مجلة أبحاث كلية التربية الأساسية ، المجلد ١٧، العدد (٢)، لسنة ٢٠٢١

College of Basic Education Researchers Journal

ISSN: 7452-1992 *Vol. (17), No.(2), (2021)*

محاكاة الطبقة الإمتصاصية CZTS في الخلية الشمسية مع طبقات نافذة وعازلة متباينة وبمعالم كهربائية مختلفة لتحقيق الأداء الأمثل

بشار علي محمد رمضان رعد أحمد رسول

جامعة الموصل/كلية التربية للعلوم الصرفة/قسم الفيزياء

(قدم للنشر في ٢٠٢١/٢/٢ ، قبل للنشر في ٢٠٢١/٣/١٠)

الخلاصة:

تم في هذا البحث الإعتماد على الخلية الأساس MoS_2/CZTS/CdS/i–ZnO/ZnO:AL التي تم تصميمها وكانت مخرجاتها (Voc =1.1074V ,Jsc= 29.5356 mA/cm^2, FF=70.29%, η=23.00%).

في هذه الدراسة تم إختبار الطبقات النافذة Window Layers وباستخدام برنامج المحاكاة SCAPS–1D (ZnO, SnO_2, ZnO:AL)، إذ تم إختيار (ZnO:AL) كطبقة نافذة، كما تبين أن أفضل سُمك لتلك الطبقة النافذة كان (0.1μm)، كما تم إختبار الطبقات العازلة المختلفة Buffer Layers للخلية الشمسية الأساس مثل(CdS, ZnO ,ZnS ,ZnSe, In_2S_3)، إذ تم إختيار (ZnS) كطبقة عازلة، إذ تبين أن أفضل سُمك لتلك الطبقة العازلة كان (0.12μm). بعد إعتماد كل من الطبقة النافذة والطبقة العازلة أصبحت الخلية المعدلة/MoS_2/CZTS/ZnS/i–ZnO/ZnO:AL ، تم تغيير سُمك طبقة الإمتصاص فيها وتبين أن أفضل سُمك لطبقة الإمتصاص (CZTS) كان (1.5μm)، عندها أصبحت مخرجات الخلية (Voc =1.0596V ,Jsc= 28.1390 mA/cm^2, FF=88.41%, η=26.37%).

<u>الكلمات الدالة</u>: الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، الخلية الشمسية(CZTS)، البرنامج الحاسوبي SCAPS–1D.

مجلة أبحاث كلية التربية الأساسية ، المجلد ١٧، العدد (٢)، لسنة ٢٠٢١

College of Basic Education Researchers Journal

ISSN: 7452-1992 *Vol. (17), No.(2), (2021)*

Simulation the Absorbance Layer CZTS in Solar Cell for Varying Windows and Buffer Layers for Different Electrical Parameters to Achieve Optimum Performance

Bashar A. Mohammed Raad A.Rasool

University of Mosul/Education College of Pure Science/Physics Department

Abstract:

In this research, we rely on the base cell MoS_2/CZTS/CdS/i–ZnO/ZnO:AL, which was designed and its outputs are (Voc=1.1074V, Jsc=29.5356 mA/cm^2, FF=70.29%, η=23.00%).

In this study, Windows layers were tested using simulation programmed SCAPS-1D about layers (ZnO, SnO_2, ZnO:AL), where (ZnO:AL) was selected as window layer, and it was found that the best thickness of the windows layer (0.1 µm). Also the different Buffer layers of the basic solar cell (CdS, ZnO, ZnS, ZnSe, In_2S_3) were tested, where (ZnS) was selected as the Buffer layer, where it was found that the best thickness was (0.12 µm).

After adopting both the window layers and Buffer layers, the modified cell became MoS_2/CZTS/ZnS/i-ZnO/ZnO:AL, the thickness of the Absorption layer was tested, and it was found that the best thickness of the Absorption layer (CZTS) was (1.5µm), then the cell output (Voc = 1.0596V, Jsc=28.1390 mA/cm^2, FF= 88.41%, η=26.37%).

Key words: Thin Film Solar Cell, CZTS Solar Cell, SCAPS-1D Computer Software.

المقدمة :

مع زيادة الإستهلاك للطاقة التقليدية والأزمة البيئية الخطيرة تدريجياً، فقد أجتذب البحث عن الخلايا الشمسية وتطبيقاتها اهتماماً عالمياً متزايداً [١]. في السنوات العشر الماضية عزَز تقدم تقنية تحضير الأغشية الرقيقة من إزدهار تكنولوجيا الجيل الثاني من الخلايا الشمسية القائمة على مواد رقيقة من أشباه الموصلات. نظراً للطلب على مواد أقل فأنه يمكن لتقنية الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة أن تقلل بشكل فعَال من المواد، علاوة على ذلك يمكن لمواد الأغشية الرقيقة أن تترسب بمرونة على ركائز مثل الزجاج والفولاذ المقاوم للصدأ والبلاستك وهي مناسبة بشكل خاص لتكامل الخلايا الشمسية. تشمل الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة الرئيسية غشاء السيليكون الرقيق غير المتبلور، والكادميوم تيلورايد (CdTe)، والسيلينيوم النحاسي الإنديوم (CIS)، والسيلينيوم النحاسي والإنديوم الغاليوم (CIGS)، وزنيخيد الغاليوم، ونحاس الزنك والكبريت والقصدير (Cu_2ZnSnS_4) فيما يلي يشار إليها بإسم (CZTS)، حيث يحتوي زرنيخيد الغاليوم والكادميوم تيلورايد على عناصر سامة (الكادميوم والزرنيخ)، ويحتوي نظام سيلينيد الإنديوم والنحاس على عناصر إنديوم نادرة.

أن (CZTS) عبارة عن مركبات رباعية من هيكل ستانيت، تبلغ فجوة الطاقة فيه حوالي (1.5 V) وهي قريبة جداً من فجوة الطاقة الأفضل التي تتطلبها الخلايا الشمسية شبه الموصلة (1.35 V)، كما أن(CZTS) هي مادة أشباه موصلات ذات فجوة طاقة مباشرة مع معامل امتصاص عالي وهيكل متعدد الطبقات،لذلك يمكن استخدامه كطبقة إمتصاص للخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة. مقارنة بالسيليكون البلوري المتداول حالياً CIGS وCdTe، نظراً لوفرة العناصر المكونة في القشرة الأرضية، تعد الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة غير السَامة والصديقة للبيئة CZTS واحدة من أفضل المواد المرشحة لطبقة إمتصاص الطاقة الشمسية [2,3]. وهو أمر متوقع لتصبح مادة طبقة الإمتصاص المثالية للجيل القادم من الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة.

تم إنشاء الخلايا الشمسية CZTS لأول مرَة في عام 1966 [4]، ثم تبين لاحقاً أنها تعرض للتأثير الكهروضوئي في عام 1988 [5]، وقد تمت زيادة كفاءة الخلايا الشمسية في CZTS إلى 5,7%، وفي عام 2005 تم تحسين عملية الترسيب [6].

في عام 1988 إستخدم كل من Ito و Nakazawa في جامعة شينشو اليابانية طريقة الرش لتصنيع خلية(CZTS) لأول مرة. قاموا بتصنيع الخلية (CZTS) برش حزمة ذرية والحصول على الخلية (CZTS) بفجوة طاقة قدرها (1.45V). وبعد تشكيل وصلة غير متجانسة مع (CdZnO) حصلوا على خلية شمسية بجهد دائرة فتح بلغ (165mV) [7].

في عام 1996 أستخدم مجموعة من الباحثين في Nagaoka National college of Technology Research Group وبطريقة التبخير الإشعاعي الإلكتروني وطريقة المعالجة لتصنيع الخلايا الشمسية لهيكل الخلية ZnO–AL/CdS/CZTS/Mo/SLG وبجهد دائرة الفتح (400mV) وتيار دائرة القصر ($6.0mA/cm^2$) وعامل المليء (0.277%) وكفاءة تحويل(0.66%) [8].

في عام 2011 درس Ito في جامعة شينشو طريقة رش المواد الأولية المعدنية من النحاس والقصدير والزنك لتصنيع (CZTS) وحصل على كفاءة (3.7%) [9].

المواد وطرق عمل المحاكاة:

برنامج الـ (SCAPS) هو محاكاة عددية لهياكل أشباه الموصلات للخلايا الشمسية الرقيقة (CZTS) القائمة على (Cu_2ZnSnS_4)، وقد تم تطويره في قسم الإلكترونيات ونظم المعلومات (ELIS) من جامعة كينت في بلجيكا، ساهم في تطويره عدد من الباحثين وهم كلاً من كوين ديكوك ومارك بوركلمان و أليكس نيميكيرز وستيفان ديكريفDegrave [10].

البرنامج متاح مجاناً لمجتمع البحوث الكهروضوئية (الجامعات ومعاهد البحث). إذ تم تطوير البرنامج في الأصل لتركيبات خلايا ($CulnSe_2$) وعائلة (CdTe)، بحيث يعمل على الخلايا الشمسية البلورية (Si وGaAs) والخلايا غير البلورية (a–Si and micromorphous Si) ويعمل على الكمبيوتر الشخصي بنظام Windows 95، 98، NT، XP، Vista، Windows 7، مبدأ عمل محاكي الـ (SCAPS) هو معادلة الإنتشار diffusion equation والإنجراف drift equation ومعادلة بواسون Poisson's equation ومعادلة الإستمرارية Equality equation، ويستخدم طريقة نيوتن– رافسون، ويمكن دراسة الخلية الشمسية من خلال محاكي SCAPS تحت الظروف المحددة من قِبل الباحث K.wok وهذه المعادلات هي على النحو الآتي[11].

$$Jn = q\mu n\, n\mathcal{E} + qDn\frac{dn}{dx} = q\mu n\left(n\mathcal{E} + \frac{KT}{q}\frac{dn}{dx}\right) = nn\frac{dEFn}{dx} \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

$$Jp = q\mu pP\mathcal{E} + qDp\frac{dp}{dx} = q\mu p\left(P\mathcal{E} + \frac{KT}{q}\frac{dp}{dx}\right) = \mu pP\frac{dEFp}{dx} \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

حيث $\mathcal{E}$ – تمثل المجال الكهربائي (V/cm) Electric Field

μn , μp – التحركية نسبة للإلكترونات والفجوات (cm^2/V–s) The Ability of Electron's and Hole's.

Jn, Jp– تمثل كثافة التيار نسبة للإلكترونات والفجوات The Electron's and Hole's current density (mA/cm^2).

Dn, DP– معامل الإنتشار للإلكترونات والفجوات (cm^2/s) Diffusion Coefficient for Electron's and Hole's .

ويمكن كتابة معادلة الإستمرارية نسبة للإلكترونات وهي:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = \mathrm{G}n(x) - Rn(x) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

حيث Gn(x) – تمثل عملية التولد للإلكترونات Generation Process of Electron's.

Rn(x)– تمثل عملية معدل إعادة التركيــب ومعادلة الإستمرارية نسبة للفجوات:

$$\frac{\partial \mathrm{p(x)}}{\partial \mathrm{t}} = Gp(x) - Rp(x) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

حيث $Gp(x)$ – تمثل عملية تولد الفجوات Generation Process of Hole's.

$Rp(x)$ – تمثل معدل إعادة التركيب Mean Recombination.

أما معادلة بواسون poisson's equation فهي تربط بين معادلة كثافة الشحنات وجهد الإلكترونات (الجهد الكهروستاتيكيΦ)، وهي نقطة بداية في الحصول على الحل النوعي للمتغيرات في الكهربائية الساكنة في أشباه الموصلات [11].

$$\frac{d\ln(E(x))}{\partial x}\cdot\frac{d\Phi(x)}{dx}+\frac{d2\Phi}{dx^2}=\frac{\rho(x)}{\mathcal{E}_\circ(X)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

وفي حالة ثبات ($\varepsilon_\circ$) تكون معادلة poisson's equation بالصيغة الآتية:

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2}=-\frac{\rho(x)}{\varepsilon_\circ} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots(6)$$

إذ إن: $\varepsilon_\circ$ – تمثل السماحية الكهربائية Electron Permittivity (F/cm).

ويمكن حساب التيار الذي يمر عبر الخلية الشمسية من خلال المعادلة:

$$I=I_o\left(exp\frac{qv}{kT}-1\right) \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots(7)$$

حيث I – تيار دائرة الحمل، أما I_o – يمثل تيار التشبع العكسي، وT تمثل درجة الحرارة وk – تمثل ثابت بولتزمان Boltzmann constant، ويمكن حساب فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) من العلاقة الآتية:

$$V_{oc}=\frac{kT}{q}In\frac{I_{SC}}{I_o}+1 \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots(8)$$

عامل المليء Fill Facter يمكن تعريفه بأنه تربيع المنحني (I – V) ويرتبط مقداره بشكل رئيسي في خسارة المقاومة للخلية الشمسية ، ويمكن حسابه من العلاقة الآتية:

$$FF=\frac{V_mI_m}{V_{oc}I_{sc}} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots(9)$$

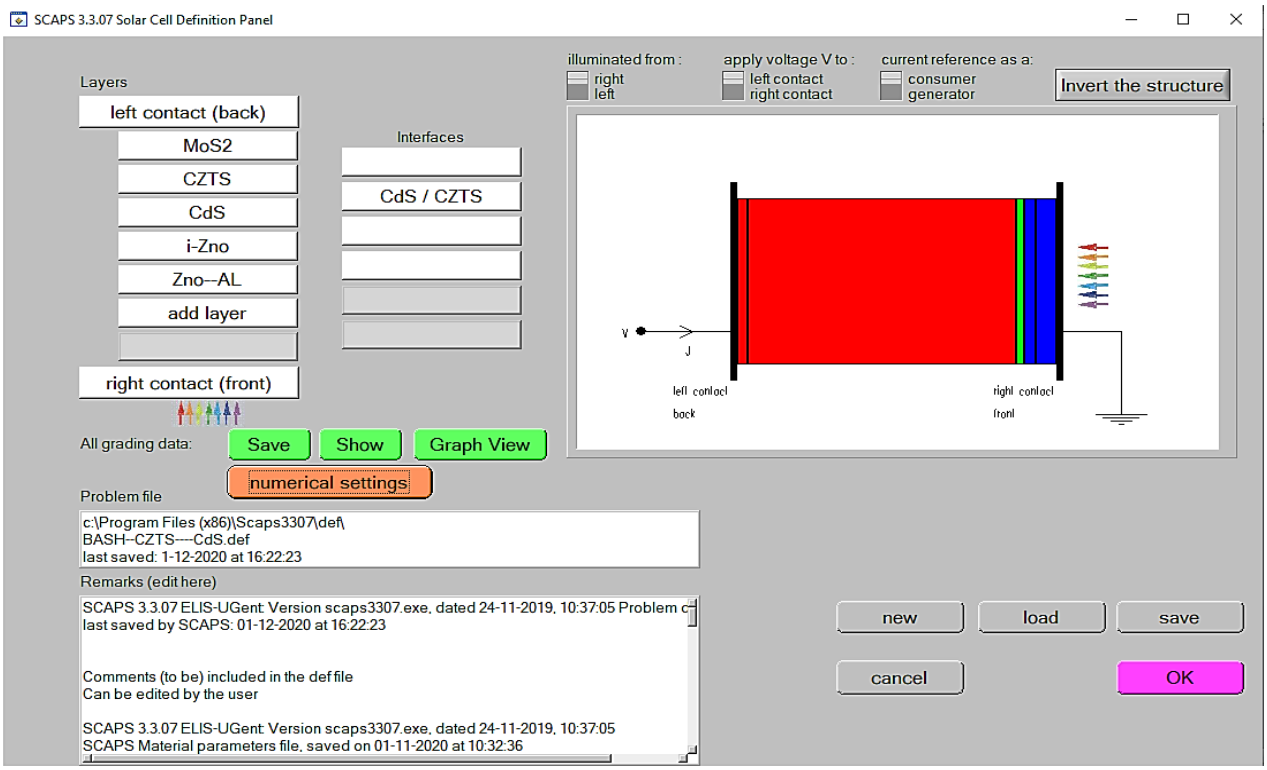
نحسب أيضاً كفاءة الخلية الشمسية من العلاقة:

$$\eta=\frac{OutPut\ Power(P_{out})}{InPut\ Power(P_{in})}\times 100\% \quad \dots\dots(10)$$

ويمكن كتابة معادلة الكفاءة بطريقة أخرى

$$\eta = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \qquad \dots\dots\dots\dots\dots (11)$$

في البدء تم إختبار الخلية الأساس MoS_2/CZTS/CdS/i–ZnO/ZnO:AL باستخدام برنامج الـ SCAPS–1D وكما مبين في الشكل (١) الذي يمثل طبقات الخلية شكلياً من خلال البرنامج، وكانت مخرجات هذه الخلية بعد تطبيق واجهة البرنامج هي الآتي: Voc=1.1074V, Jsc=29.5356 mA/cm^2, FF=70.29%, η=23.00%



الشكل(١) يوضح طبقات الخلية الأساس

إذ يبين الجدول(1) معلمات الطبقات الخاصة بالخلية الأساس وهي كلا من: الطبقة الخلفية Back Layer (MoS_2) والطبقة الماصة Absorption Layer (CZTS) والطبقة العازلة Buffer Layer (CdS)،والطبقة الموصلة الشفافة(i–ZnO) والطبقة النافذة Window Layer (ZnO:AL).

وتتمثل هذه المعلمات كلاً من: فجوة الحزمة band gap (E_g)، والسُمك thickness، والألفة الإلكترونية electron affinity electron affinity (χ)، السماحية العازلة dielectric permittivity (ε)، تحركية الإلكترون electron mobility

(μ_n)، تحركية الثقوب (μ_p) hole mobility، كثافة الواهب (N_A) donor density، كثافة المستقبل(N_D) acceptor density. donor or acceptor defects، كثافة نطاق التوصيل(N_C) conduction band density of states ، كثافة حزمة التكافؤ (N_V) valence band density of states.

الجدول(1) معلمات الطبقات الخاصة لمحاكاة الخلية الشمسية MoS_2/CZTS/CdS/i–ZnO/ZnO:AL

Parameter	MoS_2	CZTS	CdS	ZnO	i– ZnO	ZnO:Al
Thickness (nm)	100	2500	80	80	100	200
Band gap (eV)	1.7	1.45	2.4	3.3	3.3	3.3
Electron affinity (eV)	4.2	4.5	4.2	4.6	4.4	4.6
Dielectric permittivity	13.6	10	9	9	9	9
CB effective density of states (cm^{-3})	2.2E+18	2.2E+18	2.2E+19	2.2E+19	2.2E+18	2.2E+18
VB effective density of states (cm^{-3})	1.8E+19	1.8E+19	1.8E+18	1.8E+19	1.8E+19	1.8E+19
Electron thermal velocity (cms^{-1})	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7
Hole thermal velocity (cms^{-1})	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7	1.0E+7
Electron mobility (cm^2/V_s)	100	100	100	100	100	100
Hole mobility (cm^2/V_s)	25	25	25	25	25	25
Shallow uniform donor density, N_D (cm^{-3})	0	0	3.0E+16	1.0E+14	1.0E+18	1.0E+18
Shallow uniform acceptor density, N(cm^{-3})	1.0E+16	1.0E+17	1.0E+1	1.0E+1	1.0E+18	0
Defect type	_	Donor	Acceptor	Acceptor	Acceptor	Acceptor

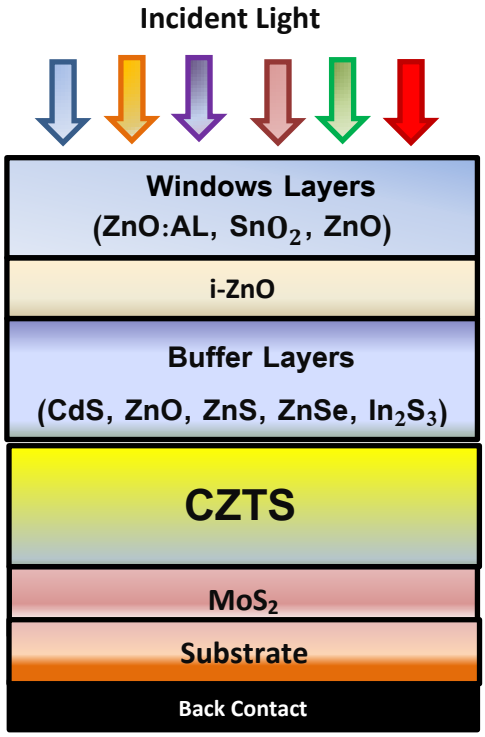
كما تم مقارنة الخلية الأساس التي تم تصميمها مع الخلايا المختلفة، إذ تبين إن أفضل النتائج كانت مع الخلية التي تم الحصول عليها هي خلية (Mo/CZTS/ZnS/i–ZnO/ZnO:AL) وكما موضح في الجدول (2).

الجدول (2) معلمات الإخراج للخلايا المختلفة

Thin film solar cell	Efficiency(%)	Fill Factor (%)	J_{sc}(mA/cm^2)	V_{oc} (V)
Mo/CZTS/CdS/i-ZnO/Zno:Al	23.00	70.29	29.5356	1.1074
Mo/CZTS/ZnO/i-ZnO/ZnO:Al	25.55	85.77	28.6459	1.0397
Mo/CZTS/ZnS/ i-ZnO/ZnO:Al	26.37	88.41	28.1390	1.0595
Mo/CZTS/In_2S_3/i-ZnO/ZnO:Al	21.13	77.29	26.6775	1.0642
Mo/CZTS/ZnSe/i-ZnO/ZnO:Al	20.50	68.68	28.6653	1.0410

النتائج والمناقشة:

من أجل تحسين مخرجات الخلية الأساس MoS_2/CZTS/CdS/i–ZnO/ZnO:AL، تم محاكاة كلاً من الطبقات النافذة Window Layers (ZnO, SnO_2, ZnO:AL)، كما تم محاكاة الخلية بالطبقات العازلة المختلفة (CdS, ZnO, ZnS, ZnSe, In_2S_3)، والشكل (2) يوضح الخلية والطبقات المقترحة النافذة والعازلة.



A– دراسة تأثير إختبار الطبقة المثلى في الطبقات العازلة للخلية الأساس:

من أجل وضع الطبقة المثلى للخلية الأساس MoS_2/CZTS/CdS/i–ZnO/ZnO:AL من الطبقات العازلة، فقد إقترح بديل لطبقة كبريتيد الكادميوم (CdS). إذ تم إختبار طبقات عازلة مثل كبريتيد الزنك (ZnS) وسيلينيد الزنك (ZnSe) وكبريتيد الإنديوم (InS) وأوكسيد الزنك (ZnO) مع (CdS). فكانت النتائج التي تم الحصول عليها بإستخدام (ZnS) ، تقارن بشكل إيجابي مع نتائج CdS، عليه فان الطبقة (ZnS) وبسُمك (0.12 µm) التي تعتبر من أفضل البدائل المرشحة كمواد عازلة للخلية الشمسية الأساس، وكما مبين في الشكل(3).

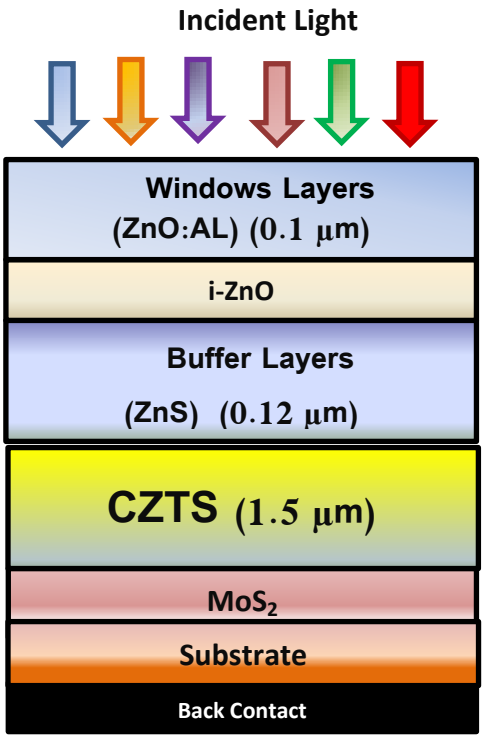
B– دراسة تأثير إختبار الطبقة المثلى في الطبقات النافذة للخلية الأساس:

ومن أجل وضع الطبقة المثلى للخلية الأساس MoS_2/CZTS/CdS/i–ZnO/ZnO:AL من الطبقات النافذة، وقد إقترح بديلاً لطبقة (ZnO:AL). إذ تم إختبار طبقات نافذة مثل (SnO_2) و (ZnO). كانت النتائج التي تم الحصول عليها بإستخدام (ZnO:AL) التي يمكن مقارنتها إيجابياً، عليه فان الطبقة (ZnO:AL) وبسُمك (0.1 µm) التي تعتبر من أفضل البدائل المرشحة كمواد نافذة للخلية الشمسية الأساس، وكما مبين في الشكل(3).

كما تم فــي هذه الدراسة تغيير سُمك طبقة الإمتصاص Absorber Layer من (0.5 –3.5 µm)، وتبَين أن أفضل سُمك كان (1.5 µm)، للحصول على افضل كفاءة، مع اعتماد تركيز الشوائب (NA) shallow uniform acceptor density ($1/cm^3$) إلى ($1\times 10^{17}\ cm^{-3}$) لطبقة الإمتصاص (P–CZTS) absorber layer. وقد أنتجت الخلية الجديدة أفضل كفاءة بلغت (26.37%)، والشكل (3) يوضح الخلية المعتمدة في هذه الدراسة.

تم الحصول على مجموعة من النتائج الجيدة عندما كان أفضل سُمك لطبقة الامتصاص(CZTS) هو (1.5µm)، وأن أفضل سُمك للطبقة العازلة (ZnS) كان (0.12µm)، وأفضل سُمك للطبقة النافذة (ZnO:AL) كان (0.1µm)، إذ تم تطبيق هذه الأسماك في الخلية المعدلة التي تم إعتمادها وكانت مخرجاتها هي كما يأتي:

(Voc =1.0596V, Jsc=28.1390mA/cm^2, FF=88.41%, η=26.37%)

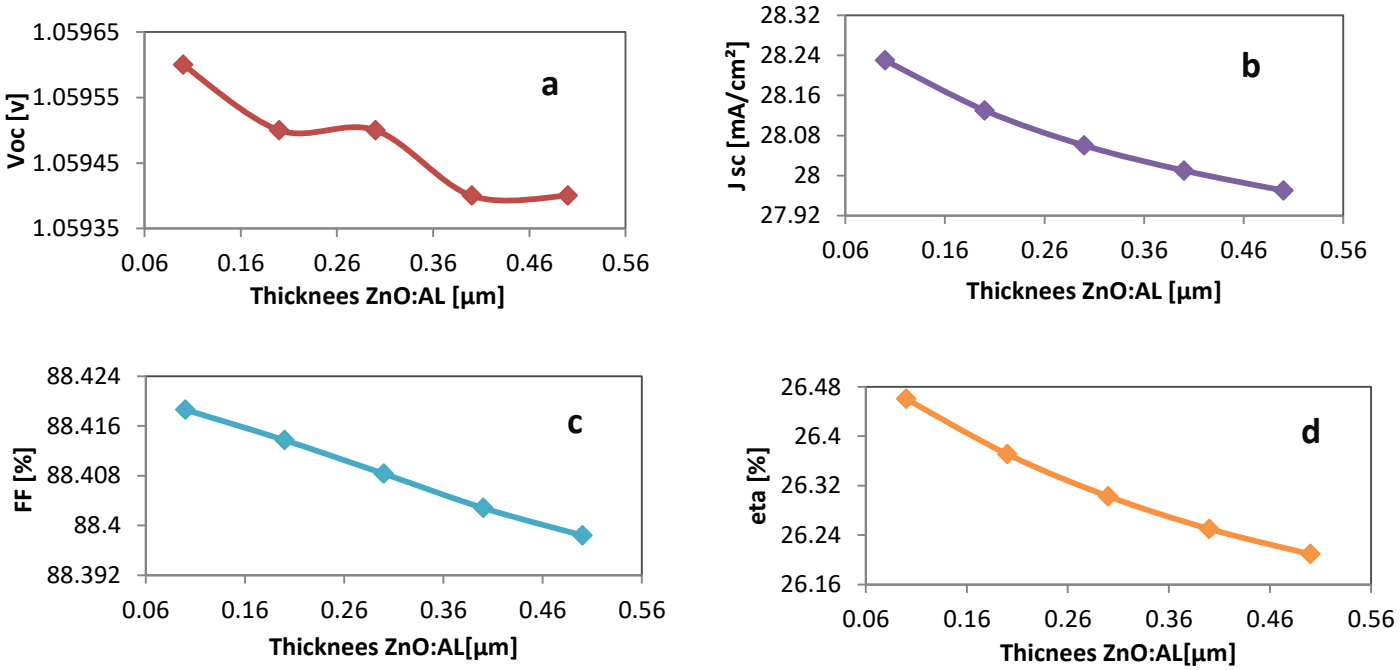


الشكل (3) الهيكل التخطيطي للخلية المعدلة من الخلية الأساس.

C- دراسة تأثير سُمك الطبقة النافذة (ZnO:AL) على الخواص الكهربائية للخلية الشمسية:

تُعد طبقة (ZnO:AL) من أكثر الطبقات شيوعاً التي يمكن إستخدامها في العديد من التطبيقات، إذ درس العديد من الباحثين هذه الطبقة في تطبيقات الإلكترونيات[12]. يُستحسن دائماً أن تكون هذه الطبقة أرق من طبقة الإمتصاص لزيادة إمتصاص الإشعاع الشمسي الوارد (الفوتونات) الى طبقة (P-CZTS)، إذ تم تغيير سُمك طبقة (ZnO:AL) من(0.1-0.5µm)، مع ثبوت معلمات الطبقة النافذة الأخرى للوصول إلى أفضل سُمك، إذ تبين أن زيادة سُمك الطبقة النافذة(ZnO:AL) لهُ آثار سلبية على مخرجات الخلية، إذ تبَين أنه بزيادة سُمك الطبقة النافذة(ZnO:AL) فأن قيمة فولتية الدائرة المفتوحة (Voc) تقل، كما في الشكل (4-a)، أما بالنسبة لـ تيار دائرة القصر Jsc ،فأنه بزيادة سُمك الطبقة النافذة (ZnO:AL) أيضاً يقل، نتيجة أزدياد إعادة الإلتحام عند السطح، كما في الشكل(4-b)، أما بالنسبة لـ عامل المليء FF فانه يقل أيضا لإمتلاك طبقة (ZnO:AL) مقاومة وتشويب عالي، كما في الشكل (4-c)، أما عن كفاءة الخلية الشمسية فأنه يلاحظ إنخفاض قيمة الكفاءة (η) بزيادة سُمك الطبقة النافذة (ZnO:AL)، نتيجة إنخفاض وصول الفوتونات الى طبقة الإمتصاص (CZTS)، وبذلك تزداد عملية إعادة

الإلتحام، ويقل معدل توليد الزوج (إلكترون–فجوة)، تبيَّن أنه بزيادة سُمك طبقة (ZnO:AL)، فأن مخرجات الخلية الشمسية تقل، كما في الشكل(4–d).

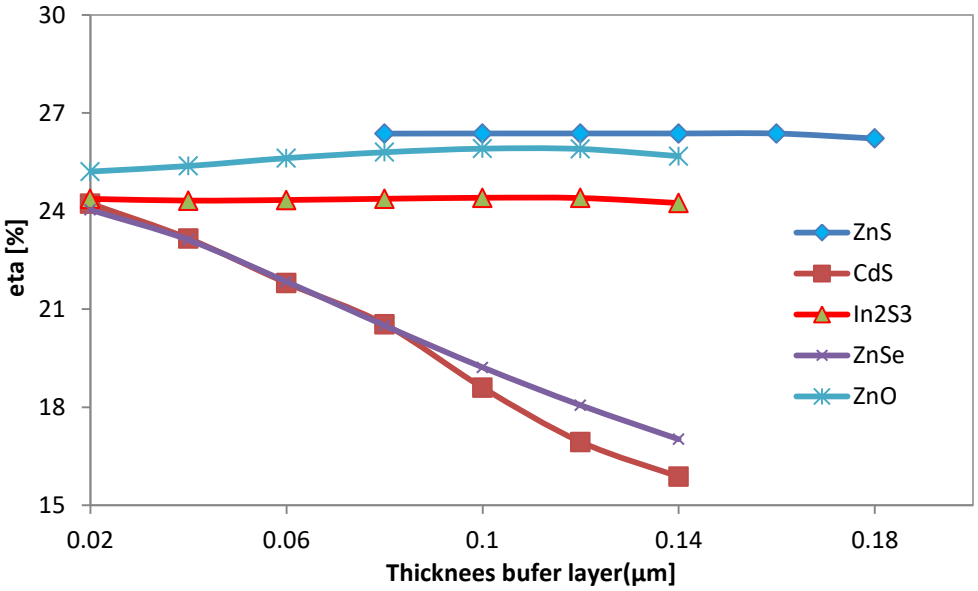


الشكل (4) تأثير سُمك طبقة ZnO:AL على الخصائص الكهربائية للخلية الشمسة

D– دراسة تأثير سُمك الطبقات العازلة (Buffer Layers) على كفاءة الخلية الشمسية:

تم دراسة تأثير سُمك الطبقات العازلة على كفاءة الخلية الشمسية. وتم تغيير سُمك الطبقات العازلة المختلفة من (0.02–0.18µm)، بزيادة سُمك الطبقات العازلة، فان مقدار (Jsc) يقل، وتحدث زيادة بسيطة قريبة من الثبوت في مقدار (Voc)، ويزداد عامل المليء (FF) ، لأن الطبقات العازلة (BL) تعمل على تقليل عملية إعادة الإلتحام فيزداد عامل المليء(FF)، وزيادة سُمكها يزيد من إمتصاص الفوتونات الساقطة عليها فيقل Jsc، لذلك ستنتج أزواج أقل من الإلكترون–فجوة Less electron–hole pairs بفعل إنخفاض الفوتونات المُلتقطة بواسطة طبقة الإمتصاص Captured by the Absorber Layer وتم الحصول على كفاءة مثلى لطبقة (ZnS) عند سُمك (0.12µm). فقد تؤدي الطبقات العازلة (BL)

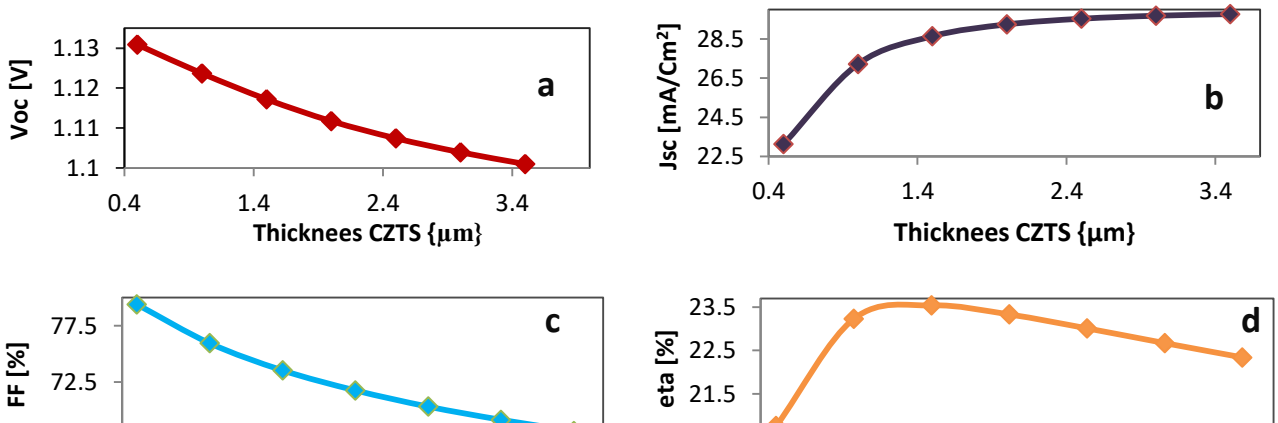
السميكة إلى إمتصاص الفوتونات الداخلة، وتؤدي الطبقات الرقيقة إلى تسرب التيار، نستنتج أن الكفاءة تقل بزيادة سُمك الطبقة العازلة(BL)، وكما مبين في الشكل (5).



الشكل (5) تأثير سُمك الطبقات العازلة على كفاءة الخلية الشمسية

E- دراسة تأثير سُمك طبقة الإمتصاص (CZTS) على الخواص الكهربائية للخلية الشمسية:

تمتلك طبقة إمتصاص (CZTS) إمتصاصية عالية أكبر من 10^4 cm^{-1} بذلك يمكن تحقيق كفاءة عالية وبتكلفة أقل, وقد تم إختبار طبقة الإمتصاص من (0.5-3.5µm) للحصـول على أفضل, حيث تم دراسة تأثير تغيير سُمك طبقة الإمتصـاص P-CZTS مع ثبوت جميع المعلمات المثبتة فـي الجدول) (1) والشكل (a-6) يوضح تأثير تغيير سُمك طبقة الإمتصاص على (Voc), إذ تقل (Voc) بسبب زيادة إحتمالية إعادة الإلتحام نتيجة زيادة تيار التشبع العكسي المتولد في منطقة الاستنزاف.

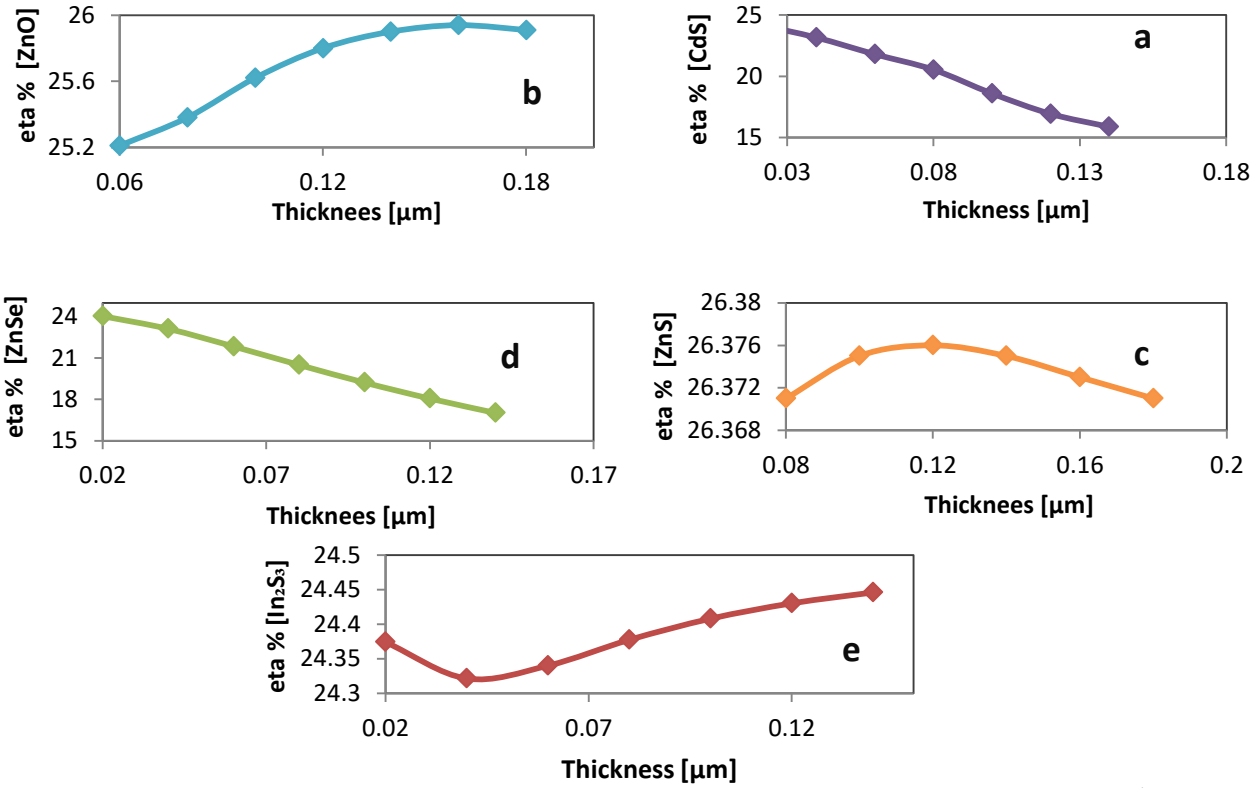


أما عن كثافة تيار دائرة القصر Jsc، إذ يلاحظ حصول إزدياد حاد واضح لقيم Jsc نتيجة زيادة إعادة الإلتحام والإمتصاص غير المتكامل للفوتونات عندما كان سُمك طبقة الإمتصاص أقل من 1.5μm، أما بزيـادة سُمك طبقة الإمتصاص أكثر من 1.5μm. عليه تحصل زيادة طفيفة في قيم Jsc، وذلك لإمتصاص مقدار أكبر من الفوتونات الساقطة الشكل (6–b) يوضح هذا الأمر.

أما عامل المليء FF فان تغيير سُمك طبقة الإمتصاص CZTS فان تأثيره يكون حاداً عند السُمك 1μm، أما بعد السُمك 1.5μm يحصل إنخفاضاً بسيطاً نتيجة لإزدياد عملية إعادة الإلتحام فيقل بذلك Voc، والشكل (6–c) يبين وضح ذلك.

أما عن كفاءة الخلية الشمسية η فان زيادة معدل توليد الزوج (إلكترون– فجوة) فان الكفاءة تزداد بزيادة سُمك طبقة الإمتصاص نتيجة زياد كثافة تيار دائرة القصرJsc، لكن هذه الزيادة تصل ذروتها عند السُمك 1.5μm. إذ يتم إمتصاص الفوتونات الساقطة عند أعماق مختلفة من الخلية، نتيجة لزيادة إعادة الإلتحام في الأطوال الموجية القصيرة وإنخفاض معامل الإمتصاص، فأن الكفاءة تبدأ بالإنخفاض بعد السُمك 1.5μm والشكل(6–d) يبين ذلك.

من خلال هذه الدراسة تم الكشف أن كفاءة الخلية تتغير بتغير سُمك طبقة الإمتصاص ولكن لديها زيادة أبطأ عندما يزيد سُمك طبقة الإمتصاص عن 1.5μm، لأن ذلك سيزيد من معدل إعادة الإلتحام وهذا السُمك كافٍ لإمتصاص معظم الفوتونات الساقطة. ويتطلب الحصول على طبقة عازلة رقيقة وطبقة إمتصاص سميكة، والشكل(7) يبين تأثير سُمك الإمتصاص للطبقات العازلة المختلفة.



الشكل (7) تأثير سُمك الإمتصاص للطبقات العازلة– (a)CdS–(b)ZnO–(c)ZnS–(d) ZnSe – ((e)– In_2S_3)على كفاءة الخلية الشمسية

الإستنتاج:

من خلال دراسة الخلية الشمسية الأساس (MoS_2/CZTS/CdS/i-ZnO/ZnO:AL)، كانت كفاءتها (23.00%)، تم تغيير الطبقات النافذة Window Layers (ZnO:AL, SnO_2, ZnO)، كما تم تغيير الطبقات العازلة Buffer Layers (CdS,ZnO,ZnS,In_2S_3,ZnSe)، وكذلك تم تغيير سُمك طبقة الإمتصاص(CZTS)، إذ تبّين من هذهِ الدراسة أن:

تم إختيار طبقة (ZnO:AL) كأفضل طبقة نافذة، إذ تبّين انهُ بزيادة سُمك الطبقة النافذةWindow Layers فان مخرجات الخلية الشمسية تقل، وإن أفضل سُمك كان (0.1µm)،

كما تم إختيار طبقة (ZnS) كأفضل طبقة عازلة، إذ تبين أنهُ بزيادة سُمك الطبقة العازلة Buffer Layers فأن قيمة(Voc) تزداد قليلاً ثم تقترب من الثبوت، أما عامل المليء يزداد بزيادة سُمك الطبقة العازلة، أما كثافة تيار دائرة القصر(Jsc)، ينخفض قليلاً ثم يرتفع إرتفاعاً حاداً عند سُمك (1.4 µm)، أما كفاءة الخلية الشمسية تصل ذروتها عند سُمك(1.5µm) ثم تقل، نستنتج من ذلك أن الكفاءة تقل بزيادة سُمك الطبقة العازلة.

إذ تبّين بتغيير سُمك طبقة الإمتصاص من (٠.٥-٣.٥ µm)، تم الحصول على أفضل كفاءة بلغت(23.5%) عند سُمك(1.5µm).

تم إختيار الخلية (MoS_2/CZTS/ZnS /i-ZnO/ZnO:AL)، وتم الحصول على كفاءة مثلى بلغت (26.37%)، إذ تم حصولنا على أفضل كفاءة من خلال إختيار أفضل الطبقات النافذة والعازلة وإختيار السمك الأمثل لطبقة الإمتصاص.

References:

1- S. C. Riha, B. A. Parkinson, and A. L. Prieto, "Solution-based synthesis and characterization of Cu_2ZnSnS_4 nanocrystals," Journal of the American Chemical Society, vol. 131, no. 34, pp. 12054–12055, 2009.

2- C. Steinhagen, M. G. Panthani, V. Akhavan, B. Goodfellow, B. Koo, and B. A. Korgel, "Synthesis of Cu_2ZnSnS_4 nanocrystals for use in low-cost photovoltaics," Journal of the American Chemical Society, vol. 131, no. 35, pp. 12554–12555, 2009.

3- S. R. Hall, J. T. Szymanski, and J. M. Stewart, "Kesterite $Cu_2(Zn,Fe)SnS_4$ and stannite $Cu_2(Fe,Zn)SnS_4$ structurally similar but distinct minerals," The Canadian Mineralogist, vol. 16, pp. 131–137, 1978.

4- Nitsche, R.; Sargent, D. F.; Wild, P. "Crystal Growth of Quaternary I(2)II-IV-VI(4) Chalcogenides by Iodine Vapor Transport". Journal of Crystal Growth. 1:pp, 52–53, 1967.

5- K. Ito and T. Nakazawa, "Electrical and Optical Properties of Stannite-Type Quaternary Semiconductor Thin Films". Japanese Journal of Applied Physics. **27,no** 11, pp. 2094–2097, 1988.

6- Katagiri, Hironori; Jimbo, Kazuo; Maw, Win Shwe; Oishi, Koichiro; Yamazaki, Makoto; Araki, Hideaki; Takeuchi, Akiko "Development of CZTS-based thin film solar cells". Thin Solid Films. **517** (7): 2455–2460. (2009).

7- S. Chen, A. Walsh, Y. Luo, J.-H. Yang, X. G. Gong, and S.-H. Wei, "Wurtzite-derived polytypes of kesterite and stannite quaternary chalcogenide semiconductors," Physical Review B, vol. 82, no. 19, Article ID 195 203, 2010.

8- Z. Yang, Research on one-step Preparation of CZTS films and electrochemical optical properties [M.S. thesis], Dalian University of Technology, 2011.

9- N. Momose, M. T. Htay, T. Yudasaka et al., "Cu_2ZnSnS_4 thin film solar cells utilizing sulfurization of metallic precursor prepared by simultaneous sputtering of metal targets," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 50, no. 1, Article ID 01BG09, 2011.

10- M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid Films, 361, pp, 527-532, 2000.

11- K.wok ,K..Ng, "Complete guide to Semiconductor Devices", U.S.A. (1995).

12- L. Znaidi, T. Touam, D. Vrel et al., "ZnO thin films synthesized by sol-gel process for photonic applications," Acta Physica Polonica A, vol. 121, no. 1, pp. 165–168, 2012.