

استخدام خوارزمية تنظيم من أجل حساب أطيف كثافة الحالات الطاقية في الفجوة الحركية لـ a-Si:H بطريقة التيار الضوئي الثابت

الدكتور حسن سليمان*

(تاريخ الإيداع 28 / 8 / 2006. قِيلَ للنشر في 28/2/2007)

□ الملخص □

تم في هذا البحث تقديم عرض شامل لخوارزمية تنظيم تيخانوف، ومن ثم دراسة تحليلية لآلية عملها. استخدمت هذه الخوارزمية في حساب طيف توزيع كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الحركية لأنصاف النواقل غير المتبلورة من النوع a-Si:H (السيلكون الأمورف المهدرج) بطريقة التيار الضوئي الثابت. بعد ذلك تم عرض نتائج حساب أطيف توزيع كثافة الحالات في الفجوة الحركية لـ a-Si:H تأسيساً على خوارزمية تنظيم تيخانوف، وتفسير هوية القمم الموجودة في هذه الأطيف وربطها بالتركيب الذري للسيلكون الأمورف المهدرج. وأخيراً أجريت مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث وتلك التي تم الحصول عليها من خلال دراسات سابقة من أجل عينات مشوبة بذرات الفوسفور والبور مما يؤكد صحة دراسة خوارزمية التنظيم المطروحة في هذا البحث.

كلمات مفتاحية: خوارزمية تنظيم - طيف كثافة الحالات - الفجوة الحركية - أنصاف النواقل اللابلورية - السيلكون الأمورف المهدرج - التيار الضوئي الثابت.

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

Use of Regularization Algorithm for Account of Spectrums of the Density of States in Mobility Gap of a-Si:H by Constant Photocurrent Method

Dr. Hasan Souleman*

(Received 28 / 8 / 2006. Accepted 28/2/2007)

□ ABSTRACT □

This research presents a panorama of the Techanoff regularization algorithm and an analytic study of its mechanism. This algorithm is used in the calculation of distribution spectra of density of states localized in mobility gap of non-crystal semiconductors type a-Si:H (amorphous hydrogenated silicon) by constant photocurrent method. Results of calculation distribution spectra of density states of this algorithm are presented. The interpretation of essence of peaks existing in spectra and connecting it with atomic structure of amorphous hydrogenated silicon was done. Finally, a comparison is done between the results obtained in this research and that obtained through previous studies for samples doped with phosphor and bore atoms. This confirms the verifying of the study of the regularization algorithm presented in this research.

Key Words: Normalization algorithm, Specter of density of states, Mobility gap, Non-crystal semiconductors, A-Si:H (amorphous hydrogenated silicon), Constant photocurrent.

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

مقدمة:

إن أهمية التعيين التجريبي لطيف كثافة الحالات $(N(E))$ في الفجوة الحركية لنصف ناقل غير متبلور Non-crystalline Semiconductors ناجمة عن التأثير الكبير لكثافة الحالات على خصائصه الضوئية والكهربائية، ولهذا الهدف استخدمت في هذا البحث طريقة التيار الضوئي الثابت Constant Photocurrent Method [1] (CPM) التي تتميز عن غيرها من الطرائق، ولاسيما طريقة التيارات الكهربائية الناجمة عن الشحنات الفراغية Space Charge Limit Currents [2] كونها تسمح لنا بالحصول على توزيع طيف كثافة الحالات في مجال طاقة واسع نسبياً. إذا تم المحافظة في طريقة التيار الضوئي الثابت على ثبات التيار الضوئي عند تغير طاقة الإشعاع الوارد E على المادة المدروسة من خلال ضبط تدفق الفوتونات الواردة عليها، لأن هذا يسمح بإيجاد التابعية الطيفية لعامل الامتصاص [3] Absorption Factor $(\alpha(E))$. تجدر الإشارة هنا إلى أن "الفجوة الحركية (Mobility Gap)" تعد مصطلحاً مميزاً لأنصاف النواقل البلورية على غرار مصطلح المنطقة المحظورة المميز لأنصاف النواقل البلورية، وسميت بهذا الاسم كون حاملات الشحنة الكهربائية الموجودة في الحالات الطاقية المتوضعة، والتي تساهم في الناقلية الكهربائية بواسطة القفز المنشط (Activated hopping) والنفق بين هذه الحالات تمتلك حركية كهربائية ذات قيمة فعالة $(\mu \leq 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$. وعليه تعرّف الفجوة الحركية بأنها مجال طاقة يفصل بين الحالات الممتدة التي تقع في عصابتي الناقلية والتكافؤ (حيث تكون حركية حاملات الشحنة الكهربائية فيها كبيرة نسبياً) لأنصاف النواقل البلورية والحالات المتوضعة التي تقع تحت حد الحركية لعصابة الناقلية (E_c) وفوق حد الحركية لعصابة التكافؤ (E_v) (حيث تكون حركية حاملات الشحنة الكهربائية صغيرة جداً).

تكمن أهمية هذا البحث في المساهمة النظرية الفعالة لدراسة الخواص المختلفة (الكهربائية، والضوئية، وغيرها) لأنصاف النواقل غير المتبلورة عموماً والسيلكون الأمورف المهدرج a-Si:H خصوصاً. ويتمتع هذا البحث بأهمية تطبيقية كبيرة حيث يمكن استخدام السيلكون الأمورف المهدرج المدروس بمثابة خلايا شمسية وترانزستورات حقلية. وهو يهدف إلى دراسة ومعالجة خوارزمية تنظيم دقيقة لتقريب المعطيات الأولية بحيث تمكننا من حساب طيف توزيع كثافة الحالات في الفجوة الحركية للمواد نصف الناقلية غير المتبلورة من النوع a-Si:H بطريقة التيار الضوئي الثابت، ومن جهة أخرى دراسة خواص a-Si:H استناداً إلى الخوارزمية الجديدة وحساب أطياف كثافة الحالات $N(E)$ للسيلكون الأمورف المهدرج.

الدراسة النظرية والتحليلية:

يرتبط عامل الامتصاص $\alpha(E)$ في تقريب الإلكترون الواحد مع كل من كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الحركية لنصف الناقل البلوري المدروس $N(E)$ وكثافة الحالات الممتدة في عصابة الناقلية $(g(E))$ بالمعادلة التكاملية التالية:

$$\int N(\varepsilon) f(\varepsilon) g(\varepsilon + E) [1 - f(\varepsilon + E)] d\varepsilon = \text{const. } E \alpha(E), \quad (1)$$

حيث $f(\varepsilon)$ تابع فيرمي - ديراك.

بما أن احتمال امتصاص فوتونين بآن واحد صغيراً [3] فإنه يمكننا إهماله، ومن ثم إعادة كتابة العلاقة (1) على شكل معادلة تكاملية من الدرجة الأولى تدعى بمعادلة وُلتر [4] Walter Equation:

$$\int_B^E N(\varepsilon) g(E - \varepsilon) d\varepsilon = C E \alpha(E), \quad (2)$$

حيث B الحد السفلي للتكامل ويمثل موضع شبه سوية فيرمي (E_{fc}) بالنسبة لحد الحركية لعصابة الناقلية E_c ، و $C \equiv const.$

تتحقق العلاقة $g(E - \varepsilon) = b (E - \varepsilon)^{1/2}$ عندما يكون لعصابات الطاقة الممتدة (غير المتوضعة) شكل قطع مكافئ حيث b مقدار ثابت. وعليه تأخذ المعادلة التكاملية (2) الشكل التالي:

$$\int_B^E N(\varepsilon) (E - \varepsilon)^{1/2} d\varepsilon = C E \alpha(E), \quad (3)$$

المعادلة (3) هي معادلة آبل التكاملية Abel Equation، التي حلها التحليلي معروف جيداً ويأخذ الشكل التالي [5,4]:

$$N(E) = \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} C \left\{ \frac{[B \alpha(B)]'}{\sqrt{E - B}} + \int_B^E \frac{[\varepsilon \alpha(\varepsilon)]''}{\sqrt{E - \varepsilon}} d\varepsilon \right\}. \quad (4)$$

يعتبر تعيين كثافة الحالات في الفجوة الحركية $N(E)$ من المعادلتين (3) و (4) مسألة رياضية غير دقيقة Non-correct Problem بالمعنى التقليدي (حسب أدامارو [6] Adamaro)؛ فأى أخطاء، مهما صغرت (بحدود الخطأ التجريبي)، تُرتكب في تعيين معامل الامتصاص $\alpha(E)$ تؤدي إلى ترجحات كبيرة (بمقدار عدة مراتب) في حساب كثافة الحالات في الفجوة الحركية $N(E)$. تُعد مثل هذه المسائل صفة مميزة لمعظم الطرق المعاصرة المستخدمة في تعيين $N(E)$ [7]، مما يجعلنا نعتمد فرضيات مسبقة حول شكل طيف كثافة الحالات في الفجوة الحركية $N(E)$. هذه الفرضيات ليست مثبتة في معظم الحالات وتسبب أخطاء حسابية حقيقية [7]. ولم تكن صدفةً هنا محاولة بعض الباحثين [8] "استعادة" طريقة مفعول الحقل اعتماداً على آلية حل معادلة فريدغلم التكاملية Fredgolm Integral Equation من الدرجة الأولى.

استخدمت في هذا البحث طريقة تنظيم تيخانوف (Regularization Method) (Tehonoff's) لتعيين طيف كثافة الحالات في الفجوة الحركية $N(E)$ من المعادلة (3) [10,9]. نعلم أنه في أنصاف النواقل الحقيقية اللابلورية أن الحالات الواقعة فوق طاقة شبه سوية فيرمي من أجل الإلكترونات E_{fn} فارغة، وبالتالي يمكننا كتابة المعادلة (3) بالشكل التالي:

$$\int_0^E N(\varepsilon) (E - \varepsilon)^{1/2} d\varepsilon = C E \alpha(E). \quad (5)$$

وهذه المعادلة ليست سوى معادلة ولتر التكاملية من الدرجة الأولى من نوع الالتفاف Convolution (التفاف) التابعين $N(\varepsilon)$ و $(\varepsilon)^{1/2}$. إن هذا الإجراء المتمثل باستبدال الحد السفلي للتكامل B بالقيمة صفر، والتخلص من الافتراضات المسبقة وغير الواضحة حول سلوك التابع المجهول $N(E)$ يسمح لنا بتبسيط آلية التنظيم من جهة، ومن جهة أخرى يُخفّض زمن حساب كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الحركية $N(E)$ إلى حد كبير مقارنة مع الزمن الذي يتطلبه تعيينها من المعادلة (3).

تكون عادةً التابعة الطيفية لعامل امتصاص أنصاف النواقل اللابلورية قريبة جداً من التابعة الأسية [1]، حيث يمكننا استناداً إلى ذلك، أن نكتب من أجل كل نقطة من الطيف E_i العلاقة التالية:

$$X(E_i) \equiv C E_i \alpha(E_i) = \sum_{j=1}^i m_j e^{a_j E_i}, \quad (6)$$

حيث $m_j = 1$ إذا تحققت المتراجحة $X(E_i) \geq X(E_{i-1})$ و $m_j = -1$ في الحالة المعاكسة، وتتعين العوامل a_j بالعلاقة التالية:

$$a_j = \frac{1}{E_i} \ln \left[C E_i \alpha(E_i) - \sum_{j=1}^{i-1} m_j e^{a_j E_i} \right]. \quad (7)$$

وانسجماً مع المعادلة (7)، تأخذ صورة الحل المنظم للمعادلة (5)، بالنسبة لتحويلات لابلاس الشكل التالي:

$$N_\nu(S) = \frac{X(S)}{K(S)[1 + \nu M(S)]}, \quad (8)$$

حيث ν بارامتر التنظيم المعين بالمساواة:

$$\int_0^\infty [E N_\nu(E) - E N(E)] dE = \delta; \quad N(E) = N_\nu(E) \Big|_{\nu=0}, \quad (9)$$

علماً أن δ الخطأ التجريبي المرتكب في قياس عامل امتصاص العينة المدروسة، و $N(S)$ تحويل لابلاس للتابع $N(E)$ ؛

$$N(S) = \mathcal{L}[N(E)],$$

و

$$\mathcal{L}[\sqrt{E}] = \frac{\sqrt{\pi}}{2S^{3/2}}$$

و $M(S) = |S|$ تابع زوجي؛

بعد إجراء عمليات التحويل هذه نحصل على العبارة التالية:

$$X(S) = \mathcal{L} \left[\sum_{j=1}^i m_j e^{a_j E_i} \right] = \sum_{j=1}^i m_j \frac{1}{(S_i - a_j)},$$

وبالتالي نجد انسجماً مع ما طرح - آخذين بالحسبان علاقات التحول الأخيرة - أن العلاقة (8) تؤول إلى الشكل:

$$N_\nu(S_i) = \frac{S_i^{3/2}}{1 + \nu |a_j|} \sum_{j=1}^i \frac{m_j}{(S_i - a_j)}. \quad (10)$$

ويتطبيق تحويلات لابلاس العكسية المعروفة التالية على المعادلة الأخيرة:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{(S-a)^n} \right] = \frac{1}{(n-1)!} E^{n-1} e^{aE}; \quad E > 0,$$

$$\mathcal{L}^{-1} [S_i^{3/2}] = a_j^{3/2},$$

نجد:

$$N_v(E_i) = \sum_{j=1}^i \frac{m_j (a_j)^{3/2}}{1 + \nu |a_j|} e^{a_j E_i} . \quad (11)$$

استعملت المعادلات من (5) إلى (10) كأساسٍ لخوارزمية حساب كثافة الحالات في الفجوة الحركية $N(E)$ بواسطة كمبيوتر شخصي IBM-PC باستخدام برنامج "Basic CPHM" مع الإشارة إلى أنه يمكن استخدام برنامج "Origin 6" لتأدية الغرض ذاته.

لقياس خصائص المادة باستخدام طريقة التيار الضوئي الثابت تم تصميم محطة أساسها مقسم ضوئي كوارتزي أحادي اللون Monochromator، وخلافاً للعينات التي درست في [2,1]، فقد تم ترسيب المساري المصنوعة من مادة النيكل على العينات بشكل مستوي. وفي هذا البحث تم اعتماد نتائج قياس العينات المستخدمة في [10] بغية التحقق من صحة الخوارزمية المدروسة هنا وإمكانية تطبيقها.

تم الحصول على عينات a-Si:H المستخدمة في هذا البحث بطريقة تدرية - عالية التواتر High Frequency Spattering - هدف من السيلكون المتبلور في حجرة مخلطة مسبقاً، وتحتوي غازي الهيدروجين والأرغون. وتوجد في هذا الإطار العديد من الأبحاث الداعمة للبحث المدروس هنا، والتي تدرس تأثير ولوج العناصر المختلفة في خصائص عينات الأفلام الرقيقة المصنوعة من a-Si:H [11]. وبلغت سماكة العينات $0.3 - 1 \mu m$. تم هنا تثبيت كل بارامترات تقانة تحضير العينات من درجة حرارة الركيزة ($T_S = 250^\circ C$) وطاقة التفريغ العالي التواتر ($W = 2.5 \text{ Watts/cm}^2$) ما عدا الضغط الجزئي للهيدروجين (P_H). آلية الحصول على الأغشية الرقيقة المدروسة وطريقة دراستها مبينة بشكل مفصل في [12,10].

النتائج والمناقشة:

يعرض الشكلان (1) و (2) أطياف كثافة الحالات $N(E)$ في الفجوة الحركية للأغشية الرقيقة a-Si:H المحسوبة بالطريقة الموصوفة أعلاه عند تغير قيم الضغط الجزئي للهيدروجين P_H من 0.2 mTorr حتى 4.5 mTorr . تميزت العينات التي تم الحصول عليها من أجل القيم المنخفضة للضغط الجزئي للهيدروجين؛ $P_H < 1.0 \text{ mTorr}$ بالتابعية الأسية لطيف كثافة الحالات $N(E)$ في مجال حد الامتصاص، وبوجود ذروة وحيدة في عمق الفجوة الحركية، أي أنه تم الحصول على تابعة مشابهة لتلك التابعة المبينة في [2,1] عند دراسة الأغشية الرقيقة المصنوعة من السيلكون الأمورف المهدرج a-Si:H التي تم الحصول عليها من تفكك السيلان الأحادي SiH₄ (Monosilane Dissociation) باستخدام طريقة التفريغ التوهجي (Glow Discharge Method). يتمثل مبدأ عمل طريقة التفريغ التوهجي للحصول على الأغشية الرقيقة من السيلكون الأمورف المهدرج في قذف جزيئات السيلان في حجرة مخلطة جيداً بحزمة إلكترونية بطاقة معينة فتننتج مركبات متأينة أساسها السيلكون؛ مثل SiH₂، و SiH، وغيرها. وبما أن المركبات الأخيرة تكون متأينة فإنها تتسارع باتجاه الركيزة لتكوّن الغشاء الرقيق المطلوب. بشكل عام تتميز طريقة التفريغ التوهجي المستخدمة للحصول على الأغشية الرقيقة a-Si:H عن غيرها من الطرائق كون كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الحركية قليلة نسبياً مقارنةً مع طريقة التدرية في جو بلازمي من الأرغون والهيدروجين. وعندما $P_H = 1.0 \text{ mTorr}$ يلاحظ وجود ذروتين في منحنيات طيف كثافة الحالات في

الفجوة الحركية $N(E)$ ، وتبقى هذه الصفة مصانة حتى من أجل العينات المحضرة من أجل القيم الكبيرة $P_H > 1.0 \text{ mTorr}$ ، شكل (1-b). وقد دلت دراسة سطوح الأغشية الرقيقة a-Si:H بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح JEOL-25S، على أن العينات المحضرة من أجل $P_H \geq 1.0 \text{ mTorr}$ ، تمتلك تركيباً عامودياً Column Structure [10] أي تركيباً ثنائي الطور مكوناً من مجالات أساسية مميزة لمادة العينة المدروسة (المركبات SiH و SiH₂) تسمى "أعمدة"، تفصل بينها حواجز كمون تتشكل من الروابط (Si-Si) المقطوعة Dangling bonds والضعيفة تسمى "تسيجاً رابطاً". يساوي ارتفاع هذه الحواجز إلى المسافة الفاصلة بين حد الحركية لعصابة التكافؤ والحالة الطاقية الموافقة لذروة كثافة الحالات المتوضعة في عمق الفجوة الحركية. في حين أن العينات المحضرة من أجل القيم الصغيرة للضغط الجزئي للهيدروجين P_H تكون متجانسة. وهذا ما يعتبر أساساً لكي نفترض أن انشطار ذروة كثافة الحالات في عمق الفجوة الحركية مرتبط مباشرة باختلاف بارامترات "الأعمدة" عن بارامترات "الفواصل الرابطة" فيما بينها في الأغشية الرقيقة ذات التركيب العامودي (مفهوم التركيب العامودي للأغشية الرقيقة اللابلورية موضح في [12,10] بالتفصيل). إن التحليل الدقيق للعلاقة المتبادلة بين مورفولوجية مثل هذه الأغشية الرقيقة وخصائصها الجهرية يؤكد على أن الذروة ذات النهاية العظمى الموافقة للطاقة $E_c - E = 1.1 \text{ eV}$ تُميز خصائص "الفواصل الرابطة" فيما بين "الأعمدة"، في حين أن الذروة ذات النهاية العظمى الموافقة للطاقة $E_c - E = 1.4 - 1.5 \text{ eV}$ فتميز خصائص "الأعمدة" ذاتها. لا شك في أن للهيدروجين دور مهم وأساسي في تحديد مواصفات العينات الحاصلة وخصائصها، وبالتالي في تحديد مجال استخدامها؛ كأن تستخدم كخلية شمسية [14,13,12] أو ترانزستورات حقلية [16,15,12].

يعرض الشكلان (2) و (3) أطراف كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الحركية للأغشية الرقيقة من النوع a-Si:H عند اختلاف مستوى تطعيمها بالفوسفور والبور. طريقة الحصول على العينات المطعمة ونتائج دراسة خصائصها الكهربائية مبينة في [17]. فالعينات ذات المستوى المنخفض للتطعيم (انزياح طاقة فيرمي بالنسبة لموضعها في العينة غير المطعمة بمقدار يقل عن 0.2 eV) تتميز بتابع توزيع لكثافة الحالات $N(E)$ لا يختلف كثيراً عن تابع توزيعه في a-Si:H غير المطعم، الذي تم الحصول عليه في شروط التقانة ذاتها. أما العينات المطعمة بشدة (انزياح طاقة فيرمي بالنسبة لموضعها في العينة غير المطعمة يفوق 0.4 eV) فتتصف بكثافة حالات عالية جداً في عمق الفجوة الحركية. وهذا مرتبط، من وجهة نظرنا، بإعادة بناء التركيب الذري للأغشية الرقيقة عند تطعيمها بشدة.

الخلاصة:

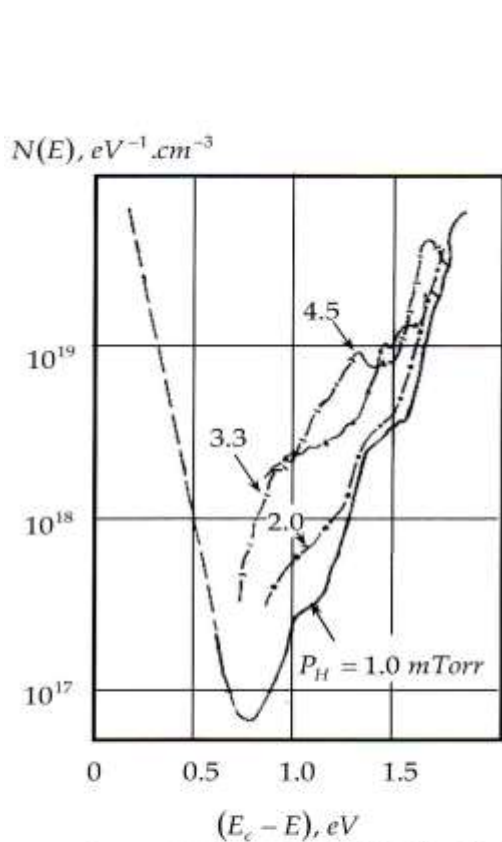
من خلال الدراسة السابقة تم الحصول على النتائج التالية:

- 1- تعيين طيف توزيع كثافة الحالات الطاقية المتوضعة في الفجوة الحركية في السليكون الأمورف المهدرج بتطبيق خوارزمية تنظيم تيخانوف وذلك باستخدام طريقة التيار الضوئي الثابت في مجال طاقي تأرجح بين 0.5 eV و 1.5 eV .
- 2- إجراء مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث من أجل عينات حُضرت عند تغيير بارامترات التقانة؛ كالضغط الجزئي للهيدروجين وتلك النتائج التي تم الحصول عليها من خلال دراسات سابقة من أجل عينات

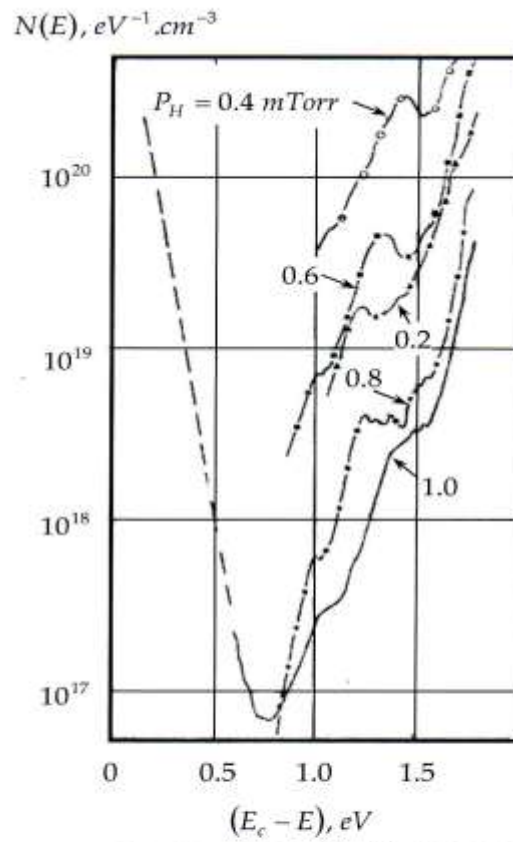
مطعمة بذرات الفوسفور والبور مما يؤكد صحة تطبيق طريقة تنظيم تيجانوف لحساب كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الحركية $N(E)$.

ونخلص في نهاية هذا البحث إلى النتائج التالية:

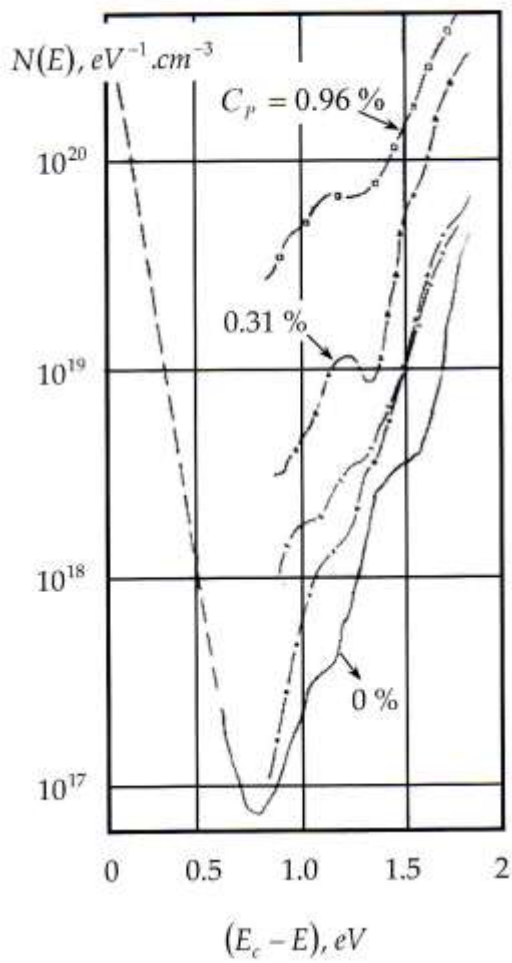
يجب أولاً متابعة دراسة هذا النوع من الأبحاث لما لها من فائدة نظرية كبيرة تتمثل في تحسين حساب أطيف توزع كثافة الحالات المتوضعة في الفجوة الحركية لـ $a\text{-Si:H}$ ، وتطبيقية تتجلى في إمكانية استخدام مواد السيلكون الأمورف المهدرج في مجال الطاقة الشمسية والإلكترونيات، ومن ثم تعميم هذه الدراسة على أنصاف النواقل الأمورفية الأخرى؛ كالجرمانيوم الأمورف $a\text{-Ge:H}$ ، وكربيد السيلكون الأمورف $a\text{-SiC:H}$ التي لها تطبيقات هامة في مجال التصوير الضوئي والإلكترونيات.



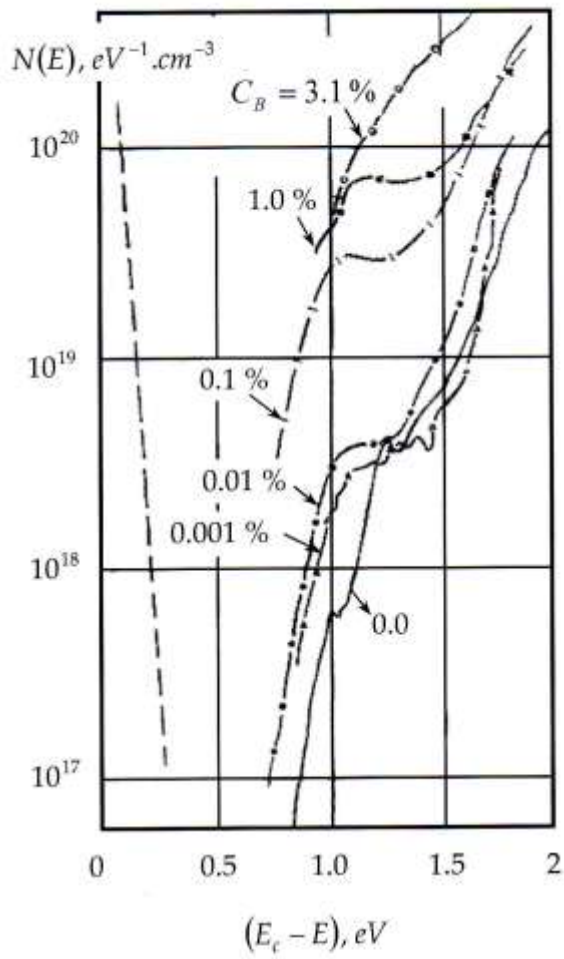
الشكل (2): أطيف كثافة الحالات في الفجوة الحركية لـ $a\text{-Si:H}$ من أجل $T_s = 250^\circ\text{C}$ و $W = 2.5 \text{ W.cm}^{-2}$ ، وقيم متغيرة للضغط الجزئي للهيدروجين من 1 mTorr حتى 4.5 mTorr .



الشكل (1): أطيف كثافة الحالات في الفجوة الحركية لـ $a\text{-Si:H}$ من أجل $T_s = 250^\circ\text{C}$ و $W = 2.5 \text{ W.cm}^{-2}$ ، وقيم متغيرة للضغط الجزئي للهيدروجين من 0.2 mTorr حتى 1 mTorr .



الشكل (3): أطراف كثافة الحالات في الفجوة الحركية لـ a-Si:H من أجل $W = 2.5 W.cm^{-2}$ و $T_S = 250^\circ C$ وقيم متغيرة لمستوى تطعيمها بالفوسفور C_P



الشكل (2): أطراف كثافة الحالات في الفجوة الحركية لـ a-Si:H من أجل $W = 2.5 W.cm^{-2}$ و $T_S = 250^\circ C$ وقيم متغيرة لمستوى تطعيمها بالبور C_B

المراجع:

- 1- 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, P. 617-623.
- 2- DEN-BOER W., *Determination of midgap density of states in a-Si:H using space-charge-limited-current measurements*, J. de Physique, Coll. 5, V. 42, Supple 10, 1981, P. 451-623.
- 3- VANECEK, M.;KOSKA, J.; STUHLIK, J., *Direct measurement on the gap states and tail absorption by constant photocurrent method*, Solid state communication, Vol. 39, 1981, P. 1199-1202.
- 4- كراسنوف أم. أل.، كيسيلوف أ.أي. ماكارينكو إغ. إي، المعادلات التكاملية. أم: ناوكا، 1976 (باللغة الروسية).
- 5- KORN, G. and KORN, T., *Mathematical Handbook*, M.Graw - Hill Book Company, 1968.
- 6- فابنيك ف. ه.، خوارزميات وبرامج استعادة العلاقات الرياضية، ناوكا، 1984.
- 7- SREET, R.A. and BIGELSEN, D.K., *The spectroscopy of localized states*, *The Phys. of hydrogenated amorphous silicon*, Pt. II, Ed. JOANNOPOULOS, J.D. and LUCOVSKY, G., Berlin, Springer-Verlag, 1984.
- 8- AUGELLY, V.; BERARDI, V.; and MURRI, R., *Analytical determination of the gap states distribution in amorphous semiconductors*, Phys. Review B, Vol. 35-1, N^o.2, 1987, P. 614-618.
- 9- تيجانوف أ. أن.، أرسينين ف. يا.، طرق حل المسائل غير الصحيحة، أم: - 8 ناوكا، 1986 (باللغة الروسية).
- 10- سليمان حسن عبد الكريم، دراسة بعض خواص السيلكون المهدرج غير المتبلور ($a\text{-Si:H}$) بحساب طيف أزمنة الاسترخاء، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الأساسية، المجلد (23)، العدد (10)، 2001، ص. 47-62.
- 11- ZANATTA, A.R.; RIBIERO, C.T.M.; and ALVAREZ, F., *X-ray photoelectron spectroscopic study of rare-earth-doped amorphous silicon - nitrogen films*, J. of App. Phys., Vol. 93, N^o.4, 2003, P.1948-1953.

12- سليمان حسن عبد الكريم، أطروحة دكتوراه بعنوان شروط التكثيف وآليات الناقلية الكهربائية في أنصاف النواقل الأمورفية"، 1992، 186 صفحة.

13- SPILA, T.; DESJADINS, P.; D'ARCY-GALL, J.; TWESTERN, R.D.; and GREENE, J.E., *Effect of steady - state hydrogen converge on the evolution of cross hatch morphology during Si_{1-x}Gex/Si(100) growth from hydride precursors*, J. of App. Phys., Vol. 93, N^o.4, , 2003, P. 1918-1925.

14- 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, N^o.2, 2005, P. 71-84.

15- WEHRSPHON, R.B.; DEANE, S.C.; FRENCH, I.D.; GALE, I.; HEWETT, J.; and POWELL, M.J., *Relative importance of the Si-Si bond and Si-H bond for the stability of amorphous silicon thin film transistors*, J. of App. Phys., Vol. 87, N^o.1, 2000, P. 146-154.

16- MINJOO, L.LEE and EUGENE, A. FITZGERALD, *Strained Si/strained Ge dual-channel heterostructures on relaxed Si_{0.5}Ge_{0.5} for symmetric mobility p-type and n-type metal-oxide-semiconductor field-effect transistors*, Applied Physics Letters, Vol. 83, Issue 20, 2003, P. 4202-4204.

17- ليغاتشوف ف.أ.، و غوردييف ف. أ.، وفيليكوف ف.أن، وبوبوف أ.إي.، الناقلية الكهربائية للأفلام الرقيقة a-Si:H المطعمة، مجموعة الأعمال العلمية، رقم 103، معهد الطاقة في موسكو، 1986، ص. 43-47، (باللغة الروسية).