



البنية التركيبية وخواص الخلايا الشمسية  $ZnO / CdZnS / CuInGaSe_2$  عالية الكفاءة

## Structure and Properties of High Efficiency $ZnO / CdZnS / CuInGaSe_2$ Solar Cells

W. E. DEVANEY, W. S. CHEN, J. M. STEWART. AND R. A. MICKELSEN

### الخلاصة

تم تصنيع أفلام الخلايا الشمسية المتعددة التبلور بتركيب  $ZnO/CdZnS/CuInCaSe$  بكفاءات مساحة إجمالية تصل لـ 12.5% تحت إضاءة تكافئ  $AM1.5$  و 10.5% تحت  $AMO$ . هذه من بين القيم الأعلى لكفاءات المساحة الإجمالية التي حصلنا عليها من أفلام الخلايا الشمسية المتعددة التبلور. بيانات التيار والجهد والكفاءة الكوانتية لمثل هذه الخلايا ذات الكفاءة العالية موضحة. مع وصف لترسيب  $CuInGaSe$  بواسطة الترسيب الكيميائي من محلول و  $ZnO$  بالانتزاع التفاعلي (reactive sputtering). الخواص الضوئية والكهربائية للطبقات الأحادية تم الحصول عليها من قياسات أجهزة كاملة على طبقات منفصلة. كما تم عرض نتائج الثوابت الضوئية والسمك تم الحصول عليهم من هذه القياسات للأجهزة مع مناقشة المتطلبات اللازمة لتحسين كفاءة الأجهزة.



استخدام مركب  $\text{CuInSe}_2$  الثلاثي كطبقة ماصة من النوع p في الخلية الشمسية من النوع وصلة هيترو مع  $\text{CdS}$  او  $\text{CdZnS}$  كطبقة مستقبلية من النوع n اصبح معروفا جيدا [1-3]. استبدال  $\text{CuInSe}_2$  الثلاثي  $\text{CuInGaSe}_2$  الرباعي وجد انه يعمل على إزاحة فجوة الطاقة للطبقة الماصة باتجاه يتوافق بشكل افضل مع مدى طيف أشعة الشمس وينتج عن ذلك كفاءة كلية  $\text{AM}1.5$  و  $\text{AM}0$  اعلى [4]. تزداد فجوة الطاقة لـ  $\text{CuInGaSe}_2$  مع زيادة محتوى الجاليوم، ويزاح بمقدار  $1.04 \text{ eV}$  تقريبا عن  $\text{CuInSe}_2$  النقي وبمقدار  $1.7 \text{ eV}$  لـ  $\text{CuGaSe}_2$  النقي. هذا المدى يسهل حساب افضل فجوة طاقة للماص الأحادي لمعظم الخلايا الشمسية. استخدام مركب وسطي  $\text{CuInGaSe}_2$  ينتج عنه جهد اعلى وكفاءة جهاز اعلى من التي نحصل عليها من  $\text{CuInSe}_2$ .

القيد الأساسي على الكفاءة لخلية  $\text{CdS/CuInSe}_2$  هو القيمة المنخفضة لفجوة الطاقة لطبقة الاستقبال  $\text{CdS}$ . امتصاص طبقة الاستقبال لـ  $\text{CdS}$  تسبب فقدان التيار المتولد من الضوء بمقدار  $6 \text{ mA/cm}^2$  لـ  $\text{AM}1.5$  عند  $100 \text{ mW/cm}^2$  [5]. تم اعتبار استبدال  $\text{CdS}$  بمركب  $\text{CdZnS}$  الثلاثي ذو فجوة الطاقة الأعلى كوسيلة لتقليل فقد الامتصاص لطبقة الاستقبال. ولكن انزياح فجوة الطاقة لـ  $\text{CdZnS}$  لقيم طاقات اعلى محدود بسبب قلة التطعيم الفعلي لمحتوى  $\text{Zn}$  عالي في طبقات  $\text{CdZnS}$ . وبهذا فان الأجهزة البسيطة من  $\text{CdZnS/CuInSe}_2$  محدودة بنسبة  $\text{Zn:Cd}$  في الكبريتيد بمقدار  $0.2:0.8$  على اكثر تقدير، مع انزياح صغير لفجوة الطاقة [2]. الخلايا الشمسية المعتمدة على  $\text{CuInGaSe}$  تكون فجوة طاقة اعلى والجهد اعلى وتيار اقل على حساب كفاءة امتصاص الكبريتيد.

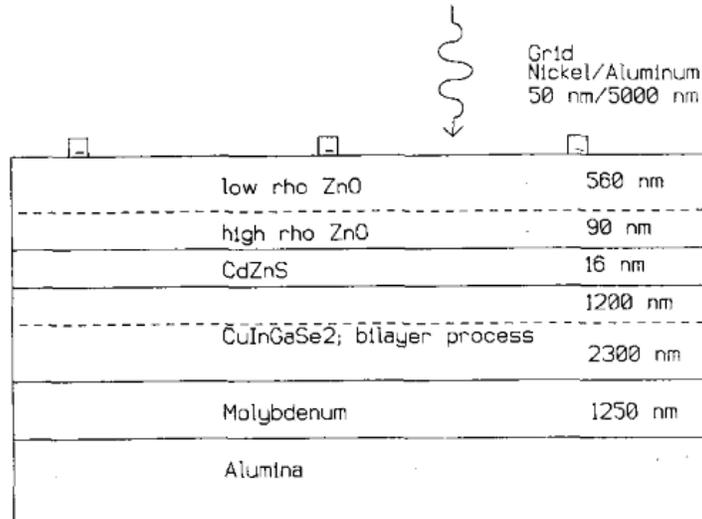
يضيف  $\text{ZnO}$  تحسين مهم لطبقة الاستقبال سواء لـ  $\text{CuInSe}_2$  أو  $\text{CuInGaSe}_2$ . فجوة الطاقة كبيرة بما فيه الكفاية لتقليل الفقد في امتصاص طبقة الاستقبال لأقل من  $1 \text{ mA/cm}^2$ . التطعيم بالألومنيوم يعطي مقاومة سطحية معقولة ( $20-30 \Omega/\text{sq}$ )، تقارن مع تلك التي نحصل عليها من طبقات  $\text{CdZnS}$ . ولكن عند مقاومات السطح هذه فان امتصاص الحاملات الحرة في الطيف تحت الأحمر يشكل مشكلة كبيرة مع  $\text{ZnO}$  اكثر من  $\text{CdZnS}$ .

بينما القيد الأساسي على النفاذ من طبقة الاستقبال يمكن التغلب عليه باستخدام  $\text{ZnO}$ ، إلا انه ليس ممكنا حتى الآن تشكيل وصلة هيترو بين  $\text{ZnO}$  و  $\text{CuInSe}_2$  أو  $\text{CuInGaSe}_2$ .

استخدمت أنظمة تحتوي على ZnO كطبقة تحمل تيار بمقاومة نوعية منخفضة ولكنها متحدة مع CdS أو في بعض الأحيان مع CdZnS كطبقة من النوع n [6]. في هذه الحالة يمتلك CdZnS مقاومة نوعية أعلى وتكون طبقة رقيقة جداً لأنها لا يمر بها تيار كهربائي. يمكن الحصول على نفاذ عبر طبقة CdZnS أو CdS إذا كان السمك أقل من طول الامتصاص، والذي يكون لك CdS عند 400 nm في حدود عشرات من النانومتر.

لقد قمنا بإجراء تطبيق لطبقات الاستقبال من ZnO/CdZnS على كلا من الأجهزة المعتمدة على  $\text{CuInSe}_2$  و  $\text{CuInGaSe}_2$ . الأجهزة من النوع ZnO/CdZnS/ $\text{CuInGaSe}_2$  تمتلك استجابة أفضل للأطوال الموجية القصيرة من خلال ZnO بتعديل وضبط محتوى الجاليوم في  $\text{CuInGaSe}_2$ . بالإضافة إلى نقصان التيار في الأجهزة المعتمدة على  $\text{ZnO/CdS/CuInSe}_2$  بسبب امتصاص الأشعة تحت الحمراء في ZnO يتناقص بشكل كبير مع انزياح فجوة الطاقة للسيلينيد لطاقت أعلى.

في بحث علمي سابق على أجهزة  $\text{CdZnS/CuInGaSe}_2$  [7] بينا أن محتوى الجاليوم أعلى من 0.25  $(\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.25}\text{Se}_2)$  ينتج عنه في الأجهزة خصائص تيار وجهد ضعيفة وكفاءات منخفضة. ولهذا في هذا البحث العلمي استخدمنا  $\text{CuInGaSe}_2$  مع تركيب ليس أعلى من  $\text{CuIn}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{Se}_2$  في جميع الأجهزة.



**الشكل 1.** تصنيع خلية شمسية بتركيب  $\text{ZnO/CdZnS/CuInGaSe}_2$ . طبيعة المشكلة والحد الأعلى للتركيب المستخدم لم يعلن في هذا العمل. المكونات المستخدمة في كل الحالات هي بالقرب من الطيف الشمسي AM1.5 الغير مفلتر



## تركيب الجهاز

الشكل 1 يبين مقطع عرضي خلال جهاز  $ZnO/CdZnS /CuInGaSe_2$ . الطبقات في الشكل ليست على مقياس رسم ولكنها تقديرية حسب السمك المعطى.

كل الأجهزة المدرجة هنا هي خلايا أحادية بمساحة  $1 \text{ cm}^2$  صنعت باستخدام تقنية photoresist والمشروحة مسبقا لـ  $CuInSe_2$  [8]. الجهاز الحالي هو في الأساس خلية واحدة بتصميم سلسلة مترابطة والتي هي أعطت 4 خلايا من  $CdZnS/CuInSe_2$  بمساحة  $91 \text{ cm}^2$  بكفاءة 9.5% [8].

الخواص الضوئية للجهاز تعتمد على خشونة سطح  $CuInSe_2$  أو  $CuInGaSe_2$ . بينما طبقات  $ZnO$  و  $CdZnS$  كما رسبت هي مترابطة ضوئيا، وطبقة  $CuInGaSe_2$  ذات سطح خشن بمقدار  $1 \mu\text{m}$  تقريبا. هذا ينتج عنه انعكاس من فيلم السيلينييد اقل بكثير من المتوقع من سطح  $CuInGaSe_2$ . ولهذا يبين الجهاز الكامل بعض التداخلات الضوئية في الانعكاس والكفاءة الكوانتية ولكن اقل بكثير من المتوقع من نموذج الفيلم الرقيق المترابط ضوئيا.

## ترسيب وخواص طبقة $CuInGaSe_2$

تحضير طبقة  $CuInGaSe_2$  لهذه الأجهزة لم يتغير في جوهره كما وصف من قبل في [7]. حضرت طبقات  $CuInGaSe_2$  على أرضيات من المولبدنم المغطاة بالالومينا بواسطة التبخير في الفراغ لأربعة عناصر في نفس الوقت من بوتقات ساخنة.

رسبت طبقة ثنائية من السيلينييد، بسمك  $2.3 \mu\text{m}$  لفيلم سمكه  $3.5 \mu\text{m}$  غني بالنحاس بالنسبة للاندسيوم والجاليوم والسمك المتبقي  $1.2 \mu\text{m}$  تم ترسيبه بنسبة نحاس منخفضة جدا. الاختبارات لطبقات  $CuInSe_2$  التي نمت بنفس طريقة الترسيب الثنائية الطبقات أعطت تجانس عالي بين الطبقتين. لم يتم رصد أي تدرج في تركيب العناصر لكل الطبقات. ولا يوجد أي تدرج في نسبة  $Ga:In$  على الطبقات. لأفضل جهاز ان تحديد نسبة تركيب طبقة  $CuInGaSe_2$  بواسطة تحليل EDX وكانت 23.8% للنحاس: 19.4% للاندسيوم: 49.4% للجاليوم. قياسات الجهد الكهروحراري (المجس الساخن) بينت ان هذا الفيلم هو من النوع p.



عملية النمو وخواص فيلم  $\text{CuInGaSe}_2$  من كل النواحي تقريبا يناظر  $\text{CuInSe}_2$ . عملية الترسيب كانت اكثر تعقيدا بالطبع بسبب العنصر الإضافي. درجات حرارة أرضيات الترسيب المطلوبة لإنتاج مورفولوجي جيدة للفيلم أيضا هي اعلى في حالة  $\text{CuInGaSe}_2$ ،  $450^\circ\text{C}$  و  $550^\circ\text{C}$  خلال ترسيب الطبقة الأولى والثانية على التوالي، بالمقارنة مع  $350^\circ\text{C}$  و  $450^\circ\text{C}$  لـ  $\text{CuInSe}_2$ .

### ترسيب كيميائي لطبقات $\text{CdZnS}$ الرقيقة

السلك المسموح لـ  $\text{CdZnS}$  لمثل هذه الأفلام الرقيقة يمكن ان تحسب من قيم ثوابت الامتصاص في الأبحاث المنشورة. المتطلبات الأساسية لنفاذ عالي ( $>80\%$ ) من خلال طبقة  $\text{CdS}$  عند طول موجي  $400\text{nm}$  هو سمك اقل من  $20\text{nm}$ . الترسيب بالبخار الفيزيائي المستخدم لترسيب طبقات  $\text{CdZnS}$  بسمك  $3\mu\text{m}$  في أجهزة  $\text{CdZnS}/\text{CuInSe}_2$ ، لا يمكن ان تنتج طبقات بتغطية كاملة على أفلام  $\text{CuInGaSe}_2$  حتى بأضعاف هذا السمك.

طبقة  $\text{CdZnS}$  الرقيقة ترسب بطريقة كيميائية على  $\text{CuInGaSe}_2$  مع تعديل على العملية المذكورة بواسطة [9] Danaher et al.

يحدث الترسيب بوضوح أرضية الترسيب في محلول من



تم تثبيت درجة حرارة المحلول عند  $85^\circ\text{C}$  مع التحريك بقوة. لهذه التراكيز يكتمل التفاعل في خلال 30 دقيقة تقريبا خلاله يكون تم ترسيب فيلم بسمك  $40\text{-}50\text{ nm}$ . محتوى  $\text{Zn}$  في الفيلم المرسب يمكن تغييره من خلال تعديل تراكيز المحلول.

هذه العلمية أعطت تغطية منتظمة على اسطح  $\text{CuInGaSe}_2$  الخشنة مع إمكانية التحكم في السمك حتى اقل سمك ممكن وهو  $10\text{nm}$ . ضبط افضل طبقة  $\text{CdZnS}$  تم من خلال ضبط قيم محتوى  $\text{Zn}$  الأفضل ومن خلال سمك الطبقة.



انقاص سمك طبقة الكبريتيد لأقل من 20nm لم يكون ضروريا لان السمك امتصاص الأطوال الموجية القصيرة يعتمد على حافة امتصاص طبقة ZnO. ولنفس السبب استخدم محتوى Zn عالي في الكبريتيد لا ينتج عنه كسب في التيار مع هذه الطبقات الرقيقة.

محتوى Zn في الأفلام المستخدمة في افضل الأجهزة كان بمقدار 15-20% تقريبا  $([Zn] / ([Zn] + [Cd]))$  من قياسات مجس اوجير (AUGER microprobe). لم يتم تطعيم الأفلام. كلا من المقاومة النوعية في الظلام والضوء كانت عالية، غير قابلة للقياس على أجهزتنا ( $> 5 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$ ).

تم تعيين الثوابت الضوئية والمقاومة الكهربائية للمحلول الرقيق المرسب CdZnS بواسطة القياسات الضوئية للطبقات على أرضيات من الزجاج. من قياسات النفاذ والانعكاس يمكن إيجاد معامل الانكسار  $n$ ، وثابت الامتصاص  $\alpha$  وافضل قيمة لملائمة سمك الفيلم [10]. افضل ملائمة (best fit) للبيانات الضوئية لفيلم CdZnS كان لأعلى كفاءة وأعطى سمك 16nm، وقيم  $n$  اقل بقليل من قيم المادة في صورتها الصلبة و  $\alpha$  كما هو موضح في الشكل 2.

قيم  $n$  و  $\alpha$  متوافقة مع النموذج البسيط لـ CdZnS لفيلم رقيق متصل بالكامل بثوابت ضوئية اقل بقليل من صورتها في الحالة الصلبة بسبب مسامية الفيلم.

### ترسيب ZnO وخصائص الفيلم

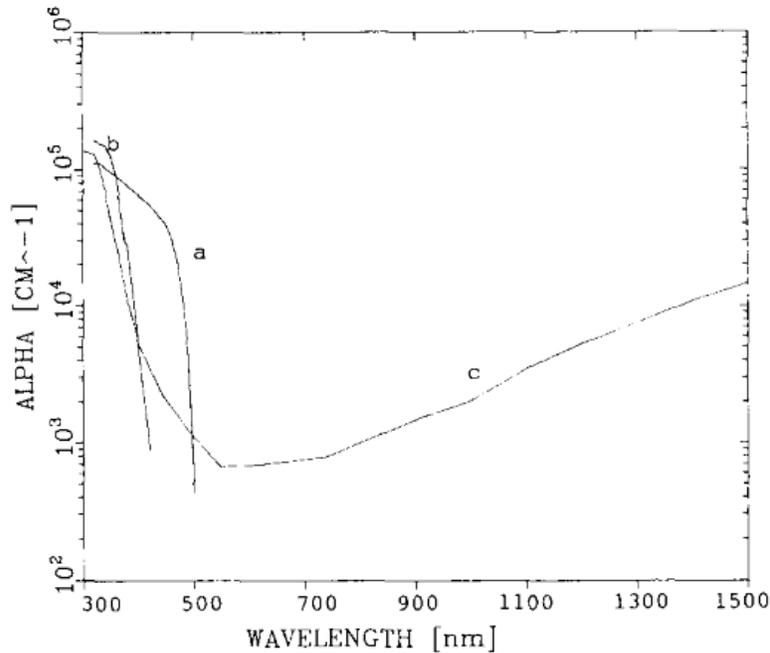
وظيفة طبقة ZnO كطبقة موصلة لتجميع التيار. وهنا نحتاج إلى وضع نقاط توصيل اومية لطبقة CdZnS. ومتطلب اخر مهم جدا هو ان التوصيل بين ZnO و  $\text{CuInGaSe}_2$  يجب ان تكون ذات مقاومة عالية لكي نجعل التركيب قادرا على تحمل العيوب في طبقة CdZnS الرقيقة والتي تسمح بالتوصيل المباشر بين ZnO و  $\text{CuInGaSe}_2$ .

أفلام ZnO ترسب بواسطة الانتزاع بالمجنترون (RF magnetron sputtering) في وجود جو من Ar أو  $\text{O}_2/\text{Ar}$  من هدف ZnO مطعم بـ 2% بـ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . يرسب ZnO في خطوتين من طبقات ثنائية بمقاومة عالية/مقاومة منخفضة. الطبقة الأولى رقيقة جدا (90 nm) بمقاومة نوعية عالية ترسب في وجود محتوى

أكسجين عالي. وطبقة سميكة (560 nm) بمقاومة نوعية منخفضة ترسب على الطبقة الأولى في وجود غاز ارجون نقي. تم معالجة الهدف مسبقا في الأكسجين قبل استخدامه لترسيب أي من الطبقتين.

لافضل ترسيب لـ ZnO تم إجراء مقايضة معقدة بين فراغات الشبكة، وسمك الـ ZnO والمقاومة السطحية لـ ZnO وامتصاصه للأشعة تحت الحمراء، وانعكاس ZnO. كل هذه العوامل درست في هذا البحث للحصول على افضل شروط للترسيب. باستخدام هندسة شبكة مناسبة تم تغيير سمك ZnO لنحصل على افضل مقايضة بين المقاومة السطحية والنفاذ. استخدمت شبكة مغطاة بالمعدن لتوصل ZnO وهي من nickel/aluminum بسمك معطى في الشكل 1.

درست الثوابت الضوئية والكهربية لطبقات ZnO باستخدام الطبقات المرسبة على أرضيات من الزجاج. في البداية طبقة ZnO ذات المقاومة النوعية العالية وجد ان الانعكاس والنفاذ ينمذج بشكل جيد باستخدام القيم المدرجة في بحوث سابقة  $n(\lambda)$  مع قيم  $\alpha(\lambda)$  التي توجد من قياسات النفاذ. قيم  $\alpha$  هذه موضحة في الشكل 2. لم يتم رصد أي فقد في الامتصاص في الطبقة ذات المقاومة النوعية العالية.



الشكل 2. ثوابت الامتصاص لفيلم CdZnS (a) ZnO ذو مقاومة نوعية عالية (b) ZnO ذو مقاومة نوعية منخفضة (c) القياسات الناتجة عن الطبقات على أرضيات الزجاج.



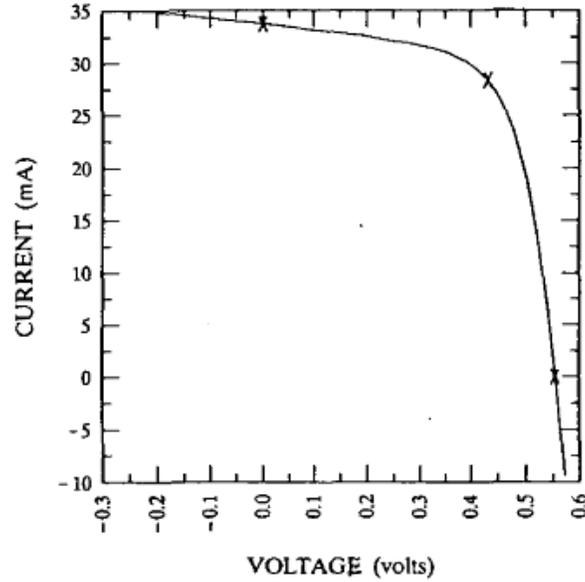
الخواص الكهربائية للطبقات ذات المقاومة النوعية العالية غير مستقرة بشكل كبير. وكما رسبت كانت مقاومتها النوعية  $50 \text{ K}\Omega/\text{sq}$ . ولكن المقاومة السطحية تتغير بشكل كبير مع المعالجة الحرارية عند  $225^\circ\text{C}$  في  $\text{O}_2$  ونتج عنها افلام بمقاومة نوعية اكبر من  $500 \text{ K}\Omega/\text{sq}$ ، بينما المعالجة في  $10\% \text{ H}_2$  و  $90\% \text{ Ar}$  نتج عنه مقاومة نوعية  $7 \text{ K}\Omega/\text{sq}$ . المقاومة النوعية النهائية للطبقات في الأجهزة الفعلية بعد المعالجة الحرارية لهذا السبب لم تكن معروفة.

طبقة  $\text{ZnO}$  ذات المقاومة النوعية المنخفضة كانت مستقرة ضوئيا وكهربيا ولكن بشكل معقد. قياسات النفاذ والانعكاس على الشرائح الزجاجية أعطت زيادة في الامتصاص عند أطول موجية اعلى من  $1 \mu\text{m}$  كما هو متوقع. الطبقة تمتلك خواص كهربية وضوئية ذات تدرج كبير المقاومة النوعية تغيرت من تقريبا  $4 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$  في الربع الأول من الفيلم إلى  $2.6 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$  في الربع الأخير. نعتقد ان هذا التدرج الكبير يعود إلى المعالجة التي تمت على الهدف قبل كل ترسيب. قيم  $\alpha$  لـ  $\text{ZnO}$  ذو المقاومة النوعية المنخفضة موضحة في الشكل 2 هي القيم المتوسطة للطبقة.

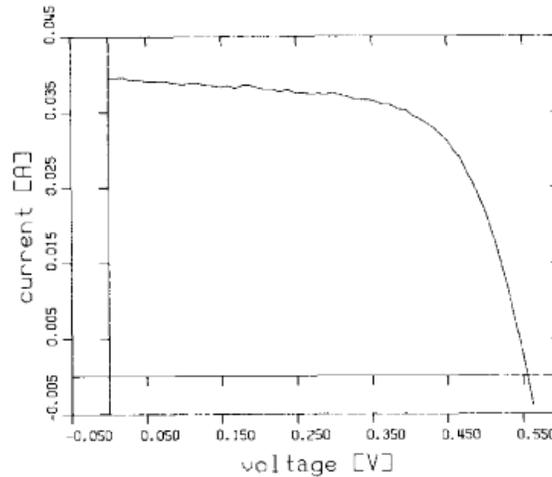
### الخواص الكهربائية لأجهزة $\text{ZnO} / \text{CdZnS} / \text{CuInGaSe}_2$

يوضح الشكل 3 خصائص I-V لأعلى كفاءة للخلية تحت إضاءة  $\text{AM1.5}$  عند  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$  كما قيس في معهد أبحاث الطاقة الشمسية (SERI). هذه القياسات تتفق مع تلك التي أجريت في مختبرنا.

كفاءة المساحة الكلية لجهاز ذو مساحة  $1 \text{ cm}^2$  هي  $12.5\%$ . كفاءة المساحة الفعالة المناظرة هي  $12.9\%$ . قياسات تحت إضاءة  $\text{AMO}$  بـ  $137 \text{ mW}/\text{cm}^2$  أعطت كفاءة مساحة كلية بمقدار  $10.5\%$ . خصائص I-V  $\text{AMO}$  كما قيست بواسطة Boeing معطاة في الشكل 4.



الشكل 3. خصائص I-V لخلية ZnO/CdZnS/CuInGaSe<sub>2</sub> ذات كفاءة عالية تحت اضاءة AM1.5 عند 100 mW/cm<sup>2</sup>. العينة: 1174، درجة الحرارة تساوي 25°C، المساحة تساوي 0.987 cm<sup>2</sup>، وV<sub>oc</sub> تساوي 0.555 V وJ<sub>sc</sub> تساوي 34.2 mA/cm<sup>2</sup>، معامل الملء يساوي 65.7% والكفاءة 12.5% وI<sub>sc</sub> تساوي 33.7 mA وI<sub>max</sub> يساوي 28.4 mA وV<sub>max</sub> يساوي 0.434 V.

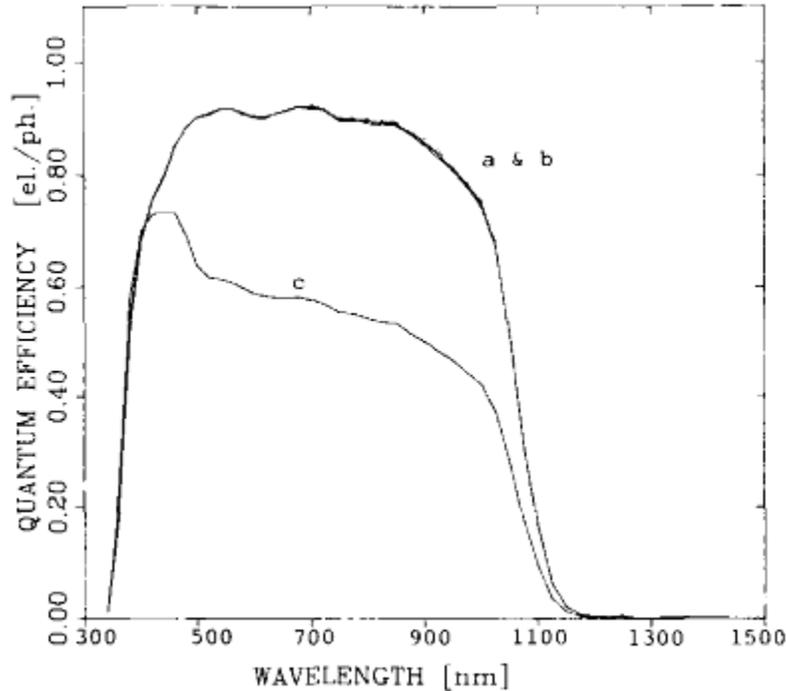


الشكل 4. خصائص I-V لخلية ZnO/CdZnS/CuInGaSe<sub>2</sub> ذات كفاءة عالية تحت إضاءة AM0 عند 137 mW/cm<sup>2</sup>. درجة الحرارة تساوي 28°C، المساحة تساوي 0.987 cm<sup>2</sup>، وV<sub>oc</sub> تساوي 0.556 V، معامل الملء يساوي 64.6% والكفاءة 10.5% وI<sub>sc</sub> تساوي 39.5 mA.

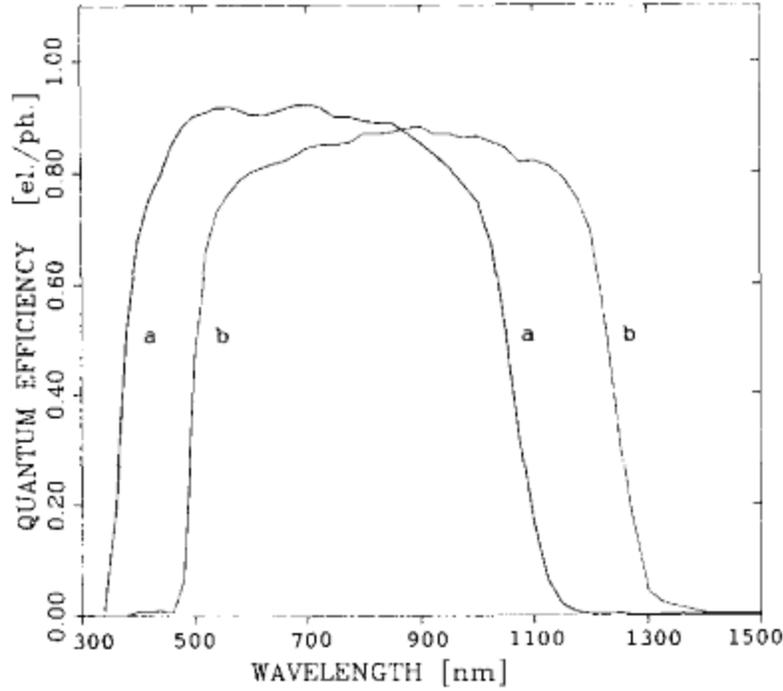
قياسات خصائص I-V الأمامية والعكسية في الظلام تبين ان تسرب shunt لا يعتمد على خصائص I-V في الإضاءة. Log قياسات I-V التي أجريت في SERI تشير إلى عوامل دايمود اعلى في الظلام من الضوء، وهذا متفق مع السلوك العادي الذي وجد في الخلايا CdZnS /CuInSe<sub>2</sub>.

يوضح الشكل 5 الكفاءة الكوانتية لنفس الخلية ZnO/CdZnS/CuInGAsSe<sub>2</sub> في الشكل 3 والشكل 4. موضح الاستجابة مع وبدون نطاق الضوء العريض (الأبيض). في حالة الخلية بدائرة مغلقة short circuit هناك تغير قليل في الكفاءة الكوانتية عند أي طول موجي مع الضوء وبدونه.

تم قياس الكفاءة الكوانتية باستخدام شعاع أحادي اللون متقطع، ولهذا فان القياسات الحقيقية هي تفاضل الإنتاج الكوانتمي (الإلكترونات/الفوتون).



الشكل 5. الكفاءة الكوانتية لنفس الخلية ZnO/CdZnS/CuInGAsSe<sub>2</sub> في الشكل 3 والشكل 4. الاستجابة موضحة عند (a) دائرة مغلقة بدون ضوء، (b) دائرة مغلقة مع ضوء،  $I_{dc}=+15$  mA (c) ضوء شدته  $50$  mW/cm<sup>2</sup>. مجموعات بيانات متعددة موضحة لكل من (a) و(b).



الشكل 6. مقارنة للكفاءة الكوانتية لخلية  $ZnO/CdZnS/CuInGaSe_2$  (a) ذات كفاءة عالية ، و (b)  $CdZnS/CuInSe_2$ .

الشرح الذي يوضح انخفاض الاعتماد على شدة الضوء لهذه الكمية تثبت ان التيار المتجمع يتناسب خطيا مع شدة الضوء عند كل الأطوال الموجية عند الدائرة المغلقة (short circuit). الكفاءة الكوانتية لانحياز الدائرة المغلقة الموضح يمكن ان يفسر بنموذج خطي بسيط يشمل فقط على امتصاص  $ZnO$  وامتصاص  $CdZnS$  والتجميع فقط من  $CuInGaSe_2$  بطول انتشار محدود، بالإضافة إلى فقد الانعكاس والشبكة. ظهرت أهداف تداخل في الكفاءة الكوانتية كما هو متوقع من طبقة  $ZnO$  الرقيقة ولكن فقد كبير بسبب تأثير السطح الخشن. الاستجابة عند 400nm متفقة مع السمك 16 nm لـ  $CdZnS$ .

موضح أيضا في الشكل 5 الكفاءة الكوانتية تحت انحياز ضوء ابيض عند انحياز أمامي 0.5 V. عند شدة الضوء المستخدم هذا يكون اعلى قليلا من جهد الدائرة المفتوحة. لشرح هذه الميزة للانحياز الأمامي للكفاءة الكوانتية من الضروري ان يشمل ذلك عدة تأثيرات والتي هي تعتمد على الجهد. الزيادة في انحدار الطول الموجي الطويل مع انحياز الجهد الأمامي يمكن ان يفسر باي من الاليات المعتمدة على الجهد في



CuInGaSe<sub>2</sub>. تشير القياسات على أجهزة CuInSe<sub>2</sub> إلى ان نموذج طول الانتشار المعتمد على الجهد هو الأفضل لملائمة الخلايا الحالية.

الجانب عند حافة الكبريتيد تشير إلى تأثيرات التوصيل الضوئي في طبقة CdZnS الرقيقة، من خلال الية تعديل الموصلية أو المجال [11]. في أي من الحالتين نرى تأثير حاملات الألكترونية في المقاومة النوعية العالية للكبريتيد. وجود التوصيل الضوئي القوي يوضح الـ CdZnS النقي أو المطعم قليلا، يشير على عدم وجود تطعيم in-situ لأفلام CdZnS.

يوضح الشكل 6 مقارنة للكفاءة الكوانتية لخلية شمسية ZnO/CdZnS /CuInGaSe<sub>2</sub> مع خلية شمسية CdZnS/CuInSe<sub>2</sub>. الإزاحة في فجوة الطاقة لـ CuInGaSe<sub>2</sub> بالنسبة لـ CuInSe<sub>2</sub> هي بوضوح دليل على ان فجوة الطاقة لـ CuInGaSe<sub>2</sub> من الجزء المحصور تكون 1.16 eV. هذا يتفق مع القيمة المتوقعة لهذا الجزء من الجاليوم المستخدم مقابل بيانات التركيب المعطاة في [7].

حافة الاستجابة للطول الموجي القصير لـ ZnO/CdZnS/CuInGaSe<sub>2</sub> موضحة في الشكل 6 وهي مقيدة بحافة الامتصاص. امتصاص ZnO في CdZnS لا يعتبر فقد مهم. التناقص في الكفاءة الكوانتية مع زيادة الطول الموجي هو بسبب الامتصاص في ZnO و تأثير طول الانتشار المحدود في CuInGaSe<sub>2</sub>.

## الاستنتاج

خلايا شمسية بتركيب ZnO /CdZnS /CuInGaSe<sub>2</sub> قد أنتجت تحسين كبير في الكفاءة على الأجهزة المعتمدة على CuInSe<sub>2</sub> تحت ظروف إضاءة AM1.5 و AMO. القياسات على الأجهزة وعلى الطبقات أنتجت نموذج متوافق ومباشر لتركيب الخلية.

تبين ان الازدياد في الكفاءة يعود إلى العديد من التحسينات. يوضح التركيب ZnO /thin CdZnS /CuInGaSe<sub>2</sub> فجوة طاقة اعلى من المركب الرباعي CuInGaSe<sub>2</sub> للزيادة في الجهد وتقليل فقد امتصاص الأشعة تحت الحمراء في ZnO. طبقة CdZnS على افضل الخلايا وجد إنها رقيقة جدا وتساوي تقريبا 16 nm، مما ينتج عن ذلك امتصاص قليل للكبريتيد.



افضل معامل فقد معرف في الأجهزة هو تسرب shunt، والذي من المحتمل ان يكون بسبب محتوى  $ZnO/CuInGaSe_2$  المرتبط بالعيوب في طبقة  $CdZnS$  الرقيقة، والمقاومة الفعالة للأجهزة. النقصان في هاتين القيمتين تم ملاحظتهما بالفعل في اجهزة  $CdZnS /CuInSe_2$  وتسبب في كفاءات مساحة إجمالية اعلى من 14% تحت إضاءة AM1.5.

الطول الموجي القصير يحد من الكفاءة الكوانتية للخلية وقد تم تحديده كحافة للامتصاص لطبقة  $ZnO$ . من قياسات الكفاءة الكوانتية تم تحديد آلية اعلى فقد في الكفاءة الكوانتية للطول الموجي الأطول كامتصاص  $ZnO$  وتأثير طول الانتشار المحدود في  $CuInGaSe_2$ . انخفاض امتصاص  $ZnO$  والزيادة طول انتشار حاملات الشحنة الأقلية في  $CuInGaSe_2$  ممكنا وينتج عنه زيادة إضافية في الكفاءة.

الآلية التي تتحكم في  $V_{oc}$  ليست مفهومة حتى الآن ولا يوجد تخمينات عن التحسينات الممكنة التي يمكن ان تجرى عليها.

تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

10-12-2011

[www.trgma.com](http://www.trgma.com)