



Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



## Offsets des bandes d'énergies et paramètres électriques d'une structure multicouche a hétérojonction application aux cellules thermophotovoltaïque

B. Messani <sup>1</sup>, H. Aït Kaci <sup>1</sup>, D. Boukredimi <sup>2</sup> et M. Mebarki <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique des Plasmas Matériaux Conducteur et leurs Applications.  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. USTO «M.B», messanizn@yahoo.fr;  
aitkaci@hotmail.com

<sup>2</sup>Laboratoire de Physique des Couches Minces et Matériaux pour l'Electronique.  
Université d'Oran. Es Sénia, boukredimi@yahoo.fr

**Résumé :** Les mécanismes de transport de charges dans les dispositifs électroniques et optoélectroniques dépendent de l'alignement des bandes d'énergies des couches de matériaux qui constituent généralement ces dispositifs. Cette caractéristique importante, dite diagramme des bandes d'énergie, permet non seulement la compréhension des phénomènes de transport mis en jeu mais aussi l'optimisation du dessin du composant pour de meilleures performances. Dans ce travail, nous étudions par la méthode capacité-tension le système à hétérojonction GaSb(p)/Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>Sb<sub>1-y</sub>(n), utilisé dans la réalisation de dispositifs lasers et détecteurs. Notre objectif est de déterminer les hauteurs de barrières et le diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre de ce système aux températures 140 K et 300 K.

**Mots clés:** hétérojonctions, capacité-tension, potentiel de diffusion, diagramme des bandes d'énergie, offsets.

### " I INTRODUCTION "

Les besoins de développement dans différents domaines tels que les télécommunications par fibres optiques, la détection de gaz polluants, le diagnostic médical ou l'imagerie thermique ont fait que les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la filière des semi-conducteurs composés III-V, pour la fabrication de dispositifs émetteurs et récepteurs de rayonnements. En particulier, les alliages quaternaires à base d'Antimoniures de Gallium (GaSb), sont d'excellents candidats pour la fabrication de composants lasers et détecteurs opérant dans la gamme des longueurs d'ondes (2-4)  $\mu\text{m}$ , ce qui correspond à une fenêtre de transparence de l'atmosphère et permet l'émission et la réception des signaux optiques. L'alliage semi-conducteur quaternaire GaAlAsSb, déposé sur substrat GaSb, est très intéressant puisqu'il a déjà permis la réalisation de zones actives pour des diodes lasers [1,2] ou de zone de champ pour des composants photodétecteurs [3]. Le fonctionnement et les performances de ces dispositifs sont étroitement liés à la structure de bande d'énergie du dispositif, généralement constitué de plusieurs couches semiconductrices.

Notre travail consiste en l'étude du cas particulier de l'hétérojonction GaSb/GaAlAsSb, destiné à la réalisation de couche fenêtre d'un composant détecteur hautes performances à la température ambiante. Cette étude, basée sur des mesures

expérimentales de la capacité de jonction à 140K et 300K, est réalisée pour déterminer les hauteurs de barrières et les discontinuités de bandes d'énergie (offsets) à l'interface pour ce système et afin de comprendre les mécanisme de transport pouvant avoir lieu dans ce type de structure. Les résultats de mesures (C-V) sont exploités par la technique, dite méthode de l'intercept, déjà utilisée sur des structures plus complexes et dont les résultats se sont avérés très satisfaisants [4,5].

### II CARACTERISTIQUE CAPACITE TENSION (C-V): METHODE DE L'INTERCEPT

La méthode capacité tension (C-V) est une technique de caractérisation électrique très utilisée dans l'étude des propriétés des couches de matériaux ou des dispositifs à semi-conducteurs. Elle est applicable aux composants électroniques et optoélectroniques quelques soient leur configurations : homojonction, hétérojonction p-n et même aux structures plus complexes telle que les super réseaux [6]. Cette méthode exploite le comportement capacitif d'un composant à semiconducteurs, sous l'effet d'une polarisation extérieure inverse. Elle peut fournir des informations précieuses sur les propriétés d'une jonction p-n telles que la densité de porteurs (trous ou électrons), leurs répartitions spatiales ainsi que les hauteurs de barrière ou potentiels de diffusion aux interfaces. Ces informations peuvent être utilisées par la suite pour tracer le diagramme énergétique, caractéristique fondamentale de tout dispositif électronique. Les variations de la capacité dans un système à hétérojonction p-n sont données par l'expression bien connue [7]:

$$C(V) = S \sqrt{\frac{q\epsilon_1\epsilon_2Nd_1Na_2}{2(\epsilon_1Nd_1 + \epsilon_2Na_2)}} \frac{1}{\sqrt{V_d - V_a}} \quad (1)$$

Les quantités  $Na_1$  et  $Nd_2$  sont respectivement les dopages des couches 1 (type p) et 2 (type n) de l'hétérojonction.  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont les permittivités diélectriques des deux matériaux,  $q$  la charge de l'électron et  $S$  l'aire de la jonction.  $V_a$  est la tension appliquée et  $V_d$  le potentiel de diffusion total de la jonction à l'équilibre.  $V_d$  est donné par la somme des potentiels de diffusion partiels  $V_{d1}$  et  $V_{d2}$ , établis de part et d'autre de l'interface.

La méthode de l'intercept consiste à utiliser la caractéristique  $1/C^2 = f(V)$  qui, à partir de l'équation (1), s'écrit :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{S^2} \left[ \frac{2(\epsilon_1Nd_1 + \epsilon_2Na_2)}{q\epsilon_1\epsilon_2Nd_1Na_2} \right] (V_{int} - V_a) \quad (2)$$

Le potentiel  $V_d$  est remplacé par  $V_{int}$ , qui tient compte de l'effet de la température et des états d'interface dans la structure. Dans le cas d'une jonction abrupte, à dopages uniformes, la courbe  $1/C^2 = f(V)$  est linéaire. Si le dopage d'une couche est connu, un calcul de pente permet de déduire la densité de porteurs dans l'autre couche. L'intersection de la droite  $1/C^2 = f(V)$  fournit le potentiel  $V_{int}$ , donné par [8]:

$$V_{int} = V_{d1} + V_{d2} + \frac{2kT}{q} - V_{ss} \quad (3)$$

$k$  étant la constante de Boltzmann et  $V_{ss}$  le potentiel résultant de la présence d'états d'interface. Si  $N_{ss}$  est la densité de ces états,  $V_{ss}$  est donné par [9]:

$$V_{ss} = \frac{1}{2q} N_{ss}^2 \left[ \frac{1}{\epsilon_1Nd_1 + \epsilon_2Na_2} \right] \quad (4)$$

La densité  $N_{ss}$  peut être correctement estimée à l'aide de l'équation établie par Kressel [10]. Pour une structure désaccordée :

$$N_{ss} = \frac{8\Delta a}{a^3} \quad (5)$$

$a$  représente le paramètre de maille de la couche désaccordée et  $\Delta a$  le désaccord paramétrique.

Nous rappelons que dans le cas d'une hétérojonction parfaitement abrupte et à dopages uniformes, la distribution du potentiel des deux cotés de l'interface est donnée par cette équation [7] :

$$\frac{V_{d1}}{V_{d2}} = \left( \frac{\epsilon_2Na_2}{\epsilon_1Nd_1} \right) \quad (6)$$

### III DESCRIPTION DE LA STRUCTURE ETUDIEE

La structure étudiée a été réalisée par épitaxie par jet moléculaire à l'Institut d'Electronique du sud de l'Université de Montpellier II (I.E.S). Elle est constituée d'un substrat et d'une couche buffer d'un même matériau (GaSb) avec 450

$\mu\text{m}$  et 30 nm d'épaisseurs, respectivement. Ces deux couches sont fortement dopées p à  $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Vient ensuite la couche quaternaire de type n, à forte énergie de bande interdite,  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}_{0.034}\text{Sb}_{0.96}$  d'épaisseur 1,6  $\mu\text{m}$  et dont le dopage prévu au cours de l'épitaxie est de l'ordre de  $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

La couche supérieure est une couche de GaSb d'épaisseur 274 nm, fortement dopée n à  $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Pour les mesures électriques capacité tension (C-V), des diodes à géométrie mesa sont fabriquées par photolithographie à partir des plaquettes épitaxiées avec des dépôts métalliques AuZn du coté p et AuSn du coté n.

La configuration mesa des diodes permet, en général, de réduire les courants de fuites par les bords, ce qui diminue les courants d'obscurité dans les diodes. Un schéma simplifié du composant est donné par la figure 1.

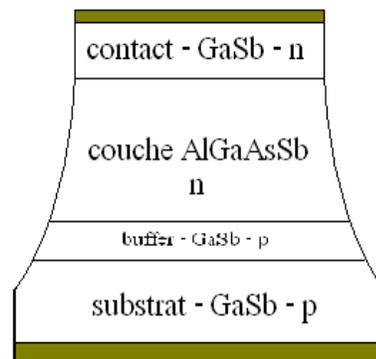


Figure 1 : Schéma simplifié de la structure à géométrie mesa GaSb (p) / GaAlAsSb (n).

### IV CARACTERISTIQUE CAPACITE TENSION DE L'HETEROJONCTION $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}_{0.034}\text{Sb}_{0.96}$ (n) / GaSb (p)

Les mesures de la capacité de jonction sous polarisations inverses sont réalisées à 1MHz sur des échantillons de 225 $\mu\text{m}$  de diamètre, à l'aide d'un capacimètre (P.A.R modèle 410). Pour éviter les perturbations dues à d'éventuels champs



**Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



extérieurs, les diodes sont disposées dans une cage métallique et reliées au capacimètre à l'aide de câbles coaxiaux (B.N.C).

Ce montage simple permet d'effectuer les mesures à la température ambiante (300K).

Pour les basses températures, les échantillons sont soudés à l'intérieur d'un cryostat refroidi à l'azote liquide et le réchauffement de l'échantillon se fait par injection d'air comprimé dans le cryostat. La température est relevée à l'aide d'une thermistance montée à proximité de la diode. Cette méthode s'est avérée assez délicate car la température est difficilement contrôlable. Nous avons choisi d'effectuer les mesures à basses polarisations, inférieures à 400 mV, afin d'éviter toute dégradation des échantillons.

Les caractéristiques typiques capacité-tension (C-V) de l'hétérojonction  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}_{0.034}\text{Sb}_{0.96}$  (n) / GaSb (p), pour deux températures 300K et 140K, sont donnée par la figure 2. Les capacités de la structure étudiée présentent des variations classiques. Entre 0V et 0.4V, cette grandeur diminue de 122 pF à 86 pF pour la température ambiante (300K) et de 71 pF à 58 pF à 140K.

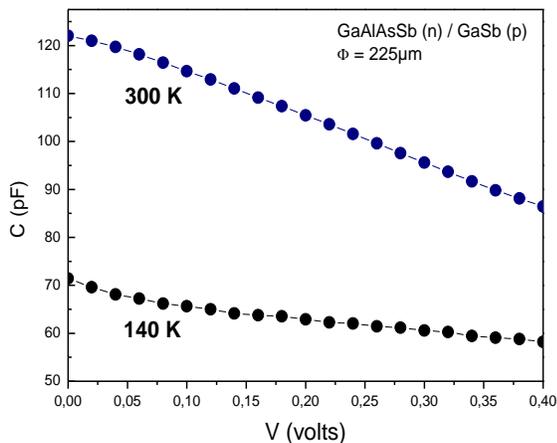


Figure 2 : Caractéristiques capacité-tension (C-V) de l'hétérojonction  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}_{0.034}\text{Sb}_{0.96}$  (n) / GaSb (p).

Les valeurs expérimentales de l'inverse du carré de la capacité ( $1/C^2$ ), extraites de la figure 2, sont représentées sur la figure 3.

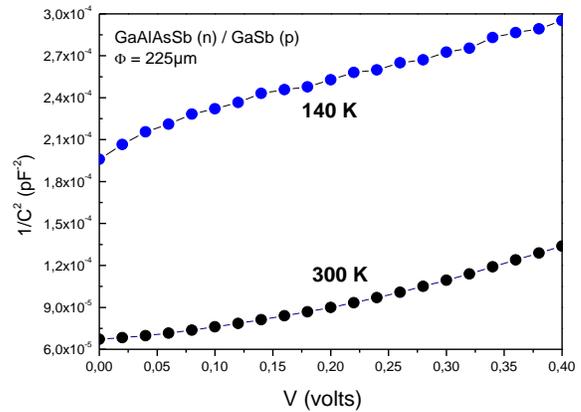


Figure 3 : Variations  $1/C^2 = f(V)$ , extraites de la figure 2

Les courbes  $1/C^2 = f(V)$  sont « fitées » par l'équation 2 pour déduire la densité de porteurs  $N_d$  dans la couche quaternaire GaAlAsSb ainsi que le potentiel de diffusion total  $V_d$  de l'hétérojonction. Les résultats obtenus sont regroupés sur le tableau 1.

Température (K)	$V_{int}$ (V)	$V_d$ (V)	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
140	0.920	0.895	$2.82 \cdot 10^{17}$
300	0.820	0.768	$6.60 \cdot 10^{17}$

Tableau 1 : Dopages effectifs  $N_d$  et potentiels de diffusion  $V_d$ , dans l'hétérojonction GaSb(p) / GaAlAsSb(n).

Les dopages effectifs  $N_d$  sont très proches de la valeur prévue lors de la croissance de la couche quaternaire. Les résultats

concernant le potentiel de diffusion  $V_d$  et de  $N_d$  fournissent des tensions partielles de 101 mV dans la couche GaSb et 794 mV dans la couche GaAlAsSb, à la température de 140K.

A la température ambiante, ces valeurs sont 176 mV dans GaSb et 591 mV dans GaAlAsSb. Cette diminution du potentiel de diffusion total avec la température est un résultat tout à fait prévisible en raison de la diminution de l'énergie de la bande interdite  $E_g$  et donc l'augmentation de la densité intrinsèque  $n_i$  de la couche quaternaire.

## V DIAGRAMME DES BANDES D'ENERGIE DE L'HETEROJONCTION $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}_{0.034}\text{Sb}_{0.96}$ (n) / GaSb (p)

L'alignement des bandes d'énergie dans l'hétérojonction est une caractéristique très importante dans la mesure ou elle peut renseigner sur le mode de conduction du courant dans le dispositif ainsi que le type de porteurs mis en jeu. Ce



**Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



diagramme peut également aider à identifier les différents mécanismes de transport, sous polarisation directe ou inverse.

Le tracé des diagrammes énergétiques nécessite la connaissance de grandeurs physiques caractérisant les couches semiconductrices constituant la jonction. Ces grandeurs sont les énergies de bandes interdites  $E_g$  et les masses effectives de densités d'états dans la bande de conduction  $m_{dc}^*$  et dans la bande de valence  $m_{dv}^*$ . Dans le tableau 2, nous avons regroupé les données relatives à la couche binaire GaSb [11] et quaternaire GaAlAsSb. Pour l'alliage quaternaire, ces données sont calculées par interpolation des données relatives aux binaires constituant le composé, en tenant compte des compositions [12,13,14].

Paramètre	GaSb		Ga <sub>0.60</sub> Al <sub>0.40</sub> As <sub>0.034</sub> Sb <sub>0.96</sub>	
	T = 140K	T = 300K	T = 140K	T=300K
$E_g$ (eV)	0.782	0,726	1.287	1.207
mdc/mo	0.042	0.042	0.806	0.806
mdv//mo	0.235	0.235	0.299	0.299

$m_0$  : masse de l'électron au repos.

Les diagrammes des bandes caractérisant le système étudié Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>As<sub>0.034</sub>Sb<sub>0.96</sub> (n) /GaSb (p) sont représentés sur les figures 4 et 5, pour les températures 140 K et 300 K respectivement. Ces diagrammes montrent clairement que pour les températures considérées, la zone de charge d'espace (Z.C.E) ou zone de déplétion s'étend essentiellement du côté n de la jonction (GaAlAsSb). Cela s'explique par le potentiel de diffusion dans cette couche ( $V_{d2}$ ) plus important que le potentiel établi dans la couche de type p ( $V_{d1}$ ). Ce résultat est en fait due à la densité de porteurs plus faible dans l'alliage quaternaire (inférieure à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) comparé à celle de la couche binaire de type p ( $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ).

Les quantités  $\delta_1$  et  $\delta_2$  représentent les positions du niveau de Fermi dans GaSb et GaAlAsSb respectivement. A 140K (figure 4) les discontinuités à l'interface de l'hétérojonction sont  $\Delta E_c = 130.16 \text{ meV}$  dans la bande de conduction et  $\Delta E_v = 374.33 \text{ meV}$  dans la bande de valence.

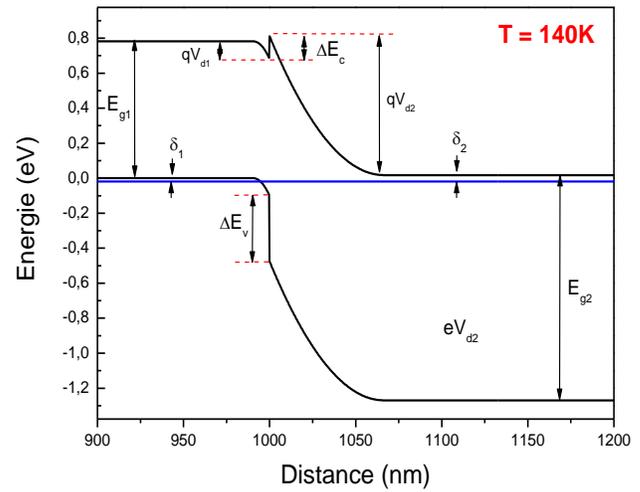


Figure 4 : Diagramme des bandes d'énergie à T = 140K, de l'hétérojonction Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>As<sub>0.034</sub>Sb<sub>0.96</sub> (n) /GaSb (p).

A T = 300K (figure 5),  $\delta_1 = 2.91 \text{ meV}$  et  $\delta_2 = 85.22 \text{ meV}$ . Les discontinuités à l'interface sont, dans ce cas,  $\Delta E_c = 124.3 \text{ meV}$  et  $\Delta E_v = 354.7 \text{ meV}$ .

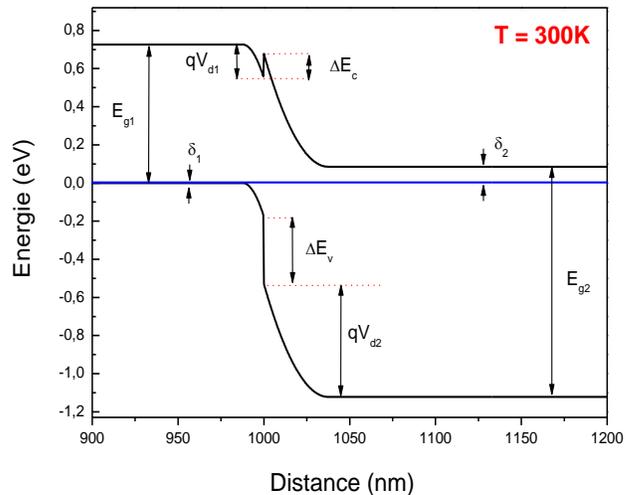


Figure 4 : Diagramme des bandes d'énergie à T = 300K, de l'hétérojonction Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>As<sub>0.034</sub>Sb<sub>0.96</sub> (n) /GaSb (p).

Les structure énergétique de l'hétérointerface GaSb(p) / GaAlAsSb (n), obtenues pour les deux températures considérées présentent la même allure. L'hétérojonction est de type II, à 300K et 140K. La couche d'alliage GaAlAsSb, en raison de son faible dopage et son gap important, joue le rôle de barrière énergétique pour les deux types de porteurs (électrons et trous). Cependant, un mécanisme de conduction probable est l'effet tunnel bande à bande dans le cas où la



Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



structure est soumise à de fortes polarisations inverses. Sous polarisations directes, la hauteur de barrière dans la bande de conduction diminue plus vite que celle établie dans la bande de valence. Ce résultat favoriserait une conduction par électrons à travers l'interface.

## VI CONCLUSION

Par une technique simple, basée sur l'exploitation des variations de la capacité de jonction dans un système à hétérojonction, pu déterminer l'alignement des bandes d'énergie et le type de discontinuités à l'interface pour le système GaSb (p) / GaAlAsSb (n). Nos résultats à basse température (140K) et à températures ambiante (300K) montrent que les offsets de bandes ne varient pas avec T. La faible différence observée peut être attribuée aux incertitudes dans la mesure; particulièrement à 140K. L'hétérojonction étudiée reste de type II, quelque soit la température.

## VII REFERENCES

- [1] J. L. Lazzari , J. C. Leclercq, P. Grumberg, A. Joullié, B. Lambert, D. Barbusse, and R. Fourcade, *J. Cryst. Growth* 123, 405 (1992)
- [2] L. M. Dolginov, A. E. Drakin, L. V. Druzhinina, P. G. Eleseev, M. G. Ilidsny, V. A Skripkin and B. N. Sverdlov, *IEEE. J. Quantum Electron.* QE17, 593 (1981)
- [3] I. A. Andreev, M. A. Afrailov, A. N. Baranov, M. A. Mirsagatov, M. P. Mikhailova and Yu. P. Yakovlev, *J. Tech. Phys. Lett.* 14, 435 (1989)
- [4] H. Aït Kaci, *Phys. Stat. Sol. (a)* 163, 101-106 (2005)
- [5] M. Mebarki, A. Kadri, and H. Mani *Sol. St. Comm.*, Vol. 72, No8, 795-798(1989)
- [6] Hood, D. Hoffman, Y. Wei, F. Fuchs and M. Razeghi *Appl. Phys. Lett.*, 88, 052112 (2006)
- [7] H. Mathieu, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques* Ed. Masson, paris (1987)
- [8] H.Kroemer, *Hétérostructure devices : a device physicist looks at interfaces* *Surf. Sci.*, 132-543 (1983)
- [9] A. Y. Polyakov, A. G.Miilnes, S. J. Eglash, M. Y. Ye and A. E. Bochkarev, *Sol. Stat..Electronics*, Vol 36, 649 (1993)
- [10] H. Kressel *J. Electr. Matter.* 4., 1081 (1975)
- [11] S. Adachi *J. Appl. phys.* 67. 6427(1990)
- [12] I. Vurgaftman and J. R. Meyer *J. Appl. phys* Vol 89, 5815 (2001)
- [13] R. PÄSSLER. *Phys. Stat. Sol. (b)* 216, 975 (1999)
- [14] Jua .A. Gonzalez-cuevas, T. F. Refaat, .M. N. Abedin, H. E. Elsayed *J. Appl. Phys* 102, 014504 (2007)