تأثير التشعيع على الخصائص البصرية لأغشية CdS المحضرة بطريقة التبخير الحراري في الفراغ

هند فاضل عليوي

جامعة بغداد ، كلية العلوم للبنات ، قسم الفيزياء.

الخلاصة

تم في هذا البحث دراسة تأثير التشعيع بأشعة كاما المنبعثة من مصدر الكوبلت Co^{60} وبجرعات اشعاعية مختلفة Mrad (0,1,5,10) على الخواص البصرية لاغشية متجانسة من مادة كبريتيد الكادميوم (CdS) المحضرة بطريقة التبخير الحراري في الفراغ وبسمك (1μm) تحت ضغط (10^{-6}Torr) والمرسبة على ارضية زجاجية.

تضمنت الدراسة الخواص البصرية للاغشية المشععة وغير المشععة اطياف النفاذية والامتصاصية والانعكاسية ضمن مدى الاطوال الموجية nm(900-300) كما تم دراسة معامل الانكسار ومعامل الخمود ومعامل الامتصاص وثابت العزل الكهربائي بجزئيه الحقيقي والخيالي كدوال لطاقة الفوتون وفجوة الطاقة البصرية للانتقال المباشر المسموح والممنوع.

اظهرت النتائج ان التشعيع ادى الى تغير لون الاغشية الى الاصفر الداكن والى زيادة قيم معامل الامتصاص ، معامل الخمود وثابت العزل الخيالي وتناقص في قيم فجوة الطاقة ونقصان في قيم الانعكاسية ومعامل الانكسار وثابت العزل الكهربائي الحقيقي بزيادة الجرعات الاشعاعية ,كما انه لم يغير من طبيعة شكل هذه المنحنيات عما كانت عليه قبل التشعيع.

المقدمة

ابرزت التقنيات الحديثة تقدما كبيرا في مجال الالكترونيات ووفرت دراسات متكاملة للاغشية الرقيقة التي كان لها الدور الكبير في الكثير من التطبيقات الصناعية المختلفة كالدوائر الالكترونية والمكثفات والخلايا الشمسية والسطوح الانتقائية المستخدمة في التطبيقات الشمسية الضوئية، اذ تعد تقنية الاغشية الرقيقة واحدة من اهم التقنيات التي ساهمت في تطور دراسة اشباه الموصلات واعطت فكرة واضحة عن العديد من خواصها الفيزيائية والكيميائية (1).

من المعروف ا ن هناك انواعا مختلفة من الاغشية الرقيقة ولكل نوع استخداماته وطرق تحضيره . يعد مركب (CdS) احد المركبات شبه الموصلة للمجموعة (الثانية–السادسة) (II-VI) ويمتلك فجوة طاقة مباشرة (Direct Band Gap)، ومعامل امتصاص عالٍ ($\alpha>10^4cm^{-1}$) في مدى الطيف المرئي (4,3) ويمكن انتاج اغشية رقيقة منه ذات مواصفات عالية الجودة وبتقنيات متعددة وبكلفة قليلة ، وقد ازداد الاهتمام بشكل ملحوظ بهذه المادة خلال السنتين الاخير تين بسبب اثباته نجاحاً في تطبيقات التوصيلية الضوئية بالاضافة الى النبائط والخلايا الشمسية (5).

تهدف هذه الدراسة الى استخدام طريقة التبخير الحراري في الفراغ حيث ان الاغشية المحضرة بهذه الطريقة تتميز بالانتظام والتجانس وخلوها من الشوائب (6) وبعد ذلك يتم تعريض هذه الاغشية لجرع مختلفة من اشعة كاما ودراسة الخواص الضوئية لهذه الاغشية بعد التشعيع لمعرفة تاثير الجرع الاشعاعية المختلفة على هذه المادة. تم تحضير اغشية CdS المستخدمة في هذا البحث بعدة طرق منها التبخير الحراري في الفراغ وطريقة الترذيذ Sputtering و CBD (Chemical Bath Deposition) والرش (Metal Organic MOCVD Deposition) (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) Screen (2). و Spray) (Molecular Beam و Epitaxy) و SILAR

تعد دراسة الخصائص البصرية بدءا من الثوابت البصرية وحساب فجوة الطاقة البصرية من الدراسات المهمة لعلاقتها بسلوكية المواد شبه الموصلة وتحديد مدى ملائمتها للتطبيقات المختلفة.

الجانب العملي

1- العينات

تم في هذا البحث تحضير اغشية CdS باستخدام منظومة تبخير من نوع (Lybold Coating Unit) تحت ضغط واطيء بحدود (10^{-6}Torr) باستخدم حويض مصنوع من المولبيدنيوم (Mo) التي تم اختياره لعدم تفاعله مع مادة CdS ولان درجة انصهاره عالية ($2890K^{o}$). تم ترسيب الاغشية بسمك (1μm) على قواعد زجاجية من نوع (Soda glass) في درجة حرارة الغرفة وبمعدل ترسيب (360Å/s).

2- القياسات البصرية

اجريت القياسات البصرية التي تشمل الامتصاصية (A) (Absorbance) والنفاذية (T) (Transmittance) لاغشية (CdS) غير المشععة والمشععة بجرعات مختلفة من اشعة كاما ولمدى الاطوال الموجية (300-900)nm بوساطة جهاز (UV/VIS Double Beam Spectrophotometer pu-8800) ذي الحزمتين المجهز من قبل شركة (Philips).

3- التشعيع

تم تشعيع العينات باستخدام اشعة كاما المنبعثة من مصدر Co^{60} باستخدام جهاز التشعيع (Gamma Chamber 900) المتوفر في قسم الفيزياء-كلية العلوم- جامعة بغداد. تم تشعيع العينات في الهواء عند درجة حرارة الغرفة والضغط الجوي الاعتيادي.

النتائج والمناقشة

1. طيف الامتصاصية والنفاذية Absorbance and Transmittance

تم قياس اطياف الامتصاصية والنفاذية لاغشية (CdS) كدالة لطاقة الفوتون قبل وبعد التشعيع بجرعات اشعاعية مختلفة من اشعة كاما والشكلان (2,1) يوضحان اطياف الامتصاصية والنفاذية كدوال لطاقة الفوتون للنماذج المحضرة ونلاحظ من هذين الشكلين ان الامتصاصية تزداد والنفاذية تقل مع زيادة الجرعات الاشعاعية.

2. معامل الامتصاص Absorption coefficient

تم حساب قيمة معامل الامتصاص البصري وفق المعادلة الاتية(7)

$$\alpha = 2.303(A/t) \quad \text{..... [1]}$$

حيث ان: α: معامل الامتصاص (cm^{-1})، t: سمك الغشاء المحضر (μm) ، A : الامتصاصية

تم قياس سمك الغشاء بالطريقة الوزنية وطريقة التداخل الضوئي التي تعد من افضل الطرق الدقيقة في قياس سمك الاغشية (8)، يوضح الشكل (3) تغير معامل الامتصاص مع طاقة الفوتون لاغشية (CdS) كدالة للجرع الاشعاعية ونلاحظ من الشكل ان معامل الامتصاص يزداد تدريجياً بزيادة طاقة الفوتون.

من الشكل نفسه نلاحظ ان هناك منطقتين توضحان علاقة معامل الامتصاص مع طاقة الفوتون:

- منطقة الطاقات الفوتونية الواطئة ($h\nu<2.25eV$) وفيها يتغير معامل الامتصاص تغيرا طفيفا مع زيادة طاقة الفوتون حيث نلاحظ ان معامل الامتصاص يكون ثابت تقريبا عند تلك المنطقة.
- منطقة الطاقات الفوتونية العالية ($h\nu>2.25eV$) والتي يزداد فيها معامل الامتصاص زيادة سريعة مع زيادة طاقة الفوتون. ان هذه الزيادة السريعة والمفاجئة تساعد في تعيين حافة الامتصاص الاساسية والتي تحدث نتيجة انتقال الالكترونات من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل.

لقد اظهرت النتائج التي حصلنا عليها ان كبريتيد الكادميوم يمتلك معامل امتصاص عالي يصل مداه إلى ($10^{4}cm^{-1}$) عند الطاقات الفوتونية العالية وهذا يرجح احتمالية حصول الانتقالات الا لكترونية المباشرة وبصورة كبيرة ولكن هذا لا يمنع من حصول الانتقالات غير المباشرة، ان التشعيع لم يغير شكل طبيعة منحني معامل الامتصاص كدالة لطاقة الفوتون قبل التشعيع ويلاحظ ان معامل الامتصاص يزداد بزيادة الجرعات الا شعاعية الممتصة خاصة عند الطاقات العالية ، ويعزى سبب هذه الزيادة في معامل الامتصاص الى ان التشعيع تسبب في توليد مستويات مانحة داخل فجوة الطاقة الممنوعة وقريبة

من حزمة التوصيل وهذا ما سبب زيادة احتمالية امتصاص الفوتونات ذات الطاقات الواطئة .

يلاحظ ان معامل الامتصاص يتغير مع تغير طاقة الفوتون بصورة بطيئة عند الطاقات الواطئة ثم يزداد التغير بسرعة بالقرب من حافة الامتصاص وكذلك فان التشعيع ادى الى تغير لون اغشية (CdS) الصفراء الشفافة الى اللون الاصفر القاتم مع زيادة الجرعات الاشعاعية الممتصة لذا نرى ان النفاذية تقل عند زيادة نسبة التشعيع.

3. فجوة الطاقة البصرية Optical Band Gap

تم حساب فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح باستخدام العلاقة الاتية:

$$(\alpha h\nu)^2=\alpha^2(h\nu-E_g) \quad \text{..... [2]}$$

وذلك برسم العلاقة البيانية بين $(\alpha h\upsilon)^2$ و طاقة الفوتون ($h\upsilon$)، بمد الجزء الخطي من المنحني ليقطع محور طاقة الفوتون عند النقطة $(\alpha h\nu)^2=0$ لنحصل على قيمة فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح لاغشية (CdS). يوضح الشكل (4) قيم فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح لاغشية (CdS) قبل وبعد التشعيع.يلاحظ ان قيم فجوة الطاقة تقل بعد التشعيع عما هي عليه قبل التشعيع بزيادة الجرعات الاشعاعية الممتصة والجدول (1) يبين قيم فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح للاغشية . ويمكن تفسير النقصان في قيم فجوة الطاقة الى ان التشعيع قد ادى الى خلق مستويات مانحة داخل فجوة الطاقة بالقرب من حزمة التوصيل وان وجود هذه المستويات المانحة يزيد من احتمالية امتصاص الفوتونات ذات الاطوال الموجية الطويلة مما يؤدي الى تقليل قيمة فجوة الطاقة.

اما فجوة الطاقة للانتقال المباشر الممنوع فقد تم حسابها بالاعتماد على العلاقة الاتية:

$$(\alpha h\nu)^{2/3}=\alpha^{2/3}(h\nu-E_g) \quad \text{..... [3]}$$

ترسم العلاقة بين $(\alpha h\upsilon)^{2/3}$ و طاقة الفوتون ($h\upsilon$) وبمد الجزء الخطي المستقيم من المنحني ليقطع محور طاقة الفوتون عند النقطة $(\alpha h\nu)^{2/3}=0$ نحصل على قيمة فجوة الطاقة للانتقال المباشر الممنوع لاغشية (CdS) قبل التشعيع وبعده. والشكل (5) يمثل فجوة الطاقة للانتقال المباشر الممنوع لاغشية (CdS) قبل وبعد التسعيع وان قيمة معامل الامتصاص عند هذه الطاقة يصل مداها الى ($10^3 cm^{-1}$) مما يؤكد ان قيمة الطاقة المحسوبة هي فجوة الطاقة للانتقال المباشر الممنوع، ويلاحظ من الشكل ان قيم فجوة الطاقة بعد التشعيع تقل بزيادة الجرعات الاشعاعية الممتصة والجدول (2) يبين قيم فجوة الطاقة للانتقال المباشر الممنوع للاغشية قبل التشعيع وبعده ولعدد من الجرعات الاشعاعية الممتصة المختلفة.

جدول (1)

قيم فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح.

فجوة الطاقة (eV)	الجرعة (Mrad)
2.4	0
2.4	1
2.25	5
2.25	10

جدول (2)

قيم فجوة الطاقة للانتقال المباشر الممنوع.

فجوة الطاقة (eV)	الجرعة (Mrad)
2.16	0
2.08	1
2.07	5
2.06	10

يوضح الشكل تغيراً خطياً عند مدى الطاقات العالية ولم يظهر هذا السلوك مع المنحنيات الاخرى مما يشير إلى حصول الانتقال الالكتروني المباشر المسموح في الاغشية المحضرة، هناك تفاوت بين القيم المستحصلة لفجوة الطاقة وتأثرها بآلية تكوين الاغشية والظروف المصاحبة لعملية التحضير.

تعتمد قيمة فجوة الطاقة ونوعها على التركيب البلوري للمادة وكيفية توزيع الذرات في الشبيكة البلورية وتركيب المستويات الطاقية [9]، وهذا يعني ان أي تغير في الخصائص التركيبية والمعلمات الاخرى يكون سبباً في احداث تغيراً في قيمة فجوة الطاقة وفي نوع الانتقالات التي تحصل في الاغشية.

4.عرض الذيول للمستويات الموضعية

ان السمة الاساسية لحافة الامتصاص البصري لاشباه الموصلات هي الزيادةالاسية لمعامل الامتصاص مع طاقة

الفوتون، ان هذا الجزء من الطيف يعرف بذيل اورباخ (Urbach tail) ويعبر عن معامل الامتصاص في هذا الجزء وفقا لعلاقة اورباخ بالعلاقة التالية:

$$\alpha = \alpha_o \exp(h\nu/E_t) \quad \text{.....} \quad [4]$$

تم حساب عرض الذيل الممثل للمستويات الموضعية (E_t) لمادة (CdS) من خلال رسم العلاقة بين ($\ln\alpha$) وطاقة الفوتون ومن ميل الجزء المستقيم للمنحني تم حساب قيمة (E_t) حيث تساوي مقلوب الميل ويوضح الشكل (6) عرض الذيل الممثل للمستويات الموضعية لاغشية (CdS) غير المشععة والمشععة بجرع مختلفة من اشعة كاما. كما موضحة بالجدول (3)، نلاحظ من الجدول ازدياد قيمة عرض الذيل بزيادة الجرعة الاشعاعية وذلك لان التشعيع ادى الى زيادة العشوائية في الغشاء حيث ان الطاقة سببت اهتزاز الذرات وكذلك احتمالية حدوث خلل في تركيب هذه المادة.

جدول (3)

قيم عرض الذيل الممثل للمستويات الموضعية لاغشية CdS لجرع مختلفة.

الجرعة (Mrad)	E_t (eV)
0	0.24
1	0.243
5	0.246
10	0.247

5. الانعكاسية Reflectance

الانعكاسية هي النسبة بين الشعاع المنعكس والشعاع الساقط عند الحد الفاصل بين وسطين، تم حساب الانعكاسية من طيفي الامتصاصية والنفاذية وبموجب قانون حفظ الطاقة (8):

$$R = 1 - A - T \quad \text{.....} \quad [5]$$

يوضح الشكل (7) تغير طيف الانعكاسية كدالة لطاقة الفوتون لاغشية (CdS) قبل وبعد التشعيع بجرع اشعاعية مختلفة من اشعة كاما ويلاحظ تزايد الانعكاسية تدريجياً مع تزايد طاقة الفوتون بعدها يحصل هبوط تدريجي في الانعكاسية مع زيادة طاقة الفوتون ,ويلاحظ من الشكل ان التشعيع لم يظهر تأثير ا ملحوظ ا على طبيعة منحني الانعكاسية عما كانت عليه قبل التشعيع لكنه سبب نقصان في قيم الانعكاسية خاصة في منطقة الطاقات الواطئة بزيادة الجرعات الممتصة، ان سبب هذا التغير هو الاختلاف في امتصاصية الاغشية فضلاً عن التركيب البلوري للاغشية.

6- معامل الخمود Extinction Coefficient

يمثل معامل الخمود كمية الطاقة الممتصة في الغشاء الرقيق او الخمود الحاصل في الموجة الكهرومغناطيسية داخل المادة ويمثل بالجزء الخيالي من معامل الانكسار بموجب العلاقة

$$n = c/v = n - ik \quad \text{.....} \quad [6]$$

تم حساب معامل الخمود اعتماداً على معامل الامتصاص وفقاً للعلاقة (9):

$$k = \left(\frac{\alpha\lambda}{4\pi}\right) \quad \text{.....} \quad [7]$$

حيث ان:

k: معامل الخمود

λ: الطول الموجي.

يبين الشكل (8) تغير معامل الخمود كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (CdS) قبل التشعيع وبعده ولجرعات اشعاعية مختلفة، ويلاحظ ان معامل الخمود يزداد تدريجياً بتزايد طاقة الفوتون ثم يتناقص تدريجياً يعقبها زيادة سريعة جداً عند الطاقات الفوتونية المقابلة لحافة الامتصاص ، وهذه الزيادة قد تكون ناتجة عن الزيادة السريعة لمعامل الامتصاص عند هذه الطاقات. يلاحظ ايضا ان معامل الخمود يسلك سلوكاً مشابهاً لمعامل الامتصاص لارتباط معامل الخمود مع معامل الامتصاص بموجب العلاقة [7] حيث يزداد معامل الخمود بزيادة معامل الامتصاص. ان سلوك منحني معامل الخمود بعد التشعيع مشابه لسلوكه قبل التشعيع مما يستنتج ان التشعيع لم يؤثر بصورة ملموسة على منحني معامل الخمود ولكنه سبب زيادة في قيم معامل الخمود خاصة عند الطاقات العالية.

7. معامل الانكسار Refractive Index

معامل الانكسارهو النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ الى سرعته في الوسط وتم حساب معامل الانكسارللاغشية المحضرة قبل وبعد التشعيع حسب المعادلة الاتية (10).

$$n=[(1+R/1-R)^2-(k^2+1)^{1/2}+[(1+R)/(1-R)] \quad \text{.....[8]}$$

يبين الشكل (9) تغير معامل الانكسار مع طاقة الفوتون كدالة للجرع الاشعاعية لاغشية (CdS) المحضرة. تبين النتائج ان طبيعة تغير معامل الانكسار مع طاقة الفوتون قبل التشعيع مشابهة لطبيعة تغير الانعكاسية مع طاقة الفوتون للغشاء نفسه لارتباط معامل الانكسار مع الانعكاسية بموجب المعادلة [3]. اما بالنسبة لاغشية(CdS) بعد التشعيع فنجد ان طبيعة تغير معامل الانكسارمع طاقة الفوتون لم تتأثر كثيرا بالتشعيع,لكن نلاحظ نقصان في قيم معامل الانكسار عند الطاقات الواطئة.

8. ثابت العزل الكهربائي

يعطى ثابت العزل الكهربائي المعقد للوسط بالعلاقة الاتية:

$$\varepsilon=\varepsilon_1-i\varepsilon_2 \quad \text{.....[9]}$$

حيث ان: ε_1 : الجزء الحقيقي لثابت العزل الكهربائي

ε_2: الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي.

يتم حساب ثابت العزل الكهربائي بجزئيه الحقيقي والخيالي لاغشية (CdS) من خلال العلاقتين الاتيتين:

$$\varepsilon_1=n^2-k^2 \quad \text{.....[10]}$$
$$\varepsilon_2=2nk \quad \text{.....[11]}$$

يمثل الشكل (10) تغير ثابت العزل الحقيقي كدالة لطاقة الفوتون لاغشية (CdS) قبل التشعيع وبعده . يلاحظ من الشكل ان ثابت العزل الحقيقي يتناقص تدريجيا بزيادة الجرعات الاشعاعية الممتصة بصورة طفيفة ، كما يلاحظ ايضا ان ثابت العزل الحقيقي يتصرف مثل تصرف معامل الانكسار لارتباطه مع ه بالعلاقة (10) حيث يكون تأثير معامل الخمود قليل جدا مقارنة بتاثير معامل الانكسار بالنسبة للاغشية غير المشععة، اما بالنسبة للاغشية المشععة فقد أظهر التشعيع تاثير واضح على طبيعة تغير الجزء الحقيقي لثابت العزل الكهربائي مع طاقة الفوتون.

اما الشكل (11) فيمثل تغير ثابت العزل الخيالي كدالة لطاقة الفوتون لاغشية (CdS) قبل التشعيع وبعده . يلاحظ من الشكل ان طبيعة تغير منحني الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي مع طاقة الفوتون مشابه لطبيعة تغير معامل الخمود مع طاقة الفوتون.

الاستنتاجات

في ضوء الدراسة الحالية تم استنتاج ما يلي:

1. ان التشعيع يؤدي الى زيادة معامل الامتصاص.
2. ان التشعيع يؤدي الى تغير لون اغشية كبريتيد الكادميوم من الاصفر الشفاف الى الاصفر القاتم بزيادة الجرعات الاشعاعية الممتصة.
3. ان العلاقة بين معامل الامتصاص، معامل الانكسار، الانعكاسية، ثابت العزل الكهربائي بجزئيه الحقيقي والخيالي ومعامل الخمود مع طاقة الفوتون هي علاقة اسية، وان التشعيع لم يغير من طبيعة هذه المنحنيات المذكورة اعلاه عما كانت عليه قبل التشعيع.
4. ان التشعيع يؤدي الى تقليل فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح والممنوع.

ان التشعيع ادى الى زيادة قيم الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي عند الطاقات العالية ولكنه لم يوثر بشكل واضح على طبيعة منحني الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي كدالة طاقة الفوتون.

References

[1] K.L. Chopra, "Thin films phenomena", McGraw-Hill, (1969) NewYork.

[2] A. Ates, M.A. Yildirim, M.kundakci and M. Yildirim, "Investigation of optical and structural properties of CdS thin films, Chinese J. of Phys., 45, 2-1, (2007) 135-141.

[3] H. Heo, R. Thn, R.Lee, Y. Han and D. Kim"Solar Energy Maerials and Solar Cells", 75, (2003) 193-203.

[4] L.R. Cruz, R.R. de Avillez, de Superficies Y de Vacio9, (1999) 92-95.

[5] S.K.Al-Ani, R.A. Ismail, H.F.Al-Ta`ayIraqi J. of Appl. Phys.1,2, .(2005) 13-17.

[6]7 S.K.J. Al-Ani, R.A. Ismail, and H.F. A-Taa`y, J. Mater Sci., Mater Electron, 17, (2006) 819-824.

[7] G.G. Rusu and I. Caraman, A: Appl. Phys., Vol.70,5, (2000) 565.

[8] R.A.Smith "Semiconductors", Cambridge, University Press 2nd ed, (1990).

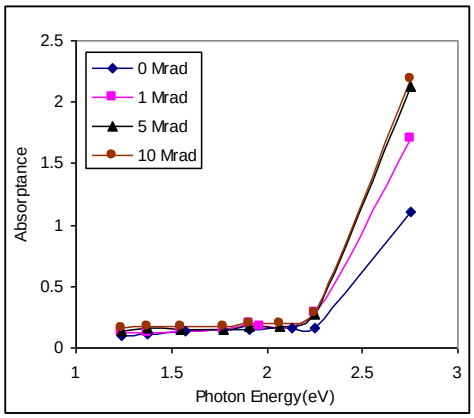
[9] J.I. Pankove, "Optical processes in semiconductors", Prentice-Hall, New Jersey, (1971).

[10] M.F. Alias, "Optoelectronic study of a Se-Ge-Al a-Si-Ge-Al(As)": H Films, Ph.D.Thesis, University of Baghdad, Department of physics (1998).

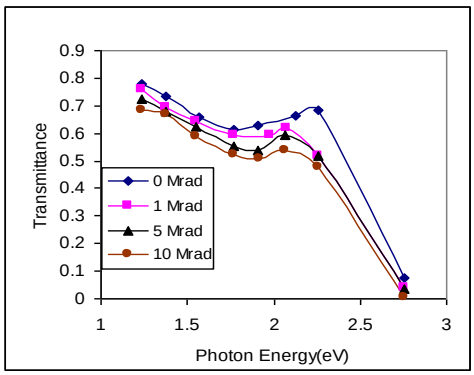
Abstract

Effect of Gamma Radiation with different doses (0,1,5,10) Mrad was studied on the optical properties for CdS films of 1μm thickness prepared by thermal evaporation at pressure (10^{-6}torr) on glass substrate.

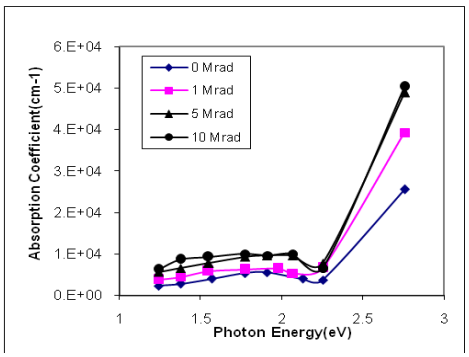
The optical properties of CdS films, absorbance, transmittance and reflectance have been studies in the wavelength range of (300-900)nm. The refractive index, extinction coefficient, absorption coefficient and dielectric constant were also studied as afunctionof photon energy and optical energy gap of allowed direct and forbidden transition. Radiation is change films colour to dark yellow and increase the value of absorption coefficient, extinction coefficient and dielectric onstant while occurs decreasing on the Reflectance, Refractive index and dielectric constant .



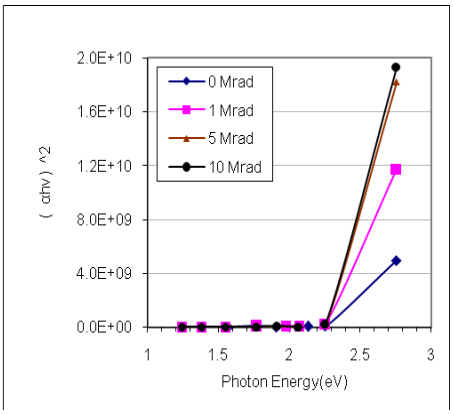
الشكل (1) طيف الامتصاصية لغشاء CdS كدالة لطاقة الفوتون.



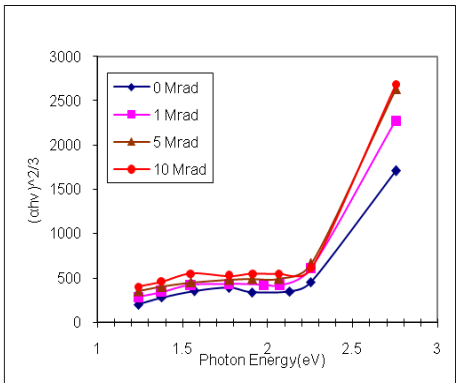
الشكل (2) طيف النفاذية لغشاء CdS كدالة لطاقة الفوتون.



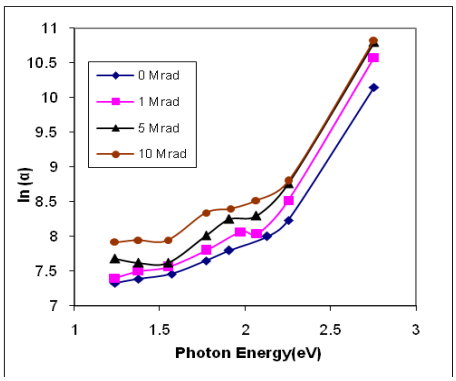
الشكل (3) تغير معامل الامتصاص البصري مع طاقة الفوتون.



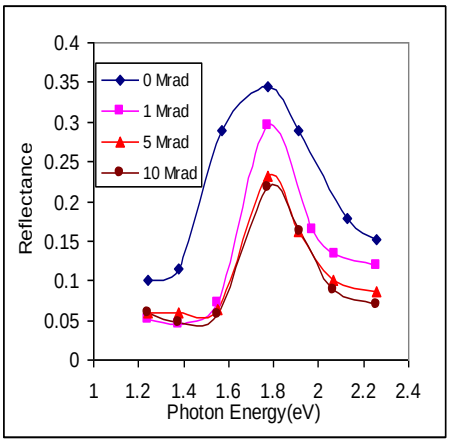
الشكل (4) $(\alpha h\upsilon)2$ مع طاقة الفوتون.



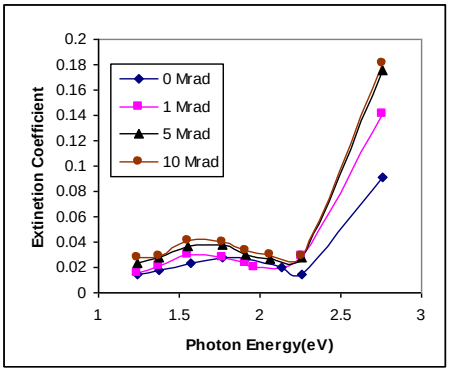
الشكل (5) $(\alpha h\upsilon)2/3$ مع طاقة الفوتون.



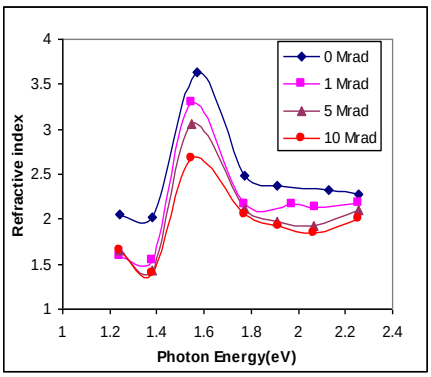
الشكل (6) Ln(α) مع طاقة الفوتون.



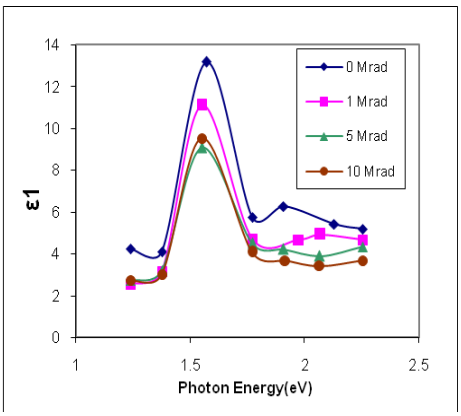
الشكل (7) طيف الانعكاسية لغشاء CdS كدالة لطاقة الفوتون.



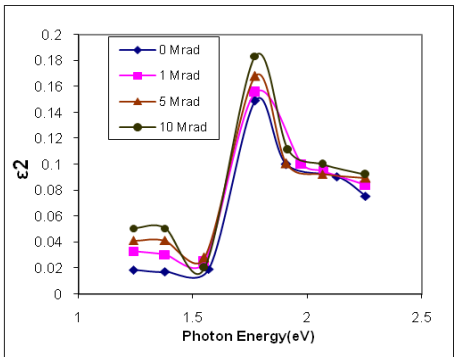
الشكل (8) تغير معامل الخمود مع طاقة الفوتون.



الشكل (9) تغير معامل الانكسار مع طاقة الفوتون.



الشكل (10) الجزء الحقيقي لثابت العزل الكهربائي كدالة لطاقة الفوتون.



الشكل (11) الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي كدالة لطاقة الفوتون.