مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (29) العدد (4) 2007
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Basic Sciences Series Vol. (29) No. (4) 2007

تحضير ودراسة المتصل الثنائي Al,Cu,Ag/CdTe-p

الدكتور رياض العبد الله *
الدكتور أيمن جندل كسيبي **
زكريا محمد علي الشرفي ***

(تاريخ الإيداع 18 / 7 / 2007. قُبِل للنشر في 2007/10/31)

□ الملخّص □

تم في هذا البحث دراسة الميزة I-V لمتصلات ثنائية من النوع $Al,Cu,Ag/CdTe_{(p)}$ من خلال ترسيب طبقات رقيقة من المعادن Al, Cu, Ag على فيلم رقيق من $CdTe_{(p)}$ محضر بثلاث طرق مختلفة:

1) ترسيب الطبقات المتراكمة من العنصرين Cd و Te.
2) ترسيب مزيج من العنصرين Cd و Te
3) ترسيب مسحوق من البلورة CdTe.

ثم أخضعت هذه الأفلام إلى المعالجة الحرارية فيما بعد الترسيب في الدرجة 400^oC خارج حجره التخلية.

تتصف هذه الأفلام ببنية مكعبة مركزية الوجوه ($a\approx6.497A^o$). تم حساب كلٍ من معامل الامتصاص وعرض العصابة المحظورة لهذه الطبقة. أشارت الميزة (I-V) بوضوح إلى خاصة تقويم التيار في هذه المتصلات نتيجة تشكل حاجز شوتكي. حدد كل من عامل المثالية ($n\approx10$) وكثافة تيار الإشباع $\left(J_s \approx 10^{-8}\frac{A}{Cm^2}\right)$ وارتفاع حاجز شوتكي $\left(q\phi_{Bp} \approx 0.75eV - 0.82eV\right)$. فسر ارتفاع عامل المثالية بوجود طبقة رقيقة بينية من الأكسيد $CdTeO_3$ التي تسبب ازدياداً في الكمون الداخلي V_{bi} وتأخراً في عتبة التيار (حول القيمة 0.6V). و قد تميز ارتفاع حاجز شوتكي بارتفاع الكهروسلبية للمعدن.

لوحظ تحسن في قيم كثافة التيار في المتصلات المحضرة بالطريقة الأولى، وطابق هذا التحسن نقصان ارتفاع حاجز شوتكي، وفسر هذا الأمر نتيجة تزايد حجم الحبيبات البلورية لـ CdTe وزيادة بقايا عنصر Te، إذْ تسيطر النوعية (p) أكثر وتنخفض مقاومة المتصل الثنائي.

كلمات مفتاحية: $CdTe_{(p)}$، الميزة I-V–، فيلم رقيق، حاجز شوتكي، عامل المثالية.

* أستاذ في قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة البعث– سورية.
** أستاذ مساعد في قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة البعث– سورية.
*** طالب دكتوراه في قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة البعث– سورية– يمني الجنسية.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (29) العدد (4) 2007
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Basic Sciences Series Vol. (29) No. (4) 2007

Preparing and Studying Al, Cu, Ag/CdTe-p Diode

Dr. R. Al-Abdellah *
Dr. Ayman Ksibe**
Zakaraya M. A. Al-Sharafi***

(Received 18 / 7 / 2007. Accepted 31/10/2007)

□ ABSTRACT □

In this research, the I-V characteristic of Al,Cu,Ag/CdTe-p diode is studied by depositing three layers of metals Al, Cu Ag on thin film of CdTe-p prepared by three different methods:

- Depositing the accumulative layers of Cd and Te elements.
- Depositing a mixture of Cd and Te elements.
- Depositing a powder of CdTe monocrystal.

These films were then thermally annealed after deposition at a temperature of 400°C outside the evacuation chamber.

These films possess a face centered cubic structure (F.C.C.) (a= 6.497Å). The absorption coefficient and the energy band gap of thin layer were calculated. The I-V characteristic clearly indicates the current rectification property in there diodes a result of Schottky barrier formation. The ideality factor (n≈10) and the saturation current density $\left(J_s \approx 10^{-8}\frac{A}{Cm^2}\right)$ were determined. The height of Schottky barrier was been calculated $\left(q\phi_{Bp} \approx 0.75eV - 0.82eV\right)$. The increase in the ideality factor was interpreted by the interfacial layer of $CdTeO_3$ oxide which caused an increase in the internal potential V_{bi} and a dilation in the current growth threshold around value 0.6 V. The height of Schottky barrier was characterized by an increase in the electronegative /value of the metal. An enhancement of the metal occurs in the current density values in the diodes prepared by the first method. Thin enhancement is accompanied by a decrease in Schottky barrier height and is related to the increase in the grain size and an increase in the remaining Te element where type (p) is enhanced greatly and the resistance of the diode is decreased.

Keywords: CdTe, p- type, I-V characteristic, thin film, Schottky barrier, ideality factor.

*Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Albaath University, Homs, Syria.
**Associate Prof, Department of Physics, Faculty of Sciences, Albaath University, Homs, Syria.
***Ph. D. Student, Department of Physics, Faculty of Sciences, Albaath University, Homs, Syria.

1- مقدمة:

تعتمد الأجهزة الإلكترونية والضوئية الإلكترونية في أدائها على المتصل معدن– نصف ناقل (M-S)، في حال استخدامه كمتصل ثنائي ذي حاجز شوتكي في التطبيقات المختلفة لتقويم التيار، وفي التحويل الفوتوفلطائي. وفي كلتا الحالتين يلزمنا طبقة فعاله نصف ناقل كمادة تلوريد الكادميوم موضوع بحثنا الحالي، وفي كلا التطبيقين السابقين يتوقف سلوك المتصل على طبيعة المادة الفعَالة وخصائصها CdTe ونوعها (p) أو(n) وإشابتها أو عدم إشابتها وهذه الميزات بدورها ترتبط ارتباطا وثيقا بطريقه تحضير الطبقة الأساسية من CdTe.

للتوصل إلى شروط تشكل المتصل كحاجز شوتكي أو كتماس أومي يلزم الرجوع لبعض الأسس الإلكترونية المتعلقة بخروج الإلكترونات من المادة [1,2]. وفي هذا الصدد نذكّرُ بالمقادير التالية: $q\phi_m$ (حيث ϕ_m بالفولت) تابع العمل للمعدن وهو الطاقة اللازمة لنزع الإلكترون من سوية فرمي في المعدن إلى سوية الخلاء E_{Vac} و $q\phi_s$ تابع العمل لنصف الناقل ويعطى بفرق الطاقة بين سوية فرمي في نصف الناقل وسوية الخلاء. يمثل المقدار $q\chi = E_{Vac} - E_C$ الألفة الإلكترونية(electron affinity) لنصف الناقل وهي الطاقة اللازمة لنقل الإلكترونات من أدنى عصابة الناقلية إلى الخلاء.

تتلخص شروط تشكل حاجز شوتكي بما يخص دراستنا كما يلي: [2,3,.4]

- عندما $\phi_m \langle \phi_s$ يشكل النوع (p) حاجزاً شوتكياً ويشكل النوع (n) تماساً أومياً.
- عندما $\phi_m \rangle \phi_s$ يشكل النوع (p) تماساً أومياً ويشكل النوع (n) حاجز شوتكي.

ونظرياً يصبح المتصل أومياً عندما يكون ارتفاع حاجزاً شوتكياً $q\phi_p$ صفراً أو سالباً حيث تكون مقاومة المتصل أصغريه ويحدث تدفق للإلكترونات بشكل متناظر تقريباً في كلٍ من التغذية الأمامية و التغذية العكسية [4,5,6] .

يتميز تلوريد الكادميوم CdTe بألفة إلكترونية عالية نسبياً $(\chi = 4.28eV, 4.3eV)$ [8,7] وتابع عمل $\phi_{s(p)} = E_g + \chi$ أكبر من 5.7 eV اعتمادا على قيمة E_g ،وباعتبار أن تابع العمل لمعظم المعادن يتراوح بين 4 eV - 5 eV [3,5,8,10] فإنه من الصعب الحصول على متصل ثنائي من النوع M/CdTe-p يتصف بصفات التماس الأومي، وخصوصاً عندما تكون الإشابة ضئيلة التركيز أو أن يكون نصف الناقل غير مشوب، وعلى العكس فمن السهولة الحصول على حاجز شوتكي من النوع M/CdTe-p في حين أن النوع CdTe–n يمكن أن يستخدم بسهوله أكثر للحصول على تماس أومي ولكن هذا ليس ضرورياً. فقد حصل P.C.Sarmah وزملاؤه [11] على متصلات ثنائية بحاجز شوتكي من CdTe–n لعدة معادن ولكن سلوكها يقترب من سلوك التماس الأومي خصوصاً في مجال الجهد المطبق الأصغر من 0.5 V

تتوقف قيمة تابع العمل للمعدن على طريقة قياسه وعلى طريقة تحضير سطح المعدن [10]، وتتوقف قيمة E_g على طريقة التحضير التي يتم بها تشكيل الفيلم الرقيق منCdTe [12,13]، وعليه سيختلف المتصل M/CdTe–p الناتج من حيث ارتفاع حاجز شوتكي ومواصفاته الإلكترونية الأخرى. لذلك فإن دراسة حاجز شوتكي لمعادن مختلفة مع فيلم رقيق من CdTe–p محضَرٌ بطرق متباينة تحتل أولوية مهمة في طريق التطبيقات العملية لمتصلات تلوريد الكادميوم الثنائية.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية المتصلات الثنائية المحضرة في هذا البحث من تلوريد الكادميوم في إمكانية استخدامها في الأدوات الإلكترونية والإلكترونية الضوئية كمقوماتٍ للتيار وأدواتٍ للتحويل الفوتوفلطائي. ويهدف البحث إلى دراسة الميزة I-V لمتصلات ثنائية من النوع Al, Cu, Ag/CdTe-p ودراسة تأثير طريقة التحضير عليها حيث استخدمت أفلام رقيقة محضرة بثلاث طرق مختلفة:

1) فيلم رقيق بطريقة الطبقات الأولية المتراكمة Stacked Elemental Layer Technique بتنوع المعالجة الحرارية.

2) فيلم رقيق بطريقة تبخير مزيج من مسحوق عنصري Cd و Te متبوعة بالمعالجة الحرارية.

3) فيلم رقيق بالترسيب المباشر من المركب CdTe النقي على الركيزة متبوعة بالمعالجة الحرارية.

ولمعرفة تناسق النتائج وانتظامها regularity نوقشت خصائص ثلاث متصلات مختلفة Cu/ $CdTe_{(p)}$, Al/ $CdTe_{(p)}$, $Ag/CdTe_{(p)}$ محضرة بشروط وأبعاد متماثلة إلى حدٍ كبير.

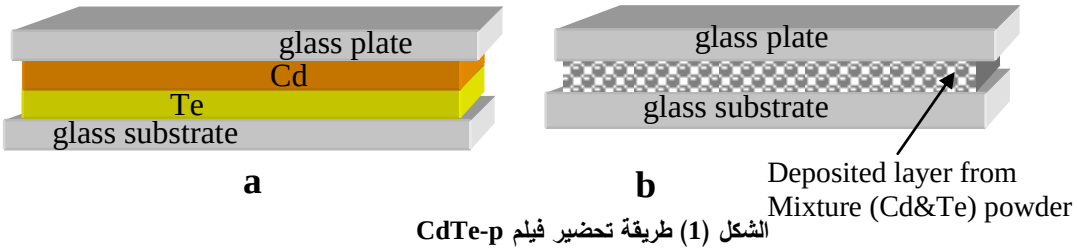
3- طرق الحصول على الأفلام الرقيقة والقياسات التجريبية:

3-1 تحضير الطبقة الأساسية للمتصل (M-S) من نصف الناقل CdTe-p

نظراً لتأثير طريقة التحضير على الخصائص البنيوية والضوئية والإلكترونية للمتصل الثنائي قمنا بتحضير فيلم رقيق CdTe–p بثلاث طرق مختلفة، وتشترك جميعها بطريقة الترسيب في الخلاء vacuum deposition على ركائز زجاجية بمنظومة إدوارد المعروفة Edwards–Auto 306، وبمعدل ترسيب ثابت 0,3 nm/Sec وتحت ضغط $\approx 10^{-5}$ mbar. توضع العينات على قرص دوار يدور بسرعة ثابتة أثناء التبخير حيث توضع المادة في قارب تبخير أسفل القرص الدوار بمسافة 14cm، وقد ضبطت السماكات من خلال اللوحة الإلكترونية لمنظومة الترسيب.

تم اختيار عينات معالجه حرارياً متقاربة بالثخانة إلى حدٍ كبير، منتجة بالطرق الثلاث السابقة واستخدمت لتحضير ثلاث مجموعات من المتصلات لكل معدن Ag, Cu, Al، وكل مجموعة تحوي ثلاثة متصلات بثلاث طرق.

1-1-3- الطريقة الأولى: ترسيب طبقتين متتاليتين من العنصرين Cd, Te بمرحلتين مستقلتين وضبطنا الثخانة لتتشكل طبقة ثنائية بالنسبة: $t_{Te} / t_{Cd} \approx 1.53$ وللحصول على طبقة واحدة من المركب CdTe أجرينا معالجة حرارية ما بعد الترسيب post-deposition heat treatment باستخدام مرمدة نوع CARBOLITE CWF 1200. لحماية جملة الطبقتين من النقصان ولإتمام عملية التفاعل غُطيت العينة من الأعلى بشريحة زجاجية نظيفة شكل(1-a):



الشكل (1) طريقة تحضير فيلم CdTe-p

استخدمنا في هذا البحث الشروط المثلى للتحضير التي أوجدناها في بحثنا السابق [12] التي سنوضحها على الأشكال الموافقة لاحقاً.

2-1-3- الطريقة الثانية: حصلنا في هذه الطريقة على فيلم رقيق من CdTe نتيجة تبخير مزيج بنسبه واحدة من مسحوق العنصرينTe و Cd، بعد ضغطهما بكبسولة واحده صغيرة. أجريت المعالجة الحرارية، وتم اختيار عينات نهائية وفق شروط مفضلة رأيناها في بحثنا السابق [13].

3-1-3- الطريقة الثالثة: قمنا بترسيب أفلام رقيقة من المركب CdTe النقي (99.99+%) التي تنتج النوع p [14]، وتم الحصول على فيلم رقيق وفق مرحلتين.

a) الترسيب على ركائز زجاجية نظيفة ساخنة 400^oC≈ في الخلاء.

b) إجراء المعالجة الحرارية بعد الترسيب في الدرجة 200^oC كشرط أمثل استنتجاه بالتجربة.

4-1-3- بنية الأفلام الناتجة(Ctructure resulted films)

حصلنا على أطياف انعراج الأشعة السينية XRD للأفلام المنتقاة من الطرق الثلاث لتهيئتها لتشكيل المتصلات [M/S-p] metal–semiconductor junction موضوع دراستنا وذلك باستخدام الجهاز نوع PW Generator 1830 في مجال زوايا براغ من $2\theta=20^o$ إلى $2\theta=80^o$ للكشف عن سطح العينات. فقد حصلنا على صور نموذجية بالمجهر الماسح الإلكتروني (SEM) للعينات المصنعة بالطرق الثلاث لملاحظة الفروق بينها.

5-1-3- القياسات الطيفية (Spectrophotometric measurements)

استخدمنا مقياس طيفي نوع (Jasco-570) Spectrophotometer لقياس طيف النفاذية (T) وطيف الانعكاسية (R) للأفلام المحضرة بالطرق الثلاث المذكورة أعلاه، واستثنينا الطيف فوق البنفسجي (<400nm) لكون الركائز الزجاجية المستخدمة غير شفافة للضوء في هذا المجال البعيد عن حد الامتصاص في تلوريد الكادميوم.

3-2 تحضير المتصل M/CdTe-p (preparing M/CdTe–p junction)

حضرت ثلاث وجبات من المتصلات وذلك بانتقاء ثلاث مجموعات من العينات، وتتألف كل مجموعه من ثلاث أفلام رقيقة CdTe محضره بالطرق الثلاث المذكورة أعلاه.

a) المجموعة الأولى: ثلاث متصلات من النوع Ag/CdTe–p بترسيب طبقة رقيقة من الفضة النقية (99.9%) سماكتها t≈10 nm على كل من أفلام المجموعات الثلاث.

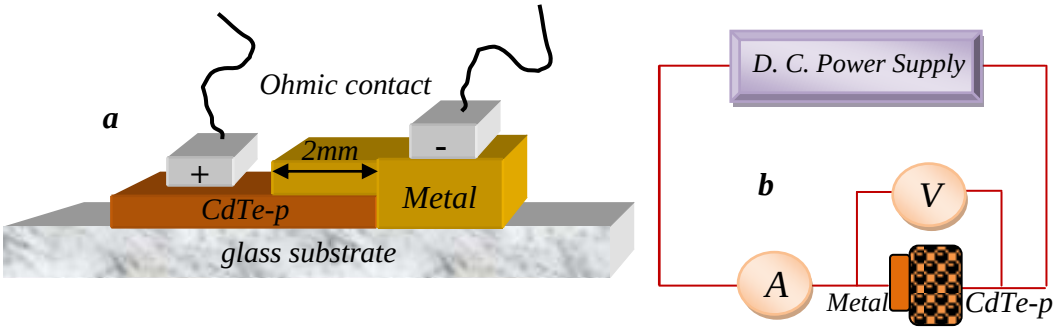
b) المجموعة الثانية: ثلاث متصلات من النوع Cu/CdTe–p بترسيب طبقة رقيقة من النحاس النقية (99.8%) بنفس سماكة Ag.

c) المجموعة الثالثة: ثلاث متصلات من النوع Al/CdTe-p بترسيب طبقة رقيقة من الألمنيوم (99.99%) بنفس السماكة السابقة.

يخفف صغر ثخانة الطبقة المعدنية من انتشار المعدن في الفيلم CdTe وتلافي الحصول على تماس أومي بدلاً من حاجز شوتكي.

وقد استخدمت أحجبة معدنية، صنعت خصيصاً، لتحديد مساحة المتصل الثنائي (≈2mm×2mm).

بعد تبخير الطبقات المعدنية قمنا بتشكيل قطبي كلٍ من المتصلات شكل (a-2) للتمكن من إجراء قياسات الميزة I-V. تم ذلك بوصل سلك نحاسي معزول من الخارج قطره 0.1mm إلى الطبقة المعدنية وسلك آخر إلى الطبقة CdTe باستعمال معجون الفضة نوع للتأكد (Silver conductive adhesive 18DB 0X) من شركة (Electron Microscopy Sciences).



الشكل (2)

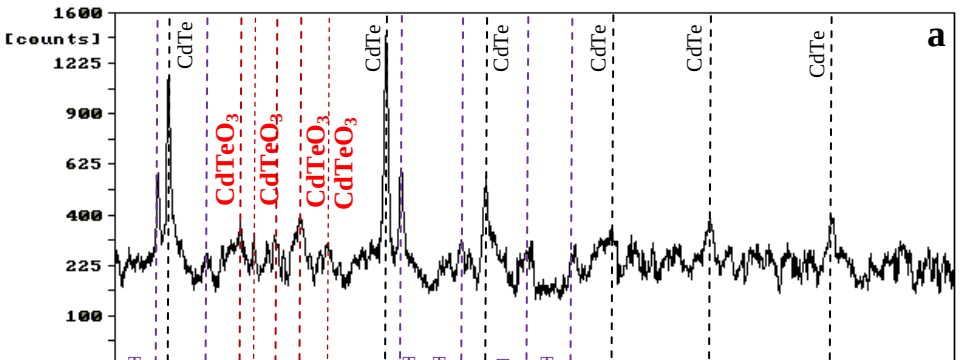
3-2 قياسات الميزة (I-V) ((I-V) characteristics measurements)

من المعلوم أن CdTe نصف ناقل ذي ناقليه ثقوبية من النوع (p) [14]. وبالرغم من ذلك فقد تعرفنا النوعية (p) بالطريقة [15]. يمكن التأكد ببساطة من النوعية CdTe-p عند مرور التيار من خلال وصل القطب الموجب للمغذية مع CdTe (تغذية أمامية) أو من خلال إعاقة مرور التيار عند وصل القطب السالب معCdTe (تغذية عكسية). استخدمت الدارة المبينة في الشكل (b-2) لقياس الميزة (I-V) لجميع المتصلات في التغذية الأمامية (Front bias) والتغذية العكسية (inverse bias)، وقد استخدم مقياس جهد عالي المقاومة من رتبة $10^{12}\Omega$ ومضخم للتيار (Measuring Amplifier) نوع (Leybold-Heraeus) لقياس تيارات منخفضة الشدة من رتبة $10^{-6}A$ أو أقل.

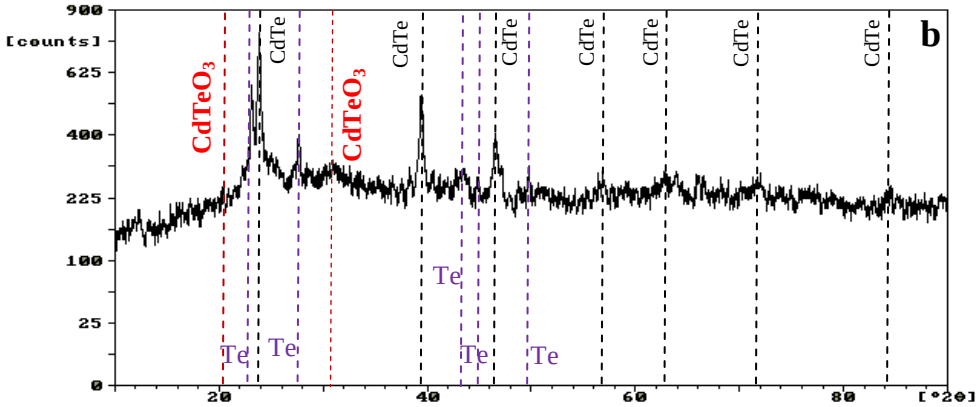
4- النتائج والمناقشة:

4-1-البنية والصور الميكروسكوبية:

تؤكد أطياف انعراج الأشعة السينية لأفلام CdTe المحضرة بالطرق الثلاث تبلورها ببنية مكعبة مركزية الوجوه من خلال مقارنة هذه الأطياف مع أطياف البنية المكعبة لتلوريد الكادميوم المنشورة سابقاً (بنك المعلومات)، كما أن القيمة الوسطى لثابت الشبكة البلورية التي حصلنا عليها من تجاربنا ($a\approx6.497A^o$) تتوافق مع القيمة المنشورة في المرجع[16]. يوضح الشكل (3) أطيافاً نموذجية خاصة بالطرق الثلاث. تشير الأشكال الثلاثة (3-a)،(3-b)،(3-c) إلى بقايا التلوريوم Te ضمن تلوريد الكادميوم، مما يعزز النوعية p في العينات المحضرة بهذه الطرق.

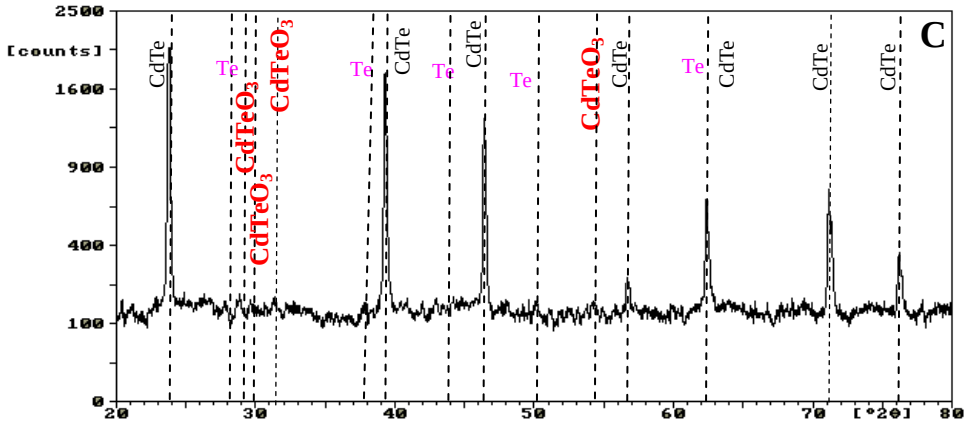


الشكل (3-a): XRD لعينة الطبقات، ثخانتها t=800 nm، ملدنة عند درجة حرارة 400°C



الشكل (3-b): XRD لعينة المزيج، ثخانتها t=750 nm، ملدنة عند درجة حرارة 400°C

إن زيادة عنصر Te تكون أوضح في العينات المحضرة بالطريقتين الأولى والثانية انطلاقاً من العنصرين Te وCd، وخصوصا في الطريقة الأولى، مما يعزز الناقلية الثقوبية في المتصلات الناتجة بهذه الطريقة التي سنراها من خلال دراسة الميزة (I-V) لهذه المتصلات، ويلاحظ أيضاً وجود قمم منخفضة الشدة من طبقة الأكسيد $CdTeo_3$ المتشكلة في الأفلام المحضرة بالطرق الثلاث. وهذا متوقع نتيجة التسخين في الهواء، الأمر الذي يؤكد وجود طبقة بينية رقيقة جداً من الأكسيد [17] في المتصل M/CdTe.

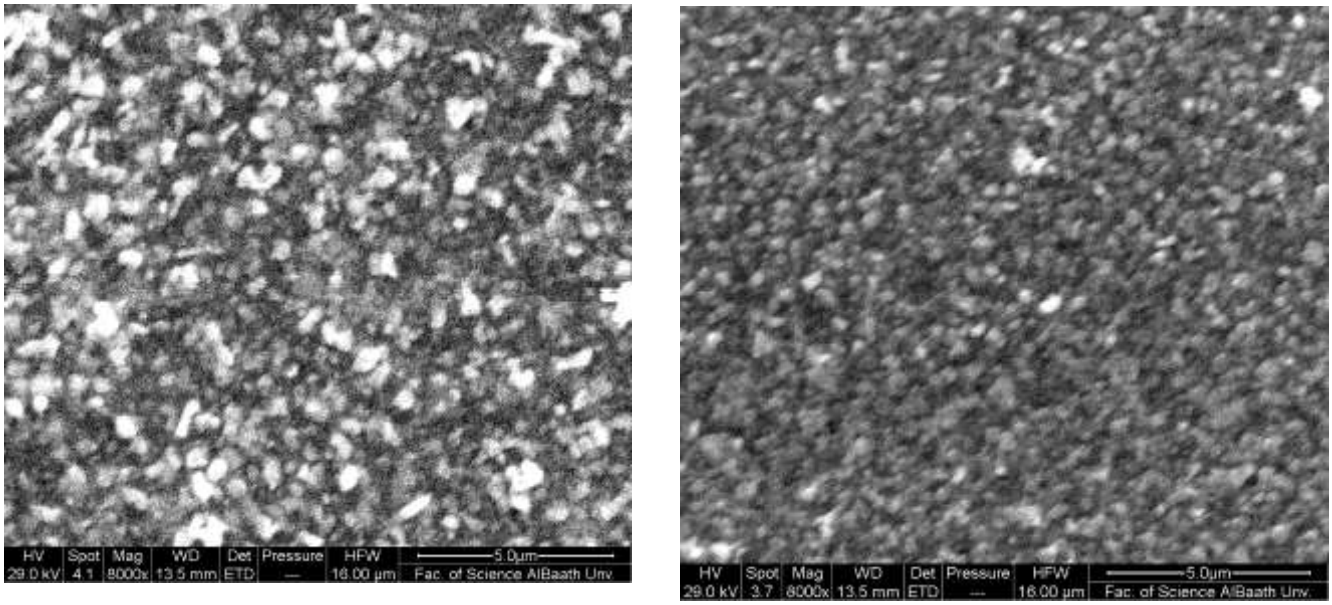


الشكل (3-C) XRD لعينة الطبقات سماكتها t=1045 nm، ملدنة عند درجة حرارة 400°C

توافق هذه الأطياف صور المجهر الإلكتروني التي تشير بوضوح إلى تحسن بنية الحبيبات للأفلام المحضرة انطلاقاً من العنصريين الأولين Te وCd كما في الطريقتين (3-1-1) و (3-1-2) مقارنةً مع الطريقة (3-1-3) انطلاقاً من المركب CdTe مباشرة.

ونميز في طريقة الطبقات المتراكمة (شكل 3-a) تشكل حبات متميزة بكبر حجمها مقارنة مع الحبات المتشكلة في الطريقتين (3-3-2) و (3-3-3).

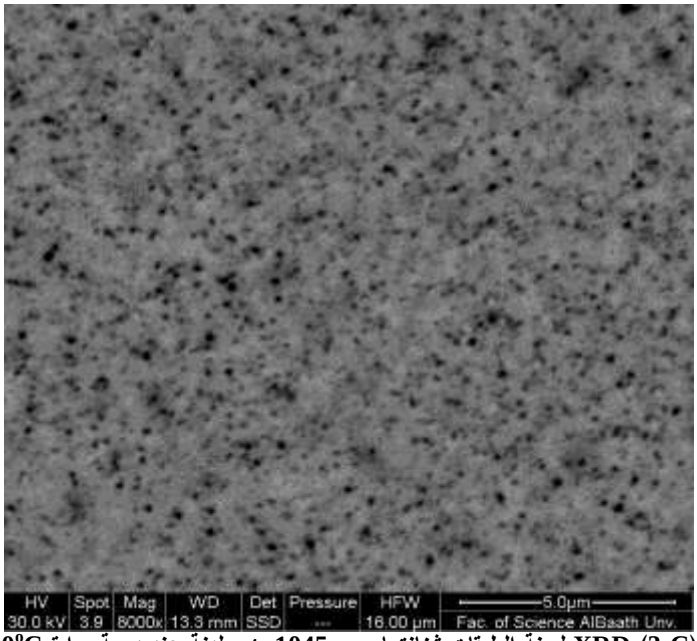
a **b**



الشكل (3-a): XRD لعينة الطبقات ثخانتها t=800 nm، ملدنة عند درجةحرارة 400^oC

الشكل (3-b): XRD لعينة المزيج ثخانتها t=750 nm، ملدنة عند درجة حرارة 400^oC

C



الشكل (3-C) XRD لعينة الطبقات ثخانتها t=1045 nm، ملدنة عند درجة حرارة 400^oC

4-2-الخصائص الضوئية:

استخدمت القياسات الضوئية Tو R لتعيين معامل الامتصاص باستخدام العلاقة: [12]

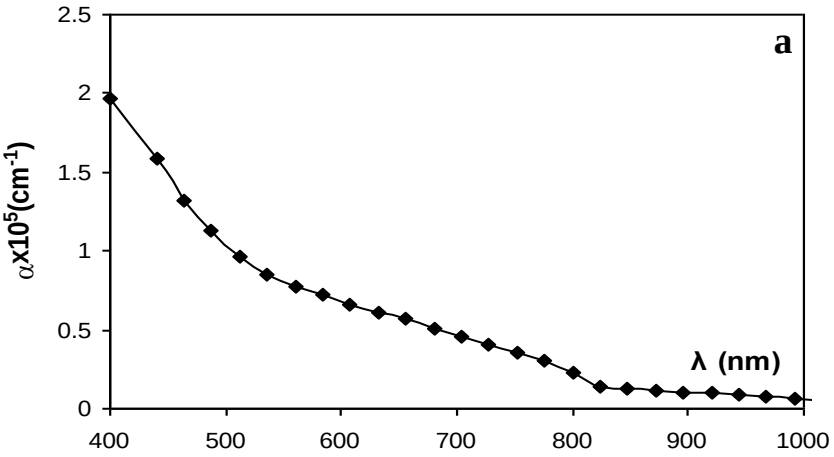
$$\alpha = \frac{2.303}{t}\mathrm{Log}\left(\frac{1-R}{T}\right) \qquad (1)$$

ذلك أن t هي ثخانة الفيلم المدروس.

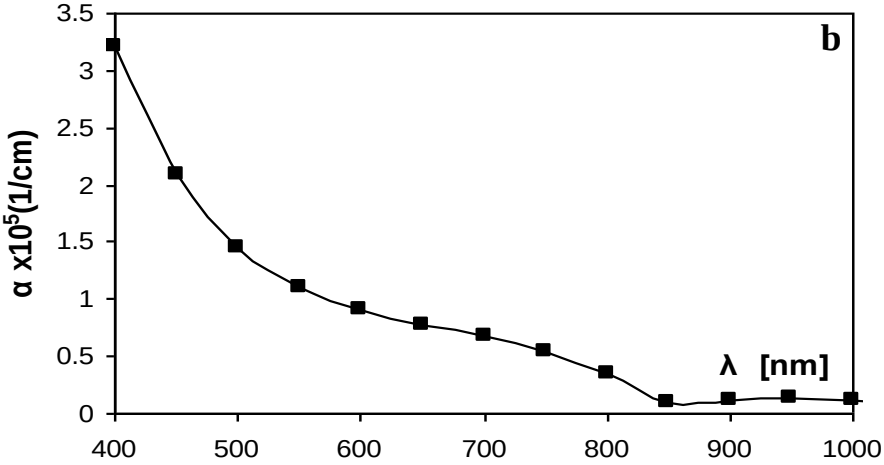
يبين الشكل (4) أن سلوك الامتصاص في أفلام CdTe المحضرة بالطرق المختلفة متماثل، وتشير جميعها إلى حد الامتصاص المتقارب من القيمة 825nm. فمن المعلوم أن امتصاص الضوء في تلوريد الكادميوم يحدث بالانتقالات الإلكترونية المسموحة المباشرة [16,14]، وأن عرض الفجوة الطاقية E_g يرتبط بمعامل الامتصاص [13,12] بالعلاقة:

$$\alpha = B\frac{\left(h\upsilon - E_g\right)^{\frac{1}{2}}}{h\upsilon}$$

ذلك أن υ هو تردد الضوء الساقط، h ثابت بلانك، Bثابت يتعلق بدرجة الحرارة.

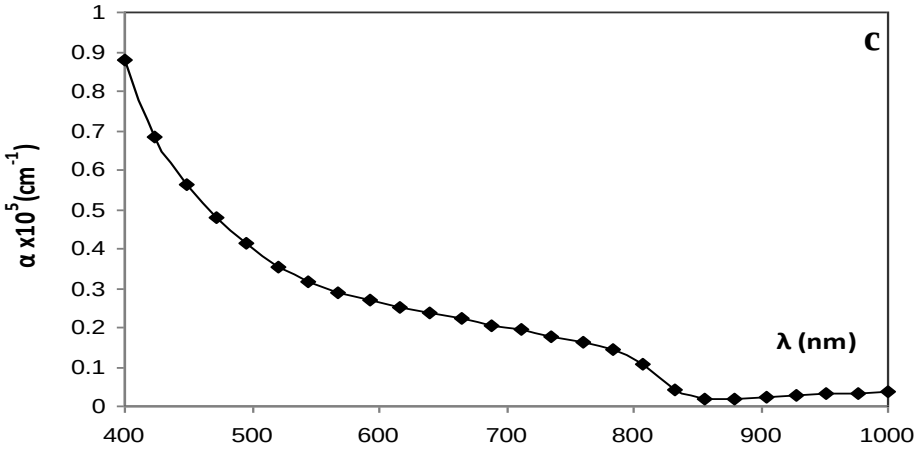


الشكل (4-a): طيف معامل الامتصاص لفلم من طبقات (Cd,Te) بثخانة 800 nm ملدن عند درجة حرارة 400°C.

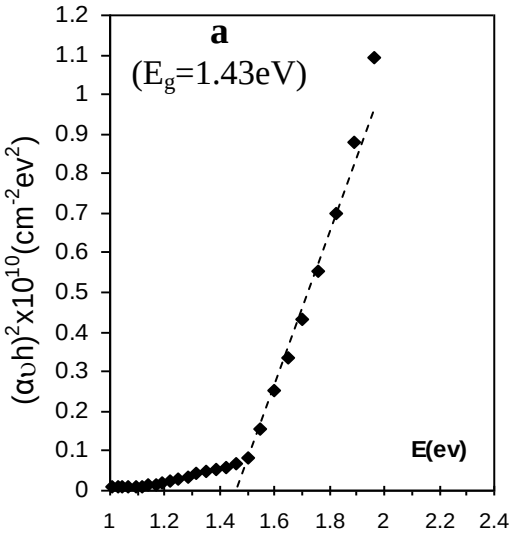


الشكل (4-b): طيف معامل الامتصاص لفلم من مزيج (Cd,Te) بثخانة 750 nm ملدن عند درجة حرارة 400°C.

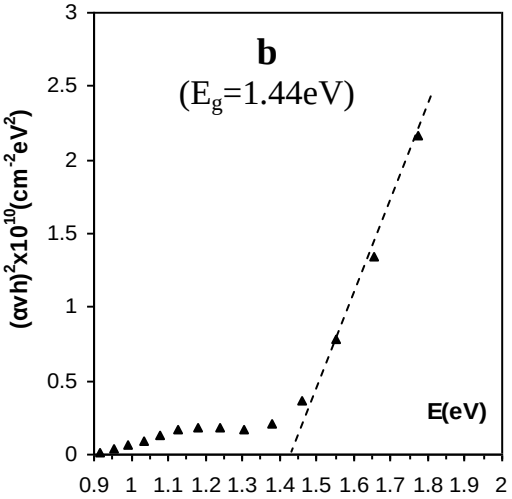
برسم المنحنى $(\alpha h\upsilon)^2$ بدلالة طاقة الفوتون $h\upsilon$ تحسب E_g من تقاطع ممدد الجزء الخطي من المنحنى مع محور الطاقة كما في الشكل (5).

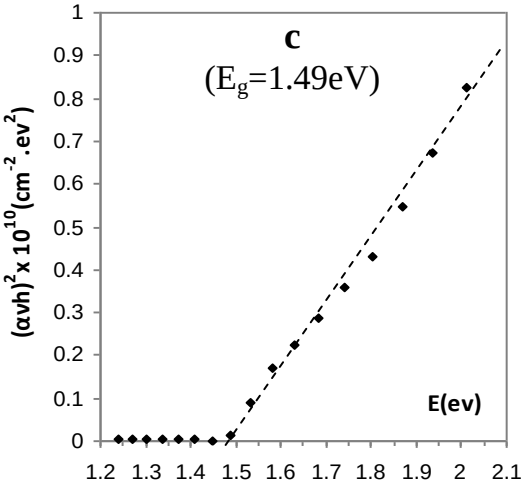


الشكل (4-C) طيف معامل الامتصاص لفلم من (CdTe) بثخانة 1045 nm ملدن عند درجة حرارة 400°C



الشكل (5-a): قيمة طاقة الفجوة لعينة محضرة بطريقة المركب ملدنة عند درجة حرارة عند 400°C في الهواء 800 nm.





الشكل (5-b): قيمة طاقة الفجوة لعينة محضرة بطريقة المزيج، ملدنة عند درجة حرارة 400°C في الهواء 750 nm.

الشكل (5-c): قيمة طاقة الفجوة لعينة محضرة بطريقة المركب، ملدنة عند درجة حرارة 400°C في الهواء 1045 nm.

يوضح الجدول (1) القيمة المتوسطة للفجوة الطاقية للأفلام المحضرة بالطرق الثلاث المستخدمة في هذا البحث، ونرى أنها تأخذ قيماً أصغر في العينات المحضرة بالطريقة الأولى مما يجعلنا ننتظر تحسن المواصفات للمتصل الثنائي المشكل من هذه الطبقة والتي سنلخصها في الفقرات التالية.

الجدول (1)

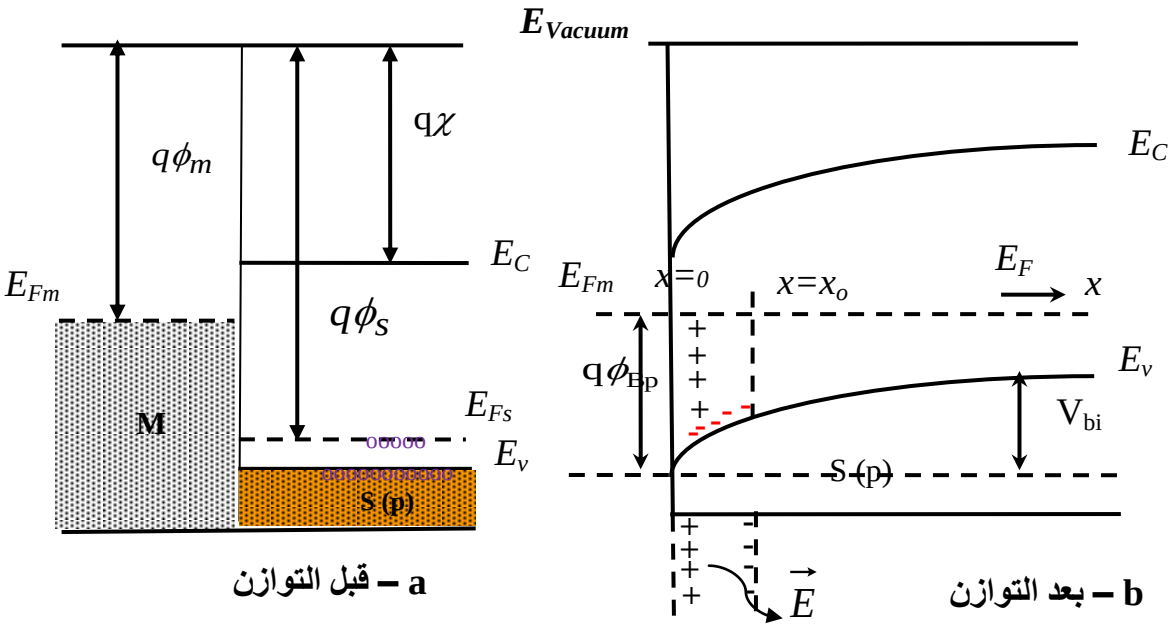
Method	E_g(eV)
Layer	1.43
Mixture	1.44
Comp.	1.49

3-4-حاجز شوتكي والميزة (I-V) في المتصلات الثنائية Al,Cu,Ag /CdTe-p

ذكرنا سابقاً أن قيمة تابع العمل لنصف الناقل CdTe-p ≈5.7eV، وأن قيمة توابع العمل $(q\phi_m)$ للمعادن التي نتعامل معها هي Cu: 4.4-4.47 eV, Ag: 4.26-4.3 eV, Al: 4.2 eV [18,10,6,5]، وأن معادلة ارتفاع حاجز شوتكي [10,6,3] تعطى بالشكل التالي:

$$q\phi_{Bp} = E_g + q\chi - q\phi_m \qquad (3)$$

ولأن الألفة الإلكترونية لتلوريد الكادميوم $q\chi \approx 4.28eV$ نتوقع صعوبة تشكل حاجز كموني بارتفاع سالب أو صفر، إذْ تصبح المقاومة أصغريه، ولا توجد إعاقة للتيار، والتماس يكون أومياً، لذلك فإن العينات المدروسة تكون من النمط الذي يتضمن حاجزاً شوتكياً بعيدة عن التماس الأومي. لكي تكون الصورة واضحة لدراسة تشكل حاجز شوتكي في المتصلات المقترحة من المفيد أن ندرج تصوراً عن المخطط الطاقي للمتصل معدن-نصف ناقل، نوع (p)، وذلك بالتناغم مع النماذج التي تعرض عادةً في المراجع العلمية بالنسبة لنصف الناقل من النوع (n). يوضح الشكل (6) المخطط الطاقي للمتصل $M/S_{(p)}$ بعد تشكله وحدوث التوازن الحراري حيث $q\phi_s \rangle q\phi_m$ يتفق مع المتصلات المدروسة في البحث الحالي



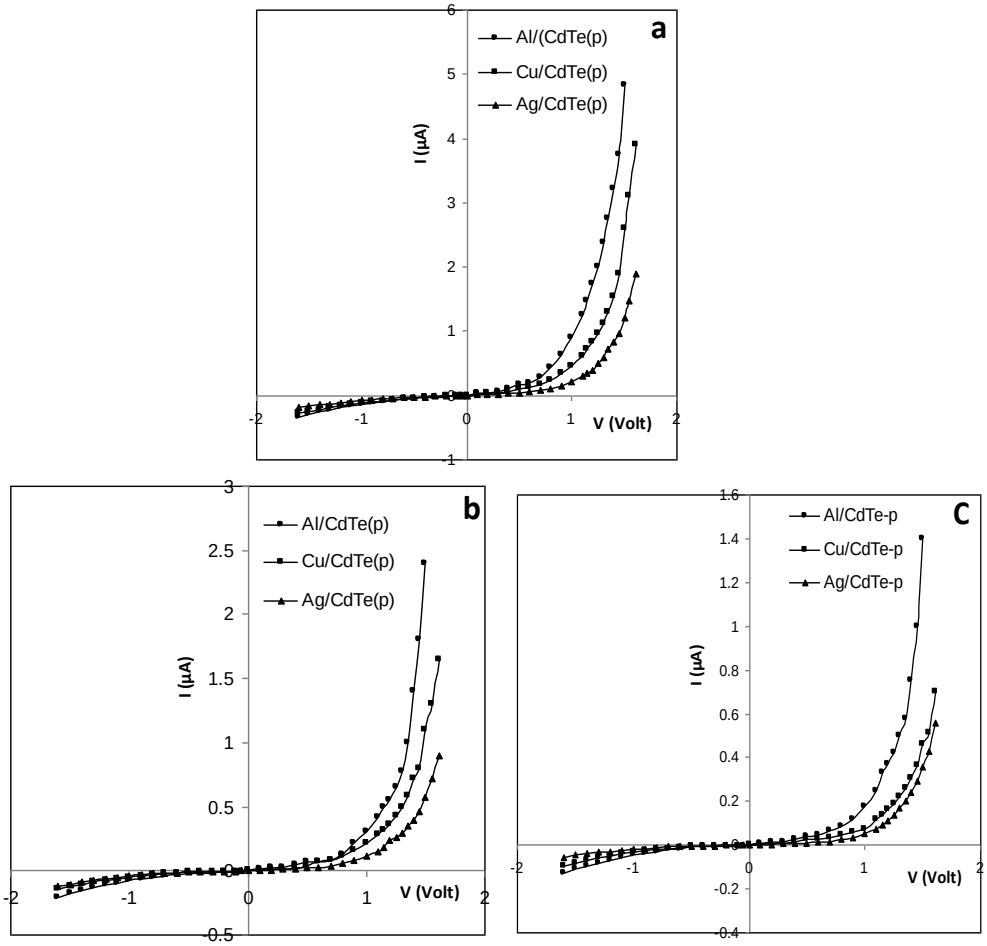
الشكل رقم (6) التوازن الطاقي لمتصل $M/S_{(p)}$ (a) قبل التوازن، (b) بعد التوازن.

تتساوى بعد التوازن الحراري سوية فرمي في الجهتين، ويظهر بين سطحي المعدن ونصف الناقل فرق في الكمون الداخلي built-in potential (qV_{bi}) الموضح في الشكل (6)، و يعبر عنه بالفرق $q\phi_s - q\phi_m$. يبين الشكل (6) أيضاً الطبقة الناضبة depletion layer المحددة بـ$x=x_o$ تغادرها الثقوب باتجاه خط التماس ويقل فيها تركيز الثقوب وتصبح مقاومتها النوعية أكبر من تلك ضمن البلورة.

يعطى ارتفاع حاجز شوتكي بالنسبة للمتصل الثنائي $M/CdTe_{(p)}$، بعلاقة من الشكل: $q\phi_{Bp} = E_g - q(\phi_m - \chi)$.

عند وصل الدارة (2-b) بوضع التغذية الأمامية يوصل القطب الموجب مع الطبقة $CdTe_{(p)}$ والقطب السالب مع الطبقة المعدنية (Al,Cu,Ag). وعند تطبيق جهد أمامي V يحدث تخفيض الكمون qV_{bi} بالمقدار V أمام انتقال الثقوب من $CdTe_{(p)}$ إلى المعدن ويحدث العكس عند وصل الدارة بوضع التغذية العكسية، ويزداد الكمون qV_{bi} بالمقدار V، وتزداد إعاقة انتقال حاملات الشحنة. وهذا يظهر التباين في قيمة تدفق التيارين في الاتجاهين الأمامي والعكسي ويحدث تقويم التيار Current rectification [10].

نوجز نتائج قياساتنا للميزة I-V في الظلمة للمتصلات الثنائية Al,Cu,Ag/CdTe-p في كلٍ من الطرق الثلاث لتحضير الطبقة CdTe-p في المنحنيات على الشكل (7) وجميعها توافق سلوكاً أقرب للتقويم الإلكتروني.



الشكل (7)

ويمكن أن يوصف بالمعادلة المميزة I-V المشتقة بناءً على نظريه الإصدار الأيوني الحراري لـBethe.

$$J = J_s\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right) \qquad (4)$$

و

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{Bp}}{kT}\right) \qquad (5)$$

ذلك أن J_S تيار الإشباع و $q\phi_{Bp}$ ارتفاع حاجز شوتكي مقدراً بـ eV، T درجة الحرارة المطلقة، A^* ثابت ريتشاردسون الفعَال (Richardson Constant) والذي يساوي: $A^* = \frac{4\pi q m_p^* k^2}{h^3}$، m_p^* الكتلة الفعالة للثقوب في حالتنا، k ثابت بولتزمان، h ثابت بلانك.

يتفق الشكل العام للمعادلة (4) مع مثيلتها في نظرية الانتشار، ويقع الفرق في العوامل الداخلة في تيار الإشباع.

نلاحظ من الأشكال (7-a),(7-b),(7-c) وجود تكرارية وتناسق منتظمين في سلوك التيار في المتصلات المدروسة، فمن الواضح وجود خاصية تقويم التيار، ومن ثمّ تشكل حاجز شوتكي، ولكن التيار يسلك سلوكاً شبه أومي عند تطبيق كمونات منخفضة أقل من 0.6V في عيناتنا، ومن ثم يأخذ التيار سلوكاً أسياً وفي هذا المجال، وفي كلٍ من طرق التحضير الثلاث، نلاحظ أن قيم كثافة التيار في المتصل $Al/CdTe_{(p)}$ أعلى من كثافة التيار في المتصل $Cu/CdTe_{(p)}$، وأعلى من $Ag/CdTe_{(p)}$ الذي يوافق كون عتبة تنامي التيار في المتصل $Al/CdTe_{(p)}$ أقل منها بالنسبة للمتصلين الآخرين $Cu,Ag/CdTe_{(p)}$، مما يشير إلى أن قيم V_{bi} و w عرض المنطقة الناضبة في المتصل $Al/CdTe_{(p)}$ أقل منها في المتصلين الآخرين، ويزداد تأثير المنطقة الناضبة بوجود طبقة الأكسيد البينية التي شاهدنا أثار وجودها في أطياف الـXRD.

تابعنا هذا السلوك بحساب ارتفاع حاجز شوتكي الذي يؤكد سلوك التيار في هذه المتصلات وسنراه لاحقا.

وفي هذا المجال نذكر بان آلية نقل التيار في المتصلات المدروسة بعيدة عن أن تكون نفقية، لأن النفقية تظهر عند إشابةٍ عاليةٍ، وذلك لأننا استخدمنا العنصرين Te,Cd والمركب CdTe النقي دون تعمد الإشابة.

4-4- تعيين ارتفاع حاجز شوتكي (Schottky barrier height):

تشير الدراسات إلى ابتعاد قيم حاجز شوتكي التجريبية عن القيم النظرية (وفق نموذج شوتكي)، وجميعها يؤكد خروج النتائج التجريبية عن تلك المثالية التي لا يدخل في الحساب عوامل كثيرة تؤدي إلى هذا التباين، ففي النموذج النظري أهمل تأثير الحالات السطحية التي قد لا تخلو منها عينة تجريبية، ولم يأخذ بالحسبان فعل الشحنة الخيالية أو إمكانية وجود طبقه أكسيد بينية interfacial Layer تزيد من تأثير المنطقة الناضبة، ومن ثمّ تؤثر في كمون البنية الداخلية V_{bi}، وفي حاجز الكمون الذي يفسر تغير شدة التيار من متصل إلى آخر.

تجمل هذه التأثيرات بإدخال عامل يعبر عن مدى خروج المتصل عن المثالية بشكل إجمالي، ويسمى عامل المثالية.

4-4-1- عامل المثالية وتيار الإشباع:

لمتابعة السلوك الواقعي لتيار المتصلات الثنائية $M/S_{(p)}$ تعدل المعادلة (5) لتأخذ الشكل التالي: [10,5]

$$J = J_s\left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right) \qquad (6)$$

حيث n يسمى عامل المثالية (Ideality Factor)، J_s كثافة تيار الإشباع، ويمكن أن تكتب بالشكل المعدل [11]:

$$J = J_s e^{\frac{qV}{nkT}}\left(1 - e^{\frac{-qV}{kT}}\right) \qquad (7)$$

وعندما $V \rangle\rangle \frac{kT}{q}$ تؤول كلٍ من (6) و (7) إلى الشكل:

$$J = J_s e^{\frac{qV}{nKT}} \qquad (8)$$

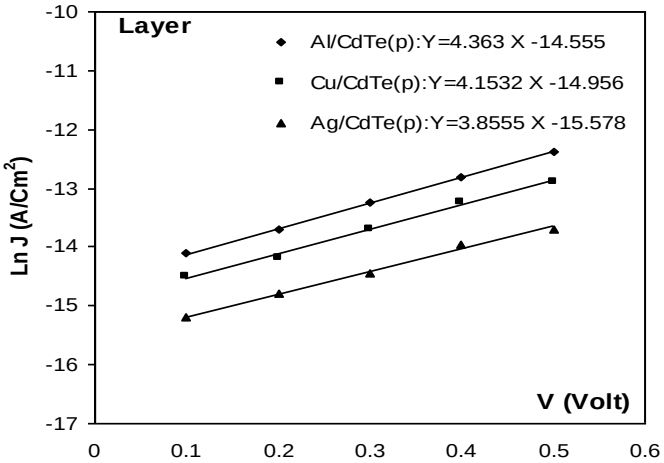
وهذا الشرط محقق فعلياً في مجال قياساتنا. تعطى كثافة التيار J_s كما في العلاقة (5) أما عامل المثالية (n):

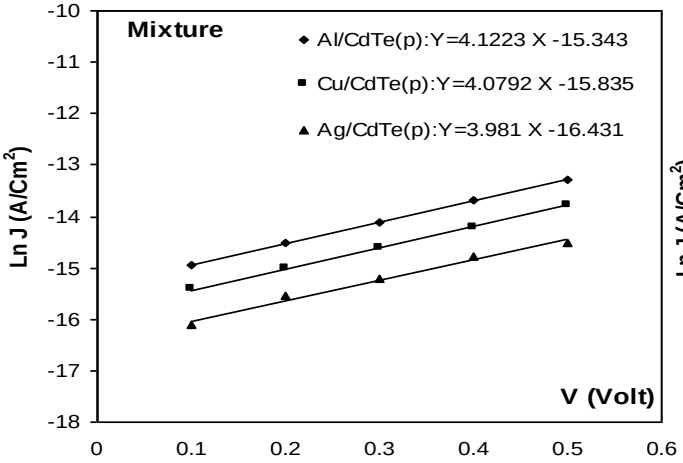
$$n = \frac{q}{kT} \cdot \frac{\partial V}{\partial (LnJ)} \qquad (9)$$

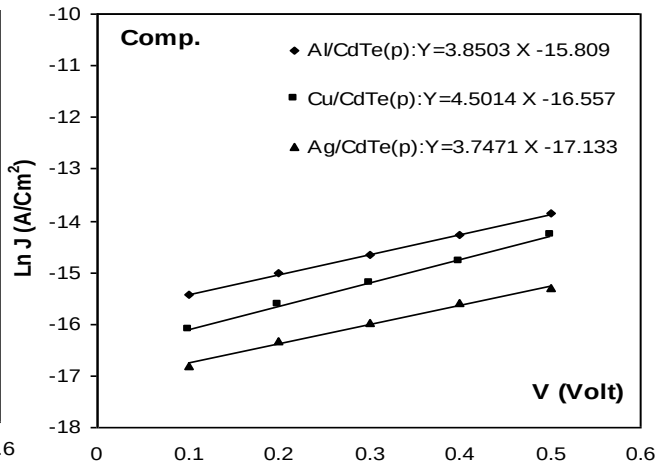
من (8) نجد أن:

$$LnJ = LnJ_s + \frac{qV}{nkT}$$

برسم LnJ بدلالة الكمون المطبق V يمكن تعيين n من ميل المستقيم $m = \frac{q}{nkT}$ وحساب كثافة تيار الإشباع J_s من LnJ_s (تقاطع الجزء المستقيم مع المحور LnJ عند V=0).







الشكل (8) يوضح الشكل (8) العلاقة $LnJ(V)$ لمعطياتنا بالنسبة للمتصلات Al,Cu,Ag/CdTe-p في كلٍ من الطرق الثلاث

وأوجدنا قيم كلٍ من J_s و n وأدرجناها في الجدول (2).

الجدول (2)

Method	Metal	J_s (A/Cm^2)	I_s (A)	Φ_b (eV)	n
Layer	Al/CdTe$_{(p)}$	4.8E-07	1.9E-08	0.75	9
	Cu/CdTe$_{(p)}$	3.2E-07	1.3E-08	0.76	9.2
	Ag/CdTe$_{(p)}$	1.7E-07	6.9E-09	0.781	10.2
Mixture	Al/CdTe$_{(p)}$	2.2E-07	8.7E-09	0.77	9.5
	Cu/CdTe$_{(p)}$	1.3E-07	5.3E-09	0.787	9.6
	Ag/CdTe$_{(p)}$	7.3E-08	2.9E-09	0.802	9.9
Comp.	Al/CdTe$_{(p)}$	1.4E-07	5.5E-09	0.79	10.3
	Cu/CdTe$_{(p)}$	6.5E-08	2.6E-09	0.805	8.7
	Ag/CdTe$_{(p)}$	3.6E-08	1.5E-09	0.82	10.5

إن قيم (n) بالنسبة للمتصلات المعتمدة على السيلكون والأرسنيد الغاليون (GaAs) أكبر من الواحد بقليل [10]، ولكن الباحث في [11] وجد أن قيمة (n) تتراوح بين 6−9 للمتصلات Ni,Al,Ag/CdTe$_{(p)}$، في حين أن (n) عند [19] تتراوح بين 1,9-10 في المتصل Ag/CdTe$_{(p)}$ ويُعزى السبب في زيادة n إلى وجود مساهمة كبيرة لإعادة الاتحاد والتوليد في المنطقة الناضبة.

وبالنسبة للمتصلات المدروسة فإن n تتراوح بين 8-10، ونعزو السبب في زيادتها إلى تشكل طبقة رقيقة بينية من الأكسيد، وتشير الأشكال (3) بوضوح إلى وجود قمم صغيرة الشدة من $CdTeO_3$. أما من حيث تيار الإشباع في هذا البحث في الطريقة الثانية فكان A/cm^2 3.62×10^{-8} تقارب جداً ما أوجده الباحث في [19] $J_s = 3.7\times10^{-8}\ \frac{A}{cm^2}$.

2-4-4- ارتفاع حاجز شوتكي:

يتعين ارتفاع حاجز شوتكي من كثافة تيار الإشباع المعطى بالمعادلة (5) إذ ينتج أن:

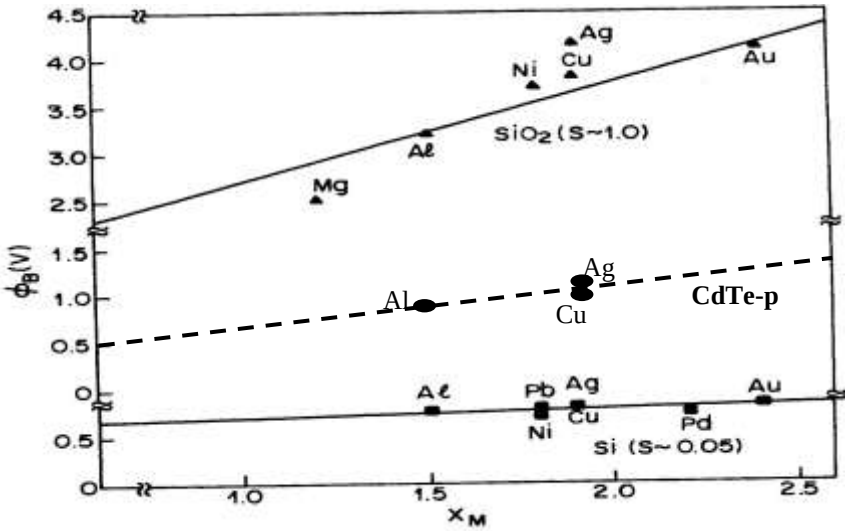
$$q\phi_B = kT.Ln\left(\frac{A^*T^2}{J_s}\right)$$

ذلك أن $q\phi_{Bp}$ ارتفاع حاجز شوتكي بالإلكترون فولت، T=295°C درجة حرارة الغرفة عند قياس (I-V) وأن $k = 8.62\times10^{-5}\ \frac{eV}{K}$. أما ثابت ريتشاردسون $A^* = \frac{4\pi q m_p^* k^2}{h^3}$ فكان يساوي $A^* = 42\frac{A}{cm^2.k^2}$ بِعَدّ $m_p^* = 0.35m_o$.

إن تغير قيمة ثابت ريتشاردسون لا تؤدي إلى أي تغير ملحوظ في قيمة ارتفاع حاجز شوتكي [10]. على هذا الأساس حسبنا $q\phi_{B(p)}$ للمتصلات Al,Cu,Ag/CdTe$_{(p)}$ في تجربتنا وأدرجناها في الجدول (2) نلاحظ ارتفاع حاجز شوتكي بالمتوسط يتراوح بين 0.75eV-0.8eV، هذه القيم قريبة لما ورد في [10] بالنسبة للفضة 0.81eV وبالنسبة للألمنيوم 0.76eV مع CdTe$_{(n)}$ وأيضاً في [3] كان 0.76eV بالنسبة لـAl/CdTe وكذلك كما ورد في [19]، فقد وجد ارتفاع حاجز شوتكي 0.83eV للمتصل Ag/CdTe$_{(p)}$، وهي قريبه جداً لما أوجدناه.

نلاحظ من الجدول (2) أن ارتفاع حاجز شوتكي في كلٍ من الطرق الثلاث يأخذ أصغر قيمه له من أجلAl، ثم يزداد من اجلCu، ويزداد أيضاً قليلاً من اجل Ag، مما يؤدي إلى أن كثافة التيار في المتصل$Al/CdTe_{(p)}$ أعلى من كثافتي التيار في$Cu/CdTe_{(p)}$ و$Ag/CdTe_{(p)}$ كما في الشكل (7).

من المعلوم أن $\phi_{B(p)}$ يرتبط بعوامل عدة، فهو يرتبط نظرياً بكل من χ و E_g و ϕ_m، ومن أجل نصف الناقل ذاته فإن $\phi_{B(p)}$ يعتمد على ϕ_m وطريقة قياسه، وهناك عامل آخر يدخل في تحديد $\phi_{B(p)}$ ألا وهو الكهربائية السلبية The Electro negativity X_M (قدرة الذرة في الجزيء على جذب الإلكترونات لنفسها). وتتعين قيمتها وفق سلّم باولينغ للكهروسلبية [10]. فهي للألمنيوم 1.5، وللنحاس تقريباً 1.8، وللفضة أكبر من 1.8 بقليل. ووفقاً لهذه الخاصة نلاحظ أن حاجز شوتكي في عيناتنا يزداد بازدياد الكهربائية السلبية كما يشير الخط المنقط في الشكل (9) الذي نتوقعه عند الحصول على متصلات أخرى من معادن أخرى. ونرى أن تأثير الكهروسلبية هي بالفعل الأقوى في ترتيب ارتفاع الحاجز. تشير النتائج التجريبية في المراجع إلى عشوائية اعتماد ارتفاع الحاجز على تابع عمل المعدن، فهو قد يزيد بازدياد ϕ_m بالنسبة لمجموعة معادن، ويتناقص بازدياد ϕ_m بالنسبة لمجموعة أخرى من المعادن.

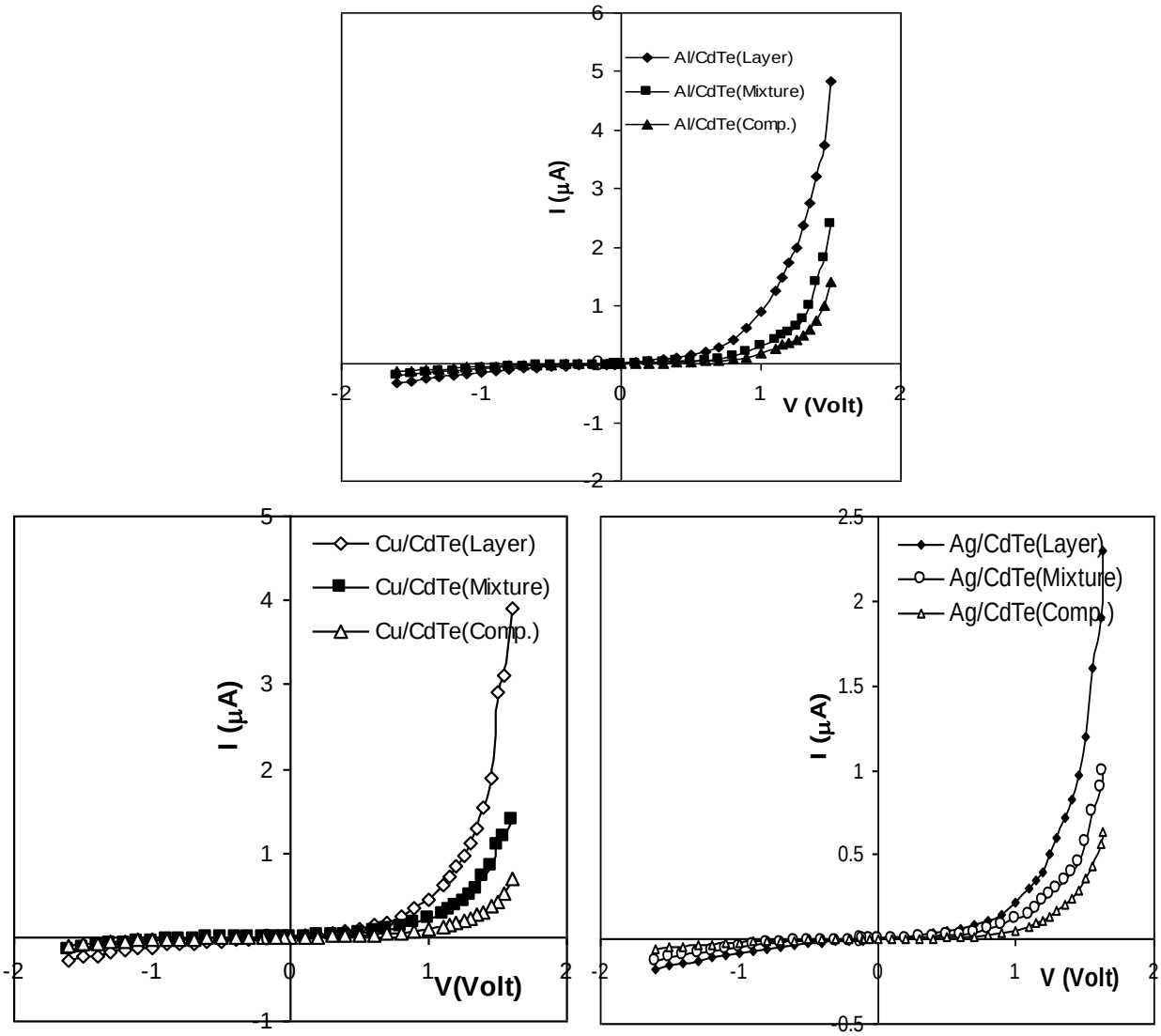


الشكل (9). يوضح الخط المنقط الذي نتوقعه عند الحصول على متصلات أخرى من معادن أخرى

لذلك نرى إن ارتفاع الحاجز في المتصلات المدروسة يزداد إلى حدٍ ما بازدياد الكهربائية السلبية مثلما تشير النتائج في كلٍ من الدراستين [10] و [3] إلى أن ارتفاع حاجز شوتكي يزداد بازدياد الكهروسلبية للمعدن في متصلات من النوع، (Al,Pb,Ag,Cu,Au/Si), (Al,Ag,Pt,Au/GaAs), (Ti,Ag,Pt,Au/ZnS), ($Mg,Al,Cu,Ag/SiO_2$) وأخيراً تشير الأشكال (10) إلى الميزات I-V للمتصلات $Al,Cu,Ag/CdTe_{(p)}$ المحضرة بالطرق الثلاث المتبعة في هذا البحث ونلاحظ هنا بالإضافة إلى ما وجدناه من مواصفات سابقة أنه توجد تكرارية قانونية في كلٍ من المتصلات، وهي أن كثافة التيار تأخذ قيماً أعلى عندما تحضر الطبقة CdTe انطلاقا من العنصرين Cd و Te بالمقارنة مع الطبقة المحضرة مباشرةً من المركبCdTe، وأن القيمة الأعلى توافق الطريقة الأولى (طريقة الطبقات المتراكمة)، وذلك بسبب نقصان حاجز شوتكي كما في الجدول (2) فإن حاجز شوتكي مثلاً

$Al/CdTe_{(p)}$ يساوي 0.786eV ≈ بالنسبة للمركب CdTe و 0.754eV ≈ بالنسبة للطبقات المتراكمة، وهكذا بالنسبة للمتصلات الأخرى.

إن هذه الحقيقة تتفق مع كون البنية البلورية ذات حجم حبيبات أكبر في الطريقة التراكمية كما هو واضح في صور المجهر الإلكتروني التي تشير إلى كبر حجم الحبيبات في عينات الطريقة الأولى، بالإضافة إلى وجود أكبر لبقايا Te في عينات هذه الطريقة كما في الشكل (3) الذي يعزز النوعية (p) ويقلل من مقاومة المتصل مما يسبب في زيادة التيار.



الشكل (10) يوضح الميزات I-V للمتصلات Al,Cu,Ag/CdTe(p) المحضرة بالطرق الثلاث المتبعة في هذا البحث

4-5-الاستنتاجات والتوصيات:

1. استخدمت ثلاث طرق لتحضير فلم رقيق من النوع $CdTe_{(p)}$:

- ترسيب الطبقات المتراكمة من العنصرين Teو Cd .
- ترسيب امزيج من العنصرين Teو Cd .

- ترسيب المركب CdTe.

أجريت عليها المعالجة الحرارية بعد الترسيب عند درجة حرارة $400^{o}C$. وقد حدد معامل الامتصاص $\alpha \rangle 10^{4} cm^{-1}$ وعرض الفجوة الطاقية $E_g \approx 1.4533eV$.

2. حضرت متصلات ثنائية $M/CdTe_{(p)}$ بترسيب طبقات رقيقة من Al وCu وAg ثخانتها $t \approx (10-20)nm$ على الطبقة $CdTe_{(p)}$. يتشكل حاجز شوتكي وتظهر خاصة تقويم التيار من خلال دراسة الميزة I-V.
3. استخدمت الميزات I-V لحساب عامل المثالية $(n \approx 9-10)$ وكثافة تيار الإشباع $\left(J_s \approx 10^{-8} \frac{A}{cm^2}\right)$.

تم تفسير انحراف القيم التجريبية عن النموذج المثالي (ارتفاع قيم n) بوجود طبقة بينية من الأكسيد $CdTeO_3$ التي تُنتج طبيعياً بعد التسخين في الهواء، وهي رقيقة لا تؤثر في السلوك العام للميزة (I-V).

4. استخدمت قيم تيار الإشباع لحساب ارتفاع حاجز شوتكي $(q\phi_{Bp} \approx 0.75eV - 0.82eV)$، ووجد أنه يزداد بازدياد الكهروسلبية للمعادن المستخدمة في تشكيل المتصل الثنائي.
5. لوحظ ازدياد قيم كثافة التيار في الميزة (I-V) في المتصلات المحضرة بطريقة الطبقات المتراكمة مقارنةً مع الطرق الأخرى، الأمر الذي يوافق انخفاض حاجز شوتكي مفسّر بازدياد حجم الحبات ووجود بقايا من عنصر Te في الطبقة CdTe المحضرة بهذه الطريقة. وتتأكد صحة النتائج من خلال دراسة انعراج الأشعة السينية وصور المجهر الإلكتروني.

المراجع:

1. FISTOOL, B,U. *Introduction in physics of semiconductors vishaea shakola* Moscow, 1975, 195.
2. KAKAH, M. Solid *states electronic*, First Edition, Damascus University, 1988.
3. HENDRICKS.*Metal-Semiconductor Contacts*, <www.mse.vt.edu/faculty/hendricks/ssmd_lectures/BandW/6pp/V2c16s06.pdf>. 2007. (8/8/2006)
4. JHOLMES. *Metal-semiconductor junctions*, <www.chu.edu/Jhoimes/p353/n409metal.semi.doc>, 2007. (2/3/2007)
5. ZEGHBROECK, B. Van *principles of semiconductors devices*, 2004, chapter 3.
6. HABIL, V. *Foundational combination in solid state*, <mtmi–vu.lt/pfk/funkc-darinian/diod/schottky>. 2007. (5/8/2006)
7. COMPAAN, A. D. & et al. *Cu k-edge x-ray absorption fine structure change in CdTe with CdTe processing*. <www.nrel.gov/pv/thin-films/docs/e-mrs-ut–livu-compaan.> 2004. (1/2/2007)
8. KASTRI lal chapra and sahit rangan das. *thin film solar calls*. New York and London, 1980,25.
9. BATZER, D. L. & et al, *development of the efficient and stable back contacts on CdTe/CdS Solar cells*, Institute Te of Quantum electronic, Germany <www.ige.ethz.ch/meoe-alt/tfp/bCd.pdf>, 2007. (2/8/2006)
10. SZE, S. M. *physics of semiconductor devise*, second Edition, john Wiley & sons, New York, 1981.
11. SARMAH, P. C. & et al. *current-voltage characteristics of Ag, Al, Ni- (n)CdTe junction*, Bull, maler, sci, India academy of sciences, vol. 24, N°.4, august 2001, pp. 411-414.
12. AL ABDELLAH, R. KSIBE, Ayman and AL SHARAFI, Zakaria. *Preparation of CdTe thin films from its Elemental constit uents (Cd, Te).* Journal of Al-Baath Uinv., Vol. 28, No. 2, 2006.
13. AL ABDELLAH, R. KSIBE, Ayman and AL SHARAFI, Zakaria. *preparations CdTe Thin films from Mixture of Cd, Te powder using heat annealing*, (accptance7/12/2006).
14. SCHAFER, Richard. *Cadmium Telluride.* 06-09-2006 ph-575 <web.engr.orgonstaTe.edu/schaferv/miror/pM-5751>.(22/9/2006)
15. SOLECON Labs., *Doping Type Determination*, Solecon Laboratories Inc., 770 Trademark Drive, Reno NV 89521-5926, Tel. (775) 853-5900, Fax (775) 853-5998, <www.solecon.com/pdf/doping_type_deTermination.pdf.>(1/10/2006)
16. PETER, Y. Y. U. & CARDONA, Manuel. *Fundamental of semiconductors Physics and materials*, Third Edition, 2003.
17. HEIBA, Z. k. *x–ray structure phase analysis of CdTe semiconductor annealed in air cry's.* Res. Technol. 38, N°. 6, 2003/Dot 10/002/crat. 2003/006. pp. 488-493
18. DEMTSU, S. M. & et al, *Stability Study of CdS/CdTe Cells made with Ag and Ni back-contacts*, Colorado state University, Sol Energy malts & Sol. Cells (2005), www.nvel.gov/thin-film/docs/albin-2005.pdf. (2/2/2007)
19. ZHAFOROV, T.D.D. & CALISKAN, M. *Photo stimulated changes of electrical characteristics of Ag/CdTe thin film structures*. matter. Res. Soc. Sump. Vol. 865 © 2005 Materials. Research Society.