الجمهورية العربية السورية
هيئة الطاقة الذريـة

هـ ط ذ س- ف / ت ن ب ع 441
تموز 2009

تقرير نـهائي عن بحث علمي
قسم الفيزياء

دراسة العيوب في عينات من السليسيوم اللابلوري المهدرج وعلاقتها بالركازة وشروط التوضيع

الدكتور رامي درويش

هـ ط ذ س- ف / ت ن ب ع 441

شارك في هذا العمل السيد ***بهاء الدين العك*** ودوره فيه محور في إجراء التجارب وتحضير وصلت العينات.

كما لابد من ذكر البروفيسور ***بيريه روكا ي كاباروكاس Pere Roca i Cabarrocas*** **من** مدرسة البوليتكنيك في باريس (فرنسا) حيث أنه قد زودنا بكل العينات المدروسة في هذا العمل.

1 المستخلص

الهدف من هذا البحث هو دراسة خصائص العيوب المتشكلة وإمكانية تحديد نوعها وطرائق التخلص منها بدلالة معاملات التوضيع كدرجة حرارة الركازة والضغط ومعدل الترسيب،.........). جرى في هذا البحث دراسة نوعين من العينات الول على شكل ديود شوتكي والثاني على شكل خليا شمسية (وصلت من النوع *p-i-n*) موضعة على أنواع مختلفة من الركائز ومعاملات توضيع مختلفة تجعل هذه العينات متدرجة (من حيث البنية) من السيليسيوم اللبلوري مرورا بمتعدد الشكال البلورية وصولاً حتى الميكروبلوري. بينت هذه النتائج أن العينات من متعدد الشكال البلورية الموضعة من أجل معدلت توضيع عالية جداً تمتلك خصائص كهرفولطية أفضل بكثير من تلك الموضعة عند معدلت منخفضة كما وجد أن تركيز العيوب في هذه العينات أقل بمرتين منه في العينات العادية من السيليسيوم اللبلوري ومتعدد الشكال البلورية وحتى الميكروبلوري. كما بينت هذه الدراسة عدم وجود أي دور لنوع الركازة ول لطبقة السيليسيوم اللبلوري الشديدة الشابة في عملية تشكل العيوب أو التأثير على خصائصها. أخيراً تمت مقارنة نتائج طرائق القياس المختلفة وبيان الفرق بينها لظهار نقاط القوة ونقاط الضعف في كل منها.

Abstract

The goal of this work is to study the properties of the defects aiming to explore the types of defects and the effect of various deposition parameters such as substrate temperature, the kind of the substrate, gas pressure and deposition rate.

Two kinds of samples have been used; The first one was a series of Schotteky diodes, and the second one a series of solar cells (*p*-*i*-*n* junction) deposited on crystalline silicon or on corning glass substrates with different deposition parameters. The deposition parameters were chosen to obtain materials whose their structures varying from amorphous to microcrystalline silicon including polymorphous silicon. Our results show that the polymorphous silicon samples deposited at high deposition rates present the best photovoltaic properties in comparison with those deposited at low rates. Also we found that the defects concentration in high deposition rate samples is less at least by two orders than that obtained in low deposition rate polymorphous, microcrystalline and amorphous samples. This study show also that there is no effect of the substrate, or the thin films of highly doped amorphous silicon deposited on the substrate, on the creation and properties of these defects. Finally, different experimental methods have been used; a comparison between their results has been presented.

2 - المقدمة

تتأثر الخواص الالكترونية والضوئية لأنصاف النواقل تأثراً كبيراً بالعيوب البلورية التي تنتج بشكل أساسي أثناء عملية التصنع. هذه العيوب غالباً ما تكون ذات سويات طاقية عميقة ضمن العصابة المحظورة وتقوم بدور مصائد لحوامل الشحنة مما يؤثر بشكل كبير على عملية النقل الكهربائي في هذه المواد. لقد اهتم الباحثون منذ حوالي نصف قرن بدراسة هذه العيوب (آلية تشكلها, طبيعتها البلورية, تأثيرها على خصائص المادة, ...). اتبعت عدة طرائق في العقود الأخيرة لدراسة العيوب وخاصة المطيافيات (مثل مطيافية الأشعة تحت الحمراء والتألق الضوئي والمطيافية الانتقالية,...) إضافة إلى الطرائق الكهربائية. يعتمد قسم كبير من الطرائق الكهربائية هذه على قياس السعة والناقلية الكهربائية بدلالة كل من درجة الحرارة وتردد القياس والانحياز المطبق وكذلك على مطيافيات السعة كالمطيافية الانتقالية للمصائد العميقة ومشتقاتها وذلك بغية فهم آلية تشكل العيوب وتعيين خصائصها لأنها تلعب دوراً أساسياً في آليات النقل الكهربائي ومفعول التحويل الفوتوفولطي. منذئذ أيضاً اتجهت أنظار عدد كبير من الباحثين حول العالم إلى أنصاف النواقل اللابلورية وخاصة السيليسيوم اللابلوري المهدرج (Hydrogenated Amorphous Silicon "a-Si:H") لتكون بديلاً رخيصاً للمواد البلورية في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بحيث تتمكن من استخدامها في الحياة اليومية. زاد الاهتمام بهذه الفكرة ليس فقط لأن هذه المادة رخيصة الثمن ولكن أيضاً كونها تعطي، من الناحية النظرية، مردوداً أكبر نظراً لأن الفجوة الطاقية أكبر بكثير مما هي عليه في السيليسيوم البلوري. اصطدمت هذه الفكرة بكون الخلايا المصنعة من هذه المادة تفقد كثيراً من مردودها بعد تعرضها للضوء لفترة كبيرة وهذا ما عرف باسم مفعول شبه الاستقرارية أو Steabler et Wronski[1]. ومنذ اكتشاف هذا المفعول، انصبت جهود كثير من الباحثين، في البحث عن إطار تحسين خصائص هذه المادة، بدءاً من طرائق تصنيع متعددة مثل التبخير الحراري تحت الخلاء (Thermal evaporation under vacuum) التوضيع بالطور الغازي (Chemical Vapor Deposition "CVD") وصولاً إلى بالتوضيع الغازي المعزز بالبلازما (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition "PECVD") [2] وكذلك دراسة خصائص هذه المادة بدلالة معاملات التصنيع وخاصة عندما تكون على شكل أفلام رقيقة. لقد وجد أن خصائص السيليسيوم اللابلوري المهدرج تختلف اختلافاً شديداً بين طريقة وأخرى وأبدت الأفلام الموضعة بطريقة الPECVD أفضل الخصائص[4،5،3]. بناءاً على ماتقدم فإن معظم البحوث منذ الثلاثين سنة الماضية حتى الآن

انصبت حول تصنيع أفلام رقيقة على ركائز مختلفة وبشروط تصنيع مختلفة (مثل ضغط الغاز، درجة حرارة الركيزة، تدفق الغاز، نسبة الهيدروجين، الشائبة،.....) باستخدام طريقة الـPECVD. في خضم هذا البحث المحموم لإيجاد المعاملات التي تعطي أفضل مردودية لهذه الأفلام تم إيجاد نوع جديد من هذه المادة يتميز بخصائص إلكترونية أفضل من خصائص السيليسيوم اللابلوري المهدرج سمي سيليسيوم متعدد الأشكال البلورية (Polymorphous silicon "pm-Si:H")[6]. بينت الدراسات أن البنية البلورية لهذه المادة هي طور مزيج مكون من نسيج من السيليسيوم اللابلوري وبلورات نانوية مغروسة ضمن هذا النسيج[7]. تم الحصول على مادة pm-Si:H بتصنيع الأفلام بطريقة PECVD تحت شروط بالقرب من شروط تشكل المساحيق. كما تم مؤخراً الحصول على أفلام من pm-Si:H موضعة من أجل معدلات تصنيع عالية جداً وتتمتع بخصائص إلكترونية ممتازة[8].

الهدف من هذا البحث هو دراسة العيوب وعلاقة تشكل هذه العيوب بمعاملات التصنيع باستخدام مختلف الطرائق السعوية وحساب تراكيز وخصائص هذه العيوب.

3 تمهيد نظري

1-3 السيليسيوم اللابلوري المهدرج وتعدد أشكاله

قبل أن نشرح الطرائق التجريبية المستخدمة، لا بد من إعطاء فكرة واضحة عن السيليسيوم اللابلوري وتعدد أشكاله والفرق بينه وبين البلوري. يختلف السيليسيوم البلوري عن السيليسيوم اللابلوري وتعدد أشكاله اختلافاً جذرياً من حيث البنية البلورية المنتظمة وكمية العيوب وتوضعها. في حين يبدي السيليسيوم البلوري بنية بلورية منتظمة حيث تتوضع ذراته في شبكة مكعبة مركزية الوجوه (بنية الماس) التي يمكن النظر إليها أيضاً كبنية مكونة من رباعيات وجوه تتكرر ضمن ترتيب معين فإن السيليسيوم اللابلوري، شأنه كشأن معظم أنصاف النواقل، يتكون من رباعيات وجوه في مجال المسافات القصيرة فقط أي الجوار الأول للذرة ويبدأ فقدان الترتيب بدءاً من الجوار الثاني ويزداد بازدياد المسافة حتى يصبح اللاتناظر كلياً عند الجوار الرابع[9]. ينعكس الفقدان التدريجي للتناظر على البنية البلورية للمادة بحيث يؤدي فقدان التناظر الموضعي إلى وجود حلقات خماسية، وحدات رباعية، تحتوى كهوف وفجوات من جهة وكذلك تغير الزوايا بين وحدات التناظر يؤدي إلى تزايد الفتل الزاوي وبالتالي وجود روابط ضعيفة وروابط مقطوعة. هذه العيوب اللاترتيبية تؤدي إلى تشكيل ذيل في عصابتي الناقلية والتكافؤ من جهة ومن جهة أخري تؤدى إلى وجود سويات عيوب في منتصف الفجوة الطاقية. يؤدي هذا إلى انحدار شديد في النقل الالكتروني والخصائص الضوئية. من هنا جاءت فكرة إضافة الهيدروجين حيث أن هذا الأخير من شأنه أن يشبع الروابط المقطوعة، وفعلاً كانت نتيجة ذلك ظهور تحسن كبير في خصائص هذه المواد الكهربائية والضوئية حتى أصبح الآن الكلام عن السيليسيوم اللابلوري يعني المهدرج حيث من الآن فصاعداً سنتكلم عن السيليسيوم اللابلوري المهدرج فقط a-Si:H. لكن سرعان ما ظهرت إحدى أكبر مشاكل هذه المادة وهي أن خصائصها الكهربائية والفوتوفولطية تتأثر بشكل كبير عند تعرض هذه المواد تعرضاً مديداً إلى الضوء. فقد وجد [1] أن الناقلية الكهربائية لعينات من a-Si:H (مقاسة في درجة حرارة الغرفة) تناقصت بمقدار ثلاث إلى أربع مراتب بعد تعرضها لعدة ساعات لضوء شدته حوالي 200 mW/cm^2 وأن الناقلية الضوئية (Photoconductivity) انحدرت بمقدار مرتبة واحدة وأدى ذلك إلى تناقص مردود الخلية بمقدار يقع مابين 20 و 50 %. وقد تبين أن هذا المفعول الذي سمي بالمفعول شبه المستقر أو مفعول ستيبلر وفرونسكي (Steabler et Wronski effect) [1] وسمي كذلك لأنه يعود إلى حالة قبل التشعيع بإحماء العينة إلى درجة حرارة 150 إلى 200C° لأكثر من ساعتين. أدى ذلك توجيه اهتمام الباحثين نحو البحث عن مواد أكثر استقرارية إلى الحصول

على مواد جديدة مطورة من a-Si:H سميت متعدد الأشكال البلورية وكذلك الميكروبلوري. بالنسبة لمتعدد الأشكال البلورية بينت النتائج أنه بنيته البلورية عبارة عن نسيج من السيليسيوم اللابلوري يتخلله بلورات ميكروية[7]. لقد أبدى هذا النوع من السيليسيوم خواص كهربائية واستقرارية أكبر من تلك التي تخص السيليسيوم اللابلوري[10] وخواص ضوئية قريبة من السيليسيوم الميكروبلوري. هذا ما يفسر الاهتمام الكبير بهذه المادة في السنين العشرة الماضية حيث أنه بالمكان صنع أفلام من هذه المادة بمعدلات توضيع مرتفعة جداً والحصول على نوعية أفضل حتى من pm-Si:H المتوضع بمعدل توضيع منخفض وهذا له أهمية بالغة في الصناعة حيث يؤدي إلى سعة إنتاج أكبر وثمن أقل. من هنا تبرز أهمية الأفلام المدروسة في هذا العمل لأنه يقارن بين عينات موضعة من أجل معدلت توضيع مرتفعة مع a-Si:H القياسي (بطيئة) وpm-Si:H من أجل معدلت توضيع منخفضة وباستخدام طرائق قياس تسمح لنا من تعيين تركيز العيوب وطاقة تنشيطها وكذلك البنية البلورية. أخيراً لابد من الإشارة إلى السيليسيوم الميكروبلوري (µc-Si:H)، حيث تتشكل هذه المادة من بلورات ميكروية ذات بنية منتظمة متوزعة عشوائياً، ذات خصائص نقل كهربائي أفضل حتى من السيليسيوم اللابلوري.

2-3 الطرائق التجريبية المستخدمة:

نظراً لكون مواد كهذه مليئة بالعيوب المختلفة فإنه لابد من استخدام عدد كبير من الطرائق والمقارنة بين نتائجها لستخلص الخصائص الصحيحة لهذه الأفلام. يهتم هذا البحث بالطرائق السعوية المختلفة بغية ايجاد تركيز وطاقة العيوب العميقة والسطحية واستخدام مجهر القوى الذرية ليجاد البنية البلورية. الطرائق السعوية المستخدمة هي 1- قياس السعة والناقلية بدللة تردد القياس ودرجة الحرارة 2- قياس السعة والناقلية بدللة الانحياز وتردد القياس 3- المطيافية الانتقالية للمصائد العميقة 4- قياس منحني تيار-جهد.

1-2-3 قياس السعة والناقلية بدللة تردد القياس ودرجة الحرارة

استخدمت هذه التقنية منذ حوالي نصف قرن على ديودات شوتكي من أنصاف النواقل النقية حيث تم إدخالها من قبل Losee [11،12]. تعتمد هذه المطيافية على قياس الاستجابة المتناوبة (تطبيق جهد متناوب) لمصائد منطقة النضوب في ديودات شوتكي أو وصلات *p-n*.

إذا افترضنا أن الكمون المستمر هو ψ والكمون المتناوب هو φ في أية نقطة من الوصلة فإن معادلة بواسون لكل الكمونين هي:

.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}=\frac{\rho}{\varepsilon},\cdots\frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{\delta\rho}{\varepsilon} \qquad (1)$$

حيث ρ تركيز الشحنات الحرة و ε ثابت العزل الكهربائي. باستخدام المطابقة

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}=\frac{1}{2}\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^{-1}\frac{d}{dx}\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2, \qquad (2)$$

وبمكاملة المعادلة (1) نجد:

$$\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2=\frac{2}{\varepsilon}\int_{\Delta E_F}^{\psi}\rho\left(\psi'\right)d\psi'=H(\psi), \qquad (3)$$

هذا التكامل يمتد من $(x = \infty)$ $\psi = \Delta E_F$ حيث $d\psi/dx = 0$ إلى النقطة داخل منطقة النضوب حيث الكمون يساوي ψ حيث ΔE_F سوية فيرمي.

يمكن حساب السعة الموافقة للتيار المستمر dc (C_0) مباشرة من تركيز الشحنات في واحدة السطح عند الحد الفاصل $\rho(V_S)$ حيث:

$$C_0=\frac{dQ}{dv}=\rho(V_S)=H^{-1/2}(V_S), \qquad (4)$$

حيث $V_S = \phi_B - \Delta E_F - V_B$ و ϕ_B يمثل ارتفاع حاجز الكمون معدن-نصف ناقل و V_B الانزياح العكسي المطبق.

بالنسبة إلى حساب الجزء المتناوب من السعة نعود إلى المعادلة (1) وإجراء تغيير المتحول $\frac{d\varphi}{dx}=\frac{d\varphi}{d\psi}\frac{d\psi}{dx}$ واستخدام المطابقة

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{d\varphi}{d\psi}\frac{d^2\psi}{dx^2}+\frac{d^2\varphi}{d\psi^2}\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2$$

نجد

$$(5)\quad \frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{\delta\rho}{\varepsilon}=\frac{\rho(\psi)}{\varepsilon}\ \frac{d\varphi}{d\psi}\ +H(\psi)\frac{d^2\varphi}{d\psi^2}$$

في إطار التقريب الذي يأخذ بعين الاعتبار فقط الحالة التي تكون فيها الشارة الجيبية صغيرة يكون $\frac{\delta\rho}{\varepsilon}=\varphi\,F(\psi,\omega)$ حيث F هو تابع محسوب في الملحق.

بما أننا نريد حساب السماحية لذى نحتاج فقط إلى نسبة التيار المتناوب إلى الكمون المتناوب المطبق حيث أن تركيز التيار المتناوب j يساوي $j = i\omega\sigma_{ac}$ و $\sigma_{ac}= -\varepsilon\,(d\varphi/dx)_{x=0}$ وبالتالي السماحية في واحدة السطح تساوي:

$$Y=-i\omega\varepsilon\ \frac{1}{\varphi}\frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=0}=-i\omega\varepsilon\frac{d\psi}{dx}\ \frac{1}{\varphi}\frac{d\varphi}{d\psi}\Big|_{x=0}$$

إذا عرفنا $W(\psi)=\left(\frac{1}{\varphi}\frac{d\varphi}{d\psi}\right)^{-1}$ نعطى السماحية أخيراً بالعلاقة:

$$(6)\quad Y=-\,i\omega\varepsilon\left|\frac{[H(\psi)]^{1/2}}{W(\psi)}\right|_{\varphi=V_S}$$

حيث يمكن حساب W من حل المعادلة التالية:

$$(7)\quad \frac{dW}{d\psi}=1+\frac{\rho}{\varepsilon H}W-\frac{F}{\varepsilon H}W^2$$

حيث أن هذه المعادلة تحسب عددياً بإجراء التكامل من $\psi = \Delta E_F$ إلى $\psi = \phi_B - V_B$.

تعيين شكل التوابع F و H و $\delta\rho$ يعتمد على الحالة المدروسة. في حالة السويات المتقطعة تمكن Losee [12] من حساب هذه التوابع من خلال حساب تغير تركيز الشحنات الحرة باعتماد طريقة روبيرت وكرول [13] (أنظر الملحق). بعد ذلك قام Cohen et Lang [14] بتعميم ذلك إلى الحالة اللابلورية بإدخال تابع تغير تركيز السويات $g(E)$ حيث وجد أن تابع كثافة الشحنات

$$\rho(x)=q\int\left[f(E',E_F^0,T)-f(E',E_F^0-\psi(x),T)\right]g(E',x)dE'$$

إذا كانت تركيز السويات (كما هو الحال غالباً) غير تابعة ل x فإن التركيز يمكن أن نعطى بالعلاقة: $\rho(\psi)=q\int_{E_F^0-\psi}^{E_F^0}g(E',x)dE'$ و التابع F يعطى بالعلاقة:

حيث $F(\psi,\omega) = q\,g(E_F - \psi)(1 + i\omega\tau)^{-1}$ و g تمثل تركيز سويات الطاقة حول سوية فيرمي وبالتالي من العلاقة (6) و (7) يمكن حساب السماحية. من الناحية العملية، يصعب حساب السماحية في الحالة العامة ولكن يمكن إنجازه بتقريب جيد عند درجات حرارة منخفضة (أقل من 100 درجة مئوية) يمكن في هذه الحالة اعتبار الحد الذي يبلغ فيه الحالة المستقرة عند نقطة x_1 حيث معدل الصدار الحراري يساوي تردد القياس المطبق أي:

$\omega = \nu_n \exp\{-[\psi(x_1) + \Delta E_F]/kT\}$ وبالتالي فإن الجزء الحقيقي والجزء التخيلي للسماحية يعطى:

$$C = \varepsilon \frac{\rho_1}{\varepsilon H_1 + x_1\rho_1}. \qquad \text{(a8)}$$

$$\frac{G}{\omega} = kT\frac{\pi}{2}C^2\,\frac{H_1^{1/2}}{\rho_1}\,qg(E_F^0 - \psi_1) \qquad \text{(b8)}$$

تعطي العلاقة (8) كلاً من السعة والناقلية بدلالة كل من درجة الحرارة وتردد القياس.

تعطي العلاقة (8)، بدلالة درجة الحرارة، من أجل كل عيب قفزة في السعة مترافقة مع قمة في الناقلية حيث أن درجة حرارة القمة (T_0) والقفزة تتعلق بتردد القياس (ω_0) الذي يسمى بتردد القفزة (turn-on) ومن خلال القياس التجريبي لدرجة حرارة القمة من أجل ترددات مختلفة يمكننا حساب طاقة التنشيط للعيب من العلاقة التالية (Arrhenuis plot):

$$\omega_0 = 2\nu_n \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT_0}\right) \qquad \text{(9)}$$

حيث ν تواتر محاولة الفلت (attempt –to-escape).

العلاقة (9) صالحة بشكل ممتاز في المواد البلورية والمواد اللابلورية المشابهة حيث تكون درجة حرارة القمة (القفزة) منخفضة نسبياً(أي اقل من 350 K) أما في حالة ديودات لابلورية غير مشابهة (من النوع i) فإن درجة الحرارة هذه تكون مرتفعة من هنا تم تطوير طريقة لحساب تركيز العيوب من خلال تغير السعة بدلالة درجة الحرارة مباشرة بعد بداية القفزة حيث[14،15]:

$$F_T(C) = \left(\frac{d}{dT}\left(-\frac{\varepsilon A}{C}\right)\right)^{-1} = \frac{T - T_0}{L_D} \qquad \text{(10)}$$

حيث A مساحة مقطع الديود و L_D طول ديباي (Debaye length) ويعطى بالعلاقة $(L_D)^2 = \frac{\varepsilon}{q^2 g(E_F)}$ حيث $g(E_F)$ تركيز السويات عند سوية فيرمي.

2-2-3 تغير السعة والناقلية بدلالة التحيز المطبق وتردد القياس

هنا أيضاً الاختلاف كبير بين المواد البلورية والمواد اللابلورية. من المعروف أن علاقة مقلوب مربع السعة بدلالة التحيز المطبق تكون خطية تماماً في المواد البلورية حيث أنه يمكن تحديد تركيز الشوائب من ميل هذا المستقيم بينما الأمر مختلف جداً في المواد اللابلورية حيث أن علاقة السعة مع التحيز المطبق معقدة جداً. مع كل ذلك التعقيد وجد أن دراسة هذه العلاقة في السيليسيوم اللابلوري المهدرج تعطي معلومات قيمة جداً مثل تركيز العيوب في الفجوة الطاقية [16،17،18،19] وكذلك تركيز العيوب السطحية[20]. في ما يلي سنستخدم نفس مصطلحات ونموذج المرجعين [16] و [20]. يعتمد هذا النموذج على الفرضيات التالية: 1- مقاومة حاجز شوتكي يجب أن تكون أكبر من المقاومة الحجمية للمادة. 2- تحليل النتائج مبني على نظرية تقريب الصدار الأيوني الحراري (Thermoionic emission approximation) وليس نظرية الانتشار. 3- انشغال السويات الطاقية في الفجوة محكوم بشبه سوية فيرمي الالكترونية. 4- يمكن تحديد تركيز السويات الطاقية ($N(E)$) من منحنيات $C(V)$ بافتراض أن كل السويات المشاركة قادرة على الاستجابة لتردد القياس المطبق. هذه الفرضيات الأربعة هي محققة غالباً بدءاً من انحيازات عكسية وانتهاءً بانحيازات أمامية ضعيفة [16]. سنعرض في ما يلي النموذج فقط من أجل ترددات القياس المنخفضة.

يعتمد هذا النموذج على مبدأ الدارة المكافئة للديود (يعتبر الديود عبارة عن مقاومة وسعة موصولتان على التفرع). في اطار هذا النموذج يتم تقسيم منطقة النضوب إلى مقاطع موازية للسطح الفاصل بين المعدن ونصف الناقل بعمق x_i وسماكة x_{i-1} - x_i حيث C_i السعة الموافقة للسويات عند سوية فيرمي وبعمق x_i ضمن منطقة النضوب وتساوي إلى:

$C_i = \frac{\varepsilon}{x_{i-1} - x_i}$ and $\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}\right)^{-1} = \frac{\varepsilon}{W}$ حيث W تمثل عرض منطقة النفاد وزمن الصدار الحراري $\tau_i = R_i C_i = \frac{\exp\{[E_C(x_i) - E_F]/kT\}}{\sigma_i v_{th} kTN(E)}$ حيث σ المقطع العرضي للسر للسويات و v_{th} السرعة الحرارية للالكترونات الحرة $N(E_C)$ تركيز السويات في عصابة الناقلية.

تكون السعة والناقلية للمقطع i ممثلة بدارة مكافئة على التوازي من:

$$(11) \quad G_{ip} = \frac{C_i \omega^2 \tau_i}{1+\tau_i^2 \omega^2} \qquad C_{ip} = \frac{C_i}{1+\tau_i^2 \omega^2}$$

من هذه العلاقة نجد ان الناقلية تصل إلى قيمة عظمى من أجل $\omega\tau_i = 1$ بكلمات أخرى المشاركة الأساسية في السعة والناقلية المقاسة تأتي من سويات تجاور x_i حيث $\omega\tau_i = 1$. السويات المشاركة إذاً متموضعة في مقطع عرضه δx_i حول x_i حيث يكون تغير الكمون الموضعي من رتبة kT/q. من السهل حساب δx_i بافتراض أن تركيز السويات لا يتغير مع الطاقة (هذا محقق إذا أخذنا فقط السويات الواقعة بين سوية فيرمي في المنطقة الحجمية المعتدلة وصولاً إلى نصف الفجوة) وهذه هي الحالة التجريبية لدينا إذاً $\delta x_i = kT/q|E_D(x_i)|$ حيث $E_D(x_i)$ الحقل الكهربائي عند النقطة x_i. من أجل توزع متجانس للسويات في المجال الطاقي المذكور يمكن أن يعطى الحقل الكهربائي من العلاقة:

$$E_D(x_i) = E_D(0)\exp\left[-(x_i / L_D)\right],\; E_D(0) = V_{bi} / L_D$$

حيث V_{bi} الحاجز الكموني (built-in potential) للديود نعوض قيمة الحقل فنجد

$$(12) \quad \delta(x_i) = \frac{kT}{q|V_{bi}|} L_D \exp\left[x_i / L_D\right]$$

ويكون تركيز السويات في المنطقة المذكورة $N_i = \delta x_i\, g(E_F)$ ومن معادلة الحقل الكهربائي $W = L_D \ln(q|V_{bi}|/kT)$ والسعة الموافقة:

$$(13) \qquad C_i(x_i) = \frac{\varepsilon}{L_D} \exp\frac{x_i - W}{L_D} \;,$$

بتعويض هذه العلاقة بالعلاقة (11) مع اعتماد تقريب الترددات المنخفضة يمكننا حساب علاقة الناقلية مع التردد عند انعدام الانحياز المطبق بالعلاقة:

$$G(\omega,0) = \varepsilon\omega 2\frac{L_D}{x_i^2}\exp\frac{x_i - W}{L_D} \Big/ \left[\exp\frac{2(x_i - W)}{L_D} + 2\frac{L_D}{x_i} + 2 - \exp\frac{x_i - W}{L_D}\right]^2$$

$$\equiv \omega F(x_i),$$

يمكن حساب الناقلية من هذه العلاقة عند قيم موافقة لـ $x_i = W$, و $x_i = 0$ ومع الأخذ بعين الاعتبار (من معادلة الحقل) $\exp(W/L_D) = q|V_{bi}|/kT = \alpha$ حيث أنه:

1- من أجل $x_i = 0$ نجد ،

$$F(0) = \frac{G(\omega,0)}{\omega} = \frac{\varepsilon}{2\alpha L_D}, \quad (a14)$$

2- من أجل $x_i = W$ نجد ،

$$F(W) = \frac{G(\omega,0)}{\omega} = \frac{\varepsilon}{L_D\left[2 + 2\ln\alpha + (\ln\alpha)^2\right]}, \quad (b14)$$

من العلاقة (14) يمكن بسهولة حساب طول ديباي الجريبي ومنه حساب تركيز العيوب.

أما علاقة السعة المقاسة فهي $C = \varepsilon / (x_i + L_D)$ ويمكن حسابها من علاقة زمن الصدار الحراري . إذا اعتبرنا أن أعلى تردد في مجال الترددات المنخفضة هو ω_0 فإنه من علاقة زمن الصدار الحراري نجد أن: $\omega_0 / \omega = \exp\left(\frac{q|V(x_i)|}{kT}\right) - 1$ ، حيث

$V(x_i) = V_{bi} \exp\left(-\frac{x_i}{L_D}\right)$ ، وأخيراً علاقة السعة عند ترددات منخفضة تعطى:

$$C(\omega,0) = \frac{\varepsilon}{L_D}\left[1 + \ln\left(\frac{q|V(x_i)|/kT}{1 + \ln(\omega_0/\omega)}\right)\right]^{-1}, \quad (15)$$

من العلاقتين (14) و (15) يمكن حساب تركيز العيوب تجريبياً باستخدام ترددات قياس منخفضة وعدم تطبيق انحياز على العينة ولكن يتطلب ذلك معرفة حاجز الكمون V_{bi}.

غير أنّ تعيين حاجز الكمون في المواد اللبلورية أمراً صعباً لذا كما وجدنا سابقاً لا يمكن حسابه من علاقة السعة بالانحياز المطبق وإنما يمكن حسابه من علاقة التيار – جهد.

3-2-3 مميز تيار-جهد

علاقة التيار المار عبر الديود عند تطبيق انحياز أمامي معين يعطى باستخدام نظرية الصدار الحراري الأيوني thermoionic-emission بالعلاقة التالية:

$$J(V) = j_0\{\exp(qV/kT) - 1\} \quad (16)$$

حيث $J_0 = A^{**}T^2 \exp\{-q(V_{bi}/kT)\}$ حيث A^{**} ثابت ريتشاردسون.

من المعروف أن العلاقة (16) هي علاقة مثالية لايمكن أن تتحقق تجريبياً ولكن السلوك الحقيقي للديود يتبع العلاقة المعدلة $J(V) = j_0 \exp(qV/nkT)$ حيث n ثابت المثالية

وهو بشكل عام أكبر من 1. يمكن تحديد حاجز الكمون بقياس مميزات تيار-جهد باتجاه أمامي من أجل عدة درجات حرارة وبالتالي تحدد j_0.عند هذه الدرجات. بعد ذلك برسم المنحني $ln(j_0/T^2)$ بدلالة T^{-1} يعطي مستقيماً ميله يساوي إلى qV_{bi}/k وتقاطعه مع المحور العمودي يعطي A^{**}.

4-2-3 المطيافية اللاتوازنية للمصائد العميقة Deep Level Transient (DLTS) Spectroscopy

ل يمكننا استخدام تقنية DLTS المعروفة لدراسة المواد اللابلورية كون هذه المواد ل تستجيب (من الناحية السعوية) من أجل تواترات مرتفعة للجهد المتناوب (أي ل يمكن دراستها باستخدام مقياس سعة عادي كون مثل هذه المقاييس تعمل من أجل تردد قياس *1 MHz*). سبب عدم استجابة هذه المواد من أجل تواترات مرتفعة هو ما يسمى تواتر القطع الذي يمثل الحد العلى الذي يمكن عنده قياس السعة وهو عادة أقل من *50 kHz* [21]. قمنا بتطوير تقنية DLTS الموجودة في مخبرنا لتصبح قادرة على القياس من أجل ترددات منخفضة وذلك من خلل تحويل الكاشف الطوري المضاعف (Lock-In analyzer) إلى مقياس سعة. تم تحويل الكاشف إلى مقياس سعة من خلل تمرير إشارة خرج العينة عبر مضخم تيار عالي الحساسية (10^9 μA) وبهذه الطريقة فإن قياس السعة يتم باستخدام الكاشف الطوري المضاعف والذي يعمل بترددات قياس يمكن اختيارها ضمن المجال *0.5 Hz* و*100 kHz* [22]. قمنا بدراسة تأثير كل من تردد القياس وحساسية مضخم التيار في عمل سابق[23]. وجدنا أن حساسية مضخم التيار لتلعب دوراً يذكر في القياس أما تردد القياس فيجب أن يكون أقل من 20 kHz حيث تبين أن المجال المناسب لتردد القياس هو بين *10 kHz* و*17 kHz*. كما قمنا بتسجيل كامل الوسيعية بدللة الزمن ومن أجل درجات حرارة مختلفة.

4 العينات والتجهيزات المستخدمة

1-4 العينات:

استخدمت في هذا البحث عينات غير متشابه على شكل ديودات وكذلك وصلت *p i n* متوضعة على شكل أفلم رقيقة على أنواع مختلفة من الركائز وبشروط توضيع مختلفة بحيث

تندرج المادة من السيليسيوم اللابلوري مروراً بمتعدد الشكال البلورية وصولاً إلى الميكروبلوري. يمكن تقسيم هذه العينات إلى مجموعات أساسية من نوع القاعدة ونوع الوصلة:

المجموعة الولى: عبارة عن ديودات موضعة مباشرة على قاعدة من السيليسيوم البلوري عالي الشابة (ثلث طبقات الولى "القاعدة" من السيليسيوم البلوري عالي الشابة من النوع n، طبقة السيليسيوم اللابلوري وأخيراً طبقة من معدن البالديوم) حيث أن شروط التوضيع لهذه العينات مبينة في الجدول (1):

Sample	Type	T_s (EC)	V_d(Å/s)	d(µm)	P(mTorr)
005241	a-Si:H	250	1.0	1.6	40
005251	Pm-Si:H	250	2.0	2.0	1100
005233	Pm-Si:H	250	1.23	1.8	1850
005222	Pm-Si:H	250	0.88	1.9	1100

جدول (1): أفلم موضعة على ركازة من السيليسيوم البلوري العالي الشابة

المجموعة الثانية: هذه العينات أيضاً عبارة عن ديودات موضعة على ركازة من السيليسيوم البلوري العالي الشابة من النوع *n* مؤلفة من أربع طبقات؛ ركازة - *Pt– a-Si:H type i– a-Si:H type n* حيث أن المعاملت الوحيدة المتغيرة هي تلك التي تخص الطبقة الغير مشابة. بالنسبة للطبقة المشابة هي طبقة من *a-Si:H* من النوع *n* عالية الشابة (حوالي 0.15 % من الفوسفين بالنسبة إلى السيلين) وبسماكة قدرها 30 nm والهدف من هذه الطبقة هو الحصول على وصل آومي جيد (Ohmic contact) وموضعة بنفس الشروط في كل العينات المدروسة. كل المعاملت لهذه العينات مجمعة في الجدول (2).

Sample	Type	T_s (EC)	V_d(Å/s)	d(µm)	RF power(W)	P (mTorr)
609111	a-Si:H	250	0.78	1.57	2	40
609161	Pm-Si:H	250	2.05	1.5	20	1630
600171	Pm-Si:H	250	1.23	1.4	20	1360
609181	µc-Si:H	250	0.73	2.1	20	900

جدول (2): أفلم موضعة على ركازة من السيليسيوم البلوري العالي الشابة

المجموعة الثالثة: هذه العينات أيضاً عبارة عن ديودات ولكن موضعة على ركازة زجاج كورنينغ 1737. هذه الركازة من الزجاج مطلية بشكل عام بطبقة من أكسيد شفاف

بالنسبة للضوء وناقل جيد للكهرباء بآن واحد مثل *ITO, ZnO, SnO_2, Cr….* وفي حالة العينات المدروسة في هذا البحث كان الكسيد المستخدم هو *ITO* و *SnO_2* و *Cr*. مباشرة بعد الطلاء توضع طبقة من *a-Si:H* العالي الشائبة من النوع *n* بسماكة قدرها 50 nm كما هو مبين أعله.

مايميز هذه السلسلة من العينات هو أن قسم منها موضع باستخدام معدل توضيع عالي جداً.

Sample	type	Ts (°C)	Vd (Å/s)	d (µm)	RF Power (W)	P (mTorr)
a611242	pm-Si:H	175	10.5	2.8	20	1600
a611261	pm-Si:H	200	8.0	4.0	20	1600
a611262	a-Si :H	175	0.73	1.6	5	2100
a611276	pm-Si:H	175	0.88	1.9	5	1600

جدول (3): أفلم موضعة على ركازة من زجاج الكورنينغ بمعدل توضيع عالي

المجموعة الرابعة: هذه العينات عبارة عن وصلت *p-i-n* موضعة على ركازات من زجاج الكورنينغ وأخرى متخالفة (Heterojunction) موضعة على ركازات من السيليسيوم البلوري من النوع *p*. القسم الموضع على ركائز زجاج مطلية بالكروم هو عبارة عن خليا شمسية من متعدد الشكال البلورية حيث الختلف الوحيد هو درجة حرارة التوضيع للطبقة الفعالة (*i type*) حيث الطبقات الثلث *p, i , n* موضعة بنفس الشروط والطبقة العليا من *SnO_2*.

أما الخليا الموضعة على ركازة بلورية فهي أيضاً من الشكل *p-i-n* ولكن مع اختلف الطبقة *i* حيث مرة تكون متعدد الشكال البلورية ومرة ميكروبلوري. أما الوصلت التخالفية فتتكون من طبقة سيليسيوم بلوري من النوع *p* (حيث المقاومية 14 Ωcm) مغطاة من الخارج بطبقة من اللمنيوم يوضع عليها طبقة من متعدد الشكال البلورية من النوع *i* (مع اختلف تمديد السيلن بالهيليوم أو الهيدروجين، جدول 3) ومن ثم طبقة من *a-Si:H* عالي الشائبة من النوع n بسماكة 10 nm وتغطى بطبقة من *ITO* بسماكة 90 nm.

Sample	type	Ts (°C)	Vd (Å/s)	d (µm)	RF Power (W)	P (mTorr)
a511251	pm-Si:H	150	1.57	2.5	20	2100
a511232	pm-Si:H	200	1.71	2.8	20	2100
a511235	pm-Si:H	250	1.5	2.3	20	2100
510031	pm-Si:H	145	0.87	0.41	6	1600

509171	µc-Si:H	175	0.85	0. 625	10	2500
0012P42	Het p m-Si:H	200		0.03	5	1600
0012P49	Het p m-Si:H	200		0.003	2	1650

جدول (4): خلايا شمسية موضوعة على شكل أفلام رقيقة على ركائزات من الزجاج ومن السيليسيوم البلوري (وصلت متخالفة).

2-4 التجهيزات المستخدمة

من أجل جميع القياسات التي أجريت في هذا العمل تم وضع العينة ضمن كريوستات تعمل على الزوت السائل حيث يمكن التحكم بدرجة الحرارة بين 100 إلى 450 *K* . انجزت الوصلات الكهربائية اللازمة باستخدام مادة الفضة السائلة التي يتم بواسطتها وصل سلكين إلى قطبي العينة ومن ثم إلى قطبي الكريوستات. هذه الكريوستات مجهزة بنافذة ضوئية من زجاج الكوارتز المطلي بمادة تعمل مرشحاً لتمرير الضوء المرئي فقط.

من أجل قياس السعة والناقلية بدلالة تردد القياس ودرجة الحرارة تم استخدام جهاز محلل Z (Z-Analayzer) من النوع HP-8320A حيث يمكن قياس كل من السعة والناقلية من أجل ترددات قياس (تردد الشارة الجيبية المتناوبة) ضمن المجال من *5Hz* إلى *13 MHz* ومطال من *1 mV* إلى *3V* ويمكن تطبيق انحياز ضمن المجال *35-* إلى *35 V* موصول على الحاسوب. كما تم استخدام الكاشف ألطوري المضاعف من نوع SRS-SR830 Lock-in analayzer بعد تحويله إلى مقياس سعة وناقلية (أنظر ما ورد أعلاه) باستخدام مضخم تيار عالي الحساسية من نوع SR570 (بحساسية تصل إلى *A/V* 10^{12}). مكننا هذه الطريقة من قياس السعة والناقلية عند ترددات منخفضة جداً أيضاً حيث أن مجال الترددات في المضخم يقع بين *1 mHz* و *100 kHZ* باستخدام انحياز مطبق من قبل مولد نبضات. لابد من الشارة هنا إلى أنه عند استخدام الكاشف ألطوري المضاعف لابد من جمع إشارة الانحياز مع الشارة الجيبية وتم ذلك باستخدام دارة جامع صنعت محلياً (عمل سابق [24]).

بالنسبة لقياس مميزات منحني تيار جهد فقد تم ذلك باستخدام جهاز Keithley 238 Source measure unite مزود ببرنامج تحكم على الحاسوب حيث تم الحصول على هذا المنحني من أجل درجات حرارة مختلفة.

بالنسبة إلى قياس المطيافية النتقالية للمصائد العميقة DLTS تم استخدام مضخم طوري كمقياس سعة وآخر كمضخم طوري مرشح. تم القياس بطريقتين الاولى من خلال قياس تغير الوسعية النتقالية(Transient) بعد تطبيق نبضة مستمرة بتردد معين (باستخدام مولد نبضات "SRS" DG535 Delay/Pulse Generator) يتراكب معها إشارة جيبية متناوبة ترددها هو تردد القياس. في حال العينات اللبلورية فإن تردد القياس يجب أن يكون منخفضاً حيث أننا استخدمنا ترددات قياس بين $4\ kHz$ و $15\ kHz$. يتم تسجيل تغير الوسعية مباشرة من خارج مقياس السعة (مضخم الطور) بدللة الزمن بتثبيت درجة الحرارة ويتم إجراء قياسات من أجل درجات حرارة مختلفة باستخدام راسم إشارة من النوع TDS3054 Tektronix ومن ثم يتم حساب معدل الصدار التجريبي من أجل كل درجة حرارة بحساب الفرق في الوسعية بين زمني قياس t_1 و t_2 متباعدين بحيث أن هذا الفرق يصبح أعظمياً من أجل معدل إصدار أعظمي

$$[21]\ \tau_{\max} = \frac{t_2 - t_1}{\ln(t_2 / t_1)}$$

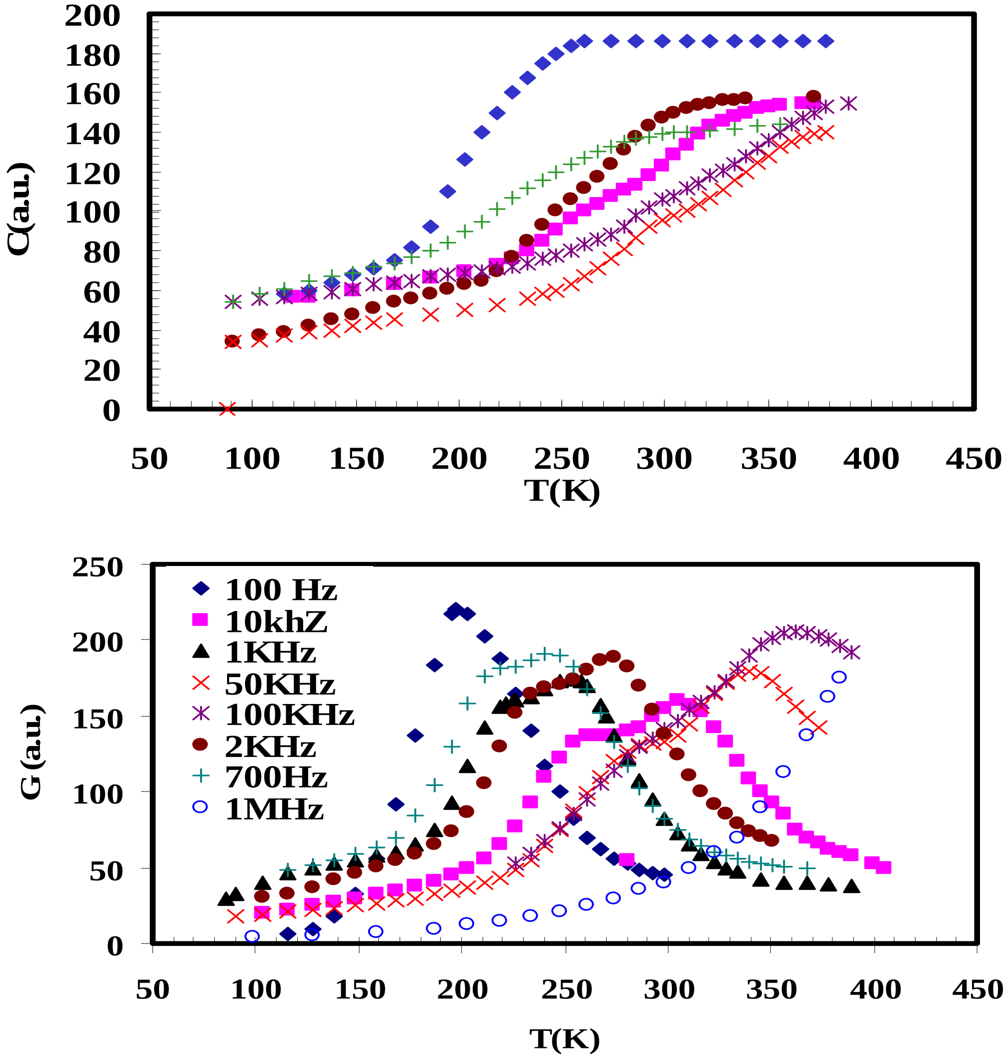
أما الطريقة الثانية فهي الطريقة المعروفة لقياس DLTS والمسماة بطريقة ترشيح A – B بحيث أن إشارة الوسعية الخارجة من مقياس السعة (مضخم الطور) تشكل إشارة دخل لمضخم طور آخر الذي يعمل كمرشح (انظر المرجع [23] والملحق). نختار تردد القياس المناسب (5 أو $10\ kHz$) ومن ثم من أجل كل نبضة مستمرة يتم تسجيل إشارة DLTS بدللة درجة الحرارة حيث يتم تسجيل درجة حرارة قمة الطيف الذي عندها يكون معدل الصدار ألعظمي $\tau_{\max} = \dfrac{1.72}{t_f}$ حيث t_f يمثل دور النبضة المطبقة (انظر الملحق).

5 النتائج

سيتم عرض مجمل النتائج ولكن بحسب الطريقة المستخدمة. كان الهدف من استخدام طرائق مختلفة هو امكانية تحليل دقيق لسويات العيوب ضمن الفجوة وامكانية تحديد هويتها ومحاولة ربط وجود هذه العيوب وأنواعها بالخصائص الفوتوفولطية لهذه العينات.

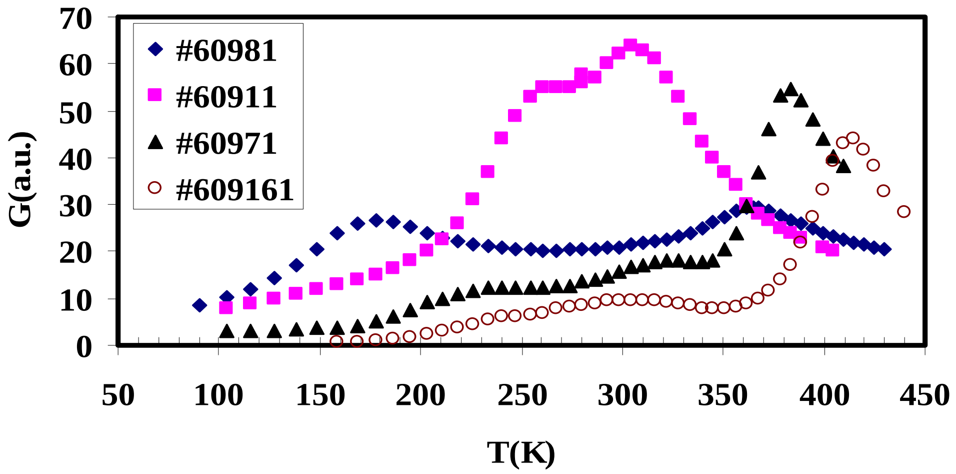
1-5 قياس السعة والناقلية بدللة تردد القياس ودرجة الحرارة

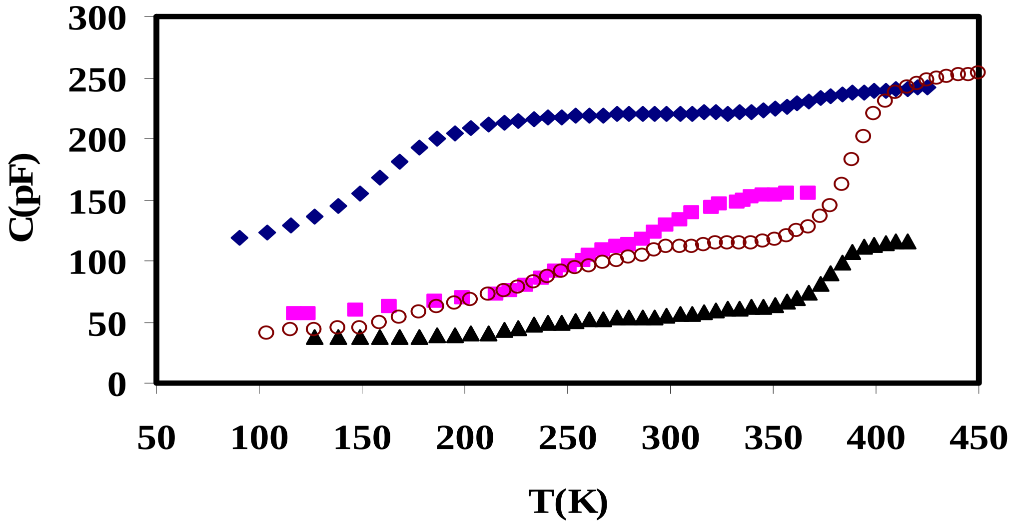
نظراً للعدد الكبير جداً من الطيوف والأشكال سنكتفي في ما يلي بمثال واحد عن كل مجموعة من العينات. تم قياس السعة والناقلية لكل العينات المدروسة بدلالة درجة الحرارة في المجال 100-450 K وتردد قياس من *10 Hz* إلى *100 kHz* . يمثل شكل (1) أحد هذه الطيوف للمجموعة الأولى (طيف العينة 005241) حيث نجد أن طيف السعة يبدي على الأقل قفزتين يترافقان بقمتين في طيف الناقلية. طاقة التنشيط المحسوبة للعيبين هي على التوالي *0.31 eV* و *0.39 eV* (الجدول 5) أما بقية العينات فنتائجها في الجدول (5) ولابد من الإشارة إلى أننا لم نستطع قياس طيوف DLTS كثيرة بدلالة التردد للعينة 005233 وذلك بسبب تلف العينة ولكن حسب مظاهر طيفين على الأقل لهذه العينة نجد أنهما تبدي قمتين على الأقل الأولى منخفضة الحرارة (حوالي 250 K) والثانية تقع حوالي 340 K. من هذه النتائج نجد اختلاف بقيم طاقة التنشيط من عينة إلى أخرى ربما يكون هذا طبيعياً ولكن اختلاف القيم لنفس العينة باختلاف الطريقة يبدو غريباً. سيناقش هذا الموضوع في الفقرة التالية.



شكل (2): السعة (C) والناقلية (G) لعينة من السيليسيوم اللابلوري المهدرج

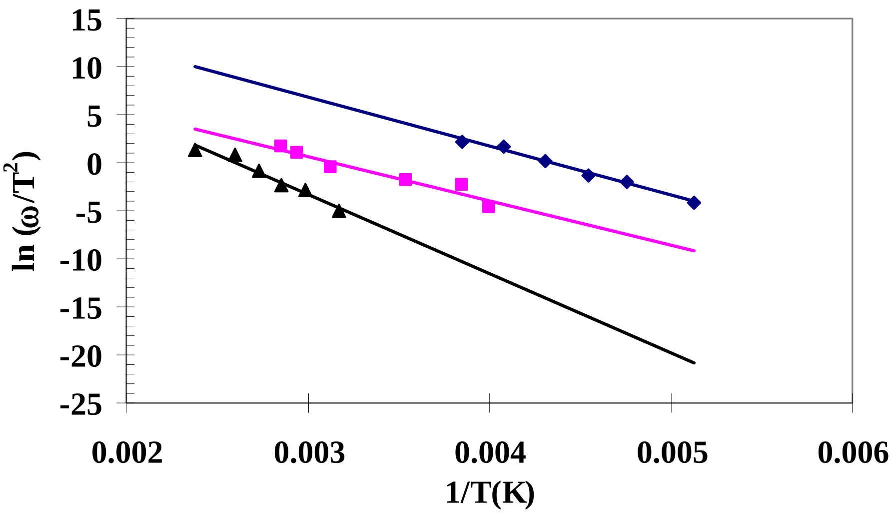
أما الشكل (3) فإنه يبين الفرق بين مختلف عينات هذه المجموعة من أجل تردد معين واحد حيث يبين أن هناك قمتين على الأقل في كل العينات (مرافقة مع قفزتين) تختلفان بالموقع.





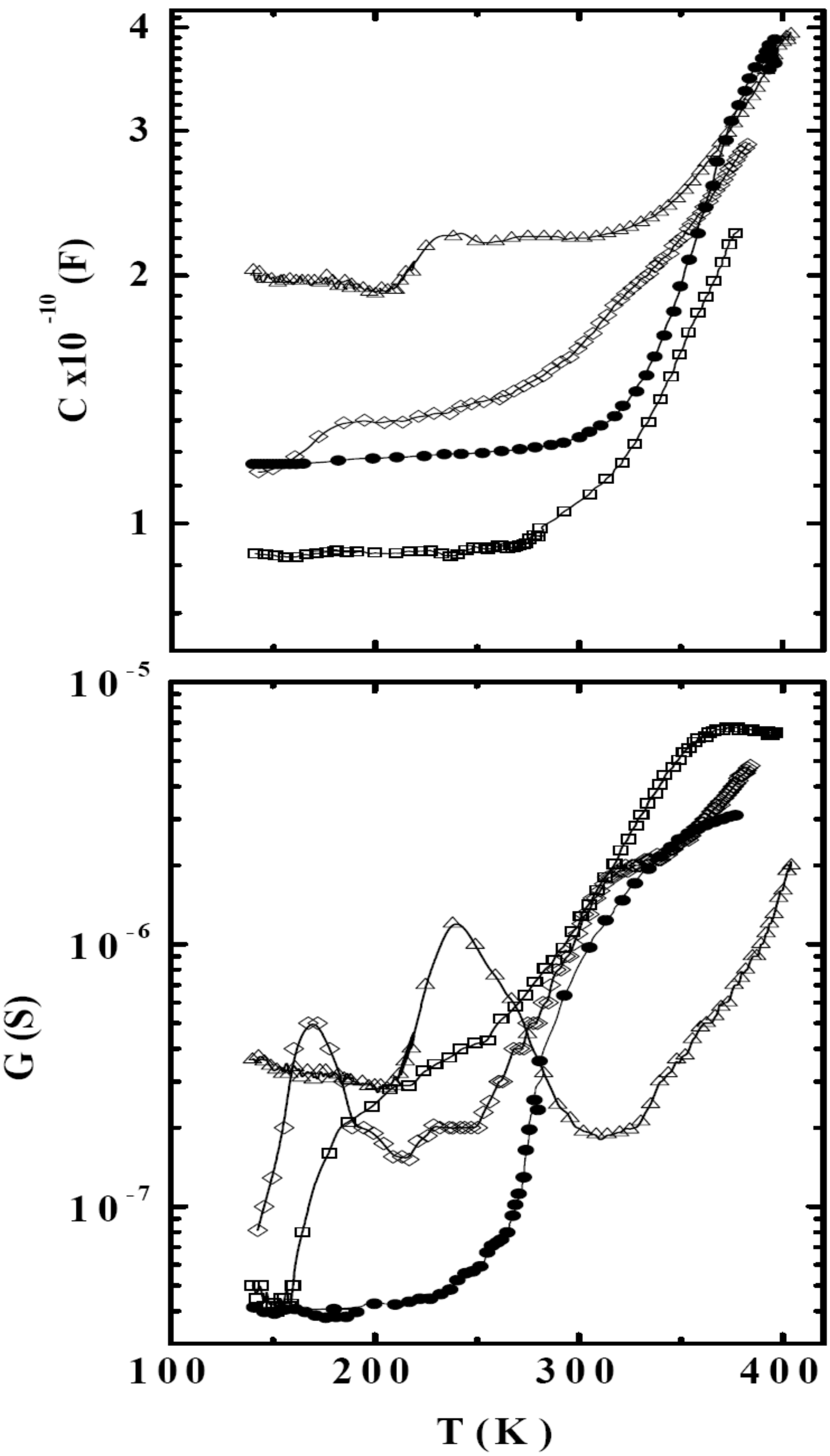
شكل (3): طيوف السعة والناقلية بدلالة درجة الحرارة لعينات المجموعة الثانية من أجل تردد قياس 10 kHz وبدون تطبيق انحياز على العينة.

نلاحظ من الشكل أنه في حال السيليسيوم اللابلوري والسيليسيوم المكروبلوري يوجد قمتان ولكن مختلفتان كثيراً من حيث الموضع أما في حال متعدد الأشكال البلورية فهناك على ما يبدو ثلاث قمم على الأقل مما يدل على اختلاف كبير في نوعية وعدد العيوب بين مختلف هذه العينات. باستخدام العلاقة (9) من رسم منحني أرينيوس (انظر الشكل 4) وذكرت في الجدول (5) طاقات التنشيط المحسوبة لمختلف العيوب في مختلف العينات كما هو مبين في الجدول (5).



شكل (4): منحنيات أرينيوس لمختلف العيوب في العينة 60971# حيث يبين الشكل أن العلاقة خطية.

أما بالنسبة إلى المجموعة الثالثة فهي مختلفة بشكل عام عن المجموعتين السابقتين حيث أن طيوف السرعة والتناقلية (شكل 5) تبين أيضاً اختلافاً كبيراً بين العينات المختلفة. خصوصية بعض هذه العينات (60961#، 60942#) هي أنها مصنعة بمعدلات توضيع عالية جداً وهذا له أهمية بالغة في عملية البحث عن مواد توضع بسرعة كبيرة وتحتفظ بنفس المواصفات. كملاحظة أولية من الشكل (5) نجد أن العيوب في العينات ذات معدل توضيع عالي أقل حتى من العينات القياسية وهذا سنبينه لاحقاً بطرائق أخرى. من جهة أخرى نجد أن تركيز العيوب (مطال القفزة أو ارتفاع القمة في الشكل 5) صغير ومن الصعب أحياناً حساب طاقة التنشيط بشكل دقيق ولذا لجأنا إلى طرائق أخرى لحساب خصائص العيوب كما سيتم عرضه لاحقاً.



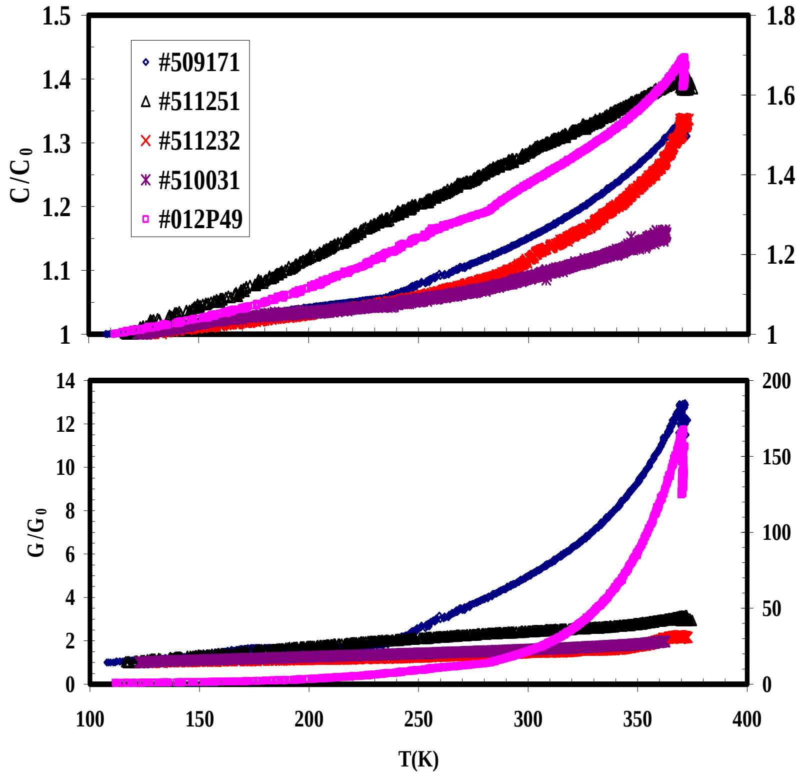
شكل (5): منحنيات السعة والتوصيلية بدلالة درجة الحرارة لعينات المجموعة الثانية: (◊) 60961# (Δ) 60971#؛ (□) 60961#؛ (●) 60942#.

Sample	E_a(eV) from G(T,ω)	E_a(eV) from DLTS	V_{bi} (V)	DOS1 ($eVcm^{-2}$)	DOS2 ($eVcm^{-2}$)
005241	0.31 0.39	0.53			
005251		0.97			
005233	1.23 1.45				
005222		0.77			
609111	0.32 0.39	0.40	0.41		
609161	0.34 0.55 --		0.84		
609171	0.33 0.47 0.85		0.25		
609181	0.52 0. 65	0.47 0.50 0.65	0.42		
a611242	0.40 0.624	1.85	0.47	1.4×10^{15}	2.4×10^{15}
a611261	0.651	1.55	0.39	4.6×10^{14}	2.2×10^{14}
a611262	0.612 0.426 1.25	0.40 1.43	0.34	9.6×10^{14}	4.1×10^{16}
a611276	0.076 0.09 0.533	--	0.67	1.3×10^{16}	4.4×10^{15}
A511251	--	--	--	--	
A511232	--	--	--	--	
A511235	--	--	--	--	
a510031		0.45			
A509171		0.97			
0012P42					
0012P49					

جدول (5): النتائج التجريبية لمختلف العينات محسوبة بطرائق مختلفة.

نعرض النتائج المجموعة الأخيرة حيث أن هذه العينات عبارة عن خلايا شمسية (*p-i-n*) تشكل الطبقة الفعالة منها الطبقات المعرفة في الجدول (4). الهدف من دراسة هذه العينات هنا هو معرفة تأثير شروط توضيع الطبقة الفعالة على خصائص الخلية.

في الشكل (6) تم عرض منحنيات السعة والتوصيلية بدلالة درجة الحرارة لمختلف العينات (الخلايا). هنا نجد أن الصورة مختلفة عما هو عليه بالنسبة للمجموعات الأخرى حيث أن هذا الشكل يبين عدم وجود قفزة (أو قمة) واضحة وذلك بغض النظر عن العينة.

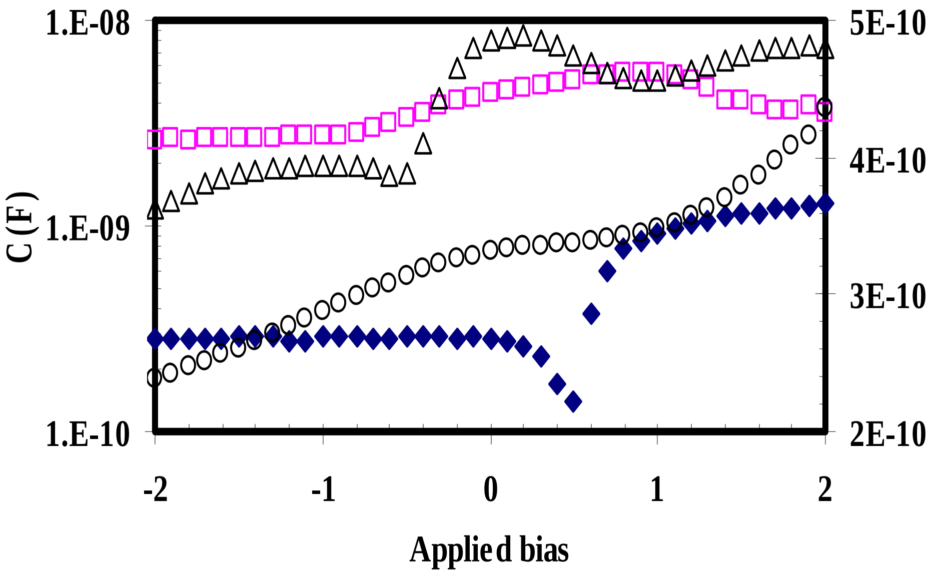


شكل (6): السعة والتوصيلية للمجموعة الرابعة من العينات مأخوذة من أجل تردد قياس 10 kHz حيث أن العينة 012P49 أخذت على المحور الثانوي لأن تغيراتها كبيرة بالنسبة لباقي العينات.

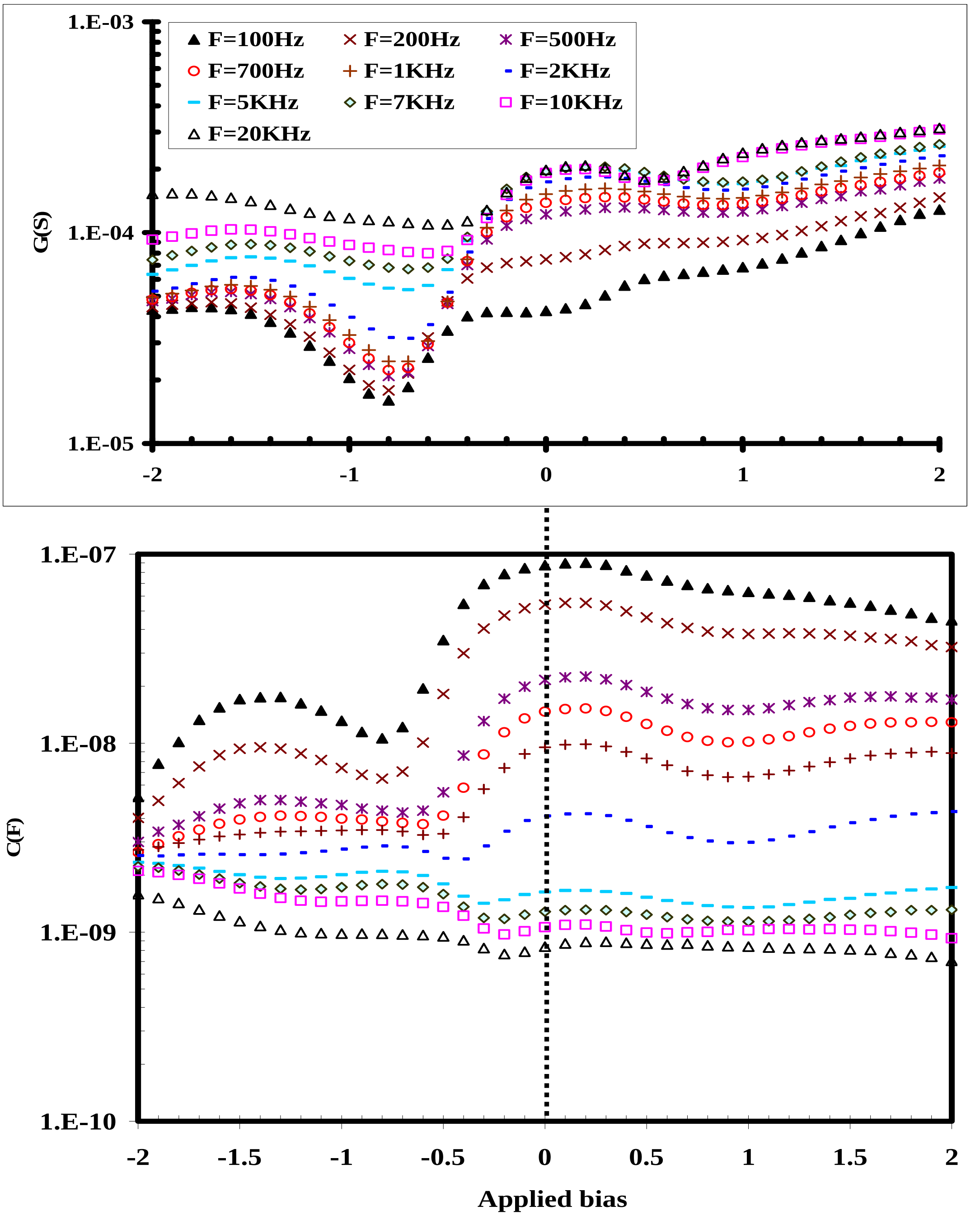
لكن بإمعان النظر في الطيوف يمكن ايجاد قفزات بسيطة في السعة ولكن غير مترافقة مع قمة في التوصيلية، لذا لم يتم أخذ هذه القفزات في الحسبان. أما بالنسبة للعينتين **a510031** و **a509171** فإنهما تبديان قفزة كبيرة لتوصيل عند درجات حرارة مرتفعة جداً حيث لم نتمكن من قياس المقام وطاقة التنشيط.

2-5 تغير السعة والتوصيلية بدلالة انحياز المطبق وتردد القياس

سندرس هنا الفرق بين المواد البلورية واللابلورية
بالنسبة للمجموعة الأولى يبين الشكل (7) مثال عن سلوك هذه الديودات بدلالة الانحياز المطبق. بالنظر إلى هذا المنحني نجد أنه يختلف كثيراً عن منحني *C-V* المعروف في أنصاف النواقل البلورية حيث أن علاقة $1/C^2$ ليست خطية مع الانحياز. هذا الأمر من شأنه أن يعقد كثيراً هذه العلاقة بحيث أنه يصعب الحصول على أية معلومات عن هذه الديودات (تركيز الشوائب, حاجز الكمون,..). كما نجد بشكل عام اختلافاً كبيراً في سلوك منحني *C-V* من عينة إلى أخرى حيث أن العينة 005222 والعينة 005241 تبديان انخفاضاً واضحاً في منطقة الانزياح الأمامي عند 0.5 و 0.9 فولط على الترتيب على عكس العينتان الأخريان. كما سنرى فإن هذا يدل على وجود عيوب عند طاقة تنشيط 0.5 و0.9 *eV* على الترتيب



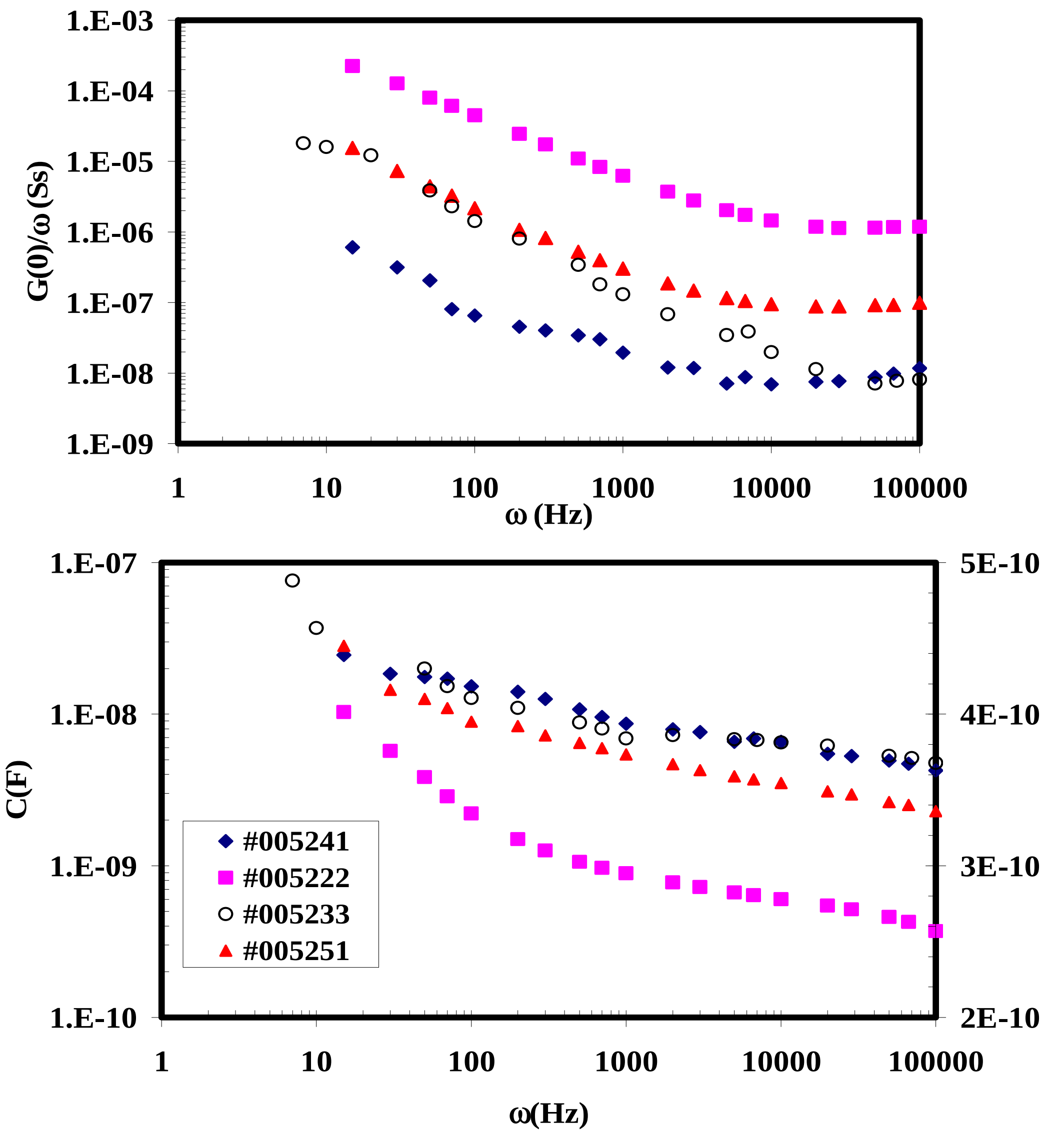
شكل (7): السعة بدلالة الانحياز المطبق من أجل تردد قياس 1 kHz عند درجة حرارة الغرفة لمختلف عينات المجموعة الأولى حيث (Δ) العينة 005241 و (□) العينة 005233 و (o) العينة 005251 و(♦) العينة 005222 (المحور الثانوي).



شكل (8): منحنيات C-V و G-V للعينة 005241 عند درجة حرارة الغرفة ومن أجل عدد كبير من الترددات.

فبينما العينتان 005241 و005222 تبديان انخفاضاً واضحاً في السعة بالتحيز الأمامي على عكس ذلك العينتان 005233 و 005251 لا تبديان أي انخفاض في السعة في التحيز الأمامي. هذا السلوك يدل، كما سنرى لاحقاً أن مقاومة الوصل (Contact resistance) في

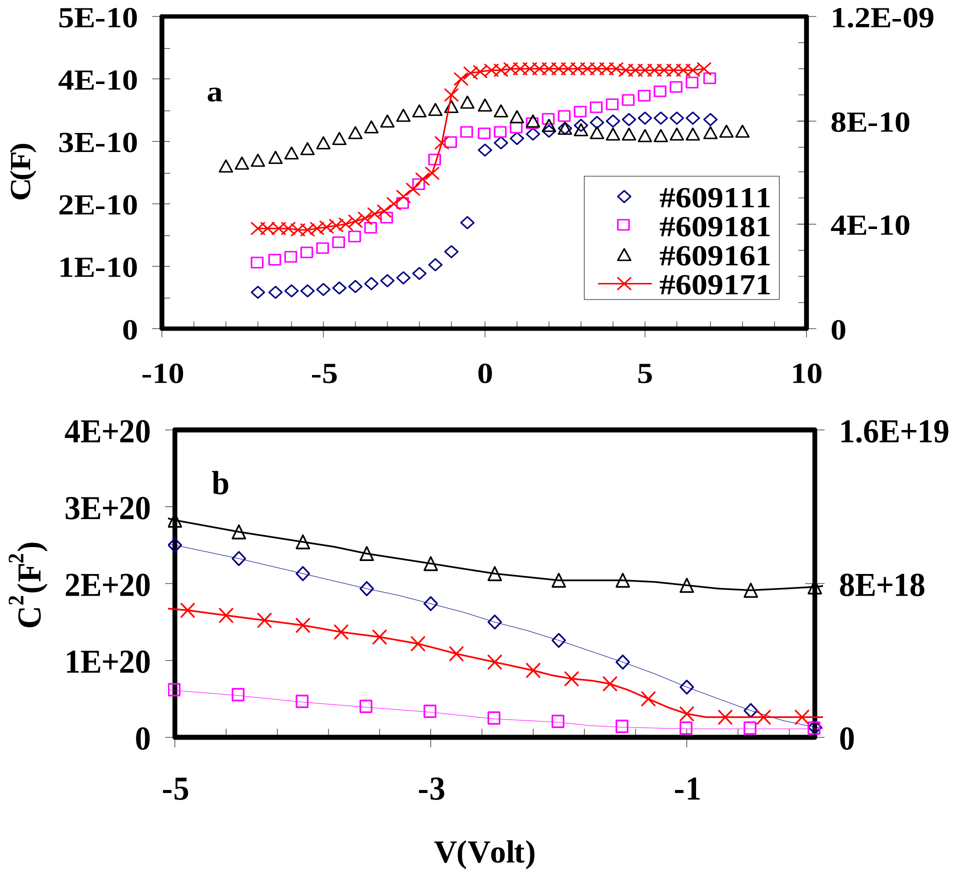
العينتان 005241 و005233 أصغر من قيمة منطقة النفاذ على عكس العينتان الأخيرتان حيث يمكن دراسة العيوب السطحية فيهما. في محاولة للحصول على المزيد من المعلومات لهذه المجموعة وذلك بقياس السعة والناقلية بدلالة التردد وخاصة في مجال الترددات المنخفضة تم قياس هذين المقدارين في حال كون الانحياز يساوي الصفر في الشكل (9).



شكل(9): السعة والناقلية بدلالة تردد القياس من أجل انحياز يساوي الصفر ودرجة حرارة الغرفة (المحور الثانوي يمثل تغيرات سعة العينة 005251).

من هذا الشكل نجد أن جميع هذه العينات ل تبدي أية حالة إشباع في المنحنيين حتى ترددات من مرتبة 1 هيرتز، وكما سنرى فيما بعد فإنه من الصعب قياس تركيز العيوب من هذه القياسات (انظر الفقرة 3-2-2).

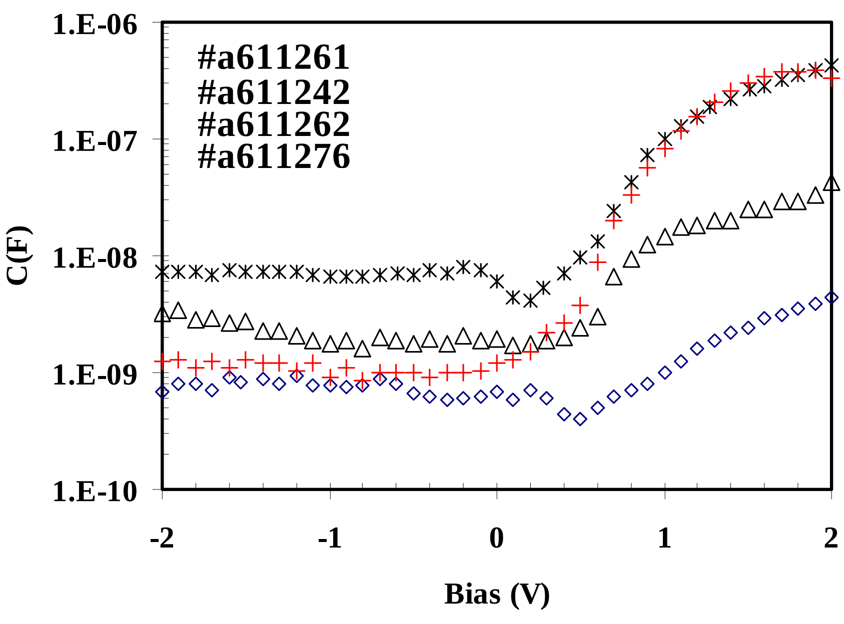
أما في حال المجموعة الثانية فإن الأمر مختلف حيث يظهر الشكل (10) أن هذه العينات تسلك سلوك الفوري في الحاجز العكسي حيث أنه من الشكل (b10) نجد أن تركيز الشوائب هو $2.53x10^{14}$, $5.6x10^{14}$, $9.527x10^{14}$, $1.66x10^{15}$ $atom/cm^3$ للعينات #609111, #609171, #609181, #609161 على الترتيب حيث أن عينة السيليسيوم البلوري المهدرج تحتوي على



شكل (10): منحني C-V (a) ومربع السعة (b) لمختلف عينات المجموعة الثانية حيث أن المحور الثانوي يخص سعة العينة 609171 لن تغيراتها كبيرة بالنسبة للعينات الأخرى (سلم الحدود أكبر). أما المنحني (b) فيقيس على قيم الحاجز العكسي فقط.

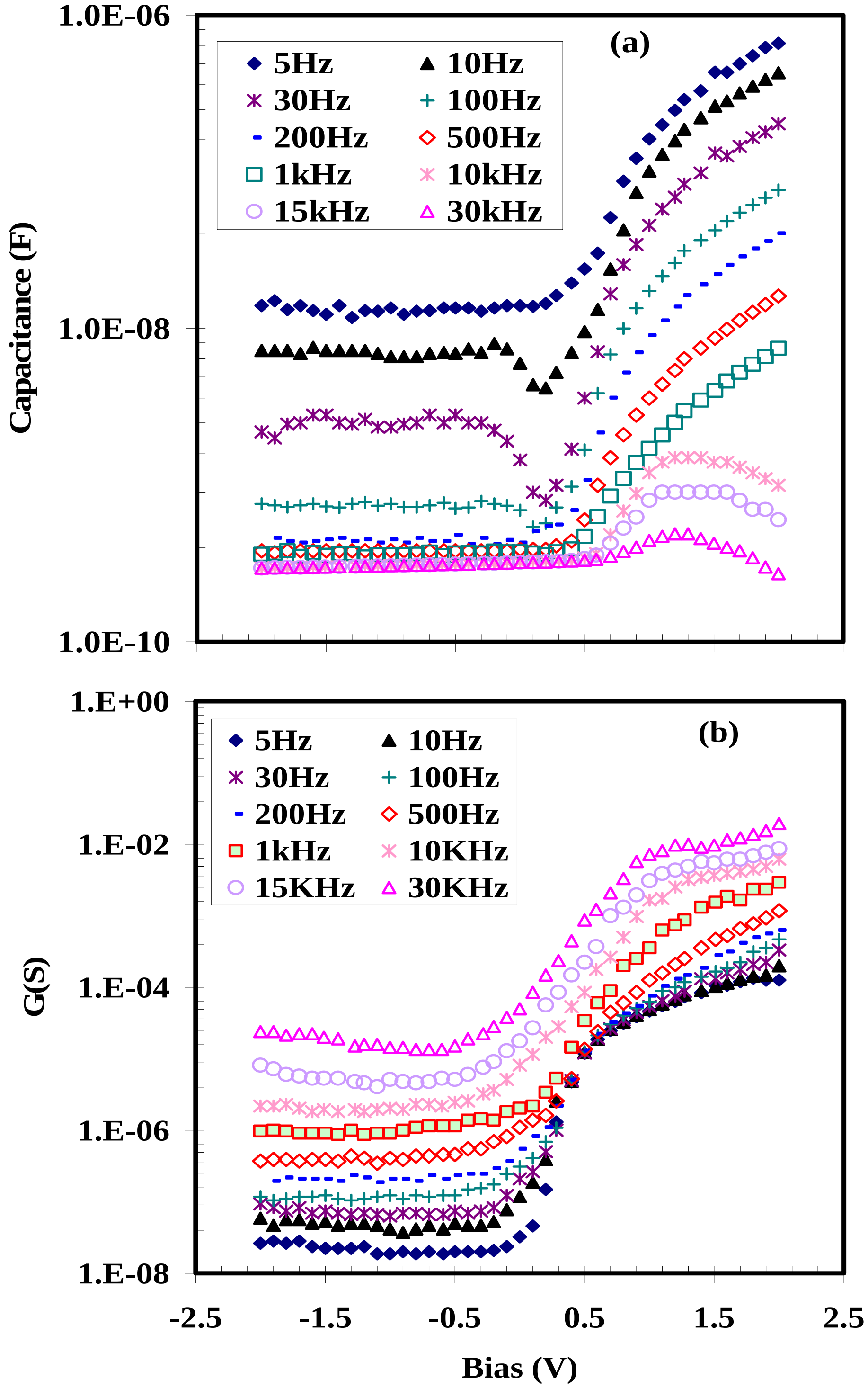
التركيز القليل من الشوائب يعطي متعدد الأشكال البلورية القريب من البلوري (609161) تحتوي على التركيز الكبير من الشوائب ونجد ملاحظة أنها موضعة بمعدل توضيع عالي نسبياً.

نعرض في الشكل (11) أيضاً منحنيات *C-V* للمجموعة التالية. نجد أن أهم ما يميز هذه المنحنيات وجود انخفاض في منحني *C-V* للعينات النموذجية من البلوري ومتعدد الأشكال البلورية باختلاف مكان الانخفاض حيث أنه يقع عند V 0.2 بالنسبة للعينة البلورية (a611262) وعند *V 0.5* بالنسبة لعينة متعدد الأشكال البلورية (a611276) بينما لا يبدي عينات متعدد الأشكال البلورية الموضعة من أجل معدلات توضيع عالية أي انخفاض. هذا يدل على وجود عيوب بتركيز أكبر في العينات القياسية. لابد من الإشارة هنا أن قياس السعة والناقلية بدلالة الفولط من أجل ترددات منخفضة له أهمية كبيرة في حساب التركيز الكلي للعيوب في الديود المدروس. وقد وجدنا بالفعل أنه، كلما انخفض تردد القياس أكثر كلما ازداد عدد العيوب التي يمكن كشفها. بالتالي عندما يسعى تردد القياس إلى الصفر نكون متأكدين من أن جميع العيوب تستجيب إلى هذا التردد وتشارك في إشارة السعة والناقلية وبالتالي يكون تركيز العيوب المحسوب من هذه المنحنيات يمثل التركيز الكلي للعيوب في العينة. يظهر هذا



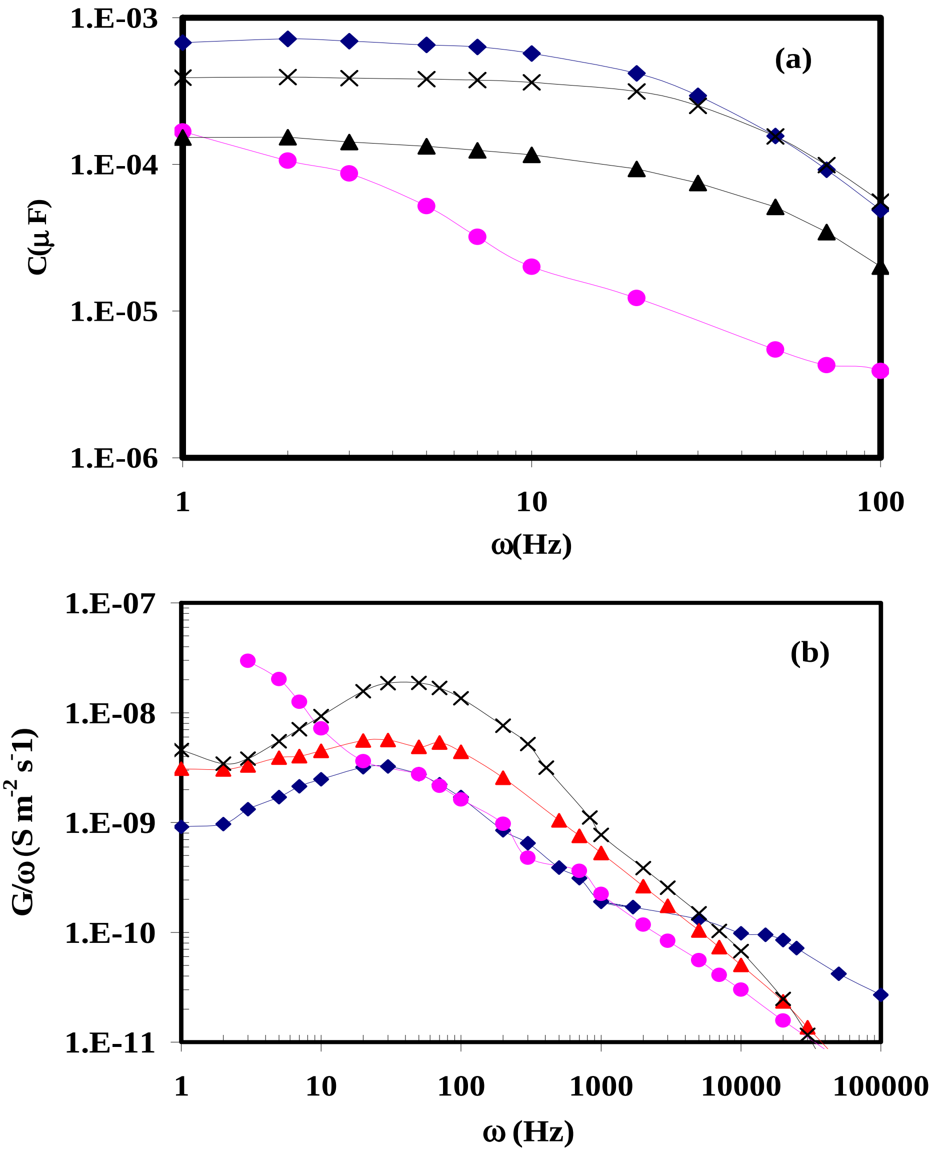
شكل (11): مقارنة منحنيات C-V لمختلف عينات المجموعة الثالثة من أجل تردد قياس 10 kHz.

جلياً في الشكل (12) حيث نجد أنه كلما انخفض التردد كلما ازدادت السعة ورافق ذلك بانخفاض قيمة الناقلية ويستمر ذلك حتى الوصول إلى تردد يستجيب له جميع العيوب ويمثل ذلك بالوصول إلى مرحلة إشباع في منحني السعة والناقلية بدلالة تردد القياس. قبل الانتقال إلى منحني السعة والناقلية بدلالة تردد القياس لابد من الإشارة إلى سلوك آخر مهم لهذه العينات. بالنظر إلى الشكل (12) في مجال الترددات المنخفضة (أقل من 200 هرتز) نلاحظ انخفاض شديد في السعة في منطقة الانحياز الأمامي كما هو الحال في ديودات من السيليسيوم اللابلوري المهدرج المدروسة من قبل العديد من الباحثين[16،17،18،19]. هذا له أهمية كبيرة حيث أنه يدل على أن مقاومة التماس (Contact resistance) في هذه العينات أكبر من مقاومة منطقة النفاد. وبالتالي إن بالإمكان قياس العيوب السطحية (هنا في حال كون مقاومة الوصل أصغر من مقاومة منطقة النفاد فإن هذه الأولى تقوم بحجب العيوب السطحية). ويمكن بالتالي قياس العيوب السطحية من أجل ترددات أقل من التردد الذي نصل عنده إلى الإشباع في السعة والناقلية[20].



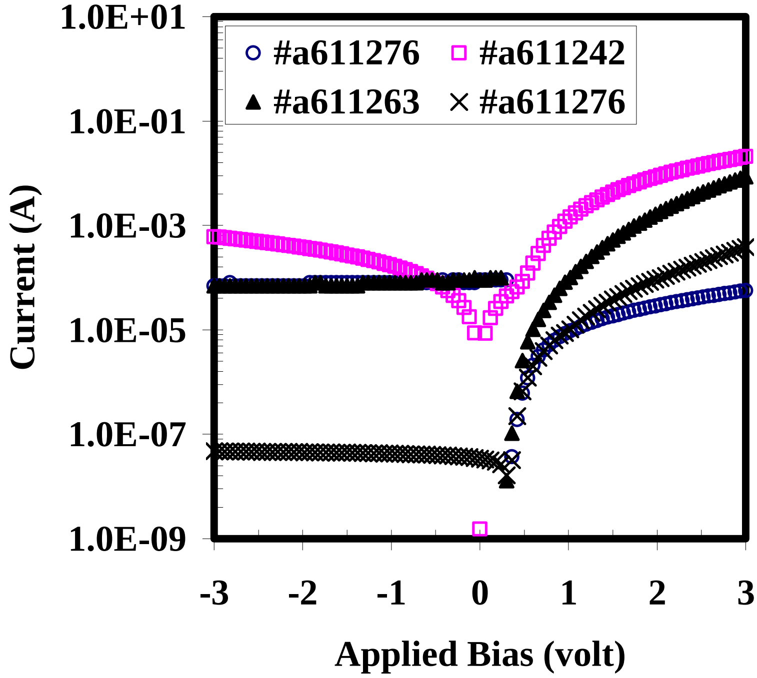
شكل(12): منحنيات C-V و G-V عند درجة حرارة الغرفة لعينة السيليسيوم البلوري من أجل ترددات قياس مختلفة.

ويمكن استخلاص المزيد من المعلومات من هذه المنحنيات وكما رأينا في الفقرة السابقة أن القياس من أجل قيمة معينة من الانحياز المطبق (صغيرة جداً) بدلالة تردد القياس يمكن من قياس تركيز العيوب حتى السطحية منها إذا كان هناك من إشباع . في الشكل (13) نجد القيم التجريبية للسعة والناقلية بدلالة تردد القياس في حال عدم تطبيق أي انحياز على العينة (*V=0*).



شكل (13) منحني السعة (a) والناقلية (b) بدون تطبيق انحياز على العينة مقاسة في درجة حرارة الغرفة لعينات المجموعة الثانية: (●) العينة المرجعية a611262، (▲) العينة a611276، (♦) العينة ذات معدل توضيع 8 Å/S a611261، (x) العينة بمعدل 10Å/S a611242.

ويميز فيه بسهولة كبيرة عدم وجود إشباع من أجل العينة اللابلورية لوجود اشباع في السعة أواللاقية حتى ترددات أقل من 1 هرتز (وحتى أقل من 10 ميلي هرتز) وهذا يتوافق مع نتائج سابقة [17] بينت أنه ليمكن الوصول إلى إشباع في ديودات من السيليسيوم اللابلوري إلاّ من أجل ترددات أقل من الميللي هرتز حيث من الصعب جداً إجراء مثل هذه القياسات تجريبياً. من الشكل (13) نجد أن عينات متعددة الشكال البلورية القياسية تصل إلى حد الشباع في السعة واللاقية من أجل ترددات قياس أقل من 50 هرتز بينما في العينات الموضعة من أجل معدلات توضيع عالية فإن هذا التردد ينخفض إلى حوالي 8 هرتز. إذا نظرنا في منحني الناقلية نجد أنه يبدي ماشبه القمة في كل العينات ماعدا العينات اللابلورية. كما ذكرنا سابقاً أن هذه القمة تقع من أجل ترددات أقل من تردد الشباع وبالتالي تعود إلى العيوب السطحية. من هذه القيم نجد زمن إصدار هذه العيوب السطحية هو 0.04 و 0.1 ثا$^{-1}$



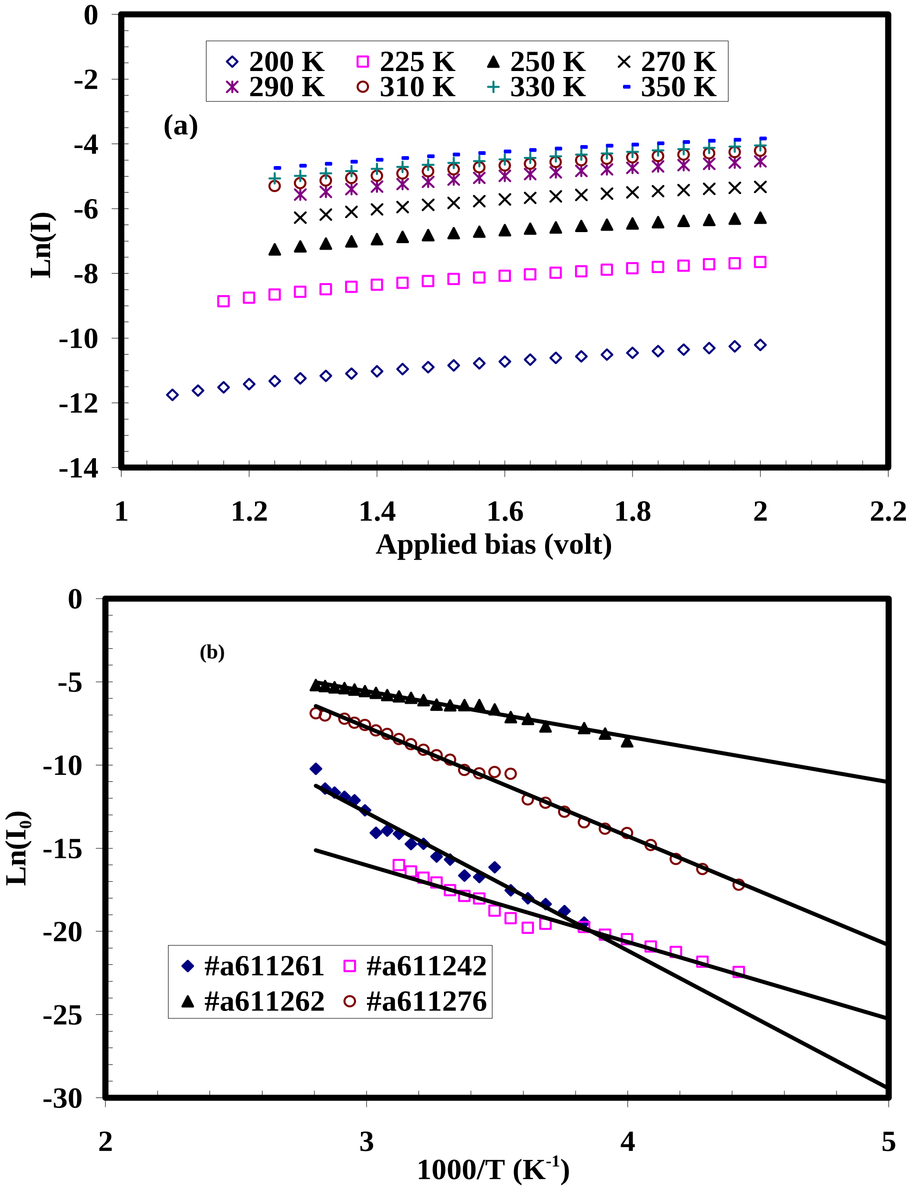
شكل (14): منحنيات تيار-جهد لمختلف عينات المجموعة الثالثة بدرجة حرارة الغرفة حيث أن قيمة التيار مأخوذة بالقيمة المطلقة.

بالنسبة لعينات متعددة الشكال البلورية القياسية والموضعة من أجل معدلات توضيع عالية على الترتيب وهذا يوافق تركيز عيوب 8.13 و $4.13 \times 10^{12} cm^{-2}eV^{-1}$ على الترتيب. من جهة أخرى

وكما هو مبين في الفقرة 4 فإن هذه الطيوف تمكننا من حساب تركيز العيوب باستخدام العلاقة (14) والعلاقة (15) حيث يمكن استخدامهما ضمن الشروط الحدية (عند النقطة $x = W$) ويمثل التردد ω_0 أكبر تردد، في مجال الترددات المنخفضة, الذي تصل عنده إلى الإشباع، نعين تجريبياً قيمة السعة والناقلية الموافقة لهذا التردد لستخدامها في العلاقتين (14) و (15) لحساب تركيز العيوب. لكننا، وكما ذكرنا أعلاه، نحتاج لمعرفة قيمة كمون القفزة لهذه الديودات.

ونعين كمونات القفزة لهذه العينات من خلال قياس منحنيات *I-V* بدرجات حرارة مختلفة (انظر الفقرة 3-2-3). وكما نلحظ من الشكل (14) أن منحنيات تيار-جهد لمختلف العينات متشابهه من حيث السلوك وخاصة بالانحياز الأمامي. كما نجد أن هذه المنحنيات تسلك سلوكاً خطياً بالنسبة للمحور اللوغاريتمي من أجل انحياز أمامي أكبر من 1 فولط. كما هو مبين في الشكل (15) نجد أن منحنيات *ln(I)* بدلالة الانحياز الأمامي من أجل انحياز أكبر من 1 هي خطية تماماً حيث تم حساب J_0 من ميل هذه المنحنيات من أجل عدد كبير من درجات الحرارة ومن ثم حاجز الكمون من ميل خط المستقيم (رسم أرينيوس) $Ln(J_0)$ بدلالة مقلوب درجة الحرارة (كما في الشكل b13). وقد حسب هذا الكمون لكل العينات وأدرج في الجدول (5)

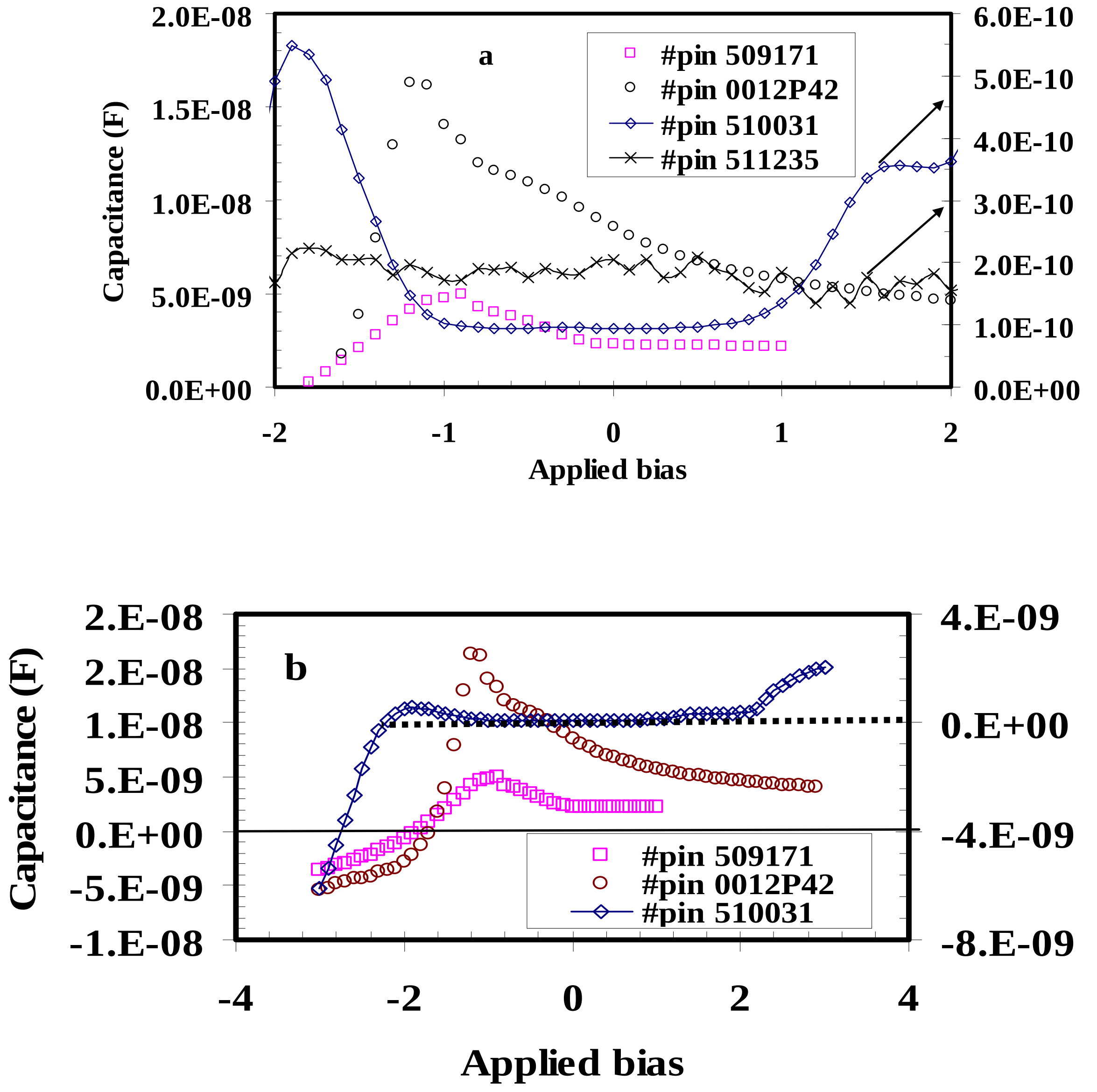
يبين الشكل (15) أن علاقة $Ln(I_0)$ خطية بدلالة مقلوب درجة الحرارة من أجل كل عينات هذه المجموعة وهذا مكننا من حساب حاجز الكمون لكل هذه العينات المعطى بالجدول (5).



شكل (15): لوغاريتم التيار بدلالة الجهد الأمامي المطبق من أجل عدة درجات حرارة (a) ولوغاريتم J_0 المحسوبة من الشكل (a) بدلالة مقلوب درجة الحرارة لمختلف عينات المجموعة الثانية.

أخيراً بقي أن نعرض نتائج المجموعة الرابعة حيث أن هذه المجموعة، كما ورد أعلاه، هي عبارة عن خلايا *p-i-n* حيث أن الطبقة الفعالة (*i*) هي الطبقة المتغيرة المراد دراستها. نبين

الشكل (16) أن سلوك هذه العينات مختلف تماماً عن سلوك العينات السابقة وحتى أنه



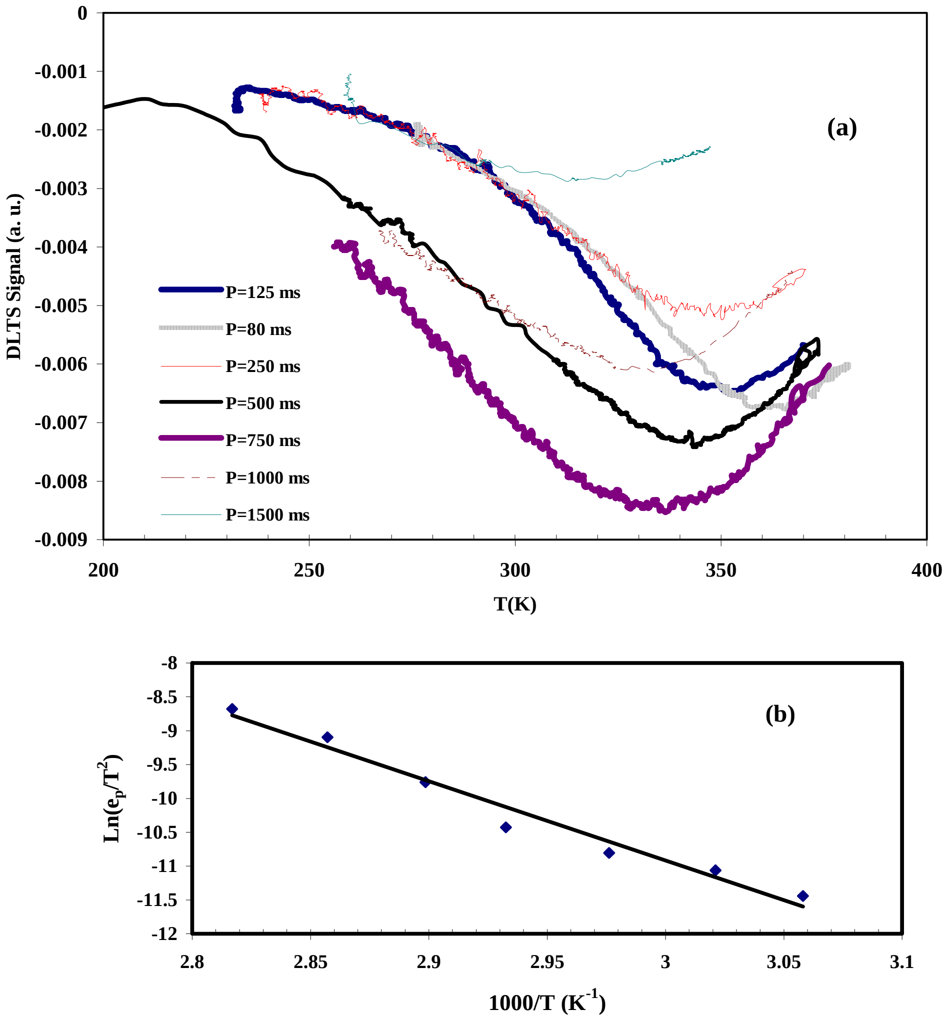
شكل (16):منحنيات سعة-جهد لعينات المجموعة الرابعة مأخوذ بدرجة حرارة الغرفة وعند تردد قياس 10 kHz.

غير مفهوم وخاصة العينات من المجموعة الرابعة (شكل a) #511232 و#511235 و #511251 حيث أننا لم نستطع قياس أي تغير في السعة بدلالة الانحياز المطبق. هذا يدل على وجود خلل في أقطاب هذه العينات حيث من الممكن جداً أن تكون طبقة الوصل الخلفي (التي نطلق عليها الركازة لتأمين الوصل الخلفي) غير موجودة أو مخربة. فيما يخص بقية العينات (شكل b) نجد كل العينات تصبح سعتها سالبة من أجل قيمة انحياز أقل من -2 فولط. هذا يحدث بسبب بنية *p-i-n* لهذه العينات لنه من أجل قيمة كبيرة للانحياز العكسي ربما تصل إلى الطبقة

السفلى (طبقة n) وكذلك الحال بالنسبة للتحيزان الأمامي حيث أن تشكل طبقة p حد أعلى لتغير السعة.

3-5 المطيافية الانتقالية للمصائد العميقة

في البداية لبد من الشارة هنا أننا لم نستطيع قياس كل العينات باستخدام هذه التقنية لعدة أسباب منها أن بعض هذه العينات لم تعطي اشارة DLTS والبعض الخر يختبر بعدد طيف

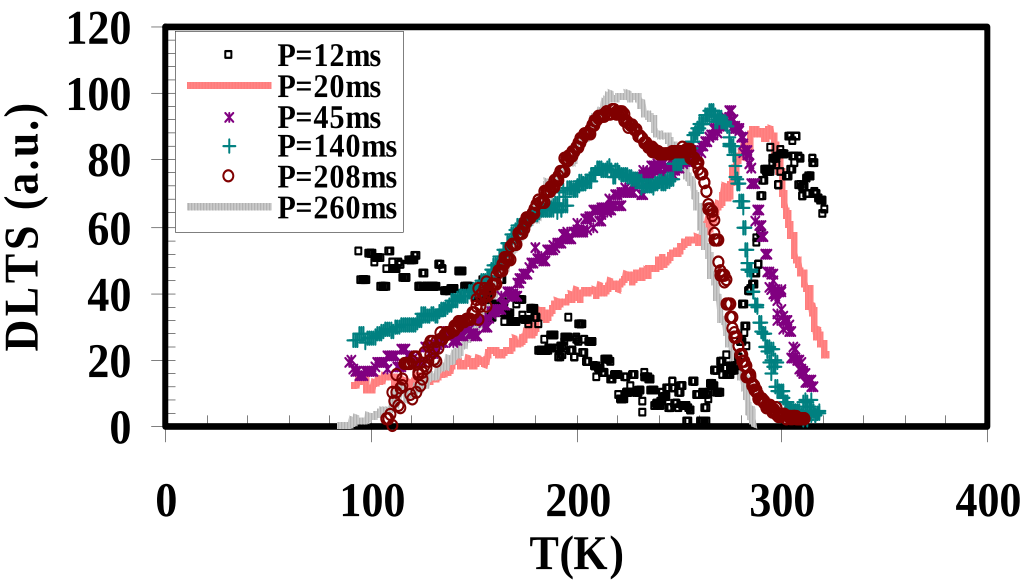


شكل(17): طيوف DLTS لحدى العينات من المجموعة الولى من أجل عدة أدوار (معدل الصدار = 1.72/الدور)(a) وكذلك رسم أرينيوس الموافق(b) من أجل عرض نبضة 1 مللي ثانية.

أو طيفين ولكن بشكل عام استطعنا إجراء تجارب نتائج معبرة ومهمة.

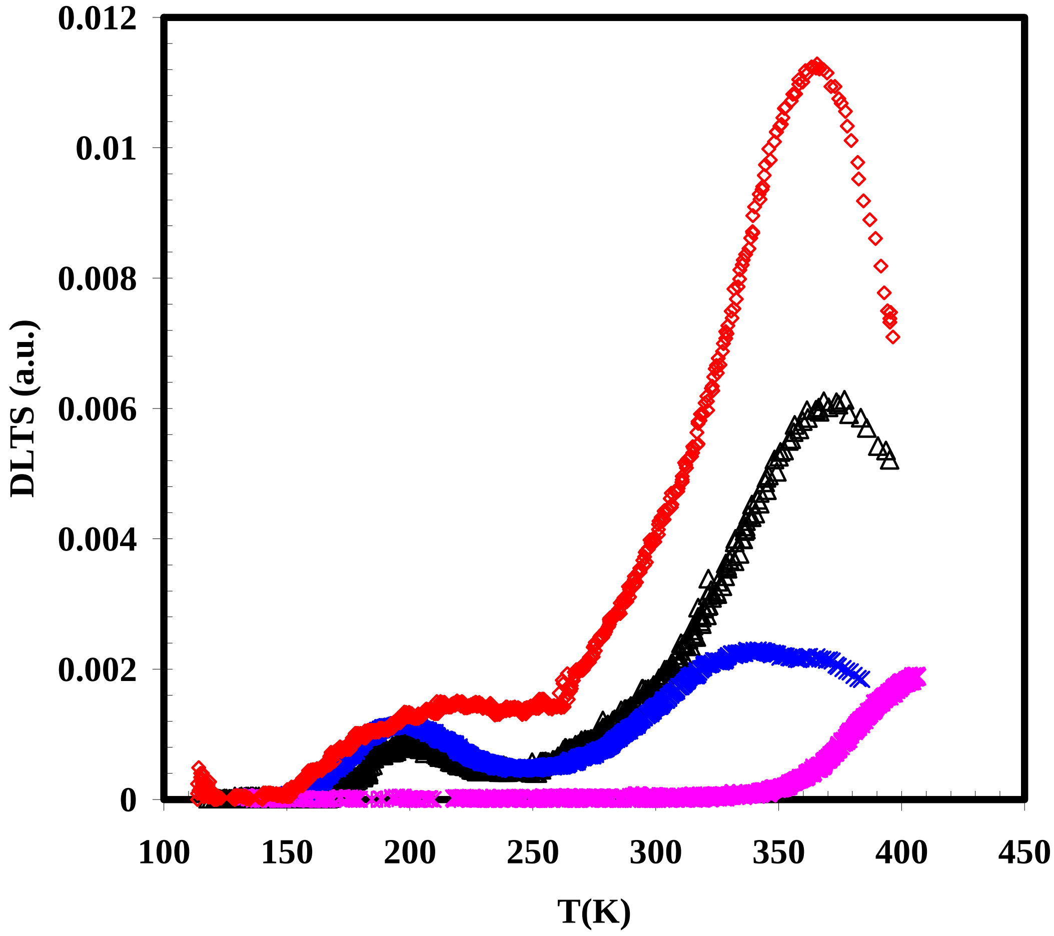
يبين الشكل (17) طيوف إحدى العينات من أجل أدوار مختلفة ونلاحظ هنا أن إنزياح القمم مناسب بشكل نظامي مع تردد النبضة المطبقة وأن رسم أرينيوس الموافق خطي حيث أن طاقة التنشيط الموافقة هي حوالي *1 eV* (جدول 5). ويلاحظ أن عرض هذه القمة الذي يبلغ حوالي 100 K كبير مما يدل على توزع واسع في هذه العيوب ضمن الفجوة الطاقية كما هو متوقع بالنسبة إلى المواد اللابلورية. كما بينت نتائج طيوف DLTS بدلالة عرض النبضة أن هناك تزايد خطي لمطال القمة مع عرض النبضة حتى عرض أكبر من 10 ميلي ثانية بالتوافق مع المرجع[23] مما يدل على أن هذه العيوب بطيئة وأن المقطع العرضي للأسر صغير. تختلف طيوف DLTS في هذه المجموعة باختلاف نوع العينة فبينما يظهر الشكل (17) قمة واحدة عريضة (عينة متعدد الشكال البلوري) فإن عينات من السيليسيوم اللابلوري (#00541) تبدي أكثر من قمة ولكن غير منتظمة ولم نتمكن من حساب طاقة التنشيط إل لعيب واحد فقط في العينة القريبة من الميكروبلوري (#00522) التي تبدي قمة واحدة بطاقة تنشيط *eV 0.77*. هذا الختلاف بعدد القمم وطاقة التنشيط يدل على اختلاف في طبيعة العيوب بدللة معاملت التوضيع.

أما المجموعة الثانية فهي قريبة جداً من عينات المجموعة الولى فهي لتختلف عنها إل بوجود طبقة من السيليسيوم العالي الشائبة موضعة مباشرة على الركازة للحصول على وصل آومي جيد وأيضاً يوجد اختلف في ضغط الغاز. هنا أيضاً نجد اختلف كبير في عدد ومواقع القمم. ففي حين أن العينة اللابلورية (#609111) تبدي عيباً وحيداً يظهر في درجات منخفضة (في المجال 200-300K) ذا طاقة تنشيط تقارب *eV 0.4* (الجدول 5) كما يبدي انتظاماً لفتاً بطريقة انزياحه مع تغير دور النبضة مما يوحي بكونه عائداً إلى طبقة الركازة (عيوب سطحية للسيليسيوم البلوري) حيث أن العيوب العائدة إلى السيليسيوم اللابلوري تبدي قمماً عريضة جداً وتقع عادة عند درجات حرارة عالية. أما العينة (#60981) تحتوي على القل على ثلث قمم (شكل 18) تنزاح بشكل منتظم مع دور النبضة المطبقة. من رسم آرينيوس الموافق حصلنا على طاقات تنشيط لهذه العيوب الثلثة *0.47, 0.50, 0.65 eV* حيث أن هذه القيم جميعها بعيدة عن قيمة طاقة تنشيط العيب اللابلوري المعرفة في الدبيات (*1 eV*) ولكن يتوافق مع متعدد الشكال البلورية كما سنرى فيما بعد. بالنسبة لبقية العينات فقد أظهرت سلوكاً غريباً إذ أعطت نتائج شبيهة جداً بالعينات البلورية وقد تعزى إلى أنها إشارة الركازة وليست إشارة العينة.



شكل(18): طيوف DLTS لحدى عينات المجموعة الثانية من أجل عدة أدوار (معدل الصدار = 1.72/الدور).

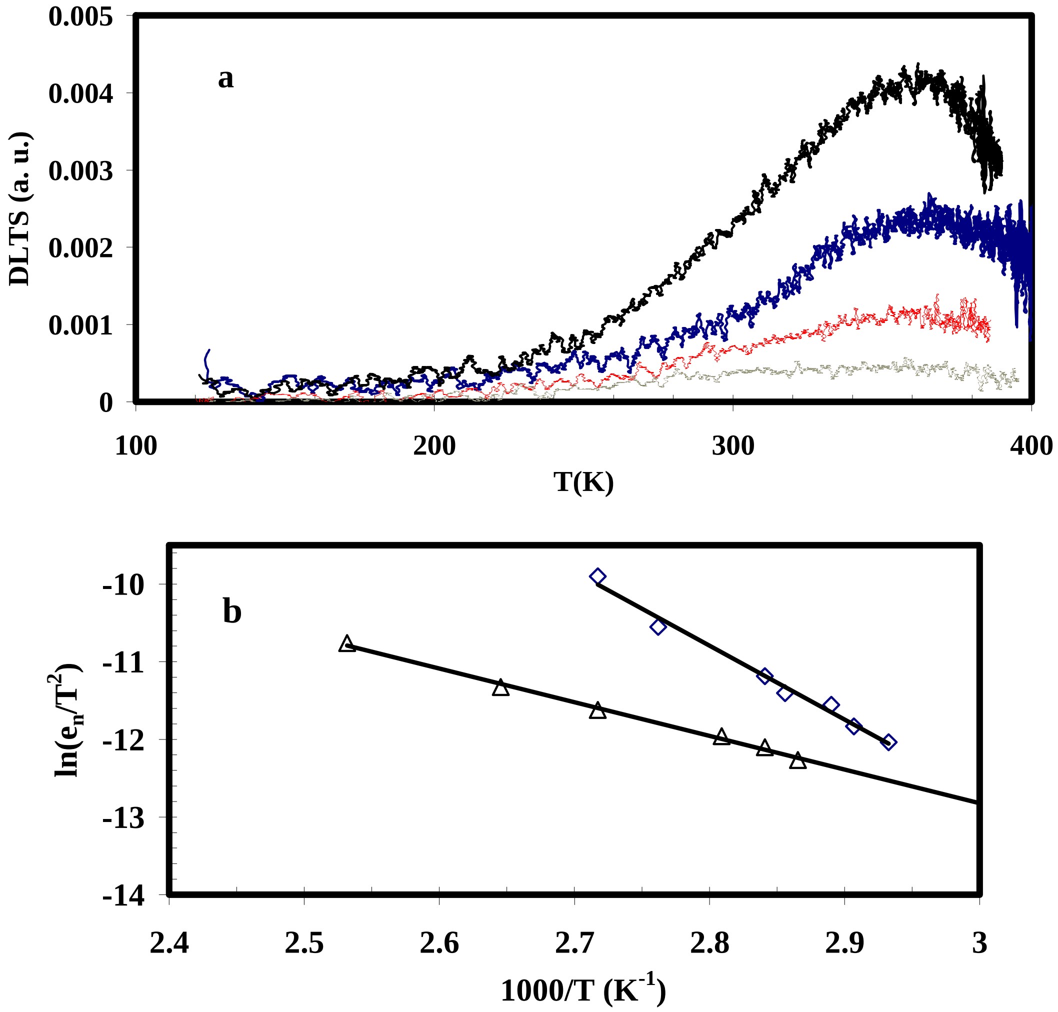
أما بالنسبة للمجموعة الثالثة فإن الشكل (19) يظهر مقارنة بين طيوف مختلف عينات المجموعة. نجد أن طيوف كل هذه العينات (وخاصة قسم درجات الحرارة العالية) يسلك سلوك المواد البلورية من حيث عرض القمة ومواضعها بدللة درجة الحرارة. عادة عينة متعددة الشكال البلورية الموضوعة عند معدل نوعي منخفض. تملك كل العينات أيضاً قمة عند درجة حرارة حوالي 200 K وان عينة البلورية تبدي قمة مضاعفة عند درجات الحرارة العالية. لم نستطع قياس طاقة التنشيط لعينة متعدد الشكال البلورية القياسية لوقوع القمة عند درجات حرارة عالية جداً أما بقية العينات كانات طاقة التنشيط كبيرة نسبياً (أنظر الجدول 5). جعلنا طاقة التنشيط الكبيرة هذه تسلك بالطريقة وبذلك قمنا بحساب طاقة التنشيط أيضاً من تغير الوسعية لننا نستطيع القياس بمسح واحد فقط ولكن لم نجد أي فارق في قيمة طاقة التنشيط المحسوبة. من جهة أخرى يمكن قياس طاقة التنشيط أيضاً من القسم النهائي من تغير الوسعية مع الزمن[25] وهنا وجدنا أيضاً طاقة تنشيط مختلفة جداً عن تلك المقاسة بطريقة DLTS العادية. سيتم مناقشة هذا المر في الفقرة التالية. كما تبين تقيس تغير سعة القمة بدللة عرض النبضة المطبقة أن طيف العينة للبلورية يبدي على القل عمليتين متراكبتين في القسم العلوي لدرجة الحرارة.



شكل(19): طيوف DLTS لمختلف عينات المجموعة الثالثة مأخوذة من أجل عرض نبضة 1 ms ومعدل إصدار $1.72\ S^{-1}$ (◇) طيف العينة #a611242 ، (▲) #a611261 (X) #a611262 (+) #a611276.

أما بالنسبة لعينات المجموعة الرابعة إننا لم نستطع قياس DLTS لكل هذه العينات بسبب عدم وجود أي إشارة. ربما يكون هذا مفهوماً بالنسبة لخلايا معدن الشكل البلورية حيث أنها، وكما رأينا سابقاً، لم تعط أي استجابة لنطبيق الحاجز عليها أما البقية فقد وجدنا إشارة جيدة وتغيير جيد للسعة بدلالة الحاجز المطبق ومع ذلك لم يكن أي قمة في طيوف DLTS لهذه العينات مثل العينات المختلفة Heterojunction. أما عينات معدن الشكل البلورية والميكروبلورية فأعطت طيوف مبينة في الشكل (20) حيث أننا وجدنا قمة واحدة فقط لكلا العينتين تقع في مجال درجات الحرارة العالية ولكن مع فارق كبير في طاقة التنشيط لكلا العينتين وهما *0.97 eV* للعينة 509171 الميكروبلورية و *0.45 eV* لعينة معدن الشكل البلورية a510031. هذه العيوب

بطيئة أيضاً لن يغير سعة إشارة DLTS بدلالة عرض النبضة يبقى خطياً حتى من أجل عرض نبضة أكبر من 10 ميلي ثانية.



شكل (20): طيوف DLTS للعينة a510031 بدلالة عرض النبضة المطبقة (0.01، 0.1، 1، 10 ميلي ثانية) من أجل معدل إصدار $3.44\ s^{-1}$ (a) ورسم أرينيوس للعينتين (b) حيث ( ) للعينة 509171 الميكروبلورية و (Δ) لعينة متعدد الشكل البلورية a510031.

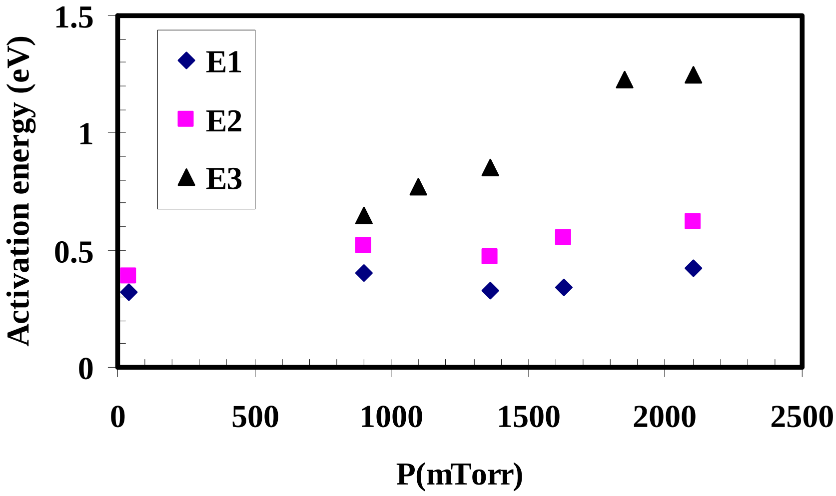
بمقارنة هذه الطيوف مع تلك التي حصلنا عليها على الديودات نجد أن النتائج متشابهة مع فارق وحيد هو أن مطال هذه القمم أقل من تلك التي حصلنا عليها في حال الديودات. مما يدل على أن مطيافية DLTS قادرة أيضاً على سبر العيوب في الوصلات من النوع *p-i-n* .

سنناقش هذا الأمر أيضاً في الفقرة التالية.

6 المناقشة

تم في هذا العمل إجراء عدد كبير جداً من القياسات على أربع مجموعات مختلفة من العينات. كان الهدف من هذا العمل دراسة العيوب المسؤولة عن مفعول ستيبلر وفرونسكي (مفعول شبه الستقرارية). ولكي نتمكن من فهم هذا المفعول لبد لنا من فهم دقيق لعملية تشكل العيوب في هذه المادة ودور وسطاء عملية التوضيع وكذلك عدد ونوعية الطبقات الموضعة. كانت المجموعات الثلثة الولى عبارة عن ديودات حيث تم توضيع طبقة من معدن البالديوم أو البلتينيوم على الطبقة المراد دراستها. الهدف من ذلك هو التأكد من أن الشارة المقيسة هي إشارة من الطبقة المعنية فقط ولتداخل لطبقات أخرى. أما المجموعة الخيرة فهي عبارة عن وصلت *p-i-n* حيث الطبقة الفعالة هنا هي الطبقة *i*. مجمل النتائج المعروضة تبين وجود اختلف كبير في سلوك هذه العينات وحتى ضمن المجموعة الواحدة. لنبدأ من المجموعة الولى حيث ان عدد العيوب يتراوح بين إثنين و ثلثة عيوب. تملك هذه العيوب طاقات تنشيط تتراوح بين 0.3 و1.2 *eV* وكذلك درجات حرارة تنشيط لهذه العيوب تقع ضمن مجال منخفض الحرارة (170-270 K) وآخر في مجال مرتفع (340-400K). تملك العيوب التي تقع في المجال المنخفض طاقة التنشيط الصغر (عادة بين *0.25* و*0.50 eV*). ويلحظ وجود أحد هذه العيوب بطاقة تنشيط حوالي 0.4 eV في كل عينات السيليسيوم اللبلوري المهدرج القياسية لمختلف المجموعات. وتشير نتائج قياس طاقة التنشيط لهذا العيب بطريقة *C,G(T,ω)*, أو بطريقة DLTS إلى نتائج متطابقة تماماً ماعدا العينة 005241 فكانت النتيجة أكبر بحوالي 30%. يعود هذا الختلاف ، على ما يبدو، إلى أن العيب المقاس بطريقة DLTS في هذه العينة ليس العيب المعني كونه يقع في مجال درجة حرارة أعلى من مجال هذا العيب في العينات الخرى وأن هناك عيب إشارته ضعيفة ويقع ضمن نفس المجال في هذه العينة لم نتمكن من قياس طاقة تنشيطه. يدل وجود هذا العيب في كل العينات بغض النظر عن نوع الركازة على أن هذا العيب هو عيب جديد في السيليسيوم اللبلوري المهدرج أو أنه عيب سطحي ليس له علقة بنوع الركازة. لقد وجد عيب مماثل في أفلم من السيليسيوم اللبلوري المهدرج الموضع على ركازة من السيليسيوم البلوري[26] حيث فسر هذا العيب على أنه عائد إلى عملية تبادل لحاملت الشحنة بين عيوب سطحية على الركازة وفلم *a-Si:H*. لبد من التنويه إلى أننا وجدنا هذا العيب, في دراستنا هذه، في عينات وضع الغشاء على ركازة من الزجاج وهذا يدل على أن هذا العيب ليس عيباً خاصاً بالسيليسيوم البلوري وإنما ربما يكون ناتجاً من تبادل شحنات بين عيوب

سطحية يسببها الفلم نفسه والفلم (مركبات على السطح تشترك فيها ذرة السيليسيوم كأكسيد السيليكون SiO_2). أما العيوب الأخرى فتختلف باختلاف العينة فالعيب ذو طاقة التنشيط الخفيض (*0.30 eV*) موجود في عينات السليسيوم البلوري ماعدا العينة a611262 ولكن لم نتمكن من قياسه بطريقة DLTS وربما يعود السبب في ذلك إلى انخفاض درجة حرارة قمته إلى أقل من 150K. ربما يدل غياب هذا العيب في العينة a611262 إلى أنه عائد إلى عيوب سطحية على ركازة السيليسيوم البلوري، لأن العينة الوحيدة الموضوعة على ركازة زجاج هي العينة المذكورة. في حين لا يوجد عيوب أخرى في عينات السيليسيوم اللابلوري الموضوعة على ركازة بلورية فإن العينة الموضوعة على ركازة زجاج تبدي وجود عيبين مختلفين الأول بطاقة تنشيط *0.6 eV* والثاني بطاقة تنشيط حوالي *1.3 eV*. العيب الأول جديد ولم يتم الإشارة لمثله في الأدبيات العلمية أما الثاني فهو قريب من 1 eV الذي تم الإشارة إليه في العديد من الدراسات حيث اعتبر عائداً إلى الروابط المقطوعة [14، 21]. ربما يكون هذا التغير ليس دقيقاً لأنه لو كان هذا العيب عائداً إلى الروابط المقطوعة فيجب أن نراه في كل العينات بغض النظر عن الركازة أو شروط التوضيع. إن وجوده في بعض العينات وغيابه في أخرى يدل على الرجاح إلى كونه عائداً إلى عملية إعادة توزيع للشحنة على عيوب موجودة مسبقاً. يحتاج حسم هذا الأمر إلى المزيد من الدراسة في علاقة هذا العيب بشروط التوضيع ونوع الركازة. إن الاختلاف بين هذه العينة اللابلورية والعينات الأخرى اللابلورية ليس فقط نوع الركازة وإنما أيضاً درجة حرارة التوضيع وضغط الغاز حيث أن درجة حرارة توضيع العينة الأولى أخفض وضغط الغاز أعلى بكثير من العينتين الأخريين مما يشير إلى إمكانية تحفيز تشكل نوع من العيوب وتغييب أخرى. لننتقل الآن إلى نتائج سيليسيوم المتعدد الأشكال البلورية والميكروبلوري. هنا تختلف العيوب من حيث العدد والطاقة باختلاف شروط التوضيع ولكن دون وجود اتجاه معين يحكم هذا التغير. فبينما نجد في المجموعة الأولى أن عدد العيوب في عينة متعدد الأشكال البلورية الموضوعة عند ضغط غاز عالي أصبح ثلاثة بدلاً من اثنين مقارنة مع بقية عينات متعدد الأشكال البلورية لهذه المجموعة نجد في المجموعة الثانية أن هذا العدد ارتفع إلى ثلاثة أيضاً في الميكروبلوري (#609181). الفارق هو أن عيوب متعدد الأشكال البلورية في المجموعة الأولى تملك طاقة تنشيط أكبر من مثيلاتها في المجموعة الثانية والثالثة (انظر الجدول 5). ربما يفسر هذا الأمر باختلاف ضغط الغاز في هذه العينات. إذا رسمنا طاقة تنشيط العيوب التي حصلنا عليها بدلالة ضغط الغاز (نخص هنا فقط العيبين الرئيسيين في العينات) نجد أن طاقة تنشيط هذه العيوب تزداد بازدياد ضغط الغاز كما يظهر الشكل (21) تكون هذه الزيادة أكبر كلما كبرت طاقة التنشيط.

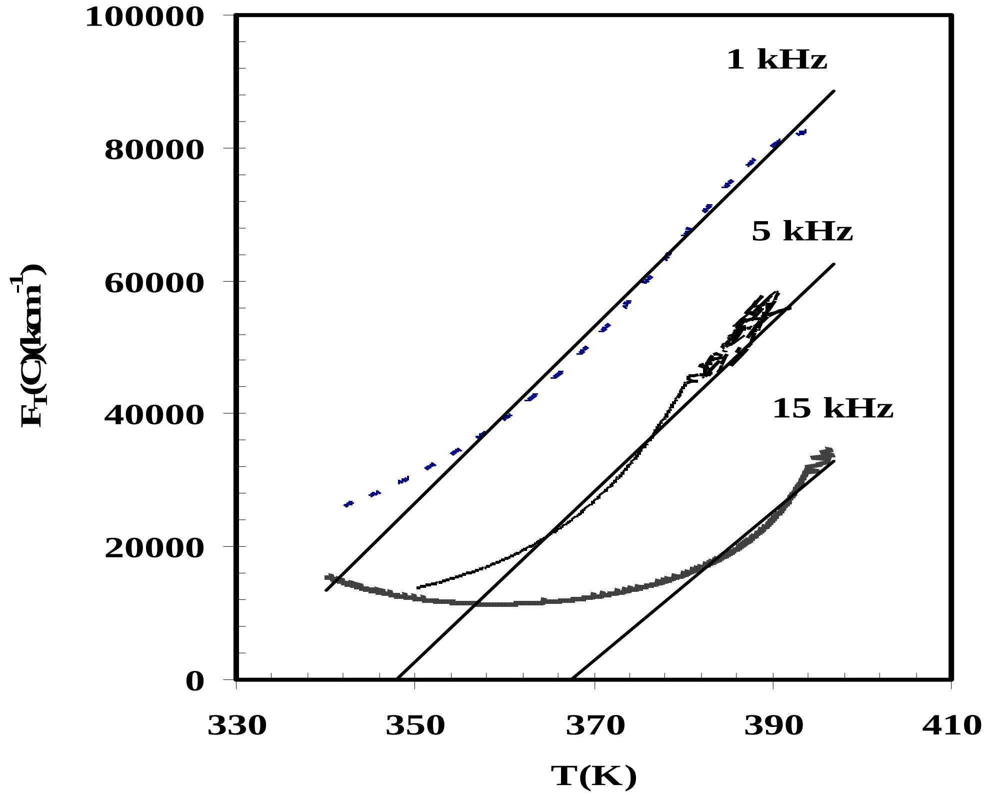


شكل (21): تغير طاقة تنشيط العيوب بدلالة ضغط غاز الأرگون أثناء التوضيع حيث E1 يدل على العيب الواقع عند درجات حرارة الخفض وهكذا.

وقد نتساءل هل لهذا أي دلالة؟ كان أن تغير ضغط الغاز يشكل عاملاً أساسياً في تغير نوع الفلم من اللابلوري ماراً بمتعدد الأشكال البلورية ووصولاً إلى الميكروكريستالي. ربما يكون تغير ضغط الغاز سبباً في تغير توزع هذه العيوب من خلال كبر وصغر الجزر البلورية (حيث أن الميكروبلوري يقع بين 900 و 1200 و متعدد الأشكال البلورية بين 1200 و 1900 *mTorr* واللابلوري خارج هذا المجال) وكذلك حتى اختلاف طبيعتها. فمثلاً طاقة وارتباط الروابط المقطوعة ضمن المادة يختلف حسب اختلاف الحالة من حيث المتوقع اختلاف شحنها والحيز المكاني الذي تشغله في المادة بين اللابلوري ومتعدد الأشكال البلورية ووصولاً إلى الميكروبلوري. ربما يفسر هذا اختلاف طاقة تنشيط العيوب بين الحالات الثلاث لهذه المادة. لابد من التنويه أنه لم يوجد فروق في عينات المجموعة الأولى مجتمعة مع عينات المجموعة الثانية مجتمعة مما يدل على أن طبقة السيليسيوم العالية الشائبة المضافة في عينات المجموعة الثانية لم تلعب دوراً يذكر في عملية تشكل العيوب حيث أننا لم نجد أي خصوصية في عيوب المجموعة الأولى أو الثانية.

تكتسب المجموعة الثالثة من العينات أهمية بالغة وذلك في بيان دور معدل التوضيع في تشكيل العيوب ونوعية المادة. بمقارنة النتائج التي حصلنا عليها لمختلف عينات هذه المجموعة. من منحنيات *C(T, ω), G(T,ω)* نجد أن العينة اللابلورية تحتوي على ثلاث عيوب بطاقة تنشيط *0.43, 0.61, 1.25 eV*. يبدو أن العيب الثاني مشتركاً يظهر في كل عينات هذه المجموعة. كما

ذكرنا سابقاً يمكن أن يكون العيب بطاقة تنشيط *0.43 eV* عيباً سطحياً. وجد هذا العيب أيضاً في عينة متعدد الشكال البلورية الموضعة بمعدل توضيع عالى جداً ولكن بتراكيز أقل بكثير من حالة العينة اللابلورية. في عينة متعدد الشكال البلورية القياسية (معدل توضيع منخفض) وجدنا أيضاً عيب مشابه ولكن بطاقة تنشيط أعلى (*0.53 eV*) وتراكيز أكبر. على عكس العينات السابقة فإن العينة ذات معدل توضيع (*8Å/s*) لا تحتوي على أي قمة في هذا المجال من درجات الحرارة. فقد وجد أن ظهور أي قفزة في منحني السعة $C(T,\omega)$ ناتجة عن عيوب سطحية يتطلب تركيزعيوب أكبر من $5\times10^{12}\ cm^{-2}eV^{-1}$ [26،27]. كما رأينا في الفصل الثالث من هذا العمل أنه يمكننا قياس تركيز العيوب بطريقتين الولى من منحنيات $C(T, \omega), G(T,\omega)$ بحساب المقدار $F_T(C)$ والذي يمثل مشتق مقلوب السعة عند القفزة والثانية من منحنيات $C(V=0, \omega)$, $G(V=0,\omega)$. أما بالنسبة للثانية فتم شرحها في الفقرة السابقة حيث أن النتائج معروضة في الجدول (5) وبما يخص طريقة المشتق فيمكن من حساب الميل إيجاد تركيزالعيوب (كما هو مبين في الشكل 22). من خلال حساب تركيز العيوب بالطريقتين المذكورتين نجد أن هذه العينات تحتوي على تراكيز عيوب منخفضة بشكل عام وأن أخفض تركيز عيوب هي في العينة a611261 الموضعة من أجل معدل توضيع *8Å/s* بالمقابل نجد أن تركيز للعيوب هو في العينة اللابلورية. تؤكد هذه النتيجة قياس تراكيز العيوب من منحني $C(\omega,V), G(\omega,V)$ (انظر الجدول 5).

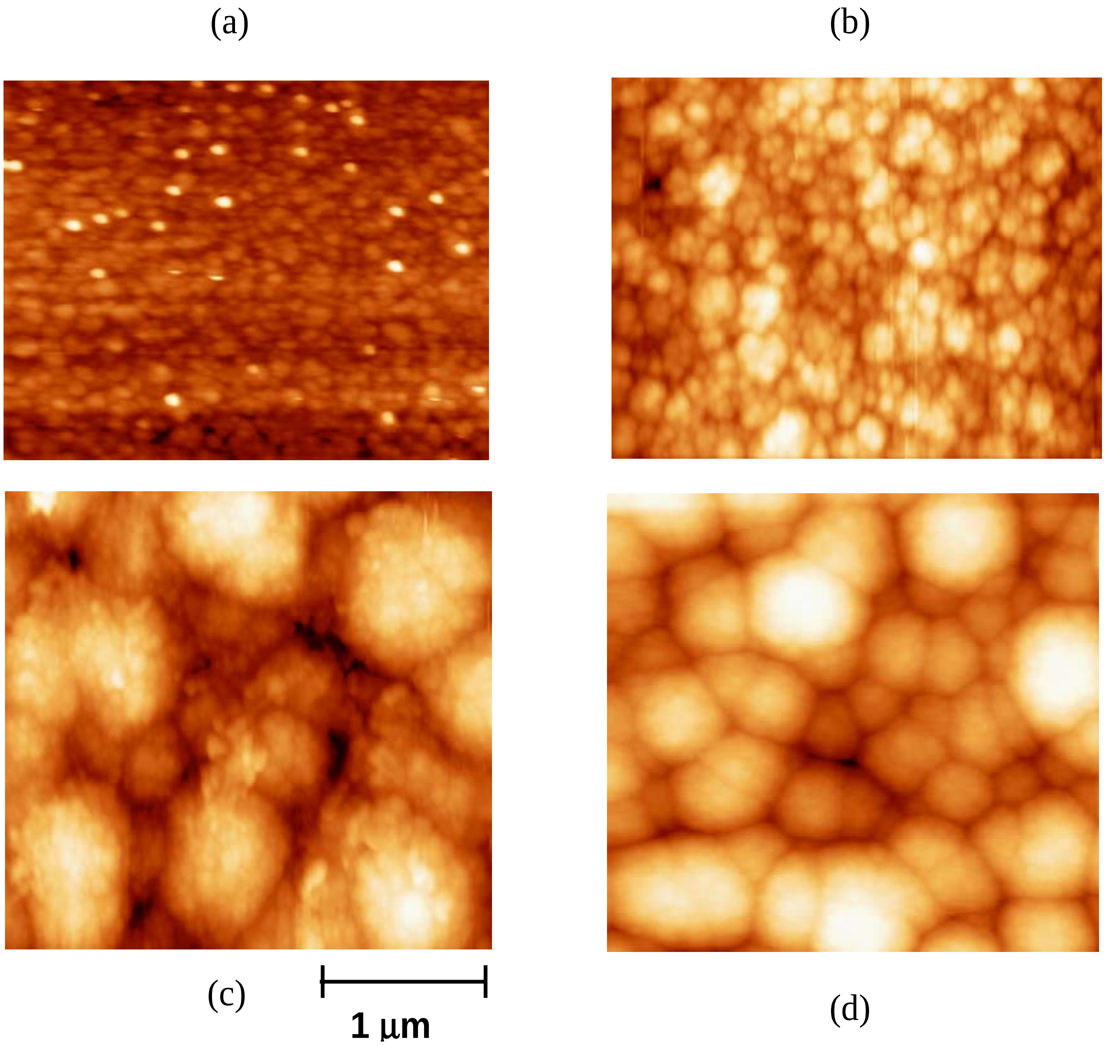


شكل(22): تغير المقدار $F_T(C)$ بدلالة درجة الحرارة للعينة a611242 الموضعة من أجل معدل توضيع عالي جداً من أجل ثلاث ترددات مختلفة. الخطوط المستقيمة تمثل ملاءمة خطية لهذه المنحنيات فوق القفزة.

تعد هذه النتيجة بالغة الهمية كون أننا نستطيع الحصول على مادة جيدة ذات مواصفات عالية وباستخدام معدلت توضيع عالية. فقد تبين نتائج هذا العمل أنه باستخدام معدلت توضيع عالية ليس فقط بإمكاننا الحصول على تحسن جودة الفلم وإنما نحصل على أفلام بجودة حتى أعلى من الفلم الموضعة بمعدلت توضيع ضعيفة. كما تبين هذه النتائج وجود، على ما يبدو، حد أعلى من معدلت التوضيع إذ تتراجع عند تخطيه خصائص الفلم مرة أخرى. يقع هذا الحد في مجال مابين *8* و *10Å/s* اعتماداً على النتائج هنا. من جهة أخرى, نجد أن تراكيز العيوب المقاسة من $G(V=0)$ عند ترددات منخفضة عالية جداً إذا ما قورنت بتلك المقاسة من منحنيات $C(T, \omega)$, $G(T,\omega)$ في عينة اللابلوري وعينة متعددة الشكال البلورية الموضع من أجل معدل توضيع منخفض. يعود هذا الختلف على الرجح إلى اعتماد قياس تراكيز العيوب من منحنيات $C(T, \omega)$, $G(T,\omega)$ على جزء المنحني فقط ذلك الجزء الذي يقع ضمن مجال درجات حرارة عالية (320-400 K) وبالتالي ل يأخذ بعين العتبار العيوب التي تقع عند درجات حرارة منخفضة.

بينت نتائج هذا العمل أيضاً أن عدد العيوب في طيوف DLTS بشكل عام أقل من تلك الموجودة في طيوف $C(T, \omega), G(T,\omega)$ وأن طاقة التنشيط المقاسة من طيوف DLTS أعلى، بشكل عام، من طاقة التنشيط المقاسة من منحنيات $C(T, \omega), G(T,\omega)$. لتفسير هذا الأمر لابد من الإشارة إلى أنه في المواد اللابلورية (أو متشققاتها) فإن طيوف DLTS تكون عادة عريضة جداً وتتداخل القمم مما يصعب معه تحديد العدد بدقة (انظر الأشكال 17، 18،19). إذ يمكننا معرفة عدد العيوب التي تظهر في طيف DLTS بدقة من خلال دراسة تأثير عرض نبضة الملء على شدة القمة (القمم) ولكن تداخل هذه القمم يجعل من الصعب قياس درجة حرارتها. أما الأمر الآخر المتعلق بالقيم العالية لطاقة التنشيط المقاسة من طيوف DLTS فربما يكون عائداً إلى عدة أسباب. منها هو أن هذه المواد اللابلورية وخاصة الغير متشابهة منها (حيث يكون تركيز الشوائب فيها منخفض جداً) تحتوي على تراكيز كبيرة من العيوب ليس فقط من مرتبة تركيز الشوائب ولكن ربما أكبر منها وفي هذه الحالة فإن طيوف DLTS تحتاج إلى معالجة خاصة لكي نتمكن من حساب طاقة التنشيط منهم[25] كما هو الحال في المواد البلورية. الأمر الثاني هو أن قمم DLTS في هذه المواد تكون عريضة جداً وعلى عكس المواد البلورية لا يوجد سوية واحدة للعيب وإنما يوجد توزع سويات في الفجوة الطاقية مما يؤدي إلى تداخل القمم وصعوبة الفصل. ونشير هنا إلى دقة الفصل للعيوب باستخدام طريقة DLTS سيئة جداً والأفضل استخدام طريقة DLTS المعتمدة على تحويلات لابلاس (Laplace Transform DLTS) التي لم تتوفر إمكانية عملها إلا مؤخراً. قبل ختام هذه الفقرة لابد من الإشارة إلى أن تغير قمم DLTS بدلالة عرض نبضة الملء كان خطياً حتى من أجل قيم عالية لعرض النبضة (أكثر من 10 ثانية) وهذا يدل أن هذه العيوب هي عيوب بطيئة ومعدل الأسر لها منخفض.

تم أيضاً في هذا العمل دراسة بنية بعض هذه الأفلام لتدعم كيفياً بعض التفسيرات المذكورة سابقاً، ونخص هنا البنية السطحية لأفلام المجموعة الثالثة، باستخدام مجهر القوى الذرية AFM. يبين الشكل (23) فارق واضح في البنية السطحية لهذه العينات. من هذا الشكل نجد أن حجم الحبيبات البلورية والمسافة بين الحبيبات يزداد بازدياد معدل التوضيع وأن بنية السطح تقترب من بنية متعدد الأشكال البلورية. إذ يظهر الفلم الذي يبدي أفضل الخصائص (الموضع من أجل معدل توضيع 8Å/s a611261) بنية سطحية بين السيليسيوم اللابلوري ومتعدد الأشكال البلورية. على مايبدو إن هذه البنية ملائمة جداً لحصول عملية إشباع للسطح وبالتالي عيوب سطحية قليلة جداً.



شكل (23): صور مجهر القوى الذرية لعينات المجموعة الثانية حيث: (a) a611262، (b) a611261، (c) a611242 و (d) a611276.

يمكن أن يفسر سبب الحصول على عينات جيدة بمعدلات نموذجية مرتفعة على أنه عائد إلى أن الفلم ذات المعدل المرتفع يحتوي على كمية أقل من الواكسيجين بسبب التدفق العالي لغاز السيلان.

لم نتمكن من دراسة عينات *p-i-n* في المجموعة الرابعة عن طريق قياس منحنيات *C(T, ω),* *G(T, ω)* لن القفزات في طيوف السعة كانت ضعيفة جداً وكذلك لم نراقب مع ع وجود قمم في طيوف الناقلية. وقد يعود هذا إلى وجود الطبقة الغير مشابهة بين طبقتين *p* و *n* وكلاهما يساهمان في إشارة تغير السعة والناقلية. ونعتقد أن هاتين الطبقتين تحجبان إشارة الطبقة غير المشابهة. أو قد يكون السبب في ذلك هو أن الوصلة الخلفية لهذه العينات سيئة وخاصة بالنسبة للعينات متعددة الشكال البلورية النانة الموضوعة بدرجات حرارة منخفضة a511251, a511232, a511235 حيث

أننا لم نستطع حتى من قياس أي تغير للسعة بتغير التحياز المطبق. أما بالنسبة للعينات الأخرى فإننا استطعنا إجراء بعض القياسات ولم نتمكن من الحصول على نتيجة حاسمة.

7 – خاتمة

تم في هذا البحث دراسة عدد كبير من العينات قسمت إلى أربع مجموعات حيث بينت النتائج أن إضافة طبقة رقيقة جداً من السيليسيوم البلوري عالية الشائبة فوق الركازة مباشرة لتحسين الوصل الومي ليس لها أي تأثير على آلية تشكل العيوب وعددها. أيضاً لم تظهر نتائجنا أي دور واضح لنوع الركازة في عملية تشكل العيوب وعددها وأن آلية تشكل هذه العيوب وعددها يأتي بشكل رئيسي من شروط التوضيع وخاصة ضغط غاز السيلان ومعدل التوضيع. بينت دراسة تأثير معدل التوضيع على خصائص عينات متعدد الشكال البلورية أن الفلم الموضع بمعدل توضيع عالي تمتلك خصائص جيدة جداً وأفضل من تلك المنخفضة المعدل المصنعة عادة والتي كان يظن أنها تملك أفضل المواصفات. اقترح تفسير ذلك على أنه عائد إلى نسبة الوكسجين المنخفضة في هذه العينات. واخيراً تمت مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها بطرائق قياس مختلفة وبيان قوة وضعف كل طريقة. وقد دعمت دراسة البنية البلورية للسطح بعض التفسيرات إذ يوجد اختلاف كبير في البنية باختلاف شروط التوضيع.

8 التوصيات

يجب استكمال هذا العمل بدراسة تأثير دور الركازة على تركيز العيوب خاصة ودور شروط التوضيع (درجة حرارة الركازة، ضغط الغاز، ....) و ايضاً دور المزج بالارغون أو

الهيليوم وأيضاً دراسة متصلة لعينات مشابهة من النوعين n و p ومقارنتها بغير المشابة. أيضاً يجب استعمال طرائق قياس أخرى مثل طريقة قياس كامل الوسعية بدلالة الزمن من أجل درجات حرارة مختلفة وحساب متحولة لابلاس لها (Laplace transform DLTS). أيضاً من المهم جداً دراسة دور الحماء والتشعيع في هذه العيوب والتأثير عليها. كل هذا يشكل كماً كبيراً من العمل ل يمكن إدراجه في هذه الدراسة.

شكر

نود تقديم الشكر والامتنان للسيد الدكتور المدير العام لهيئة الطاقة الذرية على دعمه المتواصل وكذلك رئيس قسم الفيزياء والزملاء في القسم لتقديمهم كل المساعدة في سبيل انجاح هذا العمل.

9 المراجع

1. D. L. Steabler and C. R. Wronski, ***Appl. Phys***. Lett., **31**, 292 (1977)

2. L. I Maissel and R. Glang, ***Handbook of Thin Film Technology.,*** **McGrow-Hill Book Company**, (1970))
3. J. L. Vossen and W. Kern, ***Physics Today,*** **33**, 26 (1980)
4. M. J. Rand, ***J. Vac. Sci. Technol.,***. **A16**, 420 (1979)
5. R. Reif, ***J. Vac. Sci. Technol.,*** **A2**, 429 (1984)
6. A. G. Hamers, A. Fontcuberta i Morral, C. Niikura, R. Brenot, P. Roca i Cabarrocas***, J. Appl. Phys.,*** **88**, 3674 (2000)
7. P. Roca i Cabarrocas, A. Fontcuberta i Morral, S. Lebib, Y. Poissant***, Pure Appl. Chem.,*** **74**, 359 (2002)
8. C. Voz, J. Puigdollers, A. Orpella, R. Alcubilla, A. Fontcuberta i Morral, V. Tripathi, and P. Roca i Cabarrocas ***J. Non-Cryst. Sol*.,** **299-302**, 1345 (2002)
9. S. C. Moss and J. F. Graczyk, ***Phys. Rev. Letters*,** **23**, 581 (1969)
10. P. Roca i Cabarrocas , S. Hamma, S.N. Sharma, G. Viera, E. Bertran, and J. Costa, J. Non-Cryst. Sol., **227-230**, 871 (1998)
11. D. C. Losee,***. Appl. Phys. Lett***., **21**, 54 (1972)
12. D. C. Losee, J***. Appl. Phys***., **46**, 2204 (1975)
13. . G. I Roberts and C. R. Crowell, ***J. Appl. Phys***., **41**, 1767 (1970).
14. J. D. Cohen and D. V. Lang, ***Phys. Rev. B*****25**, 5321 (1982).
15. J. P. Kleider ***Thin Solid Films***, **427**, 127 (2003)
16. P. Viktorovitch, G. Moddel, ***J. Appl. Phys***. **51** (1980) 4847.
17. A. J. Sneel, K. D. Mackenzie, P. G. Le Comber, and W. E. Spear***, Phil. Mag. B*** **40**,(1979) 1.
18. P. Viktorovitch, and D. Jousse, ***J. Non-Cryst. Solids*** **35-36** (1980) 569
19. J. Bechler, W. Fuhs, H. Mell, and H. M. Welsch***, J. Non-Cryst. Solids*** **35-36** (1980) 587.
20. P. Viktorovitch, ***J. Appl. Phys.*** **52** (1981) 1392.
21. D. V. Lang , J. D Cohen, and J. P. Harbison, ***Phys. Rev. B*****25**, (1982) 5285.
22. R. Zeisel, Dissertation, **Physics Faculty**, **Tu Munich** (2001).
23. حسن حمادة و رامي درويش, *هيئة الطاقة الذرية, تقرير:* **ه ط ذ س-فات ن ب ع** **.329** ***2005.***
24. رامي درويش، , *هيئة الطاقة الذرية, تقرير:* **ه ط ذ س-فات ع ق 77** ***.2000***

25. Alex C. Wang, and C. T. Sah, ***J. Appl. Phys***. **55** (1984) 565
26. A. S. Gudovskikh, J. P. Kleider, R. Stangle, M. Schmidt, and W. Fuhs, Proc. ***19th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf***. (Paris, France 2004) 697.
27. Y. veschetti, J-C. Muller, J. Damon-Lacost, P. Roca i Cabarrocas, A. S. Gudovskikh, J. P. Kleider, P. J. Ribeyron, and E. Rolland, ***Thin Solid Films***, **511-512**, 534 (2006)

ملحق 10

توابع التركيز ρ و H و F في المواد البلورية

حالة المواد البلورية (سويات منقطعة)

إذا أخذنا حالة ديود شوتكي من النوع n في هذه الحالة يمكن إهمال مشاركة حاملات الشحنة القليلة ويكون إلكترونات عصابة الناقلية تخضع لتوزع مكسويل والشوائب تخضع لتوزع فيرمي في هذه الحالة يعطى تركيز الشحنات بالعلاقة[11]:

$$\text{(a1)}\quad \rho(x) = \rho(\psi) = q\left(\sum_{donors} N_i f_i(\psi) - \sum_{acceptors} N_i\left[1 - f_i(\psi)\right] - N_c \exp[-(\psi - \Delta E_F)/kT]\right)$$

حيث يتم الجمع على كل أنواع الشوائب الآخذة والمعطية والتابع

$f_i(\psi) = \{1 + \exp[-(q\psi - E_i)/kT]\}^{-1}$ يمثل احتمال تأين المعطي رقم i وذو طاقة E_i

محسوبة من أسفل عصابة الناقلية N_i تركيز السوية i و N_C تركيز السويات في عصابة الناقلية.

مكاملة المعادلة (a1) نحصل على:

$$H(\psi) = \frac{-2q}{\varepsilon}\sum_{donors} N_i\{(\psi - \Delta E_E) - kT\,\ln[f_i(\psi)/f_i(\Delta E_E)]\}$$
$$+\frac{2q}{\varepsilon}kT\sum_{acceptor} N_i \ln[f_i(\psi)/f_i(\Delta E_E)] + kTN_C\frac{2q}{\varepsilon}[\exp(\Delta E_E/kT) - \exp(-\psi/kT)]$$

أما التابع F فيحسب من الاضطراب في تركيز العيوب والشوائب بعد تطبيق الإشارة المتناوبة بالعلاقة $F(\psi,\omega) = -q(\Delta n + \sum_{donors}\delta n_{ti})/\varepsilon$ حيث $\Delta n_{ti} = N_t\frac{\varphi}{kT}\frac{f_{ti}(1-f_{ti})}{1+i\omega(f_{ti}/e_n)}$ وتغير تركيز الشحنات الحرة [13] $\Delta n = -n_0\varphi/kT$ حيث n_0 تركيز الشحنات الحرة في حالة التوازن و e_n معدل إصدار الإلكترونات.

طريقة الترشيح A-B وقياس معدل الإصدار تجريبياً

من المعروف أن تقنية الـ DLTS هي عبارة عن عملية ترشيح للإشارة الناتجة عن تغير السعة في وصلة p-n أو ديود شوتكي بعد تطبيق نبضة كهربائية بعرض معين ومطال معين. استخدمنا في دراستنا هذه الطريقة الأكثر دقة وتدعى طريقة الـ A-B حيث يتم استخدام كاشف طوري مضاعف يحتوي على مركبة فرق الطور والمركبة التربيعية. المرشح هنا هو عبارة عن إشارة الفرق بين هاتين الإشارتين (انظر الشكل A1). إذا اعتبرنا تواتر النبضة المطبقة هو $f = 1/t_f$ حيث t_f هو دور النبضة المطبقة و S مقدار متناسب مع تغير السعة يكون:

$$S(e_n, t) = S\exp(-e_n t) \qquad \text{(A1)}$$

ويكون الشكل الرياضي للمرشح:

$F(t) = 0$	$0<t<t_f/4$
$F(t) = 2f$	$t_f/4<t<t_f/2$
$F(t) = 0$	$t_f/2<t<3t_f/4$
$F(t) = -2f$	$3t_f/4<t<t_f$

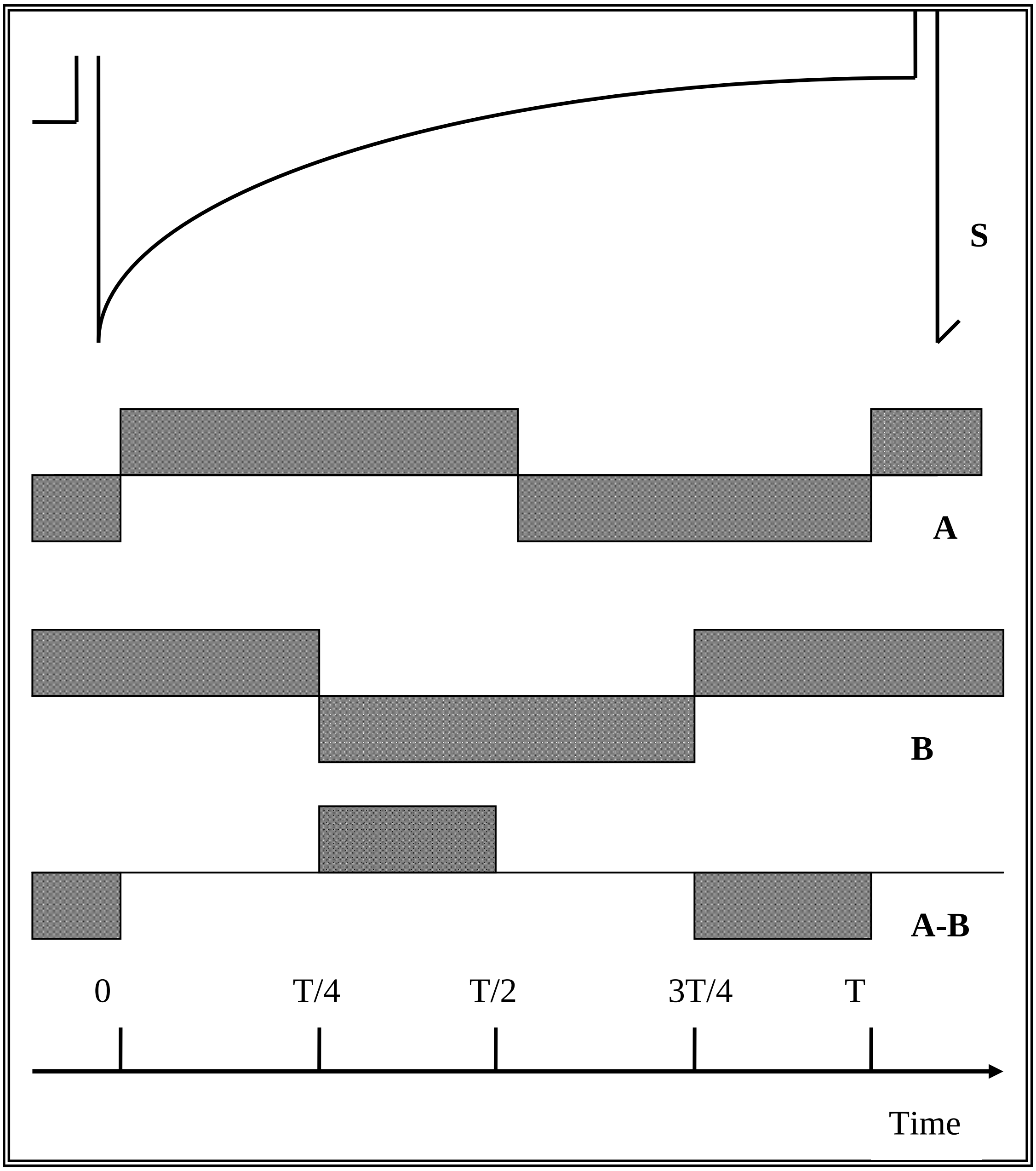
في هذه الحالة تكون الشارة الناتجة عن تغير الوسعية بعد مرورها بالمرشح:

$$R(e_n) = S\int_0^{t_f} F(t)\exp(-e_n t)dt$$

وتكون الستجابة الطيفية

$$R(e_n) = \frac{2Sf}{e_n}\ \exp(-\frac{e_n}{4f}) - \exp(-\frac{e_n}{2f}) - \exp(-\frac{3e_n}{4f}) + \exp(-\frac{e_n}{f}) \qquad \text{(A2)}$$

باشتقاق المعادلة السابقة نجد أن القيمة العظمى للشارة تكون قيمة لـ e_n تساوي إلى e_{n0} $=1.72f$.



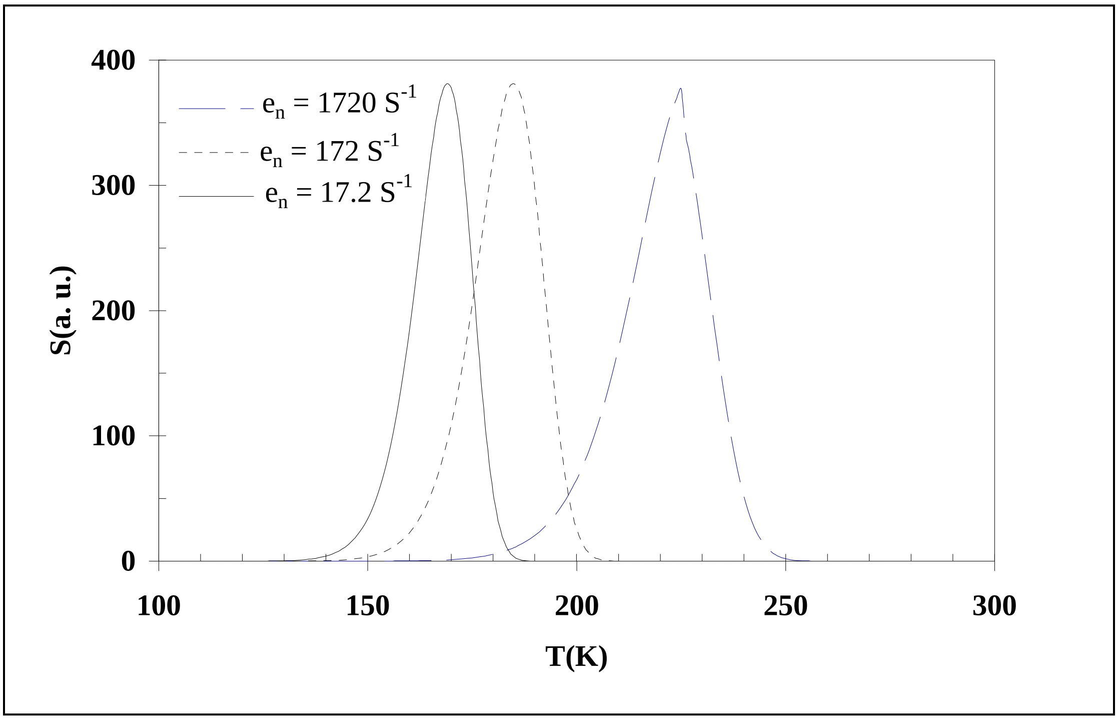
شكل (A1): طريقة الترشيح A-B حيث A تمثل إشارة فرق الطور و B تمثل الشارة التربيعية. S تمثل تغير الوسعية.

من الواضح وفق هذه العلاقة أنه من أجل كل قيمة f توجد قيمة وحيدة لمعدل الصدار عند القمة تساوي e_{n0} ترتبط بدورها بدرجة الحرارة بالعلاقة المعروفة

$$e_n = \gamma_n \sigma_n g_n T^2 \exp(-\frac{E_c - E_T}{kT}) \quad \text{(A3)}$$

حيث σ_n, γ_n و g_n هي على الترتيب المقطع العرضي للأسر, ثابت يتعلق بطبيعة المادة ومعامل الانطباق للإلكترونات. $E_c - E_T$ بعد سوية العيب عن عصابة النقل, T درجة الحرارة المطلقة, k ثابت بولتزمان. إذا عوضنا العلاقة A3 بالعلاقة A2 ورسمنا $R(e_n)$ بدلالة درجة الحرارة نجد أنه كلما ازداد معدل الإصدار عند القمة (أو ازداد التواتر) ازدادت درجة حرارة القمة (الشكل A2). يمكن إعادة كتابة المعادلة (A2) بدلالة e_{n0} (معدل الإصدار المختار تجريبياً) فنحصل:

$$R(e_n) = \frac{2S}{1.72}\exp(-1.72)\left(\frac{e_{n0}}{e_n}\right)\left[\exp\left(-\frac{e_n}{4e_{n0}}\right) - \exp\left(-\frac{e_n}{2e_{n0}}\right) - \exp\left(-\frac{3e_n}{4e_{n0}}\right) + \exp\left(-\frac{e_n}{e_{n0}}\right)\right] \quad \text{(A4)}$$



الشكل (A2): الطيف الصادر عن المرشح المعطى بالعلاقة (A2) من أجل ثلاث تواترات مختلفة.

في الحالة العامة تحدث دوما القمة (القيمة العظمى) في هذه المعادلة عند قيمة الواحد للنسبة e_n/e_{n0}.

SYRIAN ARAB REBABLIC
ATOMIC ENERGY COMMISSION
DAMASCUS- P.O.BOX: 6091

Final Report on Scientific Research
Department of Physics

Defects Study of hydrogenated amorphous silicon samples and thier relation with the substrate and deposittion conditions

Dr. R. Darwich

AECS – PH\FRSR 441 july 2009