

علاقة مفعول الشحنة في أغشية نتريد الكربون غير المتبلورة بالتركيب البنيوي

كمال كايد و كنج الشوفي و أنس الخوام

قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق – سورية

تاريخ الإيداع 2008/11/18

قبل للنشر في 2009/05/12

الملخص

حضرت أغشية نتريد الكربون غير المتبلور بواسطة تبخير أهداف من الغرافيت النقي باستخدام ليزر Nd:YAG نبضي في جو من بلازما النيتروجين بعد التوهج Nitrogen Plasma After Glow(NPA). جرى توزيع الأغشية الناتجة على ركائز من السيلكون ذي النمط n والتوجه البلوري 100. وصفت الأغشية الناتجة بواسطة تقنيات مطيافية رامان و X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) و المجهر الإلكتروني الماسح Scanning Electron Microscopy (SEM). تمت دراسة العلاقة بين معامل تصحيح مفعول الشحنة (Charge Effect) وبنية المادة. دلت النتائج على إمكانية الحصول على معلومات مهمة حول التركيب البنيوي للأغشية المحضرة من خلال هذا المعامل.

الكلمات المفتاحية: التعشية، نتريد الكربون، رامان ، مفعول الشحنة.

The Relation Between Charge Effect and Structure in Amorphous Carbon Nitride Thin Films

K. Kayed ; K. Al-Shoufi and A. Al-Khawwam

Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria

Received 18/11/2008

Accepted 12/05/2009

ABSTRACT

Amorphous carbon nitride thin films were synthesized by pulsed laser ablation (PLA) of graphite target by Nd:YAG pulsed laser. The films were deposited onto n-type silicon 100 substrates in Nitrogen Plasma After Glow (NPA). The films were analyzed by Raman, XPS and SEM spectroscopes in order to investigate the relation between the charge effect coefficient and the structural characteristic of these films. Results have shown that there's a possibility to get important information's about the films structure throw charge effect coefficient.

Key Words: Deposition, Carbon nitride, Raman, Charge effect.

المقدمة

تعدُّ تقنية التوضيع بواسطة الليزر النبضي (Pulsed laser deposition) إحدى التقنيات الواعدة والحديثة نسبياً فعلى الرغم من نجاح تجربتها أول مرة في تصنيع أغشية رقيقة في عام 1965 باستخدام ليزر الياقوت النبضي إلا أن هذه التقنية لم تستغل وتوضع قيد التطبيق العملي إلا بعد نهاية الثمانينات من القرن الماضي حيث ساعدت على التوسع والتنوع في الحصول على بنى جديدة للأغشية الرقيقة المحضرة في درجات حرارة منخفضة نسبياً وبدرجة عالية من التبلور ومستوى تلوث منخفض جداً مع الحفاظ على الاتحاد العنصري (Stoichiometry) [1-4].

يستحوذ البحث عن المواد القاسية اهتماماً كبيراً ولاسيما طرائق التقسية بالتغشية نظراً لما تؤمنه من حماية للأدوات الميكانيكية والأجهزة الحساسة من التآكل و الصدمات، وقد درس استخدام مواد متنوعة في هذا المجال من أهمها نتريد الكربون الذي يعد من المواد الواعدة. فمنذ الدراسة المقدمة من قبل Liu و Cohen [5] التي أفادت بإمكانية وجود النمط البلوري β -C₃N₄ لمركب نتريد الكربون الذي يمكن أن يملك خواص ميكانيكية فائقة مفترضين أن له قساوة تماثل أو تفوق تلك التي يتمتع بها الألماس. الأمر الذي حث العديد من الباحثين العاملين في مجال الأفلام الرقيقة على بذل جهود تجريبية كبيرة باستخدام العديد من التقنيات نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر التذرية الليزرية (laser ablation)، التبخير بالحزم الإلكترونية (electron beam)، التبخير بالرشاشة الكاثودية (sputtering) وتوضيع البخار الكيميائي (CVD) Chemical Vapor- Deposition فضلاً عن طرائق أخرى متفردة وعديدة بصدد محاولة الحصول على هذه المادة الجديدة [6-15]. إن صعوبة الحصول على هذا الطور الجديد المتميز دفعت مجموعات بحثية عديدة إلى دراسة أغشية نتريد الكربون غير المتبلور a-CN_x والتي تملك تطبيقات مهمة ولاسيما في مجال التقسية [16] وحساسات الغاز [17] وكواشف الأشعة تحت الحمراء [18].

تستخدم تقنية XPS لتحديد التركيب الكيماوي للأغشية الرقيقة. وقد استخدمت بشكل واسع لدراسة أغشية نتريد الكربون؛ حيث تزود هذه التقنية بمعلومات كمية ونصف كمية [19]. رغم استخدام XPS لدراسة الحالات الكيماوية في نتريد الكربون ما تزال مسائل مهمة تحت النقاش تتعلق بالمشاكل التي تواجه عمليات توصيف محددة للبيئات الموضعية لكل من الكربون والنتروجين [11] فما يزال تفسير المنحنيات المنشورة من آثار للجدل [20] إذ لا يوجد اتفاق واضح في النشرات حول عائدية طاقات الربط المقابلة لمختلف القمم أو حتى عدد القمم المتحللة. يقسم طيف XPS لالكترونات المدارات 1S الذي يتم الحصول

عليه لأغشية نتريد الكربون إلى عدة مجالات طاقة هي: OIS الخاص بالكترونات الأكسجين و C1s الخاص بالكترونات الكربون و N1s الخاص بالكترونات النيتروجين.

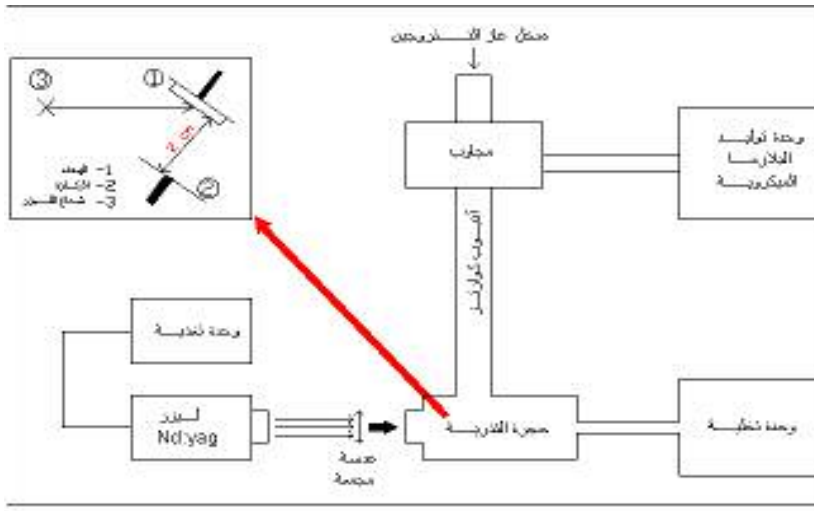
عند دراسة أطياف XPS لنتريد الكربون يؤخذ بالحسبان مفعول الشحنة والذي يرتبط بشكل أساسي بحجم حبيبات المادة ويظهر نتيجة اكتساب السطح الخارجي للحبيبة لشحنة موجبة نتيجة لاقتلاع الالكترونات بواسطة فوتونات أشعة X مما يؤثر في الطاقة الحركية للالكترونات المنطلقة، والذي يؤدي إلى انخفاض طاقتها الحركية ومن ثم انزياح طاقات الربط المسجلة باتجاه الطاقات العليا بالمقدار E والذي يسمى معامل الانزياح بفعل أثر الشحنة. إن ضم النتروجين إلى أغشية نتريد الكربون يعزز مفعول الشحنة [11] لأنه يؤدي إلى خفض ناقلية الأغشية بشكل كبير، مما يؤدي إلى بقاء الشحنة السطحية للحبيبات عند اقتلاع الالكترونات. للتغلب على هذا المفعول يتم إجراء تصحيح لأطياف XPS باستخدام قمة الغرافيت والتي تقع في مجال طاقات الربط المنخفضة من طيف C1s عند 284.6 eV [11,21] كقمة مرجعية. حيث يعرف الفرق بين الموقع الفعلي لقمة الغرافيت والقيمة 284.6eV بمعامل التصحيح. تتم عملية التصحيح بطرح معامل التصحيح من القيم العددية لمواقع جميع القمم، حيث تدل النتيجة النهائية على القيم الفعلية لطاقة الربط المرتبطة بكل قمة.

تستخدم مطيافية رامان بشكل واسع لتقصي وسطاء الربط في أغشية نتريد الكربون مثل نسب الروابط ذات التهجين sp^2 و sp^3 والكثافة وكذلك محتوى الهيدروجين في الغشاء. تتأثر أطباف رامان بمواقع التهجين sp^2 ذلك لأن طيف رامان يثار بواسطة ليزر مرئي حساس للكربون sp^2 ومن ثم فإن التعنقد واللاترتيب للطور sp^2 هي العوامل الرئيسية التي تؤثر في موقع القمة وعرضها وشدتها [22]. إن طيف رامان لأغشية نتريد الكربون اللامتبلورة مشابه لطيف رامان للكربون الشبيه بالألماس (DLC)، حيث يتكون من عصابة متناظرة يمكن تحليلها إلى عصابتين بخصائص مختلفة تقع الأولى في المجال $1560-1600\text{cm}^{-1}$ وتسمى العصابة G وهي مرتبطة باهتزازات الامتطاط في المستوي لأزواج أو سلاسل من ذرات الكربون المرتبطة بالتهجين sp^2 والتي تكون الطبقات الشبيهة بالغرافيت graphite-like لمناطق sp^2 المكروية. تقع العصابة الثانية حول 1350cm^{-1} وتسمى العصابة D ويرجع وجودها إلى عدم ترتيب زوايا الربط في المناطق المكروية الشبيهة بالغرافيت نتيجة الارتباط بذرات الكربون sp^3 التي تؤدي إلى الحد من مفاصل التبلور لمناطق sp^2 المكروية في الغشاء [23].

يهدف هذا العمل إلى دراسة إمكانية ربط الانزياح بفعل أثر الشحنة في أغشية نتريد الكربون غير المتبلورة مع الخصائص البنوية لهذه الأغشية ومدى إمكانية تقصي التبدلات التي تطرأ على التركيب البنوي للمادة من خلال تتبع تغيرات هذا العامل.

مواد البحث وطرائقه

أجري العمل التجريبي في مخبر التذرية الليزرية والبلازما المكروية الموجود في قسم الفيزياء - هيئة الطاقة الذرية، حيث تمت عملية التوضع في حجرة خلاء من البيركس (الشكل 1) عن طريق تذرية أهداف الغرافيت ذات نقاوة عالية (99.95% مصنعة من قبل شركة Good Fellow) بواسطة ليزر ND:YAG نبضي طراز (RD-YG-300) ذي طول موجي 1064nm وعرض نبضة 20ns. تم ضبط معدل تكرار نبضة الليزر على القيمة 1Hz. ضبطت زاوية ورود أشعة الليزر على الهدف على القيمة 45° بالنسبة لسطح الهدف. قبل إدخال النتروجين إلى الحجرة تم تخليتها حتى 10^{-4} pa بواسطة منظومة تخلية مؤلفة من مضخة دورانية وأخرى انتثارية. تمت عمليات التبخير في الخلاء وفي جو من بلازما النتروجين (Nitrogen Plasma Afterglow (NPA) باستطاعة 1000W مولدة بواسطة جهاز توليد ونقل الأمواج والبلازما الميكروية من شركة SAIREM الفرنسية وتحت ضغوط تراوحت بين 10 pa و 1000 pa. تؤدي بلازما النيتروجين إلى رفع درجة حرارة الحجرة لتصبح في المجال من 27 إلى 177 درجة مئوية حسب الضغط المطبق [12].



الشكل (1) رسم تخطيطي لمنظومة التذرية الليزرية.

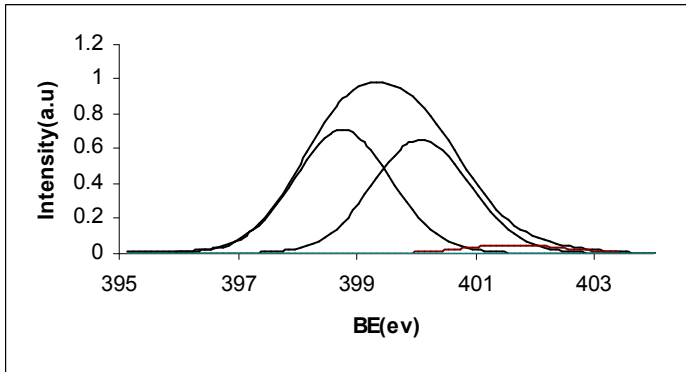
جرى توضع الأغشية المحضرة على ركائز من السليكون ذي النمط n والتوجه البلوري 100 وذي النقاوة العالية 99.999999%. تراوح ثخن العينات المحضرة ما بين 100 و 250 نانومتراً من أجل زمن تبخير 10 دقائق. أما معدل الترسيب فهو يتراوح ما بين 10nm/minute و 25nm/minute. يحتوي الشكل (1) على رسم تخطيطي لمنظومة التذرية الليزرية.

وصفت الأغشية الناتجة بواسطة تقنية X-ray Photoelectron (XPS) Spectroscopy باستخدام منظومة Leybold LHS11 MCP. تم مسح كل مجال عشر مرات وبخطوة 0.1eV من أجل الحصول على أطياف بدقة عالية.

كذلك وصفت الأغشية المحضرة بواسطة مطيافية رامان باستخدام مطياف Micro Raman Jobin-Yvon T64000 المزود بليزر أرغون ذي طول موجي 514nm وقدرة فصل 2cm^{-1} . درست طوبوغرافية الأغشية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح SEM من نوع JEOL-type JSM 6400F بتكبير قدره 100000 مرة.

النتائج والمناقشة

جرت دراسة وتحليل أطياف XPS المسجلة من أجل جميع العينات المحضرة بالشروط المذكورة مسبقاً. يبين الشكل (2) نموذجاً لطيف N1s وهو للعينة المحضرة عند الضغط 100Pa، وذلك بعد إجراء عملية تصحيح مفعول الشحنة. جرى نشر الطيف N1s كما هو موضح في الشكل (2) إلى ثلاث قمم رئيسية تتسبب كل منها إلى النتروجين المرتبط بالكربون ذي التهجين sp^3 وتقع عند 398.75eV والنتروجين المرتبط بالكربون ذي التهجين sp^2 وتقع عند 400.11eV والنتروجين المرتبط بالأوكسجين وتقع عند 401.77eV. اعتمد على منشور الطيف N1s في حساب نسبة تركيز ذرات النيتروجين المرتبطة بذرات الكربون وفق التهجين sp^3 إلى التركيز الكلي لذرات النيتروجين المرتبطة بذرات الكربون في الغشاء وفق التهجينين sp^2 و sp^3 والتي رمز إليها بالرمز M.



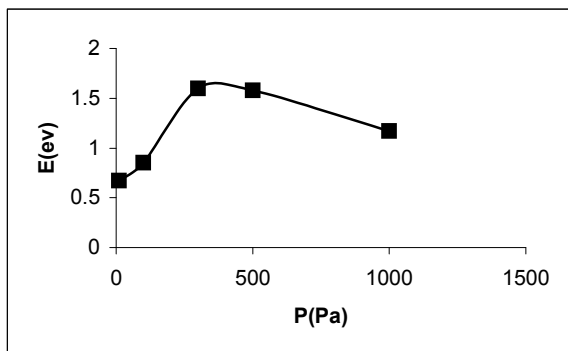
الشكل (2) طيف N1s للعينة المحضرة عند الضغط 100Pa .

يبين الجدول (1) قيم معامل الانزياح بفعل أثر الشحنة لجميع العينات حيث أشير إليه بالرمز E والضغط المقابل لكل عينة وكذلك قيم المعامل M.

الجدول (1) قيم المعاملات P و E و M.

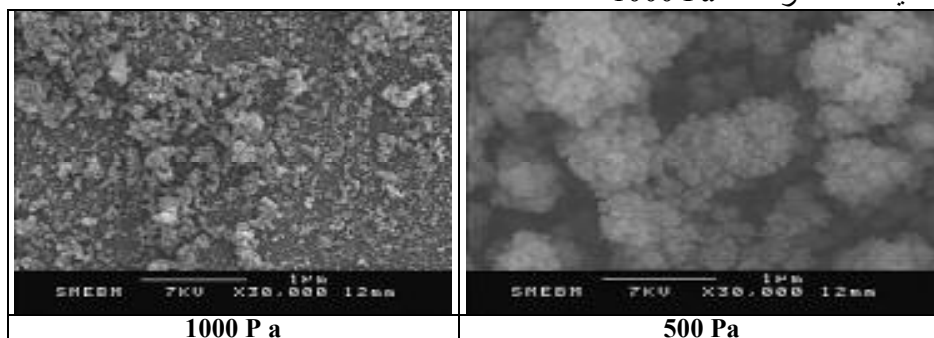
M	E(eV)	P (Pa)
0.569767	0.674839	10
0.520207	0.854509	100
0.34188	1.598483	300
0.393096	1.580206	500
0.442411	1.171000	1000

يبين الشكل (3) تحولات الانزياح E بدلالة الضغط P. نلاحظ من هذا الشكل أن المنحنى المرسوم يمر بنهاية عظمى موافقة لقيمة الضغط $P=300\text{pa}$.



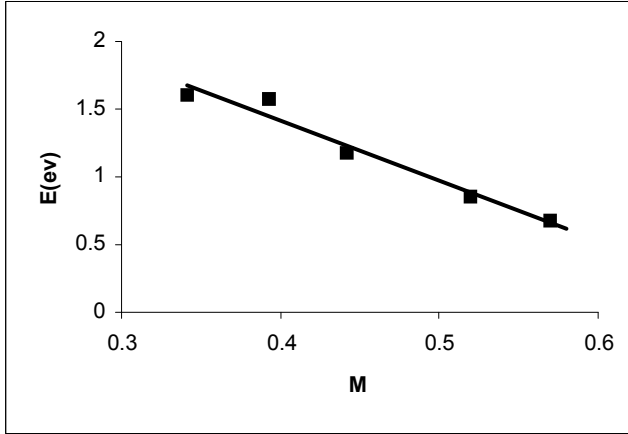
الشكل (3) تحولات الانزياح E بدلالة الضغط P.

ونظراً لارتباط قيمة المعامل E بحجم عناقيد الحبيبات [11] نستنتج أنه بازياد الضغط بعد 300Pa تحدث تغيرات في بنية الأغشية تسمح بالحصول على عناقيد ذات حجم أقل، وهذا ما تؤكده الصور المأخوذة بواسطة المجهر الالكتروني الماسح (الشكل 4)؛ حيث نلاحظ أن حجم العناقيد أكبر من أجل العينة المحضرة عند 500 Pa عنه من أجل العينة المحضرة عند 1000 Pa.



الشكل (4) الصور المأخوذة بواسطة المجهر الالكتروني الماسح للعينات المحضرة عند الضغوط 500 Pa و 1000 Pa.

يمكن التعرف على طبيعة هذه التحولات من خلال دراسة تحولات الانزياح E بدلالة النسبة M (الشكل 5)، حيث نلاحظ وجود خطية في العلاقة بين هذين المقدارين، وهذه نتيجة مهمة لأنها تشير إلى إمكانية تقصي تغيرات M من خلال المقدار E . نلاحظ تناقص قيم E مع تزايد قيم النسبة M التي تعبر عن نسبة تركيز ذرات النيتروجين المرتبطة بذرات كربون وفق التهجين sp^3 إلى التركيز الكلي لذرات النيتروجين المرتبطة بذرات كربون في الغشاء. ولكن من المعروف أن ازدياد تركيز ذرات الكربون ذات التهجين sp^3 يؤدي إلى انخفاض الناقلية ومن ثم ازدياد قيمة E [11]. لذلك يمكن تفسير تناقص قيمة E مع ازدياد M بتناقص حجم الحبيبات مع ازدياد النسبة M لأن الارتباط بذرات الكربون ذات التهجين sp^3 يؤدي إلى الحد من مقياس التبلور لمناطق sp^2 المكروية في الغشاء [23] والذي يؤدي إلى انخفاض قيمة E تبعاً لانخفاض حجم الحبيبات.

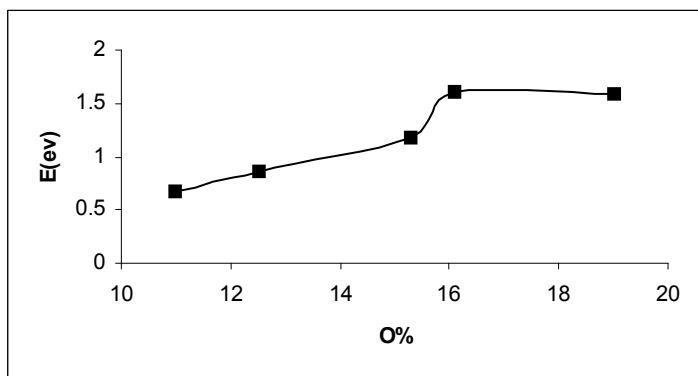


الشكل (5) المنحنى البياني لتحولات الانزياح E بدلالة النسبة M

يملك الأكسجين المندمج في الغشاء دوراً مهماً في عمليات التأثير المتبادل بين الالكترونات والشحنة السطحية للحبيبة نظراً للكهرسلبية العالية التي يتمتع بها هذا العنصر. يمثل الشكل (6) تحولات E بدلالة نسبة الأوكسجين في الغشاء. حُسبت نسبة الأوكسجين في الأغشية من خلال العلاقتين الآتيتين

$$O/C = (A_O/2.49)/(A_C/1.00), \quad N/C = (A_N/1.61)/(A_C/1.00) \quad [24]$$

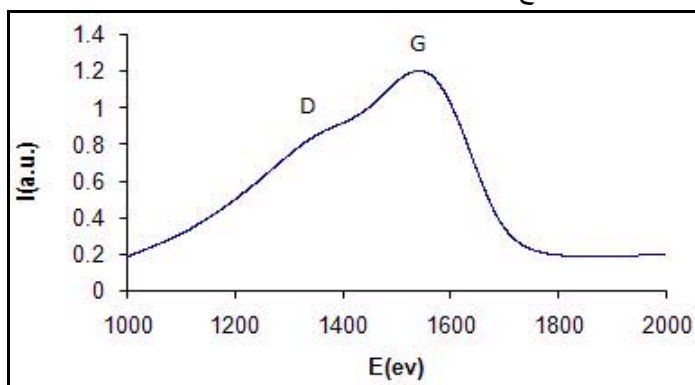
حيث A_O و A_C و A_N هي المساحات تحت الخطوط الطيفية $O1s$ و $C1s$ و $N1s$ والمقادير 1.00 و 2.49 و 1.61 معاملات الحساسية الذرية لكل من الكربون والأكسجين والنيتروجين.



الشكل (6) تحولات E بدلالة نسبة الأوكسجين في الغشاء

نلاحظ ازدياد قيمة E مع ازدياد نسبة الأوكسجين حتى الوصول إلى مرحلة تصحيح فيها E مستقلة تقريباً عن نسبة الأوكسجين يمكن تفسير هذا السلوك انطلاقاً من حقيقة أن دمج الأوكسجين في الغشاء يؤدي إلى زيادة ثغرة الطاقة الضوئية في الغشاء لأن الأوكسجين يسهم في تقليل كثافة العيوب في الغشاء [25]، وهذا يؤدي إلى انخفاض الناقلية الكهربائية للغشاء ومن ثم ازدياد قيمة الانزياح E.

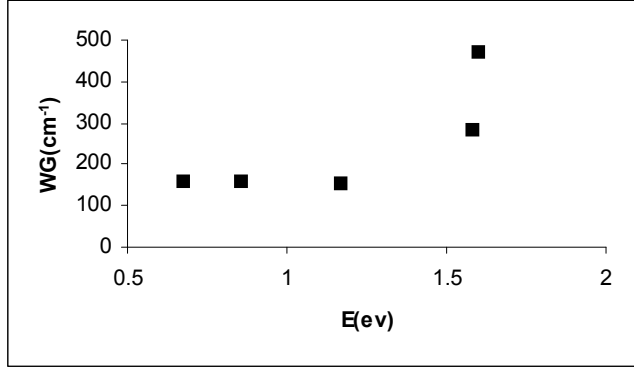
يمثل الشكل (7) طيف رامان للعينة المحضرة عند الضغط 100 Pa. يمكن من هذا الشكل ملاحظة أماكن تواجد كل من القمتين D و G.



الشكل (7) طيف رامان للعينة المحضرة عند الضغط 100Pa.

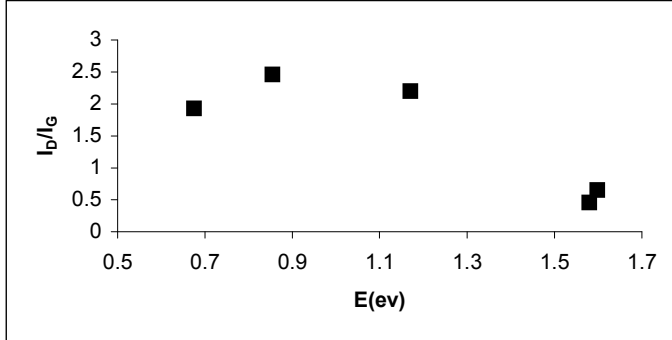
يمثل الشكل (8) تحولات عرض القمة G بدلالة الانزياح E حيث نلاحظ ثباتية في قيمة W_G مع ازدياد E حتى الوصول إلى قيمة محددة للمقدار E (نحو 1.17eV) ومن

ثم تبدأ بالازدياد. ونظراً لأن ازدياد قيمة عرض القمة G يدل على انخفاض حجم عناقيد sp^2 في الغشاء [26] يمكن اعتبار تغيرات قيمة E مؤشراً على التغيرات التي تطرأ على حجم هذه العناقيد.



الشكل (8) تحولات عرض القمة G بدلالة الانزياح E

تؤدي درجة الترتيب والتي تتناسب عكساً مع نسبة شدتي القمتين D و G دوراً مهماً في تحديد خصائص أغشية نتريد الكربون [22]، لذلك قمنا بدراسة العلاقة بين I_D/I_G والمقدار E كما هو مبين في الشكل (9). بمقارنة معطيات الشكل (9) مع معطيات الشكل (8) نلاحظ أن انخفاض قيمة درجة اللاترتيب مع زيادة E تتوافق مع ازدياد قيمة WG ، ونظراً لأن انخفاض قيم درجة اللاترتيب وارتفاع قيم عرض القمة G يدل على صغر حجم عناقيد sp^2 [27] نستنتج أن حجم العناقيد يتناقص مع ازدياد قيمة E ، وهذا يتوافق مع ما توصلنا إليه عند مناقشة معطيات الشكل (5)، وكذلك مع معطيات صور المجهر الإلكتروني الماسح (الشكل 4).



الشكل (9) تحولات درجة الترتيب بدلالة الانزياح E

أخيراً درست عينات محضرة ضمن الشروط نفسها من الضغط ولكن باستخدام غاز النيتروجين الجزيئي، وقد أجرينا عليها دراسة مقارنة مع العينات المحضرة باستخدام البلازما، وحصلنا من خلال هذه المقارنة على نتائج مهمة تشكل مادة عمل آخر قيد النشر.

الخاتمة

جرى في هذا العمل دراسة إمكانية إعطاء الانزياح بفعل أثر الشحنة في أغشية نتريد الكربون غير المتبلورة بعداً جديداً فضلاً عن كونه معامل تصحيح، وذلك من خلال تقصي إمكانية ربط الانزياح بفعل أثر الشحنة مع الخصائص البنيوية لهذه الأغشية، ومدى إمكانية تقصي التبدلات التي تطرأ على التركيب البنيوي للمادة من خلال تتبع تغيرات هذا العامل. دلت النتائج على أنه يمكن من خلال الانزياح بفعل أثر الشحنة الاستدلال على التغيرات البنيوية التي تطرأ على بنية الغشاء عند تغير الضغط في أثناء الترسيب، وكذلك الحصول على معلومات حول التركيب الكيماوي للأغشية من خلال علاقة الانزياح بالمقدار M . وجدنا أيضاً أن الانزياح بفعل أثر الشحنة يساعد على بيان أثر ارتباط الأكسجين في الغشاء. كما وجدنا أن الانزياح بفعل أثر الشحنة يعدُّ مؤشراً جيداً على حجم عناقيد sp^2 و الذي حصلنا على معلومات عنه من خلال المقارنة بين سلوك كل من عرض القمة G ودرجة اللاترتيب في الغشاء بدلالة التغيرات في قيمة معامل الانزياح بفعل أثر الشحنة.

كلمة شكر

نود أن نشكر هيئة الطاقة الذرية ممثلة بالأستاذ الدكتور إبراهيم عثمان على التشجيع والدعم الذي قدم خلال إنجاز هذا البحث. وأيضاً نخص بالشكر الدكتور بسام العبد الله من جامعة نانت - فرنسا على المساعدات القيمة التي قدمها لإنجاز هذا العمل

المراجع REFERENCES

- [1] R.K. Singh and J. Narayan, Phys. Rev. B 41, (1990) 8843.
- [2] D.H. Lowndes, D.B. Geohegan, A.A. Puzos, D.P. Norton, and C.M. Rouleau, Science 273, (1996) 898.
- [3] J.J. Cuomo, D.L. Pappas, J. Bruley, J.P. Doyle, and K.L. Saenger, J. Appl. Phys. 70, (1991) 1706.
- [4] R.M. Mayo, J.W. Newman, A. Sharma, Y. Yamagata, and J. Narayan, J. Appl. Phys. 86, (1999) 2865.
- [5] A.Y. Liu, M.L. Cohen, Science 245 (1989) 841.
- [6] F.L. Freire Jr., G. Mariotto, C.A. Achete, D.F. Franceschini, Surface and Coatings Technology 74-75 (1995) 382.
- [7] F. Fujimoto, K. Ogata, J. Appl. Phys. L32 (1993) 420.
- [8] J.J. Cuomo, P.A. Leary, D. Yu, W. Reuter, M. Frish, J. Vac. Sci. Technol. 16 (1979) 299.
- [9] C.J. Trong, J.M. Silvertsen, J.H. Judy, C. Chang, J. Mat. Res. 5 (1990) 2490.
- [10] M.Y. Chen, D. Li, X. Lin, V.P. Dravid, Y.W. Chung, M.S. Wong, W.D. Sproul, J. Vac. Sci. Technol. A11 (1993) 521.
- [11] C. Jama, A. Al khawwam, A-S. Loir, P. Goudmand, O. Dessaux, L. Gengembre and J. Grimblot, Surf. Interface Anal. 31(2001) 815.
- [12] A. Alkhawwam C. a,1 Jamaa, P. Goudmand, O. Dessaux, A. El Achari, P. Dhamelin court, G. Patrat, Thin Solid Films 408 (2002) 15-25.
- [13] SM Chore et al 2002 Semicond. Sci. Technol. 17 1141-1143 doi: 10.1088/0268-1242/17/11/301.
- [14] R. Alexandrescu, et al. Carbon Vol. 36. no 5 – 6 p. 775 – 80 (1996).
- [15] M. Jelinek et al. Superficiesy vaciko 9. 303 – 305, Diciembre (1999).
- [16] N. Hellgren, M.P. Johansson, E. Broitman, L. Hultman, J.E. Sundgren, Phys. Rev. Part B59 (1999) 5162.
- [17] L.M. Zambov, C. Popov, N. Abedinov, M.F. Plass, W. Kulish, T. Gotszalk, P. Grabiec, I.W. Rangelow, R. Kassing, Adv. Mater. 12(2000) 656.
- [18] T.A. Yeh, C.L. Lin, J.M. Sivertsen, J.H. Judy, IEEE Trans. Magn. 27 (1991) 5163.
- [19] C. Jama, V. Rousseau, O. Dessaux and P. Goudmand, Thin Solid Films, 1997, 302, 58.
- [20] W.J. Pan, J. Sun, H. Ling, N. Xu, Z.F. Ying, J.D. Wu. Applied Surface Science 218 (2003) 297–304
- [21] M. A. Baker and P. Hammer, Surf. Interface Anal., 1997, 25, 29.
- [22] C. Casiraghi, A. C. Ferrari,* and J. Robertson Physical Review B 2, 085401 (2005).
- [23] Y. Taki, T. Kitagawa, O. Takai, Thin Solid Films 304(1997)183.
- [24] M. Rusop, A.M.M. Omer, S. Adhikari, S. Adhikary, H. Uchida, T. Soga, T. Jimbo, M. Umeno. Diamond & Related Materials 14 (2005) 975–982 .
- [25] Y. Naruse, S. Nitta, Diamond Relat. Mater. 11 (2002) 1209.
- [26] F. Alibart et al. / Diamond & Related Materials 17 (2008) 925–930 .
- [27] M. Chhowalla, A.C. Ferrari, J. Robertson, G.A.J. Amaratunga, Appl. Phys. Lett. 76 (2000) 1419.