



Revue des Matériaux & Energies Renouvelable

Journal home : <https://www.univ-relizane.dz>

ISSN : 2507-7554

E- ISSN : 2661-7595



Contribution à l'étude de ternaire HgCdTe destiné aux applications optoélectroniques.

Open
Access

BELARBIA Fatiha¹, CHERCHEB Youcef², BELOUFA Nabil^{2*}, Bekheira Samir³, BENADJMIA Mhamed benali¹.

¹ GIDD Laboratory, Electrical Engineering Department, Ahmed Zabana University, Relizane, Algria.

² Laboratory of Micro and Nanophysics (LaMiN), National Polytechnic School Oran, ENPO-MA, BP 1523, El M'Naouer, 31000, Oran, Algeria.

³ Laboratory of Materials (LabMat), National Polytechnic School Oran, ENPO-MA, BP 1523, El M'Naouer, 31000, Oran, Algeria. Electronics Engineering Department, Mohamed Boudiaf University, Oran, Algeria

RESUME

En dépit des ses limitations (cout élevé, fragilité, etc.), le ternaire HgCdTe présente des qualités pour les applications infrarouges souvent supérieures à celles de ses concurrents. Il s'agit dans ce travail de prendre connaissance de toutes les données importantes de ce matériau, de faire le bilan de ses avantages mais de ces inconvénient. Les propriétés électroniques et optiques sont aussi calculées. en utilisant la méthode des ondes planes linéairement augmentées (FP-LAPW) dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) implémentée dans le code WIEN2k. Nous avons utilisé l'approximation gradient généralisé GGA, et pour performer le calcul des gaps nous avons utilisé l'approximation mBj.

Article history:

Received 08 May 2021

Received in revised form 09 May 2021

Accepted 28 May 2021

Keys word: HgCdTe; propriétés électroniques; GGA.

Copyright © 2022 - All rights reserved

1. Introduction

Les éléments du groupe V sont préférés aux lacunes du mercure et aux éléments du groupe I pour le dopage d'accepteur extrinsèque en raison de leur faible diffusivité dans le HgCdTe. L'arsenic est un élément du groupe V qui a fait l'objet d'une grande attention ces dernières années [1,2]. Bien que l'arsenic ait permis d'obtenir un dopage de type p du HgCdTe.

en utilisant de l'arsenic a été rapporté par plusieurs groupes [3-7], la nature chimique de l'impureté arsenicale n'a pas encore été mise en évidence nature chimique de l'impureté arsenic.

L'incorporation in situ d'arsenic [8] est routinière par MBE, mais le comportement de type n hautement compensé observé dans les échantillons bruts n'a jamais été expliqué de manière satisfaisante, à l'exception du modèle développé par Berding et al. le modèle développé par Berding et al. avec la suggestion que le rapport que la paire (AsHg-VHg) est le coupable [9].

* beloufa.nabil@gmail.com

De plus, l'activation complète de l'arsenic est limitée à une concentration d'arsenic supérieure 10^{16} cm^{-3} comme adopté par de nombreuses approches. Sinon, l'activation de l'arsenic semble être masquée par certains défauts de type n non identifiés [10].

D'autre part, La compréhension des propriétés électroniques, optiques et structurales des matériaux se fonde sur une représentation correcte de la structure électronique de ces matériaux, grâce aux techniques fournies par la théorie des bandes. Les plus puissantes de ces techniques sont incontestablement celles utilisées par les méthodes ab-initio qui sont utilisées pour des besoins de prédiction de nouveaux matériaux, et pour éviter d'effectuer des expériences très coûteuses ou même irréalisables en laboratoire.

Parmi ces méthodes ab-initio, la méthode linéaire des ondes planes augmentées (FP-LAPW) est l'une des plus précises actuellement pour le calcul de la structure électronique des solides dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT).

Le ternaire HgCdTe est transparent pour les photons à l'énergie inférieure à son gap (domaine de l'infrarouge). Son indice de réfraction est élevé. Les propriétés optiques de HgCdTe ont été principalement étudiées à des énergies du gap [11,12]. Le tellure de mercure et de cadmium (HgCdTe) constitue aujourd'hui le matériau de référence pour l'élaboration des captures quantiques utilisés pour la détection du rayonnement infrarouge entre $1.7 \mu\text{m}$ et $18 \mu\text{m}$. Cette technologie permet de répondre aux besoins d'un nombre croissant d'applications spatiales touchant aussi bien les domaines de l'imagerie (e.g. observation de terre, astronomie), de la spectroscopie (e.g. cartographie de gaz à effet de serre) ou des télécommunications optiques (e.g. matrices de détection pour les systèmes de pointage, d'acquisition et de suivi).

2. Détail de calcul

Nous avons utilisé la méthode FP-LAPW, implémentée dans le code. Wien2k [13]. Ce code permet de calculer les propriétés physiques comme la structure de bande électronique, la densité d'états électroniques et l'énergie totale d'un cristal périodique en se basant sur la connaissance du groupe spatial et le numéro atomique (Z) du matériau considéré. Pour le calcul du potentiel d'échange et de corrélation nous avons utilisé l'approximation du gradient généralisé GGA (PBE96) [14] et le potentiel modifié de Becke-Johnson (mBJ) [15]. En ce qui concerne la région des sphères muffin-tin nous avons utilisé pour assurer la Convergence des harmoniques sphériques $l_{\text{max}}=10$, les fonctions d'ondes dans la région interstitielle sont étendue en ondes planes avec une énergie de coupure $k_{\text{max}}= 10\text{RMT}$ (où RMT est le petit rayon des sphères muffin –tin. Le critère de convergence des cycles auto cohérents (self-consistent) n'est atteinte que lorsque l'énergie totale est stable à 0.1 mRy[16]. donc On a effectué des calculs semi - relativistes (l'effet de spin-orbit est négligé). Les fonctions d'onde, les densités électroniques et le potentiel sont développées en combinaison harmoniques sphériques autour des sites atomiques.

La première étape dans ce genre de calculs consiste à préciser les valeurs des paramètres importants, qui influent sur le temps et la précision du calcul.

- Les rayons de Muffin-tin (R_{mt}), donnés en unités atomiques (u.a). Les valeurs de R_{mtmin} que nous avons utilisées pour Cd (2.5), Hg (2.5), Te(2.4), représentent un bon choix pour notre calcul. Ce choix est basé sur deux critères :

- 1- S'assurer de l'intégration de la majorité des électrons du coeur dans la sphère (Muffin-tin).
- 2- Eviter le chevauchement des sphères (Muffin-tin).

G_{max} est la norme du plus grand vecteur d'onde utilisé pour le développement en ondes planes de la densité de charges. Le nombre de points k considéré dans la zone irréductible de Brillouin, donc tous les résultats représentés sont obtenus avec une convergence de l'ordre de 0.5mRyd. Le calcul des structures de bandes pour nos matériaux est calculé suivant différents points de haute symétrie : pour (111) points dans la zone de Brillouin.

Donc la liaison II-VI résulte de l'hybridation sp^3 des orbitales atomiques, cette liaison est iono-covalente avec un caractère d'ionicté qui fournit aux semi-conducteurs II-VI une propriété remarquable : fortes interactions coulombiennes, alors que le caractère covalent leur impose la structure suivante : chaque élément II (respectivement élément VI) se retrouve dans un environnement tétraédrique d'élément VI (respectivement élément II).

II : Un cation, appelé aussi métal de transition, possédant deux électrons de valence sur une orbitale " s ", ainsi qu'une couche " d " qui peut être soit complète soit incomplète.

Dans nos calculs, nous avons traité les états Cd : ($4d^{10} 4s^2$), Hg : ($5d^6 6s^2$), Te ($5s^2 5p^4$) comme étant des états de valence. On note que les critères de convergences sont vérifiées (Rmt*kmax, Kpoint et lmax).

3. Résultats et discussions

3.1 Propriétés structures

Nous avons pris une cellule conventionnelle cubique de HgCdTe contenant huit atomes, dont quatre atomes de Cd et quatre autres atomes de Te. Dans ce modèle, l'alliage possède une symétrie cubique simple. Dans le modèle à huit atomes, l'alliage $Hg_{0,25}Cd_{0,75}Te$ est obtenu en remplaçant un atome de Hg par atome de Cd. Le $Hg_{0,5}Cd_{0,5}Te$ est quant à lui obtenu en remplaçant deux atomes de Hg par deux atomes de Cd et enfin pour le $Hg_{0,25}Cd_{0,75}Te$, il suffit de remplacer trois atomes de Hg par trois autres atomes de Cd.

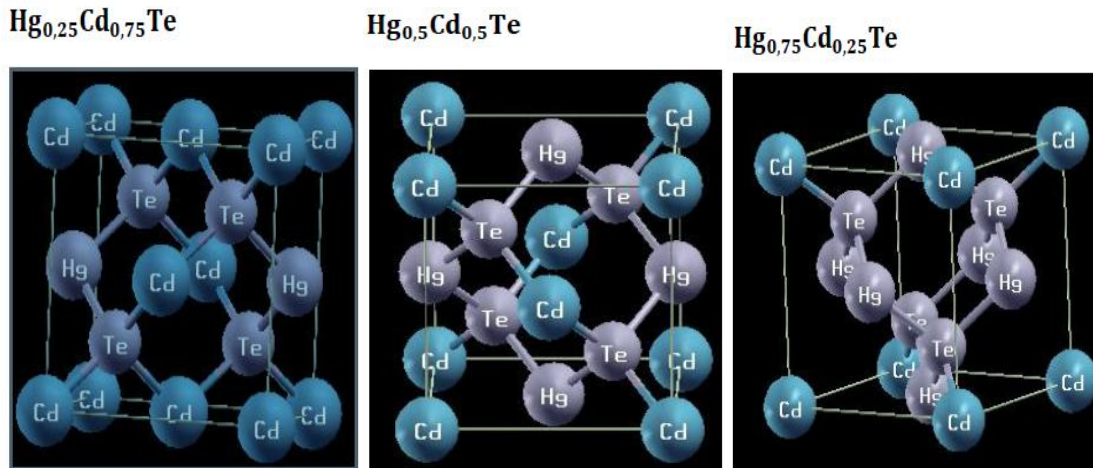


Figure 1– Les différentes structures cristallines utilisées correspondantes à différentes concentrations en Cd%.

La figure (1) montre la variation de l'énergie totale de HgCdTe en phase cubique simple avec le volume, et ceci dans les trois cas d'alliage. Après avoir fitté à l'aide de l'équation d'états de Murnaghan [3], nous remarquons que pour l'énergie totale à l'équilibre, le volume à l'équilibre correspondant est $V_0 = 1986.1081$ (u.a)³, 1978.8674 (u.a)³, et 1973.362 (u.a)³ pour $x = 0.25, 0.5$ et 0.75 , respectivement. Ceci implique que les constantes du réseau sont respectivement; 12.57 u.a, 12.55 u.a et 12.54 u.a. Le coefficient de compressibilité (bulk modulus) trouvé est $B = 34.75$ GPa, 35.44 GPa et 34.52 GPa.

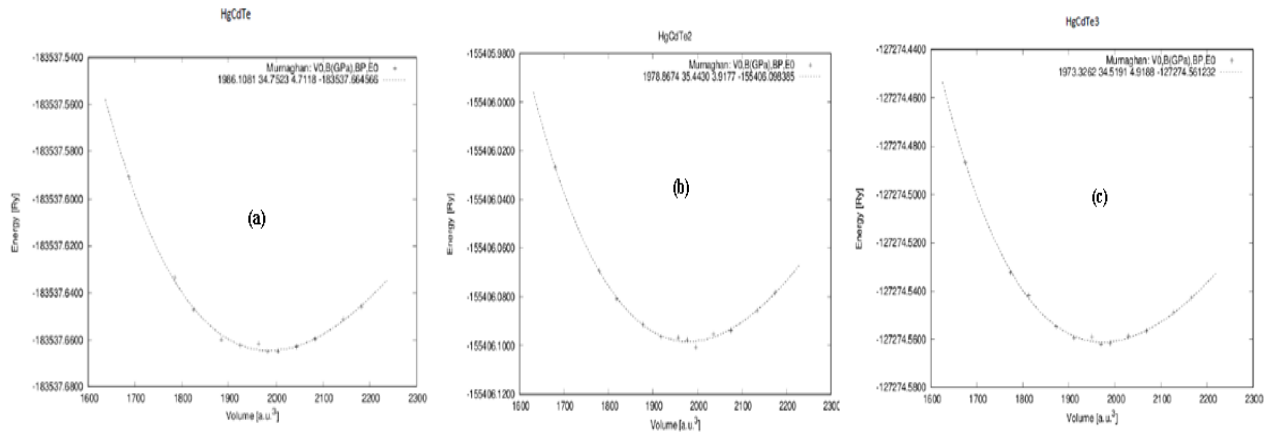


Figure 2– Minimisation de (a) $Hg_{0.25}Cd_{0.75}Te$, (b) $Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$ et (c) $Hg_{0.75}Cd_{0.25}Te$

Table 1. Comparaison des différents résultats pour les alliages $Hg_xCd_{1-x}Te$.

	Notre travail			Autre travail
	$Hg_{0.25}Cd_{0.75}Te$	$Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$	$Hg_{0.75}Cd_{0.25}Te$	
Volume	1973.3262	1978.8674	1986.1081	1843.24 ^a ; 1867.68 ^a ; 1867.68 ^a
$a_0(\text{\AA})$	6.635	6.64	6.65	6.49 ^a ; 6.52 ^a ; 6.51 ^a
B(GPa)	34.52	35.44	34.75	44.574 ^a ; 42.367 ^a ; 43.250 ^a
$E_0(\text{eV})$	-127274.561	-155406.09	-183537.664	/

^a Référence : [17]

Les variations du paramètre de réseau de l'alliage en fonction de la concentration x , comparées avec celles obtenues avec l'application de loi de Vegard [18] sont présentées par la figure (3), où on voit une décroissance de paramètre de réseau en fonction de la variation de la concentration. La loi de Vegard qui s'écrit de la façon suivante :

$$a_{(HgxCd_{1-x}Te)} = x a_{HgTe} + (1-x) a_{CdTe} \quad \text{Eq1}$$

$a_{(HgxCd_{1-x}Te)}$, a_{HgTe} et a_{CdTe} les paramètres de réseaux de l'alliage.

On voit un décalage remarquable entre la courbe de paramètre de réseau calculé et suivant la loi de Vegard, ceci implique l'existence d'un paramètre de Bowing (d'ajustement) important du essentiellement du aux : la relaxation de la structure, déformation du cristal et la différence d'ionicté entre les massifs (CdTe et HgTe) qui traduit par un transfert de charge.

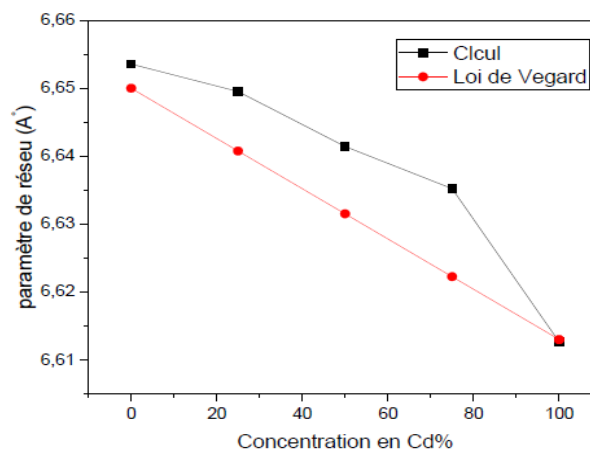


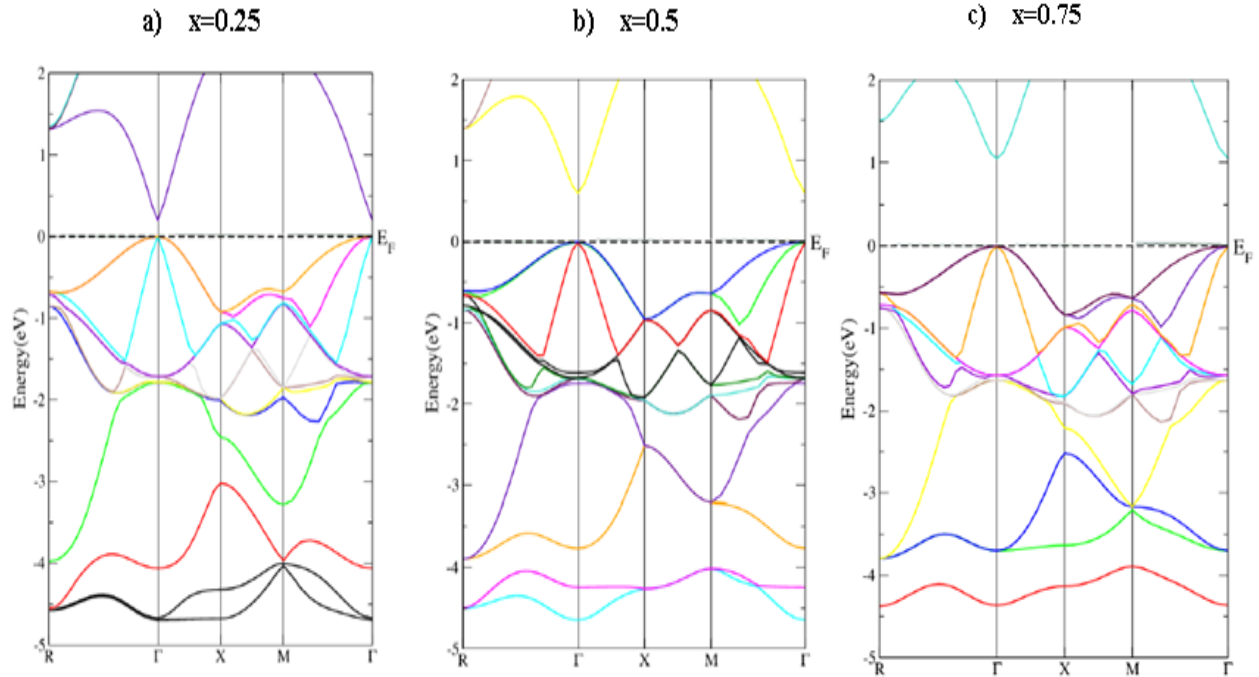
Figure 3– Variation du paramètre de réseau en fonction de Cd%.

3.2 Propriétés électroniques

3.2.1 Structure de Bande

Les structures des bandes de $Hg_{0.25}Cd_{0.75}Te$, $Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$ et $Hg_{0.75}Cd_{0.25}Te$ sont représentées sur la figure (4). Le choix des points de haute symétrie correspond à la symétrie cubique simple .

Dans les trois cas d'alliage, on voit bien que le minimum de la bande de conduction (BC) et le maximum de la bande de valence (BV) sont situés au point Γ , ce gap direct vaut : 0.21 eV pour $x = 0.25$, et 0.62 eV pour $x=0.5$ et 1.05 pour $x=0.75$. Ces valeurs sont calculées avec mbj.

Figure 4– Structure de Bande d'alliage $Hg_xCd_{1-x}Te$ Table 2–Les valeurs des gaps de $Hg_xCd_{1-x}Te$

Gap d'énergie (eV)	Nos résultats (mBJ)		
	$Hg_{0.75}Cd_{0.25}Te$	$Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$	$Hg_{0.25}Cd_{0.75}Te$
$(\Gamma \rightarrow \Gamma)$	0.21	0.62	1.05
$(\Gamma \rightarrow R)$	1.31	1.39	1.51

Sur la figure (4), nous montrons la dépendance de la structure de bande d'alliage $Hg_xCd_{1-x}Te$ en fonction de la composition x au point Γ . En effet, dans l'approximation du cristal virtuel VCA, la bande interdite négative pour la structure HgTe, augmente linéairement avec la composition x , jusqu'à ce qu'elle atteigne la structure de CdTe. d'après [18] :

- ❖ Hg Cd Te présente un gap nul quand $(E_{\Gamma_8}) - (E_{\Gamma_6}) = 0$ pour $x \approx 16\%$.
- ❖ Pour $x < x$, l'alliage a la même structure semi-métallique que HgTe.
- ❖ Pour $x > x$, l'état Γ_6 est au dessus de l'état Γ_8 , et au même moment la bande Γ_6 et Γ_8 changent de signe au fur et à mesure que le gap s'ouvre.

Dans notre travail, la variation du gap $Hg_xCd_{1-x}Te$ en fonction de la composition x est rapportée dans la figure(4). Nous avons appliqué La VCA (l'approximation du cristal virtuel) [19] qui donne le gap de l'alliage en fonction de la concentration x .

3.3 Propriétés optiques

3.3.1 Constante diélectrique statique

Nous présentons la variation de la constante diélectrique statique ϵ_s à la fréquence nulle en fonction de la composition en concentration en Cadmium (Cd) sur la figure (5). Pour la comparaison, nous avons utilisé la formule empirique suivante [20] :

$$\epsilon_s = 20.6 - 15.6x + 5.7x^2 \quad \text{Eq2}$$

On remarque que la constante diélectrique statique diminue quand la concentration en cadmium augmente.

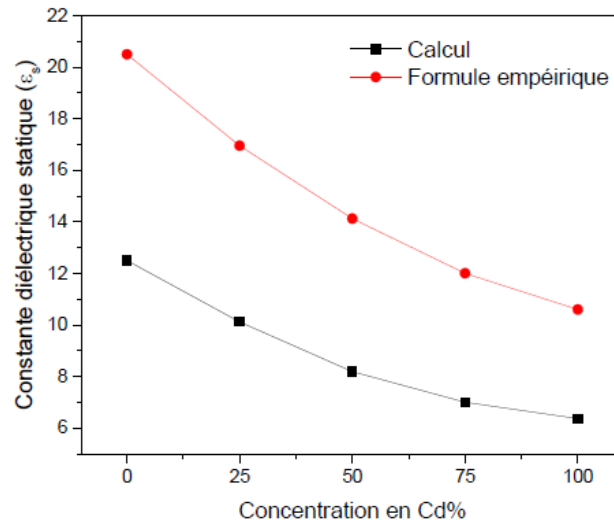


Figure 5– Variation de la constante diélectrique statique de l'alliage $Hg_x Cd_{1-x} Te$ en fonction de la composition de l'alliage x .

3.3.2 Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption $\alpha(\omega)$ caractérise la partie d'énergie absorbée par le solide, il peut être défini en fonction du coefficient d'extinction par la relation :

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi}{\lambda} k(\omega) \quad \text{Eq 3}$$

Où λ représente la longueur d'onde de la lumière dans le vide.

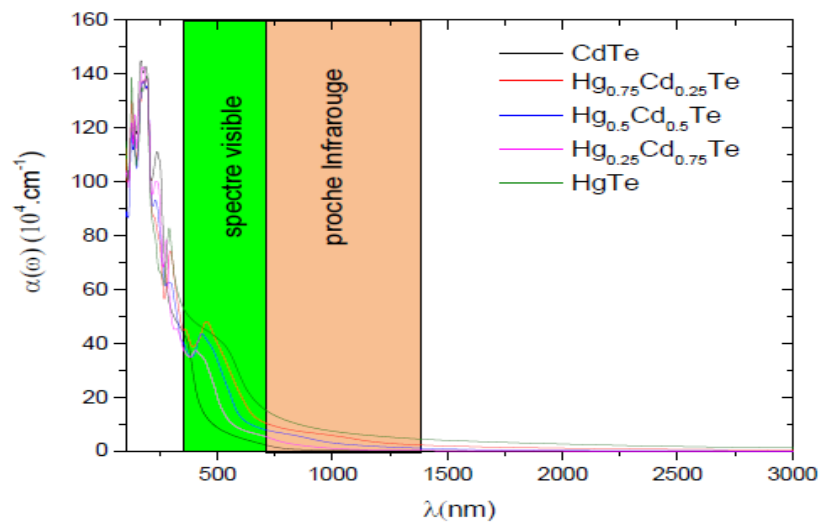


Figure 6– La variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde.

Pour nos matériaux le coefficient d'absorption augmente en fonction de l'énergie de l'onde incidente. L'intensité de l'onde incidente est reliée au coefficient d'absorption en négligeant la perte d'énergie due à la réflexion par l'expression suivante :

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha(\omega) x} \quad \text{Eq4}$$

$I(x)$: l'épaisseur du solide.

I_0 : l'intensité de l'onde dans le vide.

En examinant les courbes du coefficient d'absorption, on observe que le coefficient d'absorption commence à croître jusqu'à certain valeur de l'énergie au delà de la longueur d'onde (correspondante à l'énergie d'excitation), l'énergie n'est plus suffisante pour extraire des électrons, d'où la chute brutale de l'absorption. On confirme que le $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ est caractérisé par faible absorption dans la région proche infrarouge vis-à-vis la région visible ou la région ultraviolet.

On note que pour $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, où nous avons gap fondamental à une transition directe. La figure (7) montre la variation du coefficient d'absorption optique α dans l'alliage $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, ce coefficient commence à augmenter très rapidement dès que l'énergie de gap $E_g > 0$

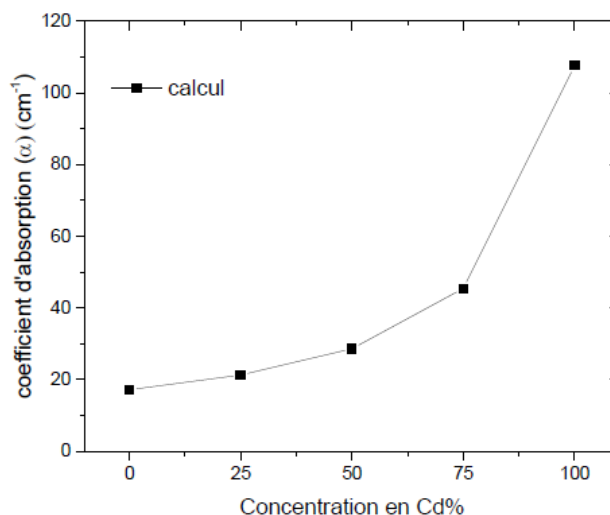


Figure 7– La variation du coefficient d'absorption optique dans l'alliage $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$

3.3.3 La réflectivité optique

La réflectivité de la lumière est importante dans le calcul des propriétés optiques, effectivement, la réflectivité est sensible à la combinaison compliquée de la fonction diélectrique. Nous illustrons sur la figure(8), la réflectivité pour différents concentrations 0%, 25%, 50%, 75% et 100% , nous présentons une comparaison entre les courbes de réflectivités en fonction de la longueur d'onde. Toutes les concentrations présentent des réflectivités d'environ 30%.

On constate que le $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ présente des oscillations de la réflectivité qui augmente jusqu'à la région visible puis elles diminuent dans la région proche infrarouge (NIR région). Le CdTe est nettement inférieur à la réflectivité du HgTe. On note aussi que la réflectivité pour les trois concentrations continue à diminuer dans la région infrarouge.

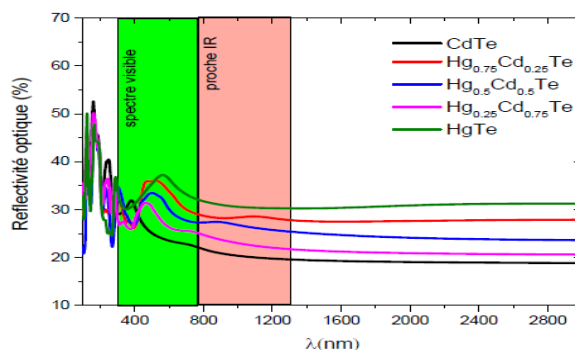


Figure 8– Comparaison entre les courbes de réflectivités en fonction de la longueur d'onde (λ) du $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$.

3.3.4 La transmittance optique

La figure (9), illustre la courbe de la transmittance optique de différentes concentrations en Cadmium. . On constate que les courbes sont caractérisées par une transmittance élevée dans les régions proche et moyen infrarouge (NIR et MIR) et des valeurs faibles dans la région Ultraviolette (UV) et la région visible. La transmittance est obtenue en combine les formules théoriques [21]

$$T = (1 - R)^2 \cdot e^{-ad} \quad \text{Eq5}$$

Où

$$T + A + R = 1 \quad \text{Eq6}$$

Telle que :

T : représente la transmittance optique.

R : représente la réflectivité optique.

et

A : représente l'absorbance où elle est liée à l'absorption par la relation suivante :

$$A = e^{-ad} \quad \text{Eq7}$$

La transmittance du CdTe pur est d'environ 66% dans le MIR., en effet, la réflectivité fait réduire la valeur idéal (100%) d'environ 30% dans la région NIR. On voit aussi que l'alliage $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ présente des faibles valeurs de transmittance dans la région ultraviolette (UV) et visible.

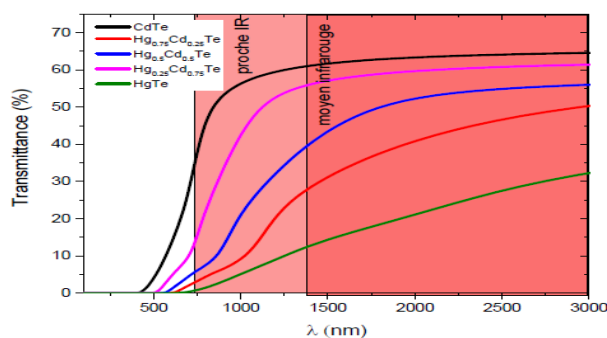


Figure 9– Comparaison entre les courbes du Transmittance optique en fonction de la longueur d'onde en (nm) du $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$.

4. Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude des propriétés structurales, électroniques et optiques de ternaire de HgCdTe. Cet alliage occupe une place majeure dans le domaine de l'infrarouge en général et de l'imagerie et de la vision nocturne en particulier, en utilisant la méthode des ondes planes linéairement augmentées (FP-LAPW) dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) implémentée dans le code WIEN2k. Nous avons utilisé l'approximation gradient généralisé GGA, et pour performer le calcul des gaps nous avons utilisé l'approximation mBj.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

On voit une décroissance de paramètre de réseau en fonction de la variation de la concentration Cd%. Il y a un décalage remarquable entre la courbe de paramètre de réseau calculé et suivant la loi de Vegard, ceci implique l'existence d'un paramètre de Bowing (d'ajustement) important du essentiellement du aux : la relaxation de la structure, déformation du cristal et la différence d'ionicté entre les massifs (CdTe et HgTe) qui traduit par un transfert de charge.

la structure de Bande : Dans les 3 cas d'alliage, on voit bien que le minimum de la bande de conduction (BC) et le maximum de la bande de valence (BV) sont situés au point Γ , ce gap direct vaut : 0.21 eV pour $x=0.25$, et 0.62 eV pour $x=0.5$ et 1.05 pour $x=0.75$. Ces valeurs sont calculées avec mBj, cette variation du gap de $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ est croissante en concentration de Cadmium "Cd" à la température ambiante et va de -0.03 dans HgTe) à +1.53eV dans CdTe. $x = 4\%$ est la valeur critique de la concentration pour la quelle se produit la transition semi-métal - semiconducteur avec $E_g = 0$.

REFERENCES

- [1]- Harman, T.C, 1989, "Optically pumped LPE-grown $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ lasers ", J. Electron. Mater. 8, 191.
- [2]- Wijewarnasuriya P.S and Sivananthan S, 1998, "Arsenic incorporation in HgCdTe grown by molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Lett. 72, 1694.
- [3]- Bevan M.J, Chen M.C and Shih H.D, 1995, "The effect of wet etching on surface properties of HgCdTe", Appl. Phys. Lett. 67, 3450.
- [4]- Aqariden F, Wijewarnasuriya PS, Sivananthan S, Vac, 1995, "Electrical properties of in situ As doped epilayers grown by molecular beam epitaxy", J. Sci. Technol. B 16, 1309.
- [5]- Bubulac L.O, Edwall D.D and Wiswanathan C.R, 1991, "Dynamics of arsenic diffusion in metalorganic chemical deposited HgCdTe on GaAs/Si substrates", J. Vac. Sci. Technol. B 9, 1695.
- [6]- Aqariden F, Shih H D, Kinch M A, Schaaake H F, 2001, "Electrical properties of low-arsenic-doped HgCdTe grown by molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Lett. 78, 3481.
- [7]- Selamet Y, Badano G, Grein C H, Boieriu P, Nathan V, Sivananthan S, 2001, "Electrical activation and electrical properties of arsenic-doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayers grown by MBE", Proceedings of SPIE 4454, 71.
- [8]- Lee T S, Garland J, Grein C H, Sumstine M, Jandeska A, Selamet Y, Sivananthan S, 2000, "Correlation of arsenic incorporation and its electrical activation in MBE HgCdTe", J. Electron. Mater. 29, 869.
- [9]- Berdinbg M A, Sher A, Vanschilfgaarde M, Chen A C, J. Arias J, 1998, "Modeling of arsenic activation in HgCdTe", J. Electron. Mater. 27, 605.
- [10]- Boieriu P, Grein C H, Jung H S, Garland J, 2005, "Arsenic activation in molecular beam epitaxy grown, in situ doped HgCdTe(211)", Appl. Phys. Lett. 86, 212106.
- [11]- Norton P, 2002, "HgCdTe infrared detectors" Opto-Electron. Rev. 10, 159-174.
- [12]- Lei W, Chen Y, Xu B, Jin P, Zhao C, Yu K, and Z .G, 2005, "One-Dimensional Nanostructures", Wang Nanotechnology; vol16, p2785.
- [13]- Blaha P, Schwaerz K, Madsen H, Kvasnicka D, and Luitz J, 2001. "WIEN2K", An Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties, Karlheinz Schwarz, Techn. University at Wien, Austria, ISBN 3 - 9501031-1-2.
- [14]- Langreth D. C. and Perdew J. P. 1980, "Generalized Gradient Approximations for Exchange", Phys. Rev. B 21, 5469.
- [15]- Bakhtiar U, Ahmed A, Shaari F, El Haj H, Mohammed B, 2014, "Study of wurtzite and zincblende GaN/InN based solar cells alloys: First-principles investigation within the improved modified Becke-Johnson potential", Solar Energy ; Vol. 107, p543-552.
- [16]- Schleife A, Fuchs F, Furthmüller J, and Bechstedt F, 2006, "First-principles study of ground- and excited-state properties of polymorphs", Phys. Rev. ; 73, 245212.
- [17]- Benson, J. D. et Martinka, 2008, "M. Modeling of the Structural Properties of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ", Journal of Electronic Materials, 2008, 37, 1166-1170.
- [18]- Lalitha, S, Karazhanov, S. Z., Ravindran, P., Senthilarasu, S., Sathyamoorthy, R., & Janabergenov, J, 2007, "Electronic structure, structural and optical properties of thermally evaporated CdTe thin films", Physica B: Condensed Matter, 387(1-2), 227-238.
- [19]- Vegard L, Vegard, Z, 1921, "Die konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome", Phys. 5 (1921) 17.
- [20]- Rogalski, 2005, "HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook", Prog. Phys. 68. 2267-2336, (2005).