



The disorder effect on the electronic properties of ternary alloy $\text{Zn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Bouthaina Bradji, Abderrachid Bechiri, Fella Benmakhlouf,
Djihad Djebbari Djebbari and Nadir Bouarissa

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

October 13, 2019

Effet du désordre compositionnel sur les propriétés électroniques de l'alliage ternaire (Zn, Hg)Te

Bouthaina Bradji^{#1}, Abderrachid Bechiri^{#2},
Fella Benmakhlouf^{#3}, Djihad Djebbari^{#4}

[#] Physics Department, Larbi Tébessi University,
Tébessa, Algeria

¹ bouthaina.bradji@univ-tebessa.dz

² bechiri@yahoo.fr

³ benmakhlouf@yahoo.fr

⁴ djebaridjihad@yahoo.com

Abstract—Our work consists to study the electronic properties of ternary alloy semiconductor $Zn_xHg_{1-x}Te$ in the structure zinc-blende. We used the empirical pseudopotential method (E.P.M) coupled with virtual crystal approximation (VCA) with and without taking account the compositional disorder effect. We calculated the energy gaps E_Γ^V and E_X^V , E_L^V and E_Γ^C , E_X^C and the width of the valence band as well as the antisymmetric gap as a function of composition x of Zinc. We also determined the bands structures of this alloy. A special attention was accentuated on the compositional disorder effect. We can conclude that the methods used are simple and reliable.

Generally, the agreement between our results for the electronic properties, with the experimental and theoretical results available is satisfactory.

Keywords—alloys $Zn_xHg_{1-x}Te$, pseudopotential, virtual crystal approximation.

Résumé—Notre travail consiste à étudier les propriétés électroniques de l'alliage ternaire semi-conducteur $Zn_xHg_{1-x}Te$ dans la structure zinc-blende. Nous avons utilisé la méthode du pseudopotentiel empirique (E.P.M) couplée avec l'approximation du cristal virtuel (VCA) avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel. Nous avons calculé les gaps d'énergies E_Γ^V et E_X^V , E_L^V et E_Γ^C , E_X^C et la largeur de la bande de valence ainsi que le gap antisymétrique en fonction de la composition x de Zinc. Nous avons déterminé aussi les structures de bandes de cet alliage. Une attention particulière a été accentuée sur l'effet du désordre compositionnel. On peut conclure que les méthodes utilisées sont simples et fiables. Généralement, l'accord entre nos résultats pour les propriétés électroniques, avec les résultats expérimentaux et théoriques disponibles sont satisfaisants.

Mots clés—les alliages $Zn_xHg_{1-x}Te$, pseudopotentiel, l'approximation du cristal virtuel

I. INTRODUCTION

les matériaux semi-conducteurs portés par leur importance industrielle ont suscités un vif intérêt de la communauté scientifique tant dans leur analyse expérimentale que dans leur développement théorique [1].

Les alliages représentent une classe importante des matériaux utilisés dans l'industrie des nouvelles technologies, [1]. La réalisation d'alliages à base de semi-conducteurs II-IV

Nadir Bouarissa^{*5}

^{*} Department of Physics, Faculty of Science, University of
M'sila,

M'sila, Algeria

⁵ n_bouarissa@yahoo.fr

semble la mieux avancée avec la commercialisation à moindre coût de diodes laser et de diodes électroluminescentes exploitables dans la région faible du visible (2.0-2.2 eV), les propriétés électroniques sont ajustées par la teneur en un composant de l'alliage [1].

Notre travail est consacré à l'étude d'un alliage ternaire semi-conducteur de type II-VI de la forme $A_xB_{1-x}C$. Ces types des alliages sont miscibles entre eux en toute proportion. Notre alliage d'intérêt est $Zn_xHg_{1-x}Te$. Ces composés binaires sont ZnTe et HgTe.

La structure cristallographique de l'alliage $Zn_xHg_{1-x}Te$ est une structure dite zinc-blende, formée de deux réseaux cubiques à faces centrées, imbriqués, et décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale

II. LA METHODE DE CALCULE UTILISEE

La méthode empirique des pseudopotentiels reste la méthode la plus simple qui offre les résultats les plus compatibles à l'expérience [2].

La méthode du pseudopotentiel empirique locale, couplée à l'approximation du cristal virtuel qui introduit l'effet du désordre compositionnel, comme un potentiel effectif est utilisée pour étudier les propriétés électroniques, à savoir : le gap énergétique, la structure de bandes électronique, la densité des charges électroniques ... etc. [3].

Le pseudopotentiel est défini comme étant une superposition linéaire des pseudopotentiels atomiques de la forme [3] :

$$V_p(r) = V_L(r) + V_{NL}(r) \quad (1)$$

$V_L(r)$: La partie locale.

$V_{NL}(r)$: La partie non locale.

Dans nos calculs on a omis les parties non locales et on a considéré les composants de Fourier de

$V_L(r)$ comme des paramètres du pseudopotentiel [4].

Donc :

$$V_p(r) = V_L(r) = \sum_G S(G)V(G)\exp(iGr) \quad (2)$$

Où $V(G)$ sont les facteurs de forme.

On détermine les paramètres du pseudopotentiel empirique par la méthode non linéaire des moindres carrées [5], dans

laquelle tous les paramètres sont optimisés simultanément sous un critère bien défini de la minimisation de la moyenne de la racine carrée de l'écart des gaps des niveaux d'énergie calculés par la méthode des pseudopotentiels par rapport à ceux trouvés expérimentalement. Il est donné par [5, 6]:

$$\delta = \left[\sum_{i,j} \frac{(\Delta E_{i,j})^2}{m - N} \right]^{1/2} \tag{3}$$

δ : doit être minimal.

$$\text{Où:} \qquad \Delta E_{ij} = E_{\text{exp}}^{ij} + E_{\text{cal}}^{ij} \tag{4}$$

E_{exp}^{ij} et E_{cal}^{ij} sont, respectivement, les énergies mesurées et celles calculées entre le $i^{\text{ème}}$ état au vecteur d'onde ($K = K_i$) et le $j^{\text{ème}}$ état au vecteur d'onde ($K = K_j$) dans les m paires choisis (i, j),

N étant le nombre des paramètres du pseudopotentiel empirique.

Les valeurs de départ des facteurs de forme sont améliorées par itération jusqu'à minimiser le δ .

Pour l'étude des propriétés physiques des alliages ternaires, nous utilisons la VCA avec et sans désordre compositionnel. Cependant, les études expérimentaux et théoriques récentes sur plusieurs alliages semiconducteurs indiquent que la VCA est rompue quand la différence entre les propriétés électroniques des atomes constitutifs dépasse une certaine valeur critique [7, 8].

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Les facteurs de formes

Les facteurs de formes du pseudopotentiel local symétriques et antisymétriques ainsi que les paramètres du réseau des composés semiconducteurs binaires ZnTe et HgTe dans la phase zinc blende sont présentés dans le **tableau (1)**.

Tableau (1) : Les facteurs de forme symétriques (V_s) et antisymétriques (V_A) ajustés en (Ryd) des matériaux semiconducteurs ZnTe et HgTe dans la phase zinc blende ainsi que les paramètres du réseau a en (u.a) et en ($^{\circ}$).

Composé	Facteurs de formes (Ryd)						Paramètre du réseau a
	$V_s(3)$	$V_s(8)$	$V_s(11)$	$V_A(3)$	$V_A(4)$	$V_A(11)$	
HgTe	0.0725	0.2032	0.0353	0.0518	-0.0126	-0.1944	12.2097(u.a)
							6.4610($^{\circ}$)
ZnTe	-0.1261	0.1422	0.016334	0.05143	0.0	-0.2889	11.5345(u.a)
							6.1037($^{\circ}$)

B. Etude des gaps énergétique de l'alliage ternaire $\text{Zn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Il est important de remarquer la dépendance en composition des gaps d'énergie de l'alliage ternaire $\text{Zn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, nommés gap direct E_{Γ}^{Γ} et gaps indirects E_X^{Γ} et E_L^{Γ} [3].

Dans notre calculs les gaps énergétiques pour les composée binaires HgTe et ZnTe pour la concentration de Zinc $x = [0-1]$ avec et sans tenir compte l'effet du désordre compositionnel sont représentés dans le **tableau (2)**.

Tableau (2): Les gaps énergétiques aux points Γ, X et L de l'alliage ternaire $\text{Zn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Composé	Gaps d'énergie (eV)					
	E_{Γ}^{Γ}		E_X^{Γ}		E_L^{Γ}	
	Autres	Cal.	Autres	Cal.	Autres	Cal.
HgTe	-0.15 ^{a,b}	0	2.9 ^c	0.91732	2.4 ^c	3.11667
$\text{Zn}_{0.1}\text{Hg}_{0.9}\text{Te}$	-	0,25358* 0**	-	1,16696* 0,8742**	-	3,3575* 3,10395**
$\text{Zn}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$	-	0,98865* 0,39747**	-	1,6381* 1,21483**	-	3,73446* 3,43437**
$\text{Zn}_{0.5}\text{Hg}_{0.5}\text{Te}$	-	1,72326* 1,09849**	-	2,07559* 1,64106**	-	3,88537* 3,73017**
$\text{Zn}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$	-	2,33924* 1,87759**	-	2,48345* 2,11051**	-	3,69874* 3,80052**
$\text{Zn}_{0.9}\text{Hg}_{0.1}\text{Te}$	-	2,56513* 2,50461**	-	2,86695* 2,63899**	-	3,11224* 3,38014**
ZnTe	2.38 ^a , 2.57 ^{a,c}	2.39087	3.05 ^c , 3.47 ^c	3.05203	3.07 ^c	2.68198

* : Nos calculs sans désordre.

** : Nos calculs avec désordre.

(a) Réf [9].

(b) Réf [10].

(c) Réf [11].

A partir du **tableau (2)** on observe que, surtout les composées binaires les résultats obtenus des gaps d'énergie sont en très bon accord avec les autres résultats disponibles qui sont illustrés dans ce tableau.

Les **figures (1) et (2)** représentent la variation des gaps d'énergies directes et indirectes E_{Γ}^{Γ} , E_X^{Γ} et E_L^{Γ} en fonction de la concentration x de Zinc de l'alliage ternaire $\text{Zn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel.

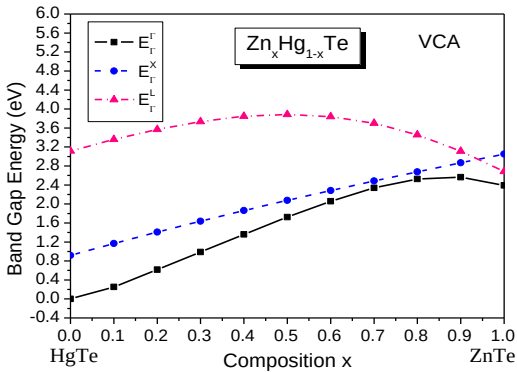


Figure (1): gaps d'énergies direct et indirects en fonction de la concentration "x" de Zinc dans l'alliage ternaire $\text{Zn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ calculés sans tenant compte de l'effet du désordre compositionnel.

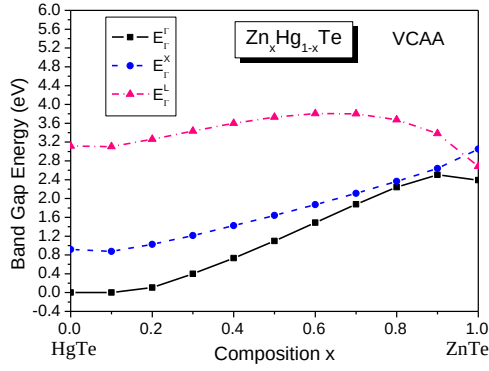


Figure (2): gaps d'énergies directs et indirects en fonction de la concentration "x" de Zinc dans l'alliage ternaire $Zn_xHg_{1-x}Te$ calculés en tenant compte de l'effet du désordre compositionnel.

On remarque que les courbes des trois gaps d'énergie (le gap direct $E_r^Γ$ et les gaps indirects E_r^X et E_r^L), sont presque similaires et non linéaires en fonction de la concentration de Zinc, les interpolations sont ajustées selon les fonctions analytiques de la forme suivante:

$$E = a + bx + cx(x-1) \quad (5)$$

Où c: est le paramètre de courbure du gap d'énergie.

Les expressions analytiques pour $E_r^Γ$ son comme suite:

$$E_r^Γ = -0.16975 + 4.89483x - 2.13765x^2 \quad (VCA) \quad (6)$$

$$E_r^Γ = -0.22309 + 2.45749x + 0.46x^2 \quad (VCAA) \quad (7)$$

L'unité du gap d'énergie est (eV).

D'après l'équation (6), on note que:

- Sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel (VCA) ($P=0$), le bowing (le paramètre de courbure) est égal à (- 2.13765 eV), qui est en désaccord avec la valeur expérimental du bowing optique qui égale à 0.46 eV.

D'après l'équation (III-7), on note que:

- Si on ajoute le terme correctif, c'est à dire en utilisant la VCA Améliorée ($P \neq 0$), qui fait intervenir le potentiel effectif dû à l'effet du désordre compositionnel dans le potentiel total du cristal le bowing est égale à ($c=0.46$ eV) pour $P=0.287605$, il 'ya un très bon accord avec le bowing (le paramètre de courbure) expérimental ($c=0.46$ eV).

On remarque que le gap d'énergie fondamentale augmente non linéairement avec l'augmentation de la concentration x de Zinc à travers les équations (III-6), (III-7) sans et avec désordre, l'effet de désordre est très clair et on ne peut pas le négligé.

- Le gap d'énergies indirect E_r^L sans désordre augmente non linéairement à une concentration $x=0.5$ et diminue non linéairement, aussi que le gap E_r^L avec désordre augmente non linéairement jusqu'à une concentration $x=0.7$ et diminue. On remarque que l'effet de désordre est très clair et décalé le gap d'énergies E_r^L .

- Les gaps d'énergies indirects E_r^X augmentent non linéairement en fonction de la concentration x de Zinc. On remarque aussi que l'effet de désordre est très clair mais faible et on ne peut pas le négligé.

Les interpolations quadratiques des courbes E_r^L et E_r^X sont ajustées selon les expressions analytiques suivantes:

$$E_r^L = 3,05177 + 3,62068x - 3,945x^2 \quad (VCA) \quad (8)$$

$$E_r^L = 2,86983 + 3,41235x - 3,31105x^2 \quad (VCAA) \quad (9)$$

$$E_r^X = 0,92087 + 2,49082x - 0,36367x^2 \quad (VCA) \quad (10)$$

$$E_r^X = 0,84554 + 0,8707x + 1,3095x^2 \quad (VCAA) \quad (11)$$

On constate que lorsqu'on néglige l'effet du désordre les paramètres de courbure sont négatifs. Lorsqu'on tient compte de l'effet du désordre les paramètres de courbure augmentent.

Même constatation a été faite pour les gaps énergétiques E_r^X et E_r^L (figures 3 et 4) et leurs interpolations quadratiques (équations 12 –15).

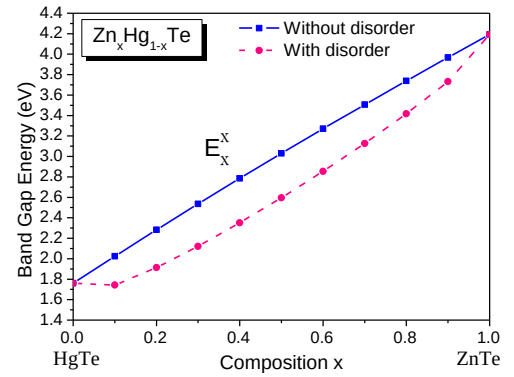


Figure (3) : la variation du gap d'énergie E_r^X en fonction de la concentration "x" de Zinc dans l'alliage ternaire $Zn_xHg_{1-x}Te$ avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel.

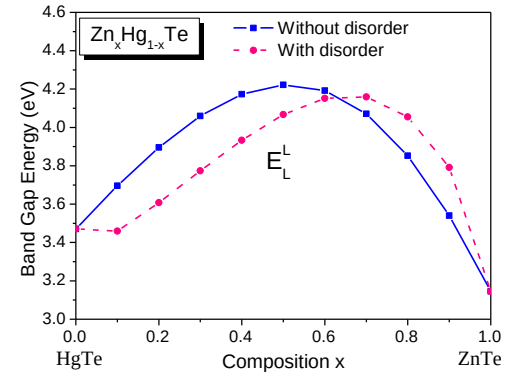


Figure (4) : la variation du gap d'énergie E_r^L en fonction de la concentration "x" de Zinc dans l'alliage ternaire $Zn_xHg_{1-x}Te$ avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel.

$$E_r^X = 1,7622 + 2,64354x - 0,21384x^2 \quad (VCA) \quad (12)$$

$$E_x^X = 1,69553 + 1,0052x + 1,46207x^2 \quad (\text{VCAA}) \quad (13)$$

$$E_L^L = 3,405 + 3,44347x - 3,65616x^2 \quad (\text{VCA}) \quad (14)$$

$$E_L^L = 3,23739 + 3,208x - 3,02363x^2 \quad (\text{VCAA}) \quad (15)$$

La valeur du paramètre de courbure c pour le gap direct E_x^X , lorsqu'on tient compte de l'effet du désordre compositionnel est la plus grande comparativement avec les valeurs du paramètre de courbure c pour les gaps indirects (E_Γ^Γ et E_L^L), cela signifie que le gap énergétique est fortement affecté par le désordre compositionnel.

- On peut constater que ces gaps d'énergies augmentent non linéairement avec l'augmentation de la concentration x de Zinc.
- Dans la figure (III-6), on constate qu'il n'y a pas une transition du gap direct E_Γ^Γ au gap indirect E_Γ^X . Donc pour l'intervalle de la concentration x de Zinc $[0, 1]$, notre résultat montre que notre matériau a un gap direct E_Γ^Γ .

Dans la figure (4), où on tient compte de l'effet du désordre compositionnel, on constate qu'il n'y a pas une transition du gap direct E_Γ^Γ au gap indirect E_Γ^X . Donc pour l'intervalle de la concentration x de Zinc $0 < x < 1$, notre résultat montre que notre matériau a un gap direct E_Γ^Γ .

Le gap antisymétrique au point de haute symétrie "X", entre la première et la deuxième bande de valence, pour les alliages ternaires $Zn_xHg_{1-x}Te$ est présenté dans le tableau (3) avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel.

C. Etude des structures de bande électroniques de l'alliage ternaire $Zn_xHg_{1-x}Te$

L'étude de la structure de bande électronique de l'alliage ternaire $Zn_xHg_{1-x}Te$ est calculée

Pour des points de haute symétrie de la première zone de Brillouin, pour quelques valeurs de la concentration "x" de Zinc, avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel.

Nos résultats pour les composés binaires $HgTe$ et $ZnTe$ sont présentées par les Figure (5) et (6) respectivement.

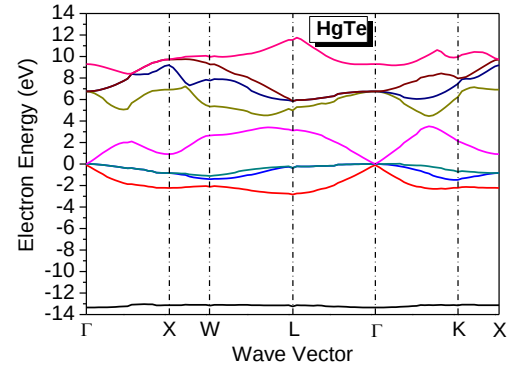


Figure (5): la structure de bande électronique de la composition binaire $HgTe$

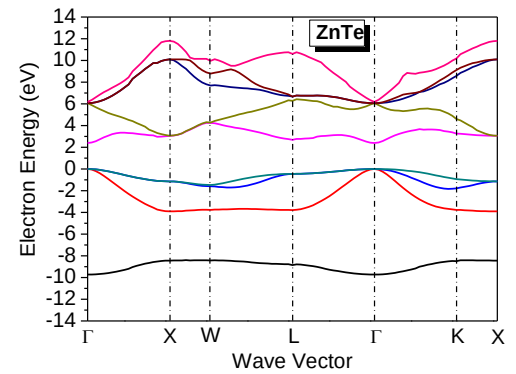


Figure (6): la structure de bande électronique de la composition binaire $ZnTe$

La figure (5) présente la structure de bande électronique de la composition binaire $HgTe$, on remarque que le maximum de la bande de valence est au point Γ et le minimum de la bande de conduction est aussi au point Γ , donc le composé binaire ($HgTe$) est un semi-conducteur à gap d'énergie direct. Ainsi, la figure (6) illustre la structure de bande électronique de la composition binaire $ZnTe$, on remarque aussi que le maximum de la bande de valence est au point de haute symétrie Γ et le minimum de la bande de conduction est aussi au point Γ , donc le composé binaire ($ZnTe$) est un semi-conducteur à gap d'énergie direct E_Γ^Γ .

Les bandes de conduction sont plus dispersées que celles des bandes de valences, cela est dû au fait que les électrons des bandes de conduction sont plus libres.

On remarque qu'il y a un gap entre la première et la deuxième bande de valence au point X, ce gap est relié à la différence des potentiels des cations Zn et Hg et anion Te. Ce gap «antisymétrique» a été proposé comme une mesure qualitative de l'ionicté du cristal ce qui confirme la proposition de Chelikowsky et al. [12]. Ainsi que les résultats trouvés par Bouarissa et al. [13], dans leurs études sur les semiconducteurs de type (IV-IV, II-VI, III-V).

En fait, l'ionicté d'un semi-conducteur est un paramètre important avec lequel on peut distinguer entre liaison covalente et ionique dans les solides [14, 15].

Le tableau (3) représente la variation du gap antisymétrique et l'ionicté du composé binaire de cet alliage.

Les valeurs du gap antisymétrique des composés binaires $HgTe$ et $ZnTe$ sont respectivement 10.91442 eV et 4.53091 eV, l'ionicté de l'alliage $Zn_xHg_{1-x}Te$ diminue avec l'augmentation de la concentration "x" de Zinc, donc le $HgTe$ est plus ionique que le $ZnTe$. On remarque aussi que l'effet du désordre augmente le gap antisymétrique ce que signifie que l'effet du désordre augmente aussi l'ionicté de l'alliage.

Tableau (3): La variation du gap antisymétrique $E^X_{(2-1)v}$ et l'ionicté des composants binaires

Matériaux	Energie $E^X_{(2-1)v}$ (eV)	Ionicté
HgTe	10.91442	0.650 ^{a,b,d} , 0.740 ^c , 0.78 ^d
Zn _{0.1} Hg _{0.9} Te	10,09747 [*] 10,78790 ^{**}	—
Zn _{0.3} Hg _{0.7} Te	8,60377 [*] 9,55714 ^{**}	—
Zn _{0.5} Hg _{0.5} Te	7,29435 [*] 8,21728 ^{**}	—
Zn _{0.7} Hg _{0.3} Te	6,13687 [*] 6,89184 ^{**}	—
Zn _{0.9} Hg _{0.1} Te	5,06463 [*] 5,52952 ^{**}	—
ZnTe	4.53091	0.609 ^{a,b,d} , 0.560 ^c , 0.68 ^d

* Nos calculs sans désordre

** Nos calculs avec désordre

(a) Réf [14].

(b) Réf [16].

(c) Réf [17].

(d) Réf [18].

Les figures (7-9) représentent les structures de bandes électroniques de l'alliage ternaire $Zn_xHg_{1-x}Te$ pour certaines concentrations (x= 0.3, 0.5, 0.7) de Zinc le long des points de haute symétrie de la première zone de Brillouin avec et sans tenir compte de l'effet du désordre. On prend le maximum de la bande de valence comme une référence du zéro d'énergie, ces figures illustre que le maximum de la bande de valence est au point Γ et le minimum de la bande de conduction est aussi au point Γ , donc les alliages ternaires semi-conducteurs, $Zn_{0.3}Hg_{0.7}Te$, $Zn_{0.5}Hg_{0.5}Te$, $Zn_{0.7}Hg_{0.3}Te$, ont un gap direct.

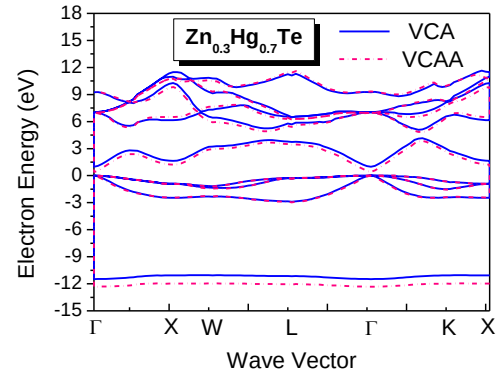


Figure (7): la structure de bande électronique de l'alliage ternaire $Zn_{0.3}Hg_{0.7}Te$

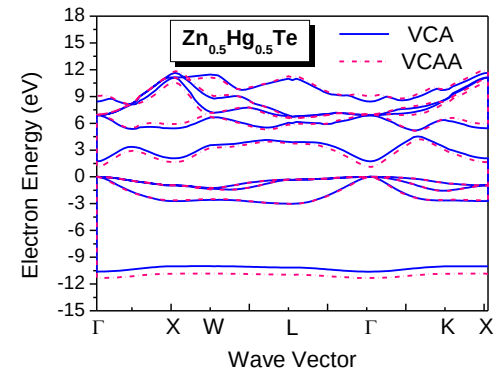


Figure (8): la structure de bande électronique de l'alliage ternaire $Zn_{0.5}Hg_{0.5}Te$

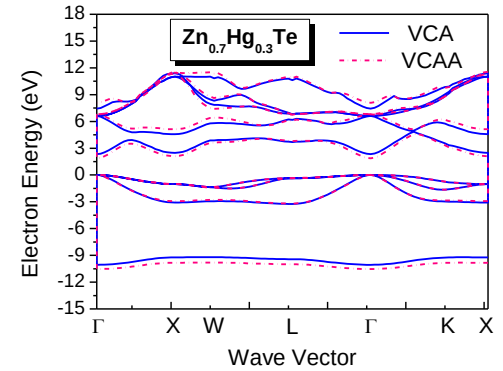


Figure (9): la structure de bande électronique de l'alliage ternaire $Zn_{0.7}Hg_{0.3}Te$

On remarque que l'effet du désordre est très clair et important. On constate aussi les bandes de conduction sont plus dispersées que les bande de valence.

IV. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié quelques propriétés électroniques à savoir, le gap d'énergie et les structures de

bandes des composés semiconducteurs binaires $ZnTe$ et $HgTe$ et leur alliage semi-conducteur ternaire $Zn_xHg_{1-x}Te$.

Nos calculs sont basés sur l'utilisation de la méthode du pseudo potentiel empirique (E.P.M) combiné avec l'approximation du cristal virtuel (VCA) avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel.

Cette méthode a fait preuve d'une efficacité particulière pour l'estimation des gaps direct E_{Γ}^{Γ} , E_{Γ}^X , E_L^L et indirect E_{Γ}^X , E_{Γ}^L et l'estimation du paramètre de courbure ($c=0.46$). Ce dernier a été parfaitement vérifié par une comparaison avec les valeurs expérimentales et théoriques. Les autres propriétés électroniques comme les structures de bandes sont en parfait accord avec les prédictions théoriques et expérimentales. Cela prouve la puissance de notre procédure d'ajustement ($p=0.287605$) et la qualité de nos facteurs de forme.

Nous avons trouvés que les gaps d'énergie E_{Γ}^{Γ} , E_{Γ}^X , E_X^X augmentent d'une façon non linéaire avec l'augmentation de la concentration de Zinc avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel, il y a une augmentation jusqu'à une valeur précisée puis une diminution avec l'augmentation de la concentration de Zinc pour les gaps d'énergie E_{Γ}^L et E_L^L avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel.

Nous avons aperçus qu'il n'y a aucune Transition du gap direct E_{Γ}^{Γ} et E_{Γ}^X pour les concentrations $0 < x < 1$ de Zinc avec et sans tenir compte de l'effet du désordre compositionnel, nos résultat montre que notre matériau est un semiconducteur a gap indirect pour toute les concentrations de Zinc.

Nous avons déterminé les structures de bandes des composés binaire $ZnTe$ et $HgTe$ et leur alliages $Zn_xHg_{1-x}Te$ et le long des points de hautes symétries dans la première zone

de Brillouin, avec et sans tenir compte de l'effet de désordre compositionnel.

REFERENCES

- [1] M. Lomascolo, GH. Li, K. Syassen, R. Cingolani, I. Suemune, Phys. Rev. B, vol. 50, 1994, pp.14635.
- [2] Y. Al- Douri, H. Abid, A. Zaoui, H. Aourag, Physica B, vol.301, 2001, pp. 295.
- [3] S Bacha, A. Bechiri, F. Benmakhlouf, H. Allouache and N. Bouarissa Physica B, vol 406, 2011, pp. 2021.
- [4] A. Bechiri, N. Bouarissa, Superlattices and Microstructures vol 39, 2006, pp. 478-488.
- [5] N. Bouarissa, Phys. Lett. A vol. 245, 1998, pp. 285-291.
- [6] H. Saheb and A. Bechiri, Solid State Phenomena vol. 297, 2019, pp 131-142.
- [7] P. Y. Yu, M. Cardona, Physics and Materials properties, Fourth edition, 2010.
- [8] M. L. Cohen, J. R. Chelikowsky, Electronic structure and optical properties of semiconductors, Springer series in solid-state sciences, 1988.
- [9] S. Adachi, Proprieties of semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors, Ed. John Wiley & Sons, 2009.
- [10] S. Kasap, P. Capper, Springer hand book of electronic and photonic material, Springer Science, 2017.
- [11] S. Adachi, Handbook on physical properties of Semiconductor, II-VI Compound Semiconductors, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [12] J. R. Chelikowsky, T. J. Wagener, J. H. Weaver, A. Jin, Phys. Rev. B, vol, 1989, pp. 9644.
- [13] N. Bouarissa, R. N. West, H. Aourag, Phys. Stat. Sol B, vol. 188, 1995, pp .723.
- [14] J. C. Phillips, "Bonds and Bands in Semiconductors", Academic Press, New York, 1973.
- [15] N. Bouarissa, Physica B, vol 399, 2007, pp. 126.
- [16] N. E. Christensen, S. Satpathy, and Z. Pawlowska, Phys. Rev B, vol 36, 1987, pp. 1032.
- [17] W. A. Harrison, Phys. Rev B, vol 8, 1973, pp 4487.
- [18] S. Adachi, Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors, Ed. John Wiley & Sons , 2005.