أجل $P > P^c$ و $P < P^c$، ومعطيات أطياف امتصاص الأشعة تحت الحمراء *Infrared Spectroscopy* في مجال الأعداد الموجية $(1800 - 2300)\,cm^{-1}$ باستخدام مقياسيي الطيف الضوئي *Specord 75 I* و *Perkin-Elmer* 1720.

يُعدّ تابع توزيع كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية $N(E)$ من المتحولات الهامة التي تُعبّر بشكل موضوعي عن خصائص السيلكون (وكربيد السيلكون) المهدرج غير المتبلور (*a-SiC:H*) *a-Si:H*، لاسيما أن معامل الامتصاص، والناقلية الضوئية، والناقلية الكهربائية، وغيرها تتعلق بشكل وثيق بهذا المتحول. وقد تم حساب طيف كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية $N(E)$ لتلك المادة بحل معادلة ولتر *Walter's Equation* التكاملية [7] التي هي معادلة من الدرجة الأولى ومن نوع الالتفاف *Convolution* التي تربط بين معامل امتصاص العينة المدروسة $\alpha(h\nu)$ وكثافة الحالات المتوضعة في فجوتها الطاقية $N(E)$، وذلك استناداً إلى معطيات التيار الضوئي الثابت *Constant* [10]



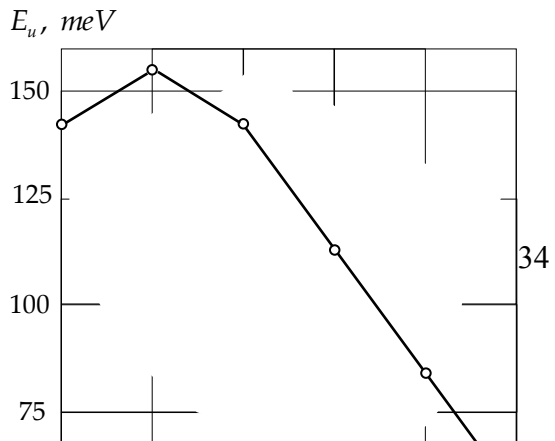
$Photocurrent: \int N(E)\, g(h\nu+E)\, dE = h\nu.\, \alpha(h\nu)$ ، حيث E طاقة الإلكترون في الفجوة الطاقية، و h ثابت بلانك، و ν تردد الفوتون، و $g(h\nu+E)$ كثافة الحالات الممتدة في عصابتي الناقلية والتكافؤ. وتم أيضاً حساب قيم الطاقة المميزة لحد امتصاص يورباك *Urbach Absorption Edge* في مجال التغير الأسي لمنحني الامتصاص كتابع لطاقة الفوتونات الواردة على العينة المدروسة $E_u = \left(\frac{\partial \ln \alpha}{\partial(h\nu)}\right)^{-1}$: تخضع أنصاف النواقل غير المتبلورة لقانون يورباك الذي يصف درجة عدم تبلور موادها، ويعبر عنه بالعلاقة $\alpha = \alpha_0 \exp(h\nu / E_u)$، حيث α_0 مقدار مميز لعامل امتصاص يورباك [7,10,11].

النتائج والمناقشة:

سمحت دراسة متحولات الأفلام الرقيقة من السيلكون المهدرج غير المتبلور، باستخدام أطياف امتصاص الأشعة تحت الحمراء، بتعيين تركيز الهيدروجين، وتوزيعه في المركبات SiH و SiH_2 الموافقة للامتصاص في مجالي العددين الموجيين $k = 2000\,cm^{-1}$ و $k = 2100\,cm^{-1}$ على الترتيب، ويبين الشكل (1) منحني تغير المتحول μ الذي يساوي نسبة قمة شدة الامتصاص في المجال الطيفي $k = 2100\,cm^{-1}$ إلى قمة شدة الامتصاص في المجال الطيفي $k = 2000\,cm^{-1}$ (أي $\mu = I(2100)/I(2000)$) عند تغير ضغط المزيج الغازي (وبالتالي الضغط الجزئي للهيدروجين *Partial Hydrogen Pressure*) في كامل المجال المدروس $(1-10)\times 10^{-3}\,mm.Hg$. يدل هذا المنحني على أن التركيز الكلي لذرات الهيدروجين في الأفلام *a-Si:H*، عند ارتفاع ضغط المزيج الغازي من القيمة $1\times 10^{-3}\,mm.Hg$ إلى القيمة $4\times 10^{-3}\,mm.Hg$، يزداد بشكل رئيسي على حساب ازدياد التركيز النسبي للمركبات SiH_2 بشكل حاد، ثم تنخفض نسبة المركبات SiH_2 مقارنة مع المركبات SiH في باقي مجال الضغط المدروس $(5-10)\times 10^{-3}\,mm.Hg$. وبينت أطياف امتصاص الأشعة تحت الحمراء أن كمية الهيدروجين تزداد عند ارتفاع ضغط المزيج الغازي، إلا أن التركيز الكلي لذرات الهيدروجين لا يتجاوز 8% في أفضل حالاته.

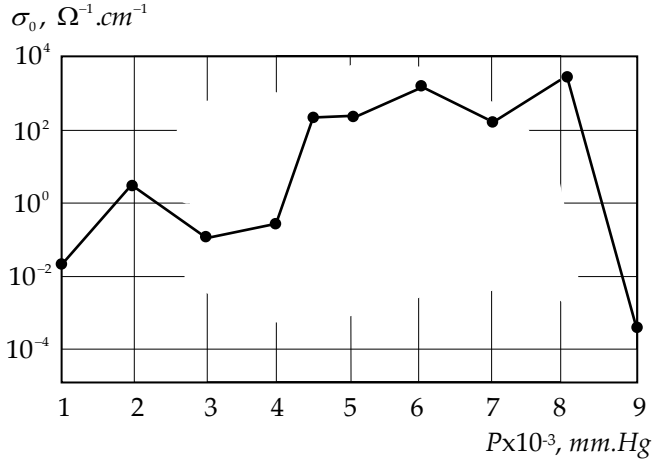
لم نتمكن من الحصول على أطياف كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية $N(E)$ من أجل جميع الأفلام الرقيقة المدروسة في هذا البحث لأن الناقلية الضوئية لبعضها لم تكن كبيرة كفاية. ولهذا السبب تمت دراسة طبقات السيلكون المهدرج غير المتبلور المترسبة عند ضغوط قريبة من الضغط الحدي فقط $P^c = 4\times 10^{-3}\,mm.Hg$. يبين الشكل (2) منحني طيف كثافة الحالات المتوضعة $N(E)$ الأكثر تميزاً للسيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* والموافق لمتحولات تقانة التحضير التالية: $W_s = 2.8\,W/cm^2$، و $P = P^c = 4\times 10^{-3}\,mm.Hg$، و $T_s = 400\,°C$. إن الشكل العام لتابعيات أطياف كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية $N(E)$ للعينات المدروسة في هذا البحث مشابهة تقريباً لتلك الأفلام الرقيقة ذات السماكة الصغيرة الأقل من $1\,\mu m$ والمدروسة في [1,11]، ولكن قيمها الإجمالية أكبر، وهذا ما يؤثر سلباً على قيم النسبة σ_{ph}/σ_d.

يبين الشكل (3) المعطيات الموافقة لقيم الطاقة المميزة لحد امتصاص يورباك E_u المحسوبة بطريقة التيار الضوئي الثابت كتابع لضغط المزيج الغازي. ولكن معطيات دراستنا البصرية (أطياف النفوذ



والانعكاس) *Optic Investigation Data* للأفلام الرقيقة *a-Si:H* في المجال المرئي للطيف تؤكد نتائج دراسة أطياف امتصاص الأشعة تحت الحمراء الخاصة بوجود قيمة حدية لضغط المزيج الغازي المستخدم $\left(P^c = 4\times10^{-3}\,mm.Hg\right)$، ويبين الشكلان (4) و (5) نتائج هذه الدراسة المتمثلة في علاقة كل من الفجوة الطاقية الضوئية $\left(E_g^{op}\right)$ وطاقة يورباك E_u بضغط المزيج الغازي في المجال $(2-10)\times10^{-3}\,mm.Hg$؛ يمكن تفسير بعض الاختلافات بين قيم E_u الملاحظة في الشكلين (3) و (5) بالأخطاء المرتكبة عند حسابها بالطريقتين المذكورتين أعلاه. ولكن في كل الأحوال تدل القيم الكبيرة لطاقة يورباك E_u في النقاط الحدية المشار إليها في الشكلين (3) و (5) على أن درجة عدم تبلور مادة السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* التي تمت دراستها في هذا البحث كبيرة جداً نتيجة تشكل التركيب العامودي *Column Structure* في بنيتها: يُعدُّ التركيب العامودي تركيباً ثنائي الطور مكوّن من مجالات أساسية مميزة لمادة العينة المدروسة (غنية بالمركبات *SiH* و SiH_2) تسمى "أعمدة *Columns*"، تفصل بينها حواجز كمون، تتشكل من الروابط (*Si-Si*) المقطوعة *Dangling Bonds*، تسمى "نسيجاً رابطاً *Texture*" [7,8]. يساوي ارتفاع هذه الحواجز إلى المسافة الطاقية الفاصلة بين قمة عصابة التكافؤ والحالة الطاقية الموافقة لقمة كثافة الحالات المتوضعة في عمق الفجوة الطاقية. وتختلف متحولات "الأعمدة" التي تُعدّ أساس الفيلم الرقيق الناتج عن متحولات "النسيج الرابط" الذي يربط فيما بين هذه الأعمدة بشكل جوهري.

يبين الشكل (6) نتائج دراسة تأثير أحد متحولات الناقلية الكهربائية للأفلام الرقيقة المدروسة المتمثل هنا في العامل الأسي للناقلية الكهربائية σ_0. ولا يختلف منحني تغير طاقة تنشيط الناقلية الكهربائية المظلمة حرارياً E_a – ضمن المجال المدروس لضغط المزيج الغازي – عن منحني تغير العامل الأسي σ_0 حيث يحقق المتحولان σ_0 و E_a قاعدة ماير – نيلدل *Meyer-Neldel Rule* [12]، ولذلك لم يُعرض هنا. تنص قاعدة ماير – نيلدل المعروفة منذ عام 1937 على أن العامل الأسي للناقلية المظلمة σ_0 يرتبط بطاقة التنشيط الحراري E_a وفق العلاقة التجريبية الأسية التالية: $\sigma_0 = \sigma_{00}\exp\left(E_a/kT_0\right)$ (حيث σ_{00} و T_0 مقداران ثابتان). وتخضع الناقلية الكهربائية المظلمة لتلك الأفلام الرقيقة للقانون $\sigma_d = \sigma_0\exp\left(-E_a/kT\right)$، حيث k ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة. تأرجحت أصغر قيمة للناقلية المظلمة بين $10^{-11}\ \Omega^{-1}.cm^{-1}$ و $10^{-10}\ \Omega^{-1}.cm^{-1}$، وتغيرت طاقة التنشيط من أجل جميع العينات المدروسة في المجال $(0.35-0.86)\,eV$. وبلغت أكبر قيمة للعامل الأسي للناقلية المظلمة $\sigma_{0,\max} = 5\times10^{-3}\,\Omega^{-1}.cm^{-1}$ وطاقة تنشيطها $E_{a,\max} = 0.86\,eV$. بلغت القيمة العظمى لنسبة الناقلية الضوئية إلى الناقلية المظلمة عند الضغط الغازي الحدي $\left(\sigma_{ph}/\sigma_d\right)_{\max} = 16.5$. تدل نتائج تلك الدراسة الكهربائية والكهرضوئية على أن تغير كل من متحول الناقلية الكهربائية المظلمة σ_0 (وبطبيعة الحال طاقة التنشيط الحراري E_a)،

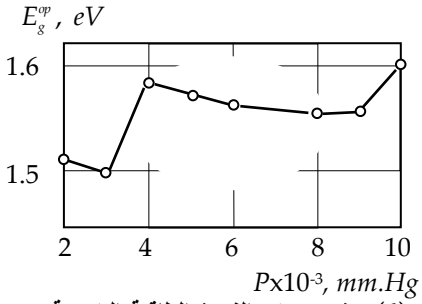


الشكل (6): تغير العامل الأسي للناقلية الكهربائية المظلمة عند تغير ضغط المزيج الغازي

والنسبة σ_{ph}/σ_d يرتبط بالتغيرات الحاصلة في توزيع ذرات الهيدروجين على المركبات المختلفة، شكل (1): فالقيم الكبيرة للعامل الأسي للناقلية المظلمة وطاقة التنشيط توافق القيم الصغيرة للمتحول $\mu = I(2100)/I(2000)$ ، والعكس بالعكس.

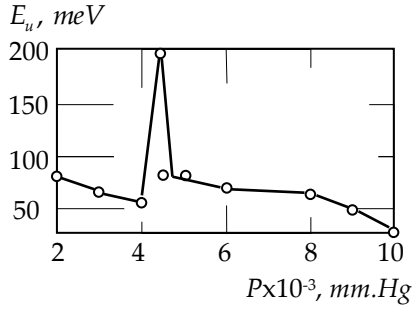
تؤكد النتائج المبينة أعلاه على أنه لا يمكن استخدام الأفلام الرقيقة من السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* المدروسة في هذا البحث كطبقات تصوير كهربائي أحادية التركيب لأن مقاومتها النوعية المظلمة ليست كبيرة كفاية لهذا الغرض حيث بلغت $(10^{10}-10^{11})\Omega.cm$ في أفضل حالاتها. وبصرف النظر عن أن قيمة الكمون الأولي الناتج عن عملية شحن سطح طبقة السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* بلغت $(400-450)V$ ، وهي تقترب من القيم العملية لكمونات شحن طبقات التصوير الكهربائي، إلا أن زمن التناقص في حالة الظلام لم يتجاوز $(0.15-0.20)s$. ولكن يمكن استخدام تلك الأفلام الرقيقة كطبقتي توليد لحاملات الشحنة الكهربائية ونقلها *Generation and Transport Layers* عند تكوين تراكيب التصوير الكهربائي ثلاثية الطبقات. أما لتأمين طبقات حصر الشحنات الكهربائية وتعديلها (تهميدها) *Blocking and Passivity Layers* في تلك التراكيب فقد استخدمت أفلام رقيقة من كربيد السيلكون غير المتبلور *a-SiC:H* التي تأرجحت سماكاتها بين القيمتين $1\mu m$ و $2\mu m$.

يبين الشكل (7) – المقتبس من [7]– نتائج دراسة أطياف كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية لعينات كربيد السيلكون غير المتبلور *a-SiC:H* $N(E)$ عند تغير النسبة A بين 0.11 و o.44. لقد لاحظنا ازدياد الكثافة

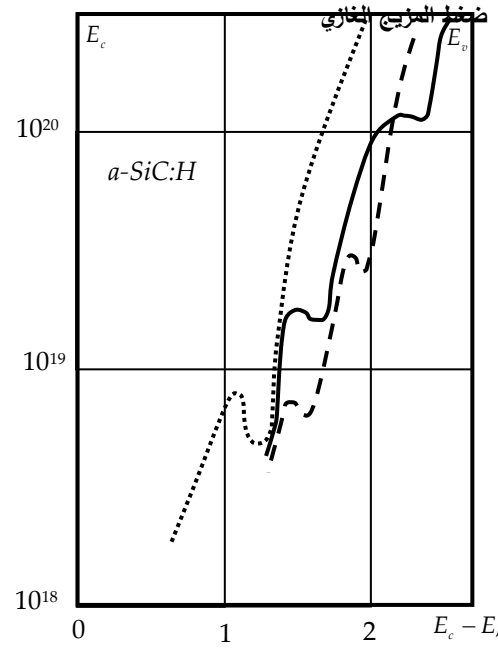


الشكل (4): تغير عرض الفجوة الطاقية الضوئية E_g^{op} كتابع لضغط المزيج الغازي

الإجمالية للحالات المتوضعة $N(E)$ وتغيراً كبيراً في الموضع الطاقي لقمم كثافة الحالات المتوضعة $N(E)$ ، حيث يوافق المنحني المنقط، والمتقطع، والمستمر قيم المتحول A: 0.11، و 0.24، و o.44 على الترتيب. وكما أشرنا في [7] فإن دخول ذرات الكربون في شبكة السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* لا يُزيد فقط عرض الفجوة الطاقية، وإنما المقاومة المظلمة للأفلام الرقيقة الناتجة مما يسمح باستخدامها في تراكيب التصوير الكهربائي متعددة الطبقات. فاستخدام



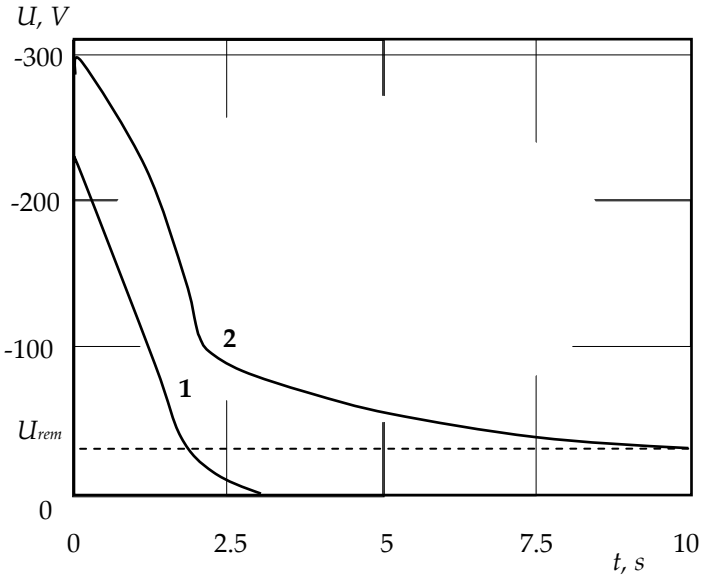
الشكل (5): تغير طاقة يورباك E_u كتابع لتغير ضغط المزيج الغازي



الشكل (7): أطياف كثافة الحالات في الفجوة الطاقية للعينات *a-SiC:H* المحضرة بطريقة الرشق المشترك: $A = 0.11$ (الخط المنقط)، و $A = 0.24$ (الخط المتقطع)، و $A = 0.44$ (الخط المستمر) [7].

التراكيب ثلاثية الطبقات في التصوير الكهربائي يتطلب من متحولات كل طبقة من طبقاتها الثلاث شروطاً أقل صرامة من تلك التي تتطلبها تراكيب التصوير الكهربائي أحادية الطبقة. وهذا ما يسمح لنا بالحصول على خصائص تصوير كهربائي مقبولة.

لقد استخدمنا في هذا البحث الأفلام الرقيقة *a-Si:H* التي تأرجحت سماكاتها بين $7\,\mu m$ و $20\,\mu m$ بمثابة طبقات لتوليد حاملات الشحنة الكهربائية ونقلها، والأفلام الرقيقة *a-SiC:H* كطبقات لحصر الشحنة الكهربائية ومعادلتها. ويبين الشكل (8) منحنيات التفريغ في حالة الظلام (أي علاقة الكمون السطحي U لشحن الطبقات كتابع للزمن t) لتراكيب التصوير الكهربائي ثلاثية الطبقات التي أساسها السيلكون المهدرج غير المتبلور: $A\ell / A\ell_2O_3 / a-Si:H / a-SiC:H$، حيث يوافق المنحني (1) طبقة *a-SiC:H* ذات السماكة $1\,\mu m$ والمنحني (2) طبقة *a-SiC:H* ذات السماكة $2\,\mu m$. يتجلى دور الطبقة العازلة $A\ell_2O_3$ في ذلك التركيب في منع تسرب الشحنات الكهربائية من داخل الركيزة المعدنية $A\ell$ وجوانبها. ولا بد من الإشارة هنا إلى أنه تم تثبيت بداية قياس الكمون السطحي U بعد $(0.5-0.8)\,s$ من انتهاء عملية الشحن بسبب عدم مثالية مقياس الجهد، ولذلك تكون القيم الحقيقية للكمون الحدي للشحن أكبر بمقدار $(50-70)\,V$.



الشكل (8): منحني التفريغ الكهربائي في حالة الظلام لتركيب التصوير الكهربائي ثلاثي الطبقات: $A\ell / A\ell_2O_2 / a-Si:H / a-SiC:H$.

يؤكد الشكل (8) تأثير سماكة طبقات *a-SiC:H* على منحني التفريغ في حالة الظلام. حيث نلاحظ ازدياد الكمون الأولي للشحن بمقدار $68\,V$، وتباطؤ معدل التفريغ وبالتالي زمن التفريغ أطول: فلم يتجاوز زمن التفريغ في المنحني (1) الثلاث ثواني، في حين تجاوز العشر ثواني في المنحني (2). ثم أن الكمون المتبقي *Remained Potential* ليس معدوماً ويبلغ $U_{rem} = -30\,V$.

وهكذا نجد أن المعطيات والنتائج المبينة في هذا البحث تدل على أن كمونات شحن التراكيب متعددة الطبقات التي أساسها السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* والخليط الصلب *a-SiC:H* تقترب من القيم العملية لكمونات شحن طبقات التصوير الكهربائي المتوالية. غير أنه من أجل الحصول على طبقات تصوير كهربائي على أساس السيلكون المهدرج غير المتبلور بحيث تكون قادرة على منافسة طبقات التصوير الكهربائي – المعمول بها حالياً –

على أساس السلينيوم غير المتبلور (*a-Se*) *Amorphous Selenium*، لا بد من زيادة زمن تفريغها في حالة الظلام بشكل كبير.

الاستنتاجات والتوصيات:

1- بلغ الضغط الحدي للمزيج الغازي المكوّن من الأرغون والهيدروجين، عند دراسة الأفلام الرقيقة *a-Si:H* التي تأرجحت سماكاتها بين $7\,\mu m$ و $20\,\mu m$، القيمة $P^c = 4\times10^{-3}\,mm.Hg$. توافق قيمة هذا الضغط الحدي التغيرات الحادة التي تعرضت لها قيم كل من العامل الأسي للناقلية المظلمة σ_0 وطاقة تنشطها الحراري E_a، ونسبة الناقلية الضوئية إلى الناقلية المظلمة (حيث بلغت القيمة العظمى لهذه النسبة $\left(\sigma_{ph}/\sigma_d\right)_{\max} = 16.5$، والمتحول $\mu = I(2100)/I(2000)$ (حيث بلغت قيمته العظمى $\mu_{\max} > 3.5$).

2- تتوزع ذرات الهيدروجين في مادة *a-Si:H* بشكل رئيسي وفق المركبات *SiH* و *SiH_2*، وبلغت كثافتها الإجمالية 8% في أفضل حالاتها.

3- أدت زيادة سماكة عينات السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* إلى ارتفاع قيمة كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الطاقية، وهذا ما جعل قيم النسبة σ_{ph}/σ_d صغيرة نسبياً، مقارنة مع قيمها في الأفلام الرقيقة الدقيقة المدروسة في [1,14].

4- تدل القيم الكبيرة لطاقة يورباك E_u التي بلغت في النقاط الحدية أكثر من 150 *meV* على أن درجة عدم تبلور مادة السيلكون المهدرج غير المتبلور *a-Si:H* التي تمت دراستها عند الضغط الحدي للمزيج الغازي كبيرة، ويُعزى ذلك إلى تشكل التركيب العامودي فيها [1,7,8].

5- لا يمكن استخدام الأفلام الرقيقة *a-Si:H* المدروسة في هذا البحث كطبقات تصوير كهربائي أحادية التركيب لأن مقاومتها النوعية المظلمة ليست كافية لهذا الهدف حيث لم تتجاوز قيمتها $\left(10^{10}-10^{11}\right)\Omega.cm$. ولكن يمكن استخدامها كطبقات لتوليد الشحنات الكهربائية ونقلها في تراكيب التصوير الكهربائي ثلاثية الطبقات المؤلفة من $A\ell/A\ell_2O_3/a-Si:H/a-SiC:H$.

6- أثرت زيادة سماكة الأفلام الرقيقة *a-SiC:H* من القيمة $1\,\mu m$ إلى $2\,\mu m$ إيجاباً على منحني التفريغ الكهربائي في حالة الظلام حيث ازداد زمن تفريغه من القيمة 3 *s* إلى 10 *s* على الترتيب.

7- نقترح دراسة الأفلام الرقيقة *a-Si:H* و *a-SiC:H* عند تغير متحولات تقانة التحضير الأخرى؛ كدرجة حرارة الركيزة، وطاقة التفريغ التي قد تؤمن تراكيب تصوير كهربائي أحادية الطبقة بقيم مقبولة لنسبة الناقلية الضوئية إلى الناقلية المظلمة، وزمن تفريغ كبير في حالة الظلام، حيث تكون قادرة على منافسة طبقات التصوير الكهربائي التي أساسها السلينيوم غير المتبلور الشائع الاستعمال في الوقت الحالي.

المراجع:

1- فيليكوف ف.أن؛ وبوبوف أ.إي.؛ وليغاتشوف ف.أ.؛ و غورديف ف. أ.، *المتحولات الكهربائية الأساسية للأفلام الرقيقة a-Si:H المستخدمة في التصوير الكهربائي*، المؤتمر العلمي في التصوير الكهربائي– 88، موسكو، 1988، 111-114 (باللغة الروسية).

2- سليمان، محمد أمين؛ باشا أحمد فؤاد؛ خيري شريف أحمد، *فيزياء الجوامد*، منشورات دار الفكر العربي، القاهرة، 2005، 503.

3- PARK, H.R.; OH, D.S., *Change in Bulk Defect Density of Hydrogenated Amorphous Silicon by Bias Stress in Thin Film Transistor Structures*, App. Phys. Let., Vol. 68, N. 22, 1996, 614-622.

4- SOULEMAN, H.; ZEIN EDDINE, A., *Study of Electrical Properties of a Triple Junction Solar Cell Type GaAs/GaInP/Ge*, Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research, Basic Science Series, Vol. 27, Nº.2, 2005, P. 71-84.

5- LECOMBER, L.; SPEAR, Y., *The Spectroscopy of Localized States, The Phys. of Hydrogenated Amorphous Silicon*, Pt. II, Ed. JOANNOPOULOS, J.D.; LUCOVSKY, G., Berlin, Springer-Verlag, 1984.

6- سليمان، حسن عبد الكريم، *استخدام خوارزمية تنظيم من أجل حساب أطياف كثافة الحالات الطاقية في الفجوة الحركية لـ a-Si:H بطريقة التيار الضوئي الثابت*، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الأساسية، المجلد 29، العدد 1، 2007، 33-42.

7- سليمان، حسن عبد الكريم، *تعيين طيف كثافة الحالات في الفجوة الطاقية لأنصاف النواقل غير المتبلورة*، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الأساسية، قيد النشر (2007).

8- سليمان، حسن عبد الكريم، *دراسة بعض خواص السيلكون المهدرج غير المتبلور (a-Si:H) بحساب طيف أزمنة الاسترخاء*، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الأساسية، المجلد 23، العدد 10، 2001، 47-62.

9- AIDA, M. S.; RAHMANE, S., *Measurement Of The Striking Force Of Ar Ions On The Substrate During Sputter Deposition Of a-Si:H Thin Films*, Thin Solid Films, N 288, 1996, 83-85.

10- VANECEK, M.; ABRAHAM, A.; STIKA, O., *Gap States Density In a-Si:H Deduced From Subgap Optical Absorption Measurement On Shottky Solar Cells*, Phys. Stat. Solid (a), Vol. 83, 1984, 617-623.

11- БАЛАГУРОВ, Л. А.; КАРПОВА, Н. И.; ОМЕЛЬЯНВСКИЙ, Э. М.; ПИНСКЕР, Т. Н.; СТАРИКОВ, М. Н., *Энергетический Спектор Глубогих Состояний в Щели Подвижности a-Si:H*, ФТП, 1986, Т. 20, В. 4, 720-723.

الترجمة: بلاغوروف، ل.أ.؛ كاربوفا، ن. إي.؛ أملانسكي، ا. م.؛ بينسكر، ت.ن.؛ ستاريكوف، م.ن.، *تعيين الطيف الطاقي للحالات العميقة في الفجوة الحركية لـ a-Si:H*، مجلة فيزياء وتقانة أنصاف النواقل، المجلد 20، العدد 4، 1986، 720-723. (باللغة الروسية)

12- CONWAY, N.M.J.; LLIE, A.; ROBERTSON, J.; MILNE, W.I., *Reduction in Defect Density By Annealing In Hydrogenated Tetrahedral Amorphous Carbon*, App. Phys. Let., Vol. 73, N.17, 1998, 2456-2458.

13- MEREY, W.; NELDEL, R., *A Relation Between The Energy Constant G And The Quantity Constant a In The Conductivity-Temperature Formula On Oxide Semiconductors*, Z. Tech. phys., V. 18, 1937, 588-593.

14- بيلينكو، د.اي.؛ وزملائه، *دراسة علاقة المتحولات الكهرضوئية لطبقات السيلكون المهدرج غير المتبلور بالخصائص الضوئية (البصرية) أثناء تحضيرها*، مجلة فيزياء وتقانة أنصاف النواقل، المجلد 21، العدد 8، 1987،1489-1492. (باللغة الروسية)