

## دراسة الثنائيات (الديودات) من نوع GaAs (p-i-n) المستخدمة ككواشف لأشعة X بغية تحسين أدائها.

الدكتور جبور جبور\*

(قبل للنشر في 2004/5/10)

### □ الملخص □

إن استخدام الثنائيات (الديودات) من نوع GaAs (p-i-n) ككواشف للفوتونات عالية الطاقة تقتضي زيادة سماكة منطقة الفراغ W حيث توجد الشحنة، وتلك المنطقة تحدد بالشوائب المتبقية لنصف الناقل. سوف نتحدث عن التقانة المستخدمة في زيادة سماكة منطقة الشحنة الفراغية W. ويقتضي هذا تعديل الشوائب المتبقية بشكل عيوب عن طريق التشعيع بالإلكترونات. تمت دراسة التيار والسعة بتابعة الجهد المطبق على الكاشف GaAs (p-i-n). توضح النتائج التي حصلنا عليها حدود التقنية المستخدمة في حالة هذا النوع من الكواشف.

\* أستاذ في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Studying and Optimizing the Performance of GaAs (p-i-n) Diodes for X-Ray Detectors

Dr. Jabbour Jabbour\*

(Accepted 10/5/2004)

### □ ABSTRACT □

The detection of high-energy photons, using compound semiconductor detectors such as GaAs (p-i-n), requires an increase of the depleted zone  $W$ , which is limited by the residual doping of the semiconductor.

In this paper, we will discuss a technique by which the extension of the space charge region of a diode can be increased. It consists in compensating the residual doping impurities with defects introduced by electrons irradiation. We have studied the current and capacitance-voltage characteristics of GaAs (p-i-n) structures.

Results are presented to illustrate and evaluate the limits of this technique in the case of GaAs (p-i-n) structures.

### مقدمة:

أُقتُرح في عام 1960 أن المركب GaAs يمكن أن يكون مركباً بديلاً لصناعة كواشف قادرة على كشف الفوتونات ذات الطاقة العالية [1]. منذ ذلك التاريخ، تم إجراء تجارب متعددة ومتنوعة على كواشف مصنوعة من GaAs. وأظهرت النتائج أن هذه الكواشف تتمتع بأداء عالٍ من حيث فصل الطاقة [2-7]. برهنت هذه الكواشف على أنها الأولى من نوعها من حيث قدرتها على فصل الطاقة في درجة حرارة الغرفة [8]. مع ذلك، فإن هذا النوع من الكواشف GaAs لم يُطرح في الأسواق. والسبب أن تقانة تطور الـ microelectronics الصغرية لهذه المادة أو المركب، سمحت بالتوصل إلى صناعة أنواع متعددة من الكواشف ذات تراكيب متنوعة من حيث البنية والأداء. ويعود السبب إلى: السماكة الكافية المطلوبة للكشف الفعال لأشعة X ولفوتونات أشعة غاما  $\gamma$ ، حيث أن السماكة المطلوبة كانت فقط متوافرة على شكل صفائح من هذا المركب أو من هذه المادة (bulk grown materials).

ولسوء الحظ إن صفائح GaAs تحتوي على شوائب ذات تراكيز كبيرة، هذا فضلاً عن أنها غير متجانسة [9]. ولهذا تم التخلي عن هذا النوع من المواد، عملياً لتطوير صناعة الكواشف، وبشكل خاص الكواشف التي تستخدم في التصوير الطبي (detectors for medical photography). يوجد الآن طريقة لصناعة كواشف من GaAs تعتمد على تقنية تنمية الطبقات فوق بعضها البعض

\* Professor, Physics Department, Faculty Of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

(grow epitaxial layers) وذلك عن طريق التبخير. وهذه الطريقة غير ملوثة واقتصادية بأن واحد [10]، [11].

سوف نتفحص، في هذا العمل، الكواشف (p-i-n) GaAs المصنوعة بالطريقة المشار إليها سابقاً، والتي صُنعت من قبل فريق تقني متخصص في مخبر: **Laboratoire des Milieux Désordonnés et Hétérogènes التابع لجامعة باريس السادسة - جامعة بيير وماري كوري - باريس - فرنسا (2003)**. ونحاول إيجاد الميزات والصفات المثلى لهذا النوع من الكواشف لكشف أشعة X ذات الطاقة العالية المستخدمة في التصوير الطبي.

## المواصفات التي يجب أن يتمتع بها الكاشف: GaAs (p-i-n)

يُشتق المتصل الثنائي (الديود) (p-i-n) من المتصل الثنائي (p-n) وذلك بوضع منطقة i غير مشابهة ( $i \equiv \text{intrinsic}$ ) بين المنطقتين p و n المشابتين. أن كثافة أو تركيز الشوائب في p هي عبارة عن شوائب مستقبلية (ثقوب) (Na) (Na - acceptor impurities)، بينما كثافة الشوائب في n عبارة عن شوائب مانحة (الالكترونات) (Nd) (Nd - donor impurities).

من أهم الصفات التي يجب أن يتمتع بها الكاشف هي أن تكون قدرته كبيرة جداً لتحويل فوتونات أشعة X إلى أزواج الكترون وثقب بحيث تكون فعاليته لتجميع الشحنات 100% تقريباً، مع المحافظة على نسبة ضجيج الكتروني منخفضة جداً. وللحصول على عدد كبير من الأزواج الكترون - ثقب لفوتون ممتص من قبل المادة، يجب أن تملك هذه المادة طاقة فجوة (Energy gap)  $E_g$  أخفض ما يمكن، متوافقة مع الضجيج الحراري لدرجة حرارة الغرفة. وجدنا إن أفضل قيمة هي  $E_g \approx 1.5 \text{ eV}$ .

والميزة الثانية المطلوبة من المادة التي يُصنع منها الكاشف هي أن يكون لها عامل امتصاص  $\alpha$  كبير. وهذا يقتضي أن يكون عددها الذري Z كبيراً. ذلك لأن عامل امتصاص أشعة X يتناسب مع القوة الرابعة أو الخامسة لـ Z. وللحصول على فعالية كبيرة لتجميع أزواج الالالكترونات - الثقوب الناتجة أو المولدة بواسطة الفوتونات الممتصة، يجب أن يكون عمر حوامل الأقلية للشحنات  $\tau$  (minority carrier lifetimes) طويلاً، وحركية الحوامل  $\mu$  (carrier mobility -  $\mu$ ) كبيراً، للمادة المستخدمة.

إن فعالية تجميع هذه الأزواج الكترونات ثقوب يتناقص بشكل أسّي مع النسبة  $[d/(\mu E \tau)]$ ، حيث تمثل E الحقل الكهربائي المطبق على الكاشف ذو السماكة d.

وأفضل المواد المرشحة لذلك هي المواد أحادية البلورية (monocrystalline)، باستثناء قيم  $\mu$  و  $\tau$  التي يمكن أن تكونا أكبر من ذلك. فعلاً، إن المواد غير البلورية تحتوي على عدد كبير من العيوب (defects)، التي تؤدي إلى تخفيض قيمة كل من  $\mu$  و  $\tau$ . من المواد البلورية التي تملك قيمة كبيرة لـ Z، وطاقة فجوة  $E_g$  من مرتبة 1.5 eV، وقيمة كبيرة لـ  $\mu$  نذكر GaAs و CdTe.

والمركب CdTe يسمح بتحقيق كواشف فعالة. لكن لسوء الحظ، لا يمكن استخدام هذه المادة من أجل تحقيق صور ذات قياس كبير كما هو مطلوب في المجال الطبي. وذلك لأن بلورات هذه المادة (المركب) صغيرة. هذا فضلاً عن عدم وجود تقانة الكترونية صغيرة (microelectronic) لهذا النوع من البلورات. بالمقابل إن بلورات المركب GaAs أكبر من البلورات السابقة. ويمكن الحصول على عينات ذات أبعاد وقياسات كبيرة من هذا المركب (قطرها تقريباً 4 إنش) أكثر سهولة للتصنيع، حيث توجد الآن تقانة متطورة تتعلق بهذا

المركب GaAs. ولسوء الحظ، إن صفائح أو رقائق GaAs المتوافرة في الأسواق تحوي على كثافة كبيرة من العيوب، التي تؤدي إلى تقصير عمر حوامل الشحنات الأقلية  $\tau$ ، وإلى التوزيع غير المتجانس للحقل الكهربائي. إن التوزيع غير المتجانس للعيوب يؤدي إلى عدم انتظام استجابة الكاشف. وللتغلب على هذه المعضلة، فلقد تم اللجوء إلى استخدام طريقة تنمية المادة بشكل طبقات (بالتبخير). والتي تؤمن تجانساً كهربائياً، وانخفاضاً في نسبة العيوب [4-7].

تبيّن أن طريقة تنمية الـ GaAs هذه تسمح بالحصول على كواشف ذات صفات جيدة. غير أن سماكة الطبقات المصنعة من GaAs، بهذه الطريقة المذكورة سابقاً [4-7]، غير كافية لامتصاص فوتونات أشعة X بشكل فعال. وهذه الطريقة موجهة لصناعة طبقات ذات سماكة قليلة (عدة ميكرونات)، وذلك لتطبيقات الالكترونيات الصغيرة.

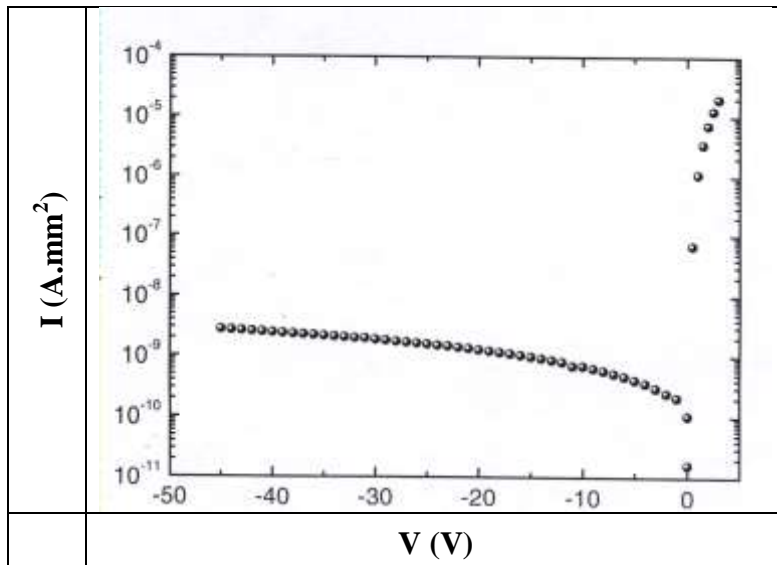
وللحصول على رقائق من GaAs ذات سماكة كافية (عدة مئات من الميكرونات)، فلقد تم تطوير طريقة تنمية فعالة من قبل مجموعة من الباحثين والتقنيين [في مخبر عديدة] يمكن الاستعانة بالمراجع [12]، [13] للإطلاع على تفاصيل هذه الطريقة.

ولكي نستطيع الربط بين الميزات الالكترونية للطبقات المصنعة بالطريقة المنوه عنها سابقاً، والميزات التي يجب أن تتوفر في الكاشف، لا بد من دراسة كل من مميزات تغير تيار وسعة الكاشف بتابعية الجهد المطبق عليه.

## النتائج العملية:

### 1- تغير التيار بتابعية الجهد:

يمثل الشكل (1) العلاقة  $I = f(V)$ . كما هو ملاحظ إن التيار من مرتبة  $(0.8 \text{ nA.mm}^2)$  من أجل جهد عكسي يساوي 10V، وذلك من أجل كاشف مساحته تساوي  $2.7 \text{ mm}^2$ .



الشكل (1): تغير شدة التيار  $I(\text{A.mm}^2)$  بتابعية الجهد المطبق  $V(\text{V})$ ،

وذلك من أجل كاشف GaAs (p-i-n) مساحته  $2.7 \text{ mm}^2$ .

## 2- تغير السعة بتابعة الجهد:

إن سعة الثنائي (p-i-n) مماثلة لسعة مكثفة مستوية لبوسيتها عبارة عن حدود المنطقتين (p-i) و (i-n)، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{W} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (1)$$

حيث  $\epsilon_0$ ،  $\epsilon_s$ ،  $\epsilon_r$  سماحية الخلاء، المادة المأخوذة بعين الاعتبار، والسماحية النسبية على الترتيب. وهذه السعة ما هي إلا عبارة عن سعة المنطقة  $W$ ؛ وتُعطى سعة هذه المنطقة بدلالة واحدة المساحة (واحدة السطح) بالعلاقة التالية:

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W \cdot \frac{dQ}{\epsilon_s}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (2)$$

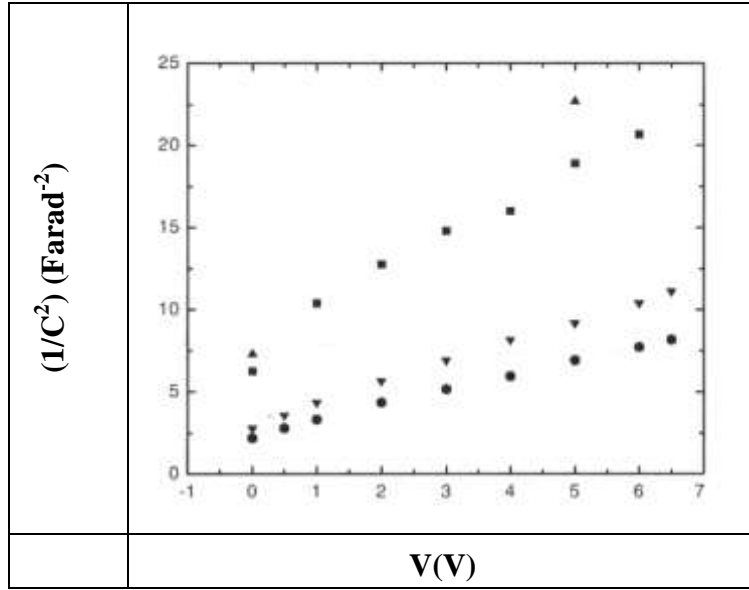
وكما هو واضح من العلاقة (1)، إن تزايد  $W$  يؤدي إلى تناقص  $C$ . وهذا ما يحدث في التغذية العكسية للثنائي (للديود). أما في التغذية الأمامية فالمفعول معاكس تماماً للمفعول السابق، أي أن  $W$  تتناقص بينما  $C$  تزداد. إذا عوضنا  $W$  بقيمتها مأخوذة من [14،15]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_i \pm V)}{qN}} \quad (3)$$

في العلاقة (1) نجد أن:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_i \pm V)}{q\epsilon_s N} \quad (4)$$

حيث الإشارة (+) من أجل التغذية العكسية بينما الإشارة (-) من أجل التغذية الأمامية. تدعى  $V_i$  بالكُمون الداخلي للثنائي،  $q$  شحنة الإلكترون، و  $N$  كثافة الشوائب في المنطقة  $W$ . يمثل الشكل (2) تغيرات  $(1/C^2)$  بتابعة الجهد المطبق على الثنائي، في حالة التغذية العكسية.



الشكل (2): تغير المقدار  $(1/C^2)$ (Farad<sup>-2</sup>) بتابعة الجهد المطبق  $V(V)$  على الكاشف GaAs (p-i-n)

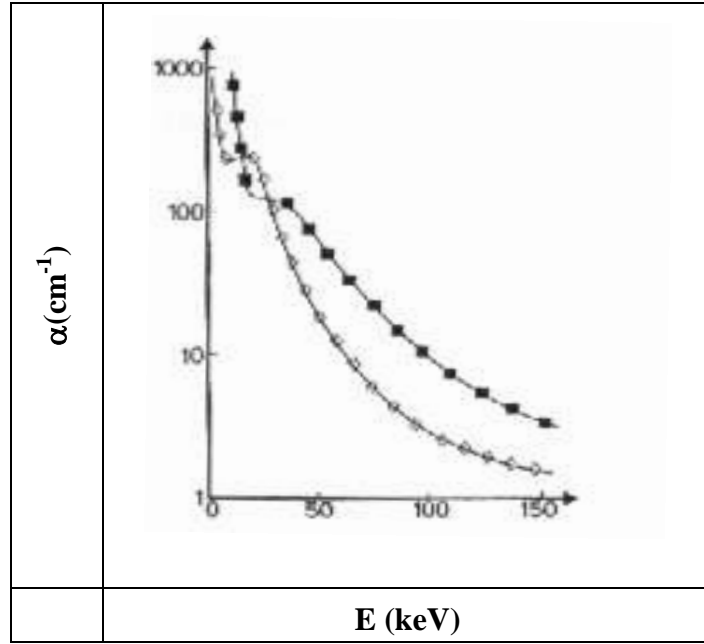
المعرض للتشعيع بواسطة حزم الكترونية بطاقة 1 MeV، وتدفق مختلف:

(●) قبل التشعيع ،  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (▼)،  $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (■)،  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (▲)، مدة التشعيع تتراوح بين 2 - 4 ساعات.

وكما هو واضح إن تغيرات  $(1/C^2)$  بتابعة الجهد  $V$ ، عبارة عن خطوط مستقيمة. واستناداً إلى الشكل السابق وإلى العلاقة (4)، نجد أن ميل المستقيمات يعطي كثافة الشوائب  $N$  في المنطقة  $W$ ، بينما تقاطعها مع المحور الأفقي [من أجل  $(1/C^2) = 0$ ] يعطي  $V_i$ ، وهكذا يتم تحديد قيمة  $N$ .  
والسؤال الذي يُطرح هو التالي: ما هو مدى تأثير  $N$  في امتصاص أشعة  $X$  من قبل الكاشف؟  
والجواب على ذلك، دراسنا تغير العامل  $\alpha$  لامتصاص فوتونات أشعة  $X$  للكاشف بتابعة الطاقة، وبتابعة  $N$ . تُعرض هذه الدراسة في الفقرة القادمة.

### 3- تأثير $N$ على عامل امتصاص الكاشف GaAs (p-i-n):

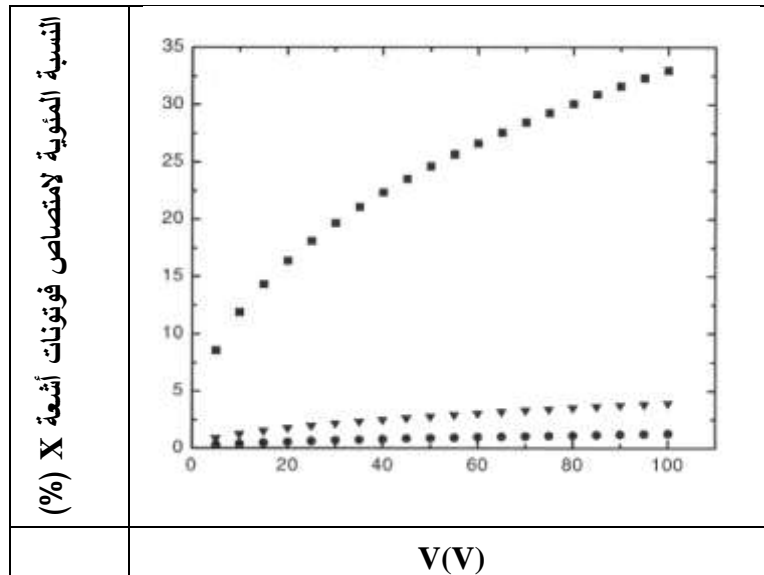
يوضح الشكل (3) تغيرات عامل الامتصاص  $\alpha$  بتابعة طاقة أشعة  $X$  (طاقة الفوتونات الممتصة من قبل الكاشف). وكما هو ملاحظ، إن  $\alpha$  يتناقص مع تزايد طاقة الفوتونات (طاقة أشعة  $X$ ).



الشكل (3): تغير عامل الامتصاص  $\alpha(\text{cm}^{-1})$  بتابعة الطاقة  $E(\text{keV})$

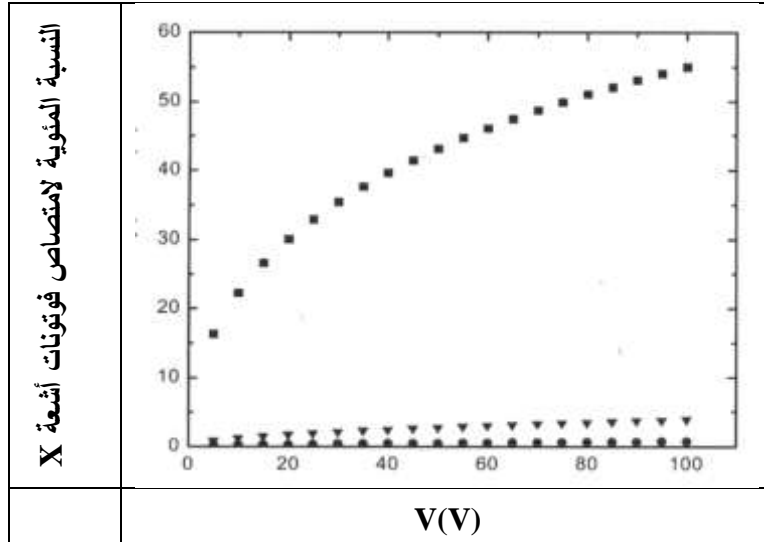
من أجل المركبين  $\text{GaAs}(\diamond)$  و  $\text{CdTe}(\blacksquare)$

بالإضافة إلى ذلك، يمثل الشكل (4) تغيرات النسبة المئوية لامتصاص فوتونات أشعة X بتابعة الجهد المطبق من أجل قيم مختلفة لـ N (مع ثبات طاقة أشعة X). بينما يمثل الشكل (5) تغيرات النسبة المئوية لامتصاص فوتونات أشعة X بتابعة الجهد المطبق ولكن من أجل قيم مختلفة لطاقة أشعة X، مع ثبات قيمة N.



الشكل (4): تغير النسبة المئوية لامتصاص فوتونات أشعة X لـ GaAs بتابعة الجهد المطبق من أجل قيم مختلفة لـ N (مع ثبات طاقة

أشعة X - 60 keV):  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  (●)،  $10^{14} \text{cm}^{-3}$  (▼)،  $10^{13} \text{cm}^{-3}$  (■).



الشكل (5): تغير النسبة المئوية لامتنصاص فوتونات أشعة X لـ GaAs بتابعة الجهد المطبق من أجل قيمة ثابتة لـ  $N = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (مع قيم مختلفة لطاقة أشعة X): (●) 100 keV، (▼) 60 keV، (■) 20 keV.

لكي يستطيع الكاشف امتصاص معظم فوتونات أشعة X، يجب أن تكون سماكته كافية، وبشكل خاص الفوتونات ذات الطاقة 60 keV (المستعملة في تصوير الأسنان). على سبيل المثال، من أجل عامل امتصاص  $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ ، وطاقة تساوي 60 keV، الشكل (3)، نجد أن حوالي 27% من الفوتونات قابلة للامتصاص فقط، وذلك من أجل  $N$  من رتبة  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (هذه القيمة تفرضها طريقة تصنيع رقائق الـ GaAs ذات سماكة عدة مئات من الميكرونات)، الشكل (4).

واستناداً إلى ذلك، إن القيمة المتوقعة لـ  $W$  من أجل جهد مطبق 50 V لا تتجاوز الـ  $30 \mu\text{m}$  [4,1]. وهذا غير كافي، كما هو موضح على الشكلين (4) و (5) وخاصة عندما تصبح طاقة الفوتونات أكبر من 20 keV. إذ أن احتمال امتصاص أشعة X سيكون أقل من 50%، الشكل (5).

بتفحص الشكل (4) يتضح أنه كلما ازدادت قيمة  $N$  انخفضت النسبة المئوية لامتنصاص أشعة X. لذلك كان من الضروري إيجاد تقنية تسمح بتخفيض تركيز حوامل الشحنات الحرة (free carrier concentration) إلى القيمة  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .

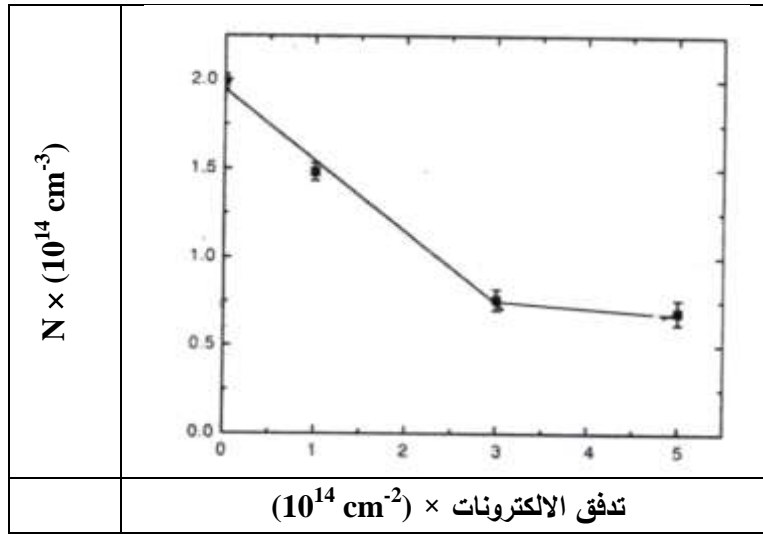
وإحدى الطرق الممكنة، التي تم اقتراحها [16] Bourgoïn et al، تقتضي تعديل  $N$  عن طريق التشعيع بالالكترونات الذي يؤدي بدوره إلى تكون عيوب في العينة المدروسة.

#### 4- تعديل $N$ بالتشعيع الالكتروني:

تم اختيار التشعيع بالالكترونات ذات طاقة مرتفعة نسبياً، من مرتبة الـ MeV، وذلك لأنها تؤدي إلى توزيع منتظم للعيوب (defects) على عمق كافٍ في العينة، وهذا ضروري لامتنصاص فوتونات أشعة X. تم اكتشاف وتحديد مميزات هذه العيوب في كل من المواد من النوع n والنوع p [17].

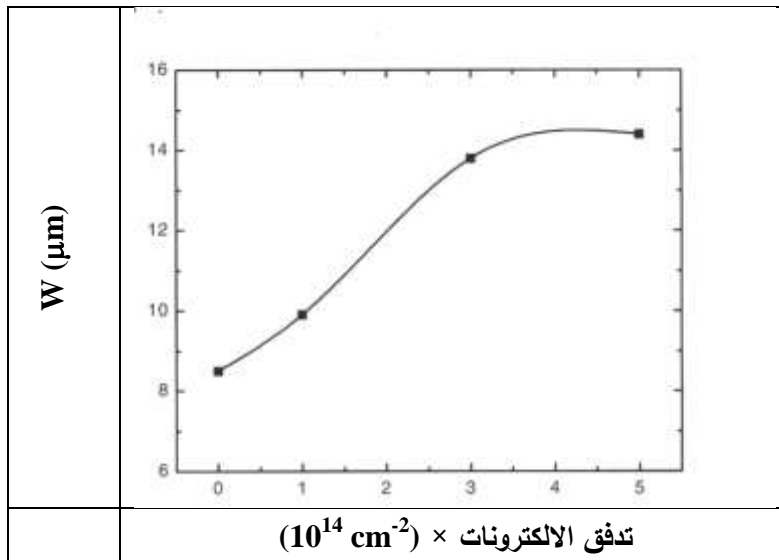
تم بعد ذلك دراسة مميزات تغير السعة بتابعة الجهد المطبق على العينة (الكاشف) (الفقرة III-2). والنتائج التي حصلنا عليها موضحة على الشكل (2). بحساب ميل المستقيمات من الشكل السابق، نلاحظ أن قيم  $N$  تتناقص بازدياد تدفق الالكترونات، كما هو موضح على الشكل (6) الذي يبين تغيرات  $N$  (تركيز حوامل الشحنات المتبقية) بتابعة تدفق الالكترونات.





الشكل (6): تغيرات  $N$  (تركيز حوامل الشحنات المتبقية) بتابعة تدفق الالكترونات. الخط البياني هو فقط للوصل بين النقاط.

ونلاحظ من العلاقة (3)، أنه يمكن حساب قيم  $W$  من أجل القيم التي حصلنا عليها لـ  $N$ ، الشكل (6)، علماً أن قيمة الجهد المطبق هي  $10 \text{ V}$  (تغذية عكسية)، بينما قيم  $V_i$  تستنتج من تقاطع الخطوط الممثلة على الشكل (2) مع المحور  $V$  من أجل  $[1/C^2] = 0$ . والنتائج التي حصلنا عليها معطاة على الشكل (7). يمكننا أن نلاحظ تزايد قيمة  $W$  بنسبة تُقدر بـ 67% تقريباً.



الشكل (7): تغيرات  $W (\mu\text{m})$  (عرض منطقة الشحنات الفراغية) بتابعة تدفق الالكترونات، وذلك من أجل جهد تغذية مقداره  $10 \text{ V}$ .

## الخلاصة:

لقد تم تشييع المتصل الثنائي GaAs (p-i-n)، حيث سماكة المنطقة  $i$  تُقدر بـ  $120 \mu\text{m}$  بالكترونات طاقتها  $1 \text{ MeV}$ . نلاحظ إن تركيز حوامل الشحنات الحرة المتبقية  $N$  انخفض بعامل يُقدر بأكثر من 10. أدى

هذا إلى تحسين سماكة منطقة الشحنات الفراغية (المنطقة W) وذلك من أجل تغذية عكسية معينة. وتؤكد هذه المعطيات أن انخفاض قيمة N يعود إلى تشكل (أو إحداث) عيوب في المنطقة W. وأدت هذه العيوب إلى تعديل تركيز الشحنات الحرة المتبقية N. والناتج التي تم الحصول عليها تشير إلى أن الثنائي (p-i-n) GaAs يمكن أن يستخدم ككاشف لأشعة X بفعالية عالية جداً.

## المراجع:

.....

- [1] W.R. Harding, C. Hilsum, M.E. Moncaster, D.C. Northrop, O. Simpson, Nature 30, 405 (1960).
- [2] A. Owens, M. Bavdaz, S. Kraft, A. Peacock, R. Strade, S. Nenonen, H. Andersson, M.A. Gagliardi, T Gagliardi, and H. Graafsma, J. Appl. Phys. 86, 4341(1999).
- [3] A. Owens, M. Bavdaz, S. Kraft, A. Peacock, S. Nenonen, H. Andersson, M.A. Gagliardi, T Gagliardi, and F. Scholze, J. Appl. Phys. 85, 7522(1999).
- [4] J.E. Eberhardt, R.D. Ryan, and T.J. Tavendale, Nucl. Inst. And Meth. 94, 463(1971).
- [5] K. Hesse, W. Gramman, and O. Hoppner, Nucl. Inst. And Meth. 101, 93(1972).
- [6] P.E. Gibbons, and J.E. Howes, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 19, 353(1972).
- [7] T. Kobayashi, T. Sugita, M. Koyama, and S. Takayanagi, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 19, 324(1972).
- [8] D.S. Mcgregor, Semiconductors and Semimetals (Academic press, 1995) Vol. 43, pp. 383-437.
- [9] J.C. Bourgoin, H. Iron Bardeleben, and D. Strevenard, J. Appl. Phys. 64, R65(88).
- [10] M. Hammadi, J.C. Bourgoin, H. Samic, J. Mat. Sci: Mat. In Electronics 10, 399(1999).

- [11] L.El Mir, M. Gandouzi, M. Hammadi, H. Samic, and J.C. Bourgoin, *Current Topics in Crystal Growth Research* 5, 131(1999).
- [12] J.C. Bourgoin, J.Ph. Montagne, and V. Donchev, *Bulgarian Journal of Physics* 27 No. 1(2000)65-70.
- [13] J.C. Bourgoin, *Nucl. Inst. And Meth. In Physics Research A* 460 (2001) 159-164.
- [14] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley – interscience, A division of John Wiley & Sons, Inc. New York. London. Sydney. Toronto, 1969.
- [15] Bernard Sapoval and Claudine Herman, *Physique des Semi-Conducteurs*, Ellipses, edition marketing, Paris, 1990.
- [16] J.C. Bourgoin, N. de Angelis, K. Smith, R. Bates, C. Whitehill, and A. Meikle, *Nucl. Inst. And Meth. In Physics Research A* 458 (2001) 344.
- [17] D. Pons, and J.C. Bourgoin, *Solid State Phys.* 18(1985)3839.