جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة ميسان / كلية التربية الأساسية

قسم العلوم العامة

﴿تحضير ودراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري وتطبيقها في الكواشف الضوئية﴾

رسالة مقدمة الى مجلس كلية التربية الأساسية ـ جامعة ميسان

وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في العلوم العامة

(علوم عامة تخصصية)

من الطالب

أحمد محمد عبد اللطيف علي

إشراف

أ.د حيدر غازي لازم

1447 هـ

2025 م

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ ﴾

"صدق الله العلي العظيم"

سورة البقرة الآية: ٣٢

إقرار المشرف

أشهد أن إعداد هذه الرسالة الموسومة **"تحضير ودراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري وتطبيقها في الكواشف الضوئية"** والمقدمة من الطالب **(أحمد محمد عبد اللطيف علي)** في جامعة ميسان / كلية التربية الأساسية / قسم العلوم العامة، تمت تحت اشرافنا وهي جزء من متطلبات نيل شهادة الماجستير في العلوم العامة / علوم عامة تخصصية.

التوقيع:

اسم المشرف: **أ.د. حيدر غازي لازم**

التاريخ: / /٢٠٢٥

توصية رئيس قسم العلوم العامة:

بناءً على التعليمات والتوصية المقدمة من قبل **(أ.د حيدر غازي لازم)** أحيل هذه الرسالة الى لجنة المناقشة لبيان الراي فيها.

رئيس قسم العلوم العامة

التوقيع:

الاسم: **ا.د هاشم حنين كريم**

رئيس لجنة الدراسات العليا

التاريخ: / /٢٠٢٥

إقرار المقوم اللغوي

اشهد إني راجعت الرسالة الموسومة: **"تحضير ودراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري وتطبيقها في الكواشف الضوئية"** المقدمة من الطالب **(أحمد محمد عبد اللطيف علي)** من الناحية اللغوية وصَححتُ ما ورد فيها من أخطاء لغوية وتعبيرية وبذلك أصبحت مؤهلة للمناقشة قدر تعلق الامر بسلامة الأسلوب وصحة التعبير.

التوقيع:

اسم المقوم اللغوي: ا.م.د قاسم نجم عبد

العنوان: جامعة ميسان / كلية التربية الأساسية

التاريخ: / /٢٠٢٥

إقرار المقوم الاحصائي

اشهد إني راجعت الرسالة الموسومة: **"تحضير ودراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري وتطبيقها في الكواشف الضوئية"** المقدمة من الطالب **(أحمد محمد عبد اللطيف علي)** من الناحية الاحصائية وصَححتُ ما ورد فيها من إحصاءات رياضية وبذلك أصبحت مؤهلة للمناقشة قدر تعلق الامر بالناحية الاحصائية.

التوقيع:

اسم المقوم الاحصائي: ا. نزار كاظم عباس

العنوان: جامعة ميسان / كلية التربية الأساسية

التاريخ: / /٢٠٢٥

إقرار المقوم العلمي

اشهد إني راجعت الرسالة الموسومة: **"تحضير ودراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري وتطبيقها في الكواشف الضوئية"** المقدمة من الطالب **(أحمد محمد عبد اللطيف علي)** من الناحية العلمية وصححت ما ورد فيها من أخطاء علمية وبذلك أصبحت الرسالة مؤهلة للمناقشة.

التوقيع:

اسم المقوم العلمي: أ.د. زياد طارق خضير

العنوان: جامعة ديالى / كلية العلوم / قسم الفيزياء

التاريخ: / /٢٠٢٥

إقرار المقوم العلمي

اشهد إني راجعت الرسالة الموسومة: **"تحضير ودراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري وتطبيقها في الكواشف الضوئية"** المقدمة من الطالب **(أحمد محمد عبد اللطيف علي)** من الناحية العلمية وصححت ما ورد فيها من أخطاء علمية وبذلك أصبحت الرسالة مؤهلة للمناقشة.

التوقيع:

اسم المقوم العلمي: أ.م.د محمد سهام سادة

العنوان: جامعة ميسان / كلية التربية / قسم الفيزياء

التاريخ: / /٢٠٢٥

إقرار لجنة المناقشة

نشهد إننا أعضاء لجنة المناقشة قد اطلعنا على الرسالة الموسومة: **"تحضير ودراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري وتطبيقها في الكواشف الضوئية"** المقدمة من الطالب **(أحمد محمد عبد اللطيف علي)** وقد ناقشنا الطالب في محتوياتها وفيما له علاقة بها وأنها جديرة بالقبول لنيل درجة الماجستير في العلوم العامة / علوم عامة تخصصية.

رئيس لجنة المناقشة

التوقيع:

الاسم واللقب العلمي: **أ.د مضر صباح حميد**

التاريخ: / /٢٠٢٥.

عضو لجنة المناقشة

التوقيع:

الاسم واللقب العلمي: **أ.د محمد كاظم حمد**

التاريخ: / /٢٠٢٥.

عضو لجنة المناقشة

التوقيع:

الاسم واللقب العلمي: **أ.م.د عدي علي صبيح**

التاريخ: / /٢٠٢٥.

المشرف

التوقيع:

الاسم واللقب العلمي: **أ.د حيدر غازي لازم**

التاريخ: / /٢٠٢٥.

صادق مجلس الكلية على قرار اللجنة في جلسته المرقمة ( )

والمنعقدة بتاريخ: / /٢٠٢٥.

عميد كلية التربية الاساسية

التوقيع:

الاسم واللقب العلمي: **ا.د غسان كاظم جبر**

التاريخ: / /٢٠٢٥.

﴿الاهداء﴾

إلى المتفضل الأول، وصاحب النعم الجسام، المنان علينا بغير استحقاق

(اللّه سبحانه وتعالى)

إلى سيدنا ونبينا، أصل الوجود وعين الشاهد والمشهود، اب الاكوان بفاعليته، و أم الإمكان بقابليته، المثل الأعلى الإلهي، رحمة رب العالمين، حبيب اللّه،

(محمد المصطفى (صل اللّه عليه واله وسلم))

وإلى من يتحقق به حلم الأنبياء والأوصياء، المستغفر لذنوبنا، مولى الزمان، مولانا الحجة على خلقه،

(الامام المهدي المنتظر (عجل اللّه تعالى فرجه الشريف))

وإلى سيدي ومرشدي وتاج راسي ونور عيني استاذنا وبابنا الشريف.

الى الذي ذهب وحمله قلبي بالدعاء، ومشاعري بالفقد والحزن ها انا اهديك جهدي فخراً واعتزازاً

والديّ (رحمه اللّه تعالى)

الى من جعل اللّه الجنة تحت اقدامها، واحتضنني قلبها قبل يدها، وسهلت لي الشدائد بدعائها

والدتي (رحمها اللّه تعالى)

وإلى سندي في دروب الحياة، ورفيقة الرحلة بكل ما فيها

(زوجتي الحبيبة)

وإلى زينة حياتي، وسبب أملي، فلذات كبدي، ابنائي الأعزاء

(محمد، مجتبى، ملاك، منتظر)

وإلى اخوتي واخواتي وأساتذتي الكرام

والى كل صديق وجدت فيه روح الاخوة والصداقة

إليكم جميعاً اهدي هذا الجهد المتواضع

أحمد

﴿الشكر والتقدير﴾

الحمد للّه الذي ما سلكنا البدايات إلا بتيسيره، وما بلغنا النهايات إلا بتوفيقه، وما حققنا الغايات إلا بفضله، والصلاة والسلام على خير خلقه، نبي الرحمة والهدى محمد صل اللّه عليه وعلى آله الطيبين الطاهرين وصحبه الغر الميامين.

يطيب لي، بعد شكر اللّه تعالى والثناء عليه، أن أتوجه بالشكر الجزيل الى عمادة كلية التربية الأساسية / جامعة ميسان، والى رئاسة قسم العلوم العامة لما اتاحوه لي من فرصة لأكمل مسيرتي العلمية، فجزاهم اللّه خيرا.

كما وابعث تحية وفاء تعجز ابلغ عبارات الشكر والتقدير عن وصفها، الى استاذي الفاضل (ا.د حيدر غازي لازم)، لإشرافه المتميز على جميع مراحل إتمام هذا البحث، لقد كانت توجيهاته العلمية السديدة ومقترحاته القيمة نبراساً اضاء لي طريق البحث. اسال اللّه تعالى له دوام الصحة والعافية وان يحفظه خدمةً للعلم واهله.

ولا يفوتني أن اتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى جميع أساتذة الدراسات العليا في قسم العلوم العامة وعلى وجه الخصوص أستاذي (ا.م.د عدي علي صبيح الجراح) لما قدموه لي من علمٍ نافع، ودعم مستمر طيلة مسيرتي الدراسية. ولا أنسى الشكر والعرفان الى زملائي وزميلاتي في الدراسات العليا، الذين كانوا خير عونٍ وسند، وشركاء دربٍ في رحلة العلم والمعرفة، فجزاهم اللّه كل خير.

وأقدم شكري وعرفاني الجميل لرفيقة دربي وشريكة حياتي (زوجتي العزيزة) وأفراد أسرتي الكريمة لما منحوني من رعاية وتشجيع ودعم لا يتوقف خلال فترة الدراسة والبحث. ادعو اللّه عز وجل ان يمدهم بالصحة والعافية والتوفيق والسداد.

أخيراً وليس آخراً، اسأل اللّه العلي القدير ان يجزي خير الجزاء كل من ذكرتهم او غاب عني ذكرهم ولم يغب عن القلب، لكم مني خالص الشكر، ووافر التقدير.

أحمد

الخلاصة:

تم تحضير اغشية أوكسيد الزنك الرقيقة (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) بنسب تشويب حجمية مختلفة (2,4,6,8%) على قواعد من الزجاج والسيلكون المسامي، بتركيز (0.1) مولاري ودرجة حرارة (360 C^o)، ومعدل رش (7 ml/min)، بلغ سمك الاغشية المحضرة حوالي (500±10nm) وباستعمال تقنية الرش الكيميائي الحراري (CSP). درست الخصائص التركيبية، المورفولوجية، البصرية، الكهربائية، والكشفية لجميع الاغشية المحضرة باستعمال عدة تقنيات: تقنية حيود الاشعة السينية (XRD)، ومجهر القوة الذرية (AFM)، والمجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM) ومطياف الاشعة فوق البنفسجية - المرئية (UV-Visible Spectrophotometer)، وتأثير هول، وكذلك الخصائص الكشفية للأغشية المحضرة من قياس تيار– جهد، والاستجابية الطيفية، والكفاءة الكمية، والكشفية النوعية. أظهرت نتائج حيود الاشعة السينية (XRD) أن جميع الاغشية المحضرة تتميز ببنية بلورية متعددة التبلور، مع اتجاه نمو مفضل (002)، وان جميع الاغشية المحضرة ذو تركيب بلوري سداسي متراص، ولوحظ أن إضافة شائبة أوكسيد المغنيسيوم أدت الى انخفاض في شدة الاتجاه (002). كما تم حساب المسافة البينية بين المستويات البلورية (d_{hkl}) وكانت النتائج تتوافق بشكل كبير مع البيانات القياسية المعتمدة في البطاقة الدولية. تم حساب معدل الحجم الحبيبي باستخدام صيغة شيرر حيث تراوحت القيم بين (23.3nm-17.8 nm) لكافة الأغشية المحضرة. بينت نتائج مجهر القوة الذرية (AFM) زيادة في قيم معدل الخشونة وقيم مربع متوسط الخشونة (RMS) بزيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم (MgO). أكدت نتائج فحص المجهر الالكتروني الباعث للمجال (FE-SEM) أن أسطح الاغشية المحضرة تتكون من مجموعات من الجسيمات النانوية الكروية وشبه الكروية المتجانسة والكثيفة، كما ان متوسط حجم الحبيبات ازداد بزيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم مما يشير الى تأثير التشويب على نمو الحبيبات. تم التأكد من التركيب الدقيق وتحديد النسب الوزنية والذرية للعناصر المكونة للأغشية الرقيقة المحضرة بأجراء تحليل مطياف تشتت الطاقة (EDS). كشفت الفحوصات البصرية بواسطة مطياف الاشعة فوق البنفسجية- المرئية (UV-Vis) ضمن النطاق (300—900 nm) أن الاغشية المحضرة تمتلك فجوة طاقة بصرية للانتقال الالكتروني المباشر المسموح تتراوح بين (3.26 eV -3.344 eV). لوحظ ان قيم النفاذية تزداد بزيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم حيث وصلت اعلى قيمة لها (94.5%) عند نسبة التشويب (6%)، وان طيف الامتصاصية ينخفض بزيادة نسبة التشويب. تم حساب قيم الانعكاسية، ومعامل الامتصاص، ومعامل الانكسار، ومعامل الخمود، وثابت العزل الكهربائي بجزئيه الحقيقي والخيالي. ومن خلال حساب معامل الامتصاص لجميع الاغشية المحضرة، تبين ان قيمته اعلى من ($\alpha>10^4$ cm^{-1}) وهذا يدل على حدوث انتقال مباشر مسموح.

Abstract

بينت الفحوصات الكهربائية من خلال دراسة تأثير هول (Hall Effect) أن أغشية أوكسيد الزنك (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بنسب تشويب (2,4,6%) بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) لها توصيلية كهربائية من نوع السالب (n-type)، في المقابل، أظهر الغشاء المشوب بنسبة التشويب (8%) تغيراً في شحنة التوصيلية الكهربائية لتصبح من النوع الموجب (p-type). كما لوحظ بزيادة نسبة التشويب انخفض تركيز حاملات الشحنة انخفاضاً ملحوظاً وكذلك انخفاضاً في التوصيلية الكهربائية، بينما كان هناك زيادة في المقاومية الكهربائية. اما فيما يتعلق بخصائص الكشف الضوئي، فتبين ان الاشابة بأوكسيد المغنيسيوم لها تأثيراً كبيراً وملحوظاً على تحسن الخصائص الكشفية للأغشية الرقيقة، مما يشير الى إمكانية استعمال هذه الاغشية في تطبيقات أجهزة الاستشعار الضوئية والخلايا الشمسية.

المحتويات

الفقرة	المحتوى	الصفحة
	قائمة المحتويات	I
	قائمة الاشكال	V
	قائمة الجداول	VIII
	قائمة المختصرات	VIII
	قائمة الرموز	IX
الفصل الأول	**مقدمة عامة**	**23-1**
(1-1)	المقدمة	1
(2-1)	تقنيات تحضير الاغشية الرقيقة	2
(3-1)	تقنية التحلل بالرش الكيميائي الحراري	3
(4-1)	مراحل تكون الغشاء الرقيق	4
(5-1)	تأثير حجم القطرة	5
(6-1)	الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمادتي (Zn و ZnO)	7
(1-6-1)	الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمادة (Zn)	7
(2-6-1)	الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمادة (ZnO)	8
(7-1)	تطبيقات اغشية اوكسيد الزنك ZnO	9
(8-1)	الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأوكسيد المغنيسيوم (MgO)	10
(9-1)	الكواشف الضوئية	11
(10-1)	الدراسات السابقة	12
(11-1)	الهدف من البحث	23
الفصل الثاني	**الجزء النظري**	**56- 24**
(1-2)	المقدمة	24
(2-2)	التركيب البلوري للمواد الصلبة	24
(1-2-2)	المواد البلورية	24
(2-2-2)	المواد ذات التركيب العشوائي	25
(3-2)	العيوب في المواد البلورية	26
(4-2)	حزم الطاقة في المواد الصلبة	27
(5-2)	اشباه الموصلات	30
(6-2)	أنواع اشباه الموصلات	31
(1-6-2)	اشباه الموصلات الذاتية	31
(2-6-2)	اشباه الموصلات غير الذاتية	32
(7-2)	تطعيم اشباه الموصلات	32
(8-2)	طرائق تشويب اشباه الموصلات	34

(9-2)	الانتقالات الالكترونية	35
(1-9-2)	الانتقالات الالكترونية المباشرة	36
(2-9-2)	الانتقالات الالكترونية غير المباشرة	37
(10-2)	الخصائص التركيبية	38
(1-10-2)	حيود الاشعة السينية	38
(2-10-2)	قانون براك	39
(3-10-2)	المعاملات التركيبية	40
(1-3-10-2)	ثوابت الشبيكة	40
(2-3-10-2)	الحجم الحبيبي	41
(3-3-10-2)	كثافة الانخلاعات وعدد البلورات	41
(11-2)	خصائص طوبوغرافية السطح	41
(1-11-2)	مجهر القوى الذرية (AFM)	41
(2-11-2)	المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM)	43
(12-2)	الخصائص البصرية لأشباه الموصلات	44
(1-12-2)	تفاعل الضوء مع اشباه الموصلات	45
(2-12-2)	حافة الامتصاص الأساسية	45
(1-2-12-2)	منطقة الامتصاص العالي	46
(2-2-12-2)	منطقة الامتصاص الاسي	46
(3-2-12-2)	منطقة الامتصاص الواطئ	47
(3-12-2)	النفاذية	47
(4-12-2)	الامتصاصية	48
(5-12-2)	الانعكاسية	48
(6-12-2)	فجوة الطاقة البصرية	48
(13-2)	الثوابت البصرية	49
(1-13-2)	معامل الامتصاص	49
(2-13-2)	معامل الانكسار	49
(3-13-2)	معامل الخمود	50
(4-13-2)	ثابت العزل الكهربائي	50
(14-2)	الخصائص الكهربائية	51
(1-14-2)	تأثير هول	51
(15-2)	معاملات الكاشف	53
(1-15-2)	الكفاءة الكمية	53
(2-15-2)	الاستجابة الطيفية	54
(3-15-2)	الكشفية النوعية	55
الفصل الثالث	**الجزء العملي**	**71-57**
(1-3)	المقدمة	57
(2-3)	منظومة الرش الكيميائي الحراري	58
(3-3)	تحضير الاغشية الرقيقة	60

(1-3-3)	تهيأة القواعد الزجاجية	60
(2-3-3)	تحضير المحاليل الكيميائية	61
(1-2-3-3)	تحضير محلول نترات الزنك	61
(2-2-3-3)	تحضير محلول نترات المغنيسيوم	62
(3-2-3-3)	تحضير المحلول المستخدم في ترسيب اغشية (ZnO: MgO)	62
(4-3)	العوامل المؤثرة في تحضير الاغشية الرقيقة	63
(5-3)	ترسيب الاغشية الرقيقة	64
(6-3)	قياس سمك الاغشية الرقيقة	64
(7-3)	فحص وتشخيص الاغشية المحضرة	65
(1-7-3)	القياسات التركيبية	65
(1-1-7-3)	التشخيص بتقنية حيود الاشعة السينية (XRD)	65
(2-1-7-3)	فحوصات الاغشية بالمجهر الالكتروني المساح الباعث للمجال (FE-SEM)	67
(3-1-7-3)	فحوصات الاغشية بمجهر القوة الذرية (AFM)	67
(2-7-3)	القياسات البصرية	68
(8-3)	القياسات الكهربائية	69
(1-8-3)	تأثير هول	69
(9-3)	توصيف الكاشف الضوئي	70
(1-9-3)	الخصائص الكهربائية للكاشف الضوئي	70
(1-1-9-3)	قياس تيار – جهد	71
(2-1-9-3)	الاستجابة الطيفية	71
(3-1-9-3)	الكفاءة الكمية	71
(4-1-9-3)	الكشفية النوعية	71
الفصل الرابع	**النتائج والمناقشة**	**72- 110**
(1-4)	المقدمة	72
(2-4)	الخصائص التركيبية	72
(1-2-4)	نتائج فحص حيود الاشعة السينية (XRD)	72
(2-2-4)	نتائج فحوصات مجهر القوة الذرية (AFM)	78
(3-2-4)	نتائج فحوصات المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FESEM)	81
(4-2-4)	نتائج فحص مطياف تشتت الطاقة (EDS)	84
(3-4)	نتائج القياسات البصرية	87
(1-3-4)	طيف النفاذية البصرية	87
(2-3-4)	طيف الامتصاصية البصرية	88
(3-3-4)	طيف الانعكاسية البصرية	89
(4-3-4)	معامل الامتصاص	90
(5-3-4)	فجوة الطاقة البصرية	91

(6-3-4)	معامل الانكسار	94
(7-3-4)	معامل الخمود	95
(8-3-4)	ثابت العزل الكهربائي	96
(4-4)	نتائج القياسات الكهربائية	98
(1-4-4)	تأثير هول	98
(2-4-4)	قياسات تيار - جهد	100
(1-2-4-4)	قياسات التيار – الجهد في حالة الظلام	100
(2-2-4-4)	قياسات التيار- الجهد في حالة الاضاءة	102
(5-4)	نتائج الخواص الكشفية	104
(1-5-4)	الاستجابية الطيفية	104
(2-5-4)	الكفاءة الكمية	105
(3-5-4)	الكشفية النوعية	107
(6-4)	الاستنتاجات	109
(7-4)	المشاريع المستقبلية	110
	المصادر	**126 - 111**

قائمة الاشكال

الرقم	عنوان الشكل	الصفحة
(1 - 1)	مخطط تقنيات تحضير الأغشية الرقيقة	2
(2 - 1)	مراحل تكون الغشاء الرقيق	5
(3 - 1)	حالات الترسيب اعتمادا على حجم القطرة المتكونة	6
(4 - 1)	التركيب البلوري لأغشية أوكسيد الزنك	9
(5 - 1)	التركيب البلوري لأوكسيد المغنيسيوم	10
(1 - 2)	المواد الصلبة تبعا لتركيبها	25
(2 - 2)	بعض أنواع العيوب البلورية	26
(3 - 2)	تكون حزمة الطاقة في المواد البلورية	29
(4 - 2)	مخطط يبين حزم الطاقة في المواد البلورية	29
(5 - 2)	مديات التوصيلية في بعض المواد العازلة، شبه الموصلة والموصلة	30
(6 - 2)	تشويب شبه الموصل السيلكون	33
(7 - 2)	أنواع الانتقالات الالكترونية	37
(8 - 2)	حيود الأشعة السينية (XRD)	39
(9 - 2)	المستويات البلورية وحيود براك	40
(10 - 2)	مخطط لعمل مجهر القوة الذرية	42
(11 - 2)	مخطط المجهر الإلكتروني الماسح الباعث للمجال (FE – SEM)	44
(12 - 2)	مناطق الامتصاص	47
(13 - 2)	مخطط توضيحي لظاهرة تأثير هول	53
(1 - 3)	الخطوات العملية المتبعة في الجزء العملي	57
(2 - 3)	مخطط لمنظومة الرش الكيميائي الحراري	58
(3 - 3)	مخطط توضيحي لجهاز الرش	59
(4 - 3)	صورة لجهاز (X- ray Diffraction)	66
(5 - 3)	صورة لجهاز (FESEM)	67
(6 - 3)	صورة مجهر القوة الذرية (AFM)	68
(7 - 3)	صورة (UV- Vis spectrophotometer)	69
(8 - 3)	مخطط توضيحي لدائرة قياس تأثير هول الكهربائية	70
(1 - 4)	انماط حيود الأشعة السينية لغشاء (ZnO Pure)	73
(2 - 4)	انماط حيود الأشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 2%)	73
(3 - 4)	انماط حيود الأشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 4%)	74
(4 - 4)	انماط حيود الأشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 6%)	74
(5 - 4)	انماط حيود الأشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 8%)	75
(6 - 4)	تغيير كثافة الانخلاعات مع نسبة التشويب لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO: MgO)	76
(7 - 4)	تغيير عدد البلورات مع نسبة التشويب لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO: MgO)	76

(4 - 8)	صورة مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO) غير المشوب	79
(4 - 9)	صورة مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 2%)	80
(4 - 10)	صورة مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 4%)	80
(4 - 11)	صورة مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 6%)	80
(4 - 12)	صورة مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 8%)	81
(4 – 13)	صور بعض المعلمات الطبوغرافية مع نسبة التشويب لجميع الأغشية المحضرة	81
(4 - 14)	صور المجهر الإلكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO) غير المشوب	82
(4 - 15)	صور المجهر الإلكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 2%)	82
(4 - 16)	صور المجهر الإلكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 4%)	83
(4 - 17)	صور المجهر الإلكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 6%)	83
(4 - 18)	صور المجهر الإلكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 8%)	83
(4 - 19)	مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO) غير المشوب	84
(4 - 20)	مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 2%)	84
(4 - 21)	مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 4%)	85
(4 - 22)	مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 6%)	85
(4 - 23)	مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 8%)	85
(4 - 24)	النفاذية كدالة للطول الموجي لأغشية (ZnO: MgO)	88
(4 - 25)	طيف الامتصاصية كدالة للطول الموجي لأغشية (ZnO: MgO)	89
(4 - 26)	طيف الانعكاسية كدالة لطاقة الفوتون لأغشية (ZnO: MgO)	90
(4 - 27)	معامل الامتصاص كدالة لطاقة الفوتون لأغشية (ZnO: MgO)	91
(4 - 28)	فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لأغشية (ZnO: MgO)	92
(4 - 29)	فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 2%)	93
(4 - 30)	فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 4%)	93
(4 - 31)	فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 6%)	93

(4 - 32)	فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 8%)	94
(4 - 33)	معامل الانكسار كدالة لطاقة الفوتون لأغشية (ZnO: MgO)	95
(4 - 34)	معامل الخمود كدالة لطاقة الفوتون لأغشية (ZnO: MgO)	96
(4 - 35)	ثابت العزل الحقيقي كدالة لطاقة الفوتون لأغشية (ZnO: MgO)	97
(4 - 36)	ثابت العزل الخيالي كدالة لطاقة الفوتون لأغشية (ZnO: MgO)	97
(4 - 37)	معامل هول كدالة لنسب التشويب للأغشية المحضرة	99
(4 - 38)	تركيز حاملات الشحنة كدالة لنسب التشويب للأغشية المحضرة	100
(4 - 39)	المقاومية كدالة لنسب التشويب للأغشية المحضرة	100
(4 - 40)	تيار جهد في حالة الظلام عند الربط الامامي والعكسي لجميع الاغشية المحضرة	101
(4 - 41)	تيار جهد في حالة الاضاءة عند الجهد والعكسي لجميع الاغشية المحضرة	103
(4 - 42)	تغير الاستجابية الطيفية كدالة للطول الموجي لجميع الاغشية المحضرة	105
(4 - 43)	تغير الكفاءة الكمية كدالة للطول الموجي لجميع الاغشية المحضرة	106
(4 - 44)	تغير الكشفية النوعية كدالة للطول الموجي لجميع الاغشية المحضرة	108

قائمة الجداول

الرقم	عنوان الجدول	الصفحة
(1 – 1)	بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية للزنك (Zn)	7
(2 – 1)	الخواص الفيزيائية والكيميائية لشبه الموصل أوكسيد الزنك (ZnO)	8
(3 – 1)	الخواص الفيزيائية والكيميائية لأوكسيد المغنيسيوم	11
(1 – 3)	النسب الحجمية للمحلول المستخدم في تحضير أغشية (ZnO: MgO)	62
(2 – 3)	مواصفات جهاز حيود الأشعة السينية (XRD)	66
(1 – 4)	جزء من بطاقة (ICDD Card) والنتائج التي تم الحصول عليها من حيود الاشعة السينية لأغشية (ZnO: MgO)	77
(2 – 4)	نتائج فحص حيود الأشعة السينية	78
(3 – 4)	بعض المعلمات الطوبوغرافية لجميع الأغشية المحضرة	79
(4 – 4)	نسب العناصر الوزنية والذرية لتحليل (EDS) لجميع الأغشية المحضرة	86
(5 – 4)	قيم معامل هول والتوصيلية الكهربائية والتحركية الكهربائية وتركيز حاملات الشحنة لأغشية (ZnO: MgO)	98

قائمة المختصرات

الاختصار	المعنى
CSP	Chemical Spray Pyrolysis
XRD	X- Ray Diffraction
ICDD	International Centre for Diffraction Data
AFM	Atomic Force Microscopy
FWHM	Full Width at Half Maximum
RMS	Root Mean Square
FE-SEM	Field Emission Scanning Electron Microscopy
EDS	Energy Dispersive x-ray Spectroscopy
UV	Ultra Violet
NIR	Near Infrared
EQE	External Quantum Efficiency

قائمة الرموز

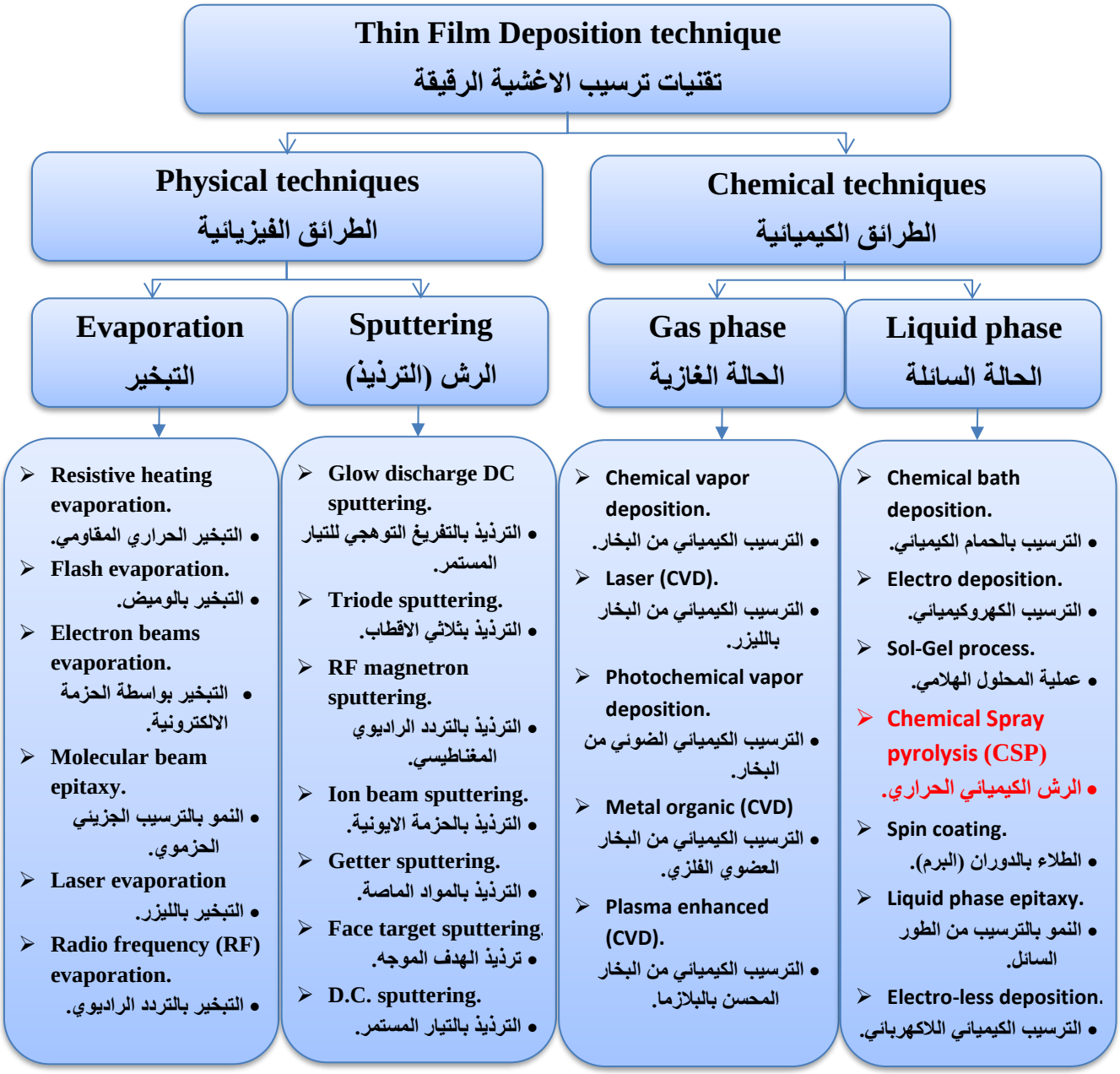
الرمز	المعنى	الوحدة
d_{hkl}	المسافة بين المستويات البلورية	Å
hkl	عدد صحيح يمثل مرتبة الحيود	-
a, c	ثوابت الشبيكة	Å
λ	الطول الموجي	nm
D	حجم البلورات	nm
Θ_B	زاوية حيود براك	Degree
V	حجم الخلية الوحدة	$Å^3$
β	عرض منحني منتصف القمة (FWHM)	Radian
Tc	عامل التشكيل	-
δ	كثافة الانخلاعات	cm^{-2}
N_o	عدد البلورات لوحدة المساحة	cm^{-2}
T	سمك الغشاء	nm
α	معامل الامتصاص	cm-1
I_o	شدة الشعاع الساقط	$eV/m^2.\ s$
I_t	شدة الشعاع النافذ	$eV/m^2.\ s$
I_A	شدة الشعاع الممتص	$eV/m^2.\ s$
T	النفاذية	-
A	الامتصاصية	-
Hυ	طاقة الفوتون	eV
H	ثابت بلانك	J. s
E_g	فجوة الطاقة	eV
r	معامل اسي يحدد نوع الانتقال	-
K	متجه الموجة	cm^{-1}
k_o	معامل الخمود	-
R	طيف الانعكاسية	-
n_o	معامل الانكسار	-
M	المولارية	mol/L
ρ	كثافة مادة الغشاء	g/cm^3
R_H	معامل هول	m^2/C
Ɛ	ثابت العزل الكهربائي	-
R_λ	الاستجابة الطيفية	A/W
D*	الكشفية النوعية	$cm.Hz^{1/2}.\ w^{-1}$
η	الكفاءة الكمية	-

(1-1) المقدمة: (Introduction)

تعد الاغشية الرقيقة (Thin Films) من الفروع المهمة في فيزياء الحالة الصلبة، وقد اسهمت بشكل كبير في دراسة وتطور اشباه الموصلات. تعرف الاغشية الرقيقة بانها طبقات من مادة معينة أو عدة طبقات من مواد مختلفة لا يتجاوز سمكها 1 مايكرومتر [1]. ان الاغشية الرقيقة لها صفات وخصائص فيزيائية وكيميائية مميزة تختلف عن خصائص المواد المكونة لها في حالتها الحجمية او الكتلية (Bulk). وغالبا ما يكون الغشاء الرقيق المحضر بواسطة تقنيات التحضير المختلفة مواد شبه موصلة، ولهذه المواد خصائص فيزيائية جيدة بشكل عام وخصائص كهربائية مميزة بشكل خاص تفوق في بعض الأحيان المواد شبه الموصلة الاخرى، مما أدى الى تطور هذا العلم واتساع تطبيقاته في مختلف المجالات العلمية والتقنية [2]. شهد مجال الأغشية الرقيقة تطوراً هائلاً على مر القرون، حيث تعود بدايات البحث في هذا المجال الى عام 1838م، إذ تم الحصول على أول غشاء رقيق صلب بطريقة التحلل الكهربائي (Electrolysis)، وفي العام (1852م) تمكن العالمان بنسون وجروف (Benson and Grove) من تحضير أغشية معدنية رقيقة باستعمال تقنية التفاعل الكيميائي (Chemical Reaction). بينما استعمل العالم فاراداي (Faraday) في العام (1857م) طريقة التبخير الحراري لتحضير غشاء رقيق وذلك بإمرار تيار كهربائي في سلك معدني وبتسخينه إلى درجة الحرارة التي يتبخر عندها ذلك السلك. وفي عام (1876م) حضر آدمز (Adams) اغشية رقيقة من السيلينيوم الملاصقة للبلاتينيوم، وفي (1887م) تم التوصل الى إمكانية تبخير المعادن باستعمال تقنية التبخير في الفراغ والتي اتبعها العالم كنت (Kenett) عام (1888م) بتحضير اغشية رقيقة للمعادن [3]. إن التطور المستمر في مجال تحضير وتطوير الاغشية الرقيقة فضلاً عن فهم خصائصها الفيزيائية والكيميائية ادى الى تنوع كبير في الابحاث التي تركز على دراسة هذه الخصائص. الاغشية الرقيقة تلعب دوراً محورياً في العديد من التطبيقات الهندسية والصناعية، مثل صناعة المرايا العاكسة وغير العاكسة وأجهزة الاستنساخ الضوئي، كما تعد الاغشية الرقيقة عنصراً اساسياً في تصنيع الدوائر الالكترونية المتكاملة (Integrated Circuits)، فضلاً عن استعمالها في خلايا الطاقة الشمسية (Solar Cells)، و الترانزستورات (Transistors)، والكواشف (Detectors)، وأجهزة الاستشعار (Sensors)[4]. تتطلب عملية تحضير اغشية رقيقة ذات درجة عالية من النقاوة والتجانس مع التحكم الدقيق في سمكها وتكوينها منظومات واجهزة دقيقة ومعقدة وتحتاج الى تكاليف باهظة، كل ذلك أدى الى تركيز الدراسات الحديثة على تطوير تقنيات تحضير أغشية رقيقة منخفضة التكلفة وبأجهزة اقل تعقيداً ومن هذه الطرائق طريقة الرش الكيميائي الحراري، والتي باستعمالها يمكن الحصول على أغشية رقيقة ذات مواصفات جيدة لدراستها في هذا البحث ويمكن الاستفادة منها في مجالات علمية مختلفة وفي تطبيقات عملية متعددة [5].

(2-1) تقنيات تحضير الاغشية الرقيقة: Thin Film Preparation Techniques

إن طرائق تحضير الاغشية الرقيقة يمكن ان تقسم على قسمين رئيسيين هما الطرائق الفيزيائية والطرائق الكيميائية. يعتمد اختيار طريقة تحضير الغشاء الرقيق على عدة عوامل منها: نوع المادة المستعملة وطبيعة ونوع التطبيق للغشاء وكلفة التحضير حيث تتجه الانظار للطريقة التي تعطي نتائج عالية الدقة والكفاءة وفي الوقت نفسه تكون بسيطة وقليلة التكلفة مقارنة بالطرائق الاخرى [6]. ادناه مخططا لأهم الطرائق الفيزيائية والكيميائية المستخدمة في تحضير الاغشية الرقيقة (1-1).



الشكل (1-1): مخطط تقنيات تحضير الاغشية الرقيقة.

(3-1) تقنية التحلل بالرش الكيميائي الحراري:

(Chemical Spray Pyrolysis (CSP))

ان التطبيقات الواسعة والمهمة في مجال الاغشية الرقيقة دفعت الباحثين الى تطوير طرائق مختلفة لأعداد الاغشية الرقيقة لذلك فان اختيار الطريقة المناسبة لتحضير الغشاء تعتمد على عدة عوامل من أهمها سمك الغشاء وتجانسه، نوع المادة المستخدمة ومجال استعماله وكلفة تحضيره، اذ تكون بعض الطرائق مناسبة لمواد معينة وغير مناسبة لمواد أخرى. إن من أكثر الطرائق شيوعاً لتحضير الاغشية الرقيقة تقنية الرش الكيميائي الحراري (CSP)، حيث تتمثل هذه الطريقة في رش محلول من مادة الغشاء على قواعد (ركائز) ساخنة من الزجاج أو السيلكون وعند درجة حرارة معينة اعتمادا على نوع المادة المستعملة، ونتيجة التفاعل الكيميائي الحراري بين ذرات المادة والقواعد الساخنة يتكون الغشاء الرقيق [7]. هناك العديد من المميزات لاستعمال هذه الطريقة منها [8]:

1- تعد طريقة اقتصادية في تحضير الأغشية الرقيقة لقلة كلفة المواد والاجهزة المستعملة فيها نسبياً.
2- تستعمل في تحضير الأغشية بمساحة أكبر نسبيا من الطرائق الأخرى.
3- تكون الأغشية المحضرة ذات جودة عالية والتصاق قوي بالقاعدة.
4- باستعمال تقنية الرش الكيميائي الحراري ممكن أن نصنع غشاء من خلط مادتين أو أكثر وبدرجات انصهار مختلفة يصعب تحضيرها بالطرائق الأخرى وبذلك يمكن عمل أغشية بمواصفات تركيبية وبصرية وكهربائية منتخبة.
5- تصلح لتحضير أكاسيد وكبريتات المواد.
6- المعالجة الحرارية للغشاء بعد التحضير غير ضرورية.

ومع ذلك فان لها عيوباً نذكر منها [9]:

1- تتطلب جهداً والكثير من الوقت لتحضير أغشية متجانسة.
2- يستعمل في التحضير محاليل كيميائية فقط، اي لا يمكن ترسيب مسحوق المادة بشكل مباشر.
3- احتمالية عدم تكون المادة المراد تحضيرها بسبب الاختلاف في التفاعل الكيميائي، مما يقتضي تكرار العمل عدة مرات حتى يتم التوصل الى تثبيت الظروف اللازمة لنجاح تحضير الغشاء الرقيق المطلوب.
4- لا تتكون الأغشية فيها بسهولة فقد تتكون جزر على القاعدة او تشوه في الغشاء، لذلك يجب توخي العناية والدقة عند إجراء عملية الترسيب للحصول على غشاء رقيق متجانس.

(4-1) مراحل تكون الغشاء الرقيق:(The Stages of Thin Film Fabrication)

تتميز البنية التركيبية للأغشية الرقيقة بدرجة تعقيد كبيرة مقارنة مع المواد الكتلية سواء أكانت أحادية التبلور أم متعددة التبلور، ويرجع ذلك إلى حجم الحبيبات الصغير جداً في الاغشية وتواجد مناطق عدم انتظام وكثافة عيوب أكبر بكثير عند مقارنتها بالمواد الأخرى. فضلاً عن ذلك، هناك عوامل تؤثر في عملية تحضير الاغشية بواسطة الرش الكيميائي الحراري، حيث تؤثر على البنية التركيبية وبداية نمو الأغشية المحضرة، ومن هذه العوامل حجم القطرات وكثافة توزيعها على وحدة المساحة وقطر فتحة جهاز الرش. هذه العوامل تلعب دوراً هاماً في تحديد تجانس البيئة التركيبية للأغشية، مما ينعكس على خواصها البصرية والكهربائية [10]. تتكون عملية ترسيب الاغشية الرقيقة من ثلاث خطوات رئيسية [12,11]:

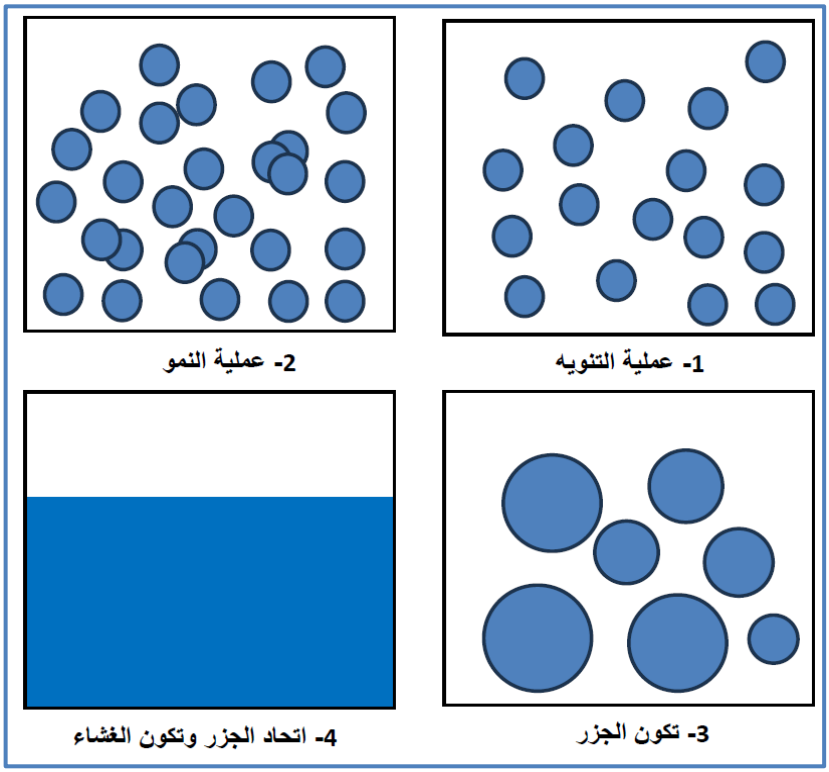
1- **تحضير الجسيمات**: يتم في هذه المرحلة تحضير الجسيمات (مثل الايونات او الذرات) التي تشكل الغشاء الرقيق.
2- **ترسيب الجسيمات**: نقل هذه الجسيمات من مصدرها إلى السطح الذي سنقوم بترسيب الغشاء عليه (الركيزة).
3- **تكوين الغشاء**: تترسب الجسيمات على سطح الركيزة، أما بشكل مباشر أو من خلال تفاعلات كيميائية أو كهروكيميائية. إن هذه المرحلة الأخيرة تتكون غالباً من أربعة مراحل فرعية.

المرحلة الأولى - تكون النويات: تبدأ عملية تكوّن الغشاء الرقيق بنشوء نقاط صغيرة جداً تسمى (النويات)، هذه النويات هي اللبنات الأساسية التي يبنى عليها الغشاء الرقيق، وتتصف بكونها صغيرة جداً وتتكون عند انتقال الذرات والأيونات من مصدرها الى سطح الركيزة (السطح الذي نريد الترسيب عليه) وتلتصق به. وتدعى هذه المرحلة بمرحلة التنويه.

المرحلة الثانية - نمو النويات: بعد تكون النويات، تبدأ هذه النويات بالنمو والتوسع. تنمو كل نواة في الأبعاد الثلاثة (الطول والعرض والارتفاع). ولكن، يكون النمو الافقي (أي الانتشار على سطح الركيزة) أسرع من النمو الرأسي، هذا النمو الافقي السريع هو سمة مميزة لنمو الاغشية الرقيقة.

المرحلة الثالثة - تكون الجزر: مع استمرار النمو للغشاء الرقيق، تبدأ النويات بالاتصال ببعضها بعضا وتشكل تجمعات أكبر تسمى الجزر، عملية تكوين هذه الجزر تتأثر بعدة عوامل مثل: معدل الترسيب، درجة حرارة الركيزة، وعدد المواقع المتاحة على سطح الركيزة.

المرحلة الرابعة - تكون البنية البلورية: عندما تلتحم الحبيبات معاً بشكل كامل، تتكون حدود ثابتة بينها تعرف بالحدود الحبيبية، إذا كانت هذه الحبيبات متجه بالاتجاه البلوري نفسه واستمرت بالالتحام، فإنها تشكل بلورة واحدة متجانسة. مع استمرار عملية الترسيب، قد تظهر مناطق ضيقة بين الحبيبات تسمى القنوات، لكن مع استمرار نمو الغشاء، تتلاشى هذه القنوات تدريجياً حتى تختفي تماماً، مما يؤدي الى تكوين غشاء متماسك ومتجانس [12].

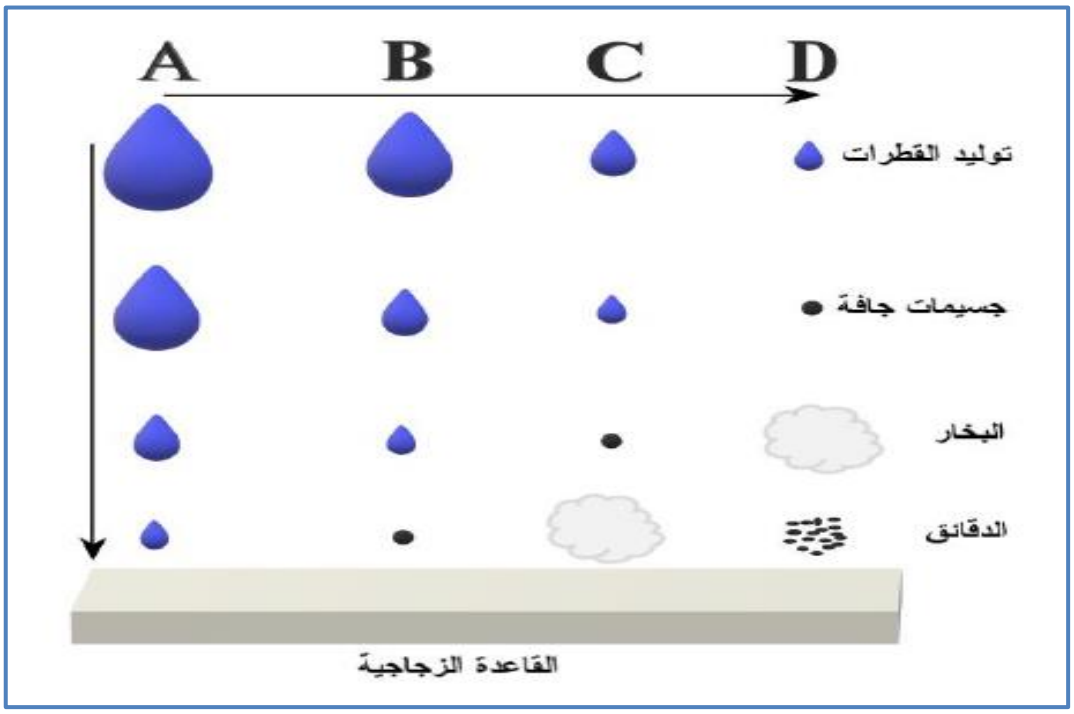


الشكل (1-2): مراحل تكون الغشاء الرقيق

(5-1) تأثير حجم القطرة: (The Effect of Droplet Size)

تعد عملية تكون الأغشية الرقيقة بتقنية الرش الكيميائي الحراري عملية معقدة تتأثر بعدة عوامل، من اهم هذه العوامل حجم قطرات المحلول التي يتم رشها من فوهة جهاز الرش (Nozzle) بسرعة محددة، تصطدم هذه القطرات بسطح الركيزة الذي سخن بدرجة حرارة مناسبة لنوع المادة المستعملة، مما يؤدي الى تبخر المحلول وتكون طبقة رقيقة من المادة على السطح. تعتمد جودة وخصائص الغشاء الناتج بشكل كبير على حجم هذه القطرات حيث تؤثر على معدل التبخير وسرعة التفاعلات الكيميائية التي تحدث على السطح. صنفت الدراسات هذه العملية الى أربع حالات رئيسية بناءً على حجم القطرات المتكونة وكما يأتي [13]:

- **الحالة الأولى (A):** عندما تكون القطرات كبيرة الحجم فان الحرارة الممتصة لا تكفي لتبخر المحلول بالكامل وبهذا يتبخر جزءً من المذيب فقط فيتكون راسب صلب على سطح الركيزة، وبسبب كبر حجم القطرات وعدم تبخر المذيب يحدث انخفاض كبير ومفاجئ في درجة حرارة القاعدة، مما يؤثر على جودة الغشاء الناتج ويجعله غير متجانس.
- **الحالة الثانية (B):** في هذه الحالة يتحلل المحلول بصورة جزئية، اذ تجف القطرات قبل وصولها الى الركيزة وبذلك تتكون مادة على شكل حبيبات تترسب على سطح الركيزة.
- **الحالة الثالثة (C):** تعتبر هذه الحالة هي المثلى لعملية الترسيب، حيث يكون حجم القطرات بين المتوسط والصغير فيتبخر معظم المذيب قبل وصول القطرات إلى سطح الركيزة مما يؤدي إلى تكون بخار مشبع بالمادة المراد ترسيبها، وعند اصطدام هذا البخار بالركيزة الساخنة يحدث تفاعل سريع يؤدي الى تكون غشاء متجانس عالي الجودة.
- **الحالة الرابعة (D):** عندما تكون القطرات صغيرة جداً يتبخر المحلول بالكامل قبل وصوله الى الركيزة، وهذا يؤدي الى تكوين بلورات صغيرة من مسحوق المادة خفيفة الالتصاق بالقاعدة وتكون بشكل راسب يعكر جودة الغشاء. الشكل (1-3) يوضح الحالات الأربعة للترسيب اعتماداً على حجم القطرة [14].



الشكل (1-3): حالات الترسيب اعتماداً على حجم القطرة المتكونة [14].

(6-1) الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمادتي (Zn و ZnO) :

(Chemical and physical properties for Zn and ZnO)

(1-6-1) الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمادة (Zn):

الزنك (Zn) عنصر كيميائي فلزي يتميز بلونه الأبيض المزرق، عدده الذري (30) ويقع في الجدول الدوري ضمن المجموعة (12)، يكون الزنك ثنائي التأكسد (Zn^{+2}) مما يعني انه يفقد الكترونين في التفاعلات الكيميائية، يتفاعل الزنك مع الاحماض المخففة مثل حامض الهيدروكلوريك، ويتفاعل مع القلويات القوية مثل هيدروكسيد الصوديوم، كما يتأكسد الزنك بسهولة في الهواء الرطب ليكون طبقة واقية من اوكسيد الزنك [15]. كما يشكل الزنك العديد من المركبات مثل كبريتيد الزنك واوكسيد الزنك. يبين الجدول (1-1) بعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية للزنك:

جدول (1-1): بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للزنك (Zn) [15]

Properties	الخواص	Value	القيمة
Molecular Weight	الوزن الجزيئي	(65.38) $kg.mol^{-1}$	
Melting Point	نقطة الانصهار	(419.5) C^o	
Boiling Point	نقطة الغليان	(907) C^o	
Density	الكثافة	(7.133) $kg.\ m^{-3}$	
Crystal Structure	التركيب البلوري	Hexagonal Close-Packed (hcp)	
Solubility in water	الذوبان في الماء	غير قابل للذوبان في الماء	
Lattice Constant	ثابت الشبيكة	a= (2.66)A^o, c= (4.95) A^o	
Type of Conductivity	نوع التوصيلية	فلز موصل جيد للكهرباء	

(2-6-1) الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمادة (ZnO):

أوكسيد الزنك النقي (ZnO) هو أحد مركبات الزنك الكيميائية، مظهره الخارجي مركب صلب ابيض اللون يصفر عند التسخين وهو مادة غير سامة لا تذوب في الماء او الكحول بل يذوب في حامض الخليك والحوامض المعدنية والامونيا وكربونات الالمنيوم والهيدروكسيدات القلوية، لذا فهو اوكسيد امفوتيري. عادة يتم تحضير اوكسيد الزنك كيميائياً من أملاح الزنك وكذلك من حرق عنصر الزنك في الهواء او بواسطة التهشيم الحراري لكربوناته أو نتراته. اوكسيد الزنك مادة نافذة شفافة في المنطقة المرئية وتمتد لغاية المنطقة تحت الحمراء القريبة وانعكاسيته في المنطقة تحت الحمراء، اذ إن معامل امتصاصه في الطيف المرئي بحدود (5×10^{3} cm^{-1}). فيما يخص التوصيلية الكهربائية لأوكسيد الزنك فأنه مادة شبه موصلة تمتلك توصيلية كهربائية قيمتها (22.65 S/cm^{-1}) من النوع السالب (n-type) وان له فجوة طاقة بصرية واسعة (Eg>3.3ev) تقريباً وتكون انتقالاته الالكترونية مباشرة [17,18]. يبين الجدول (1-2) بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لاوكسيد الزنك [19].

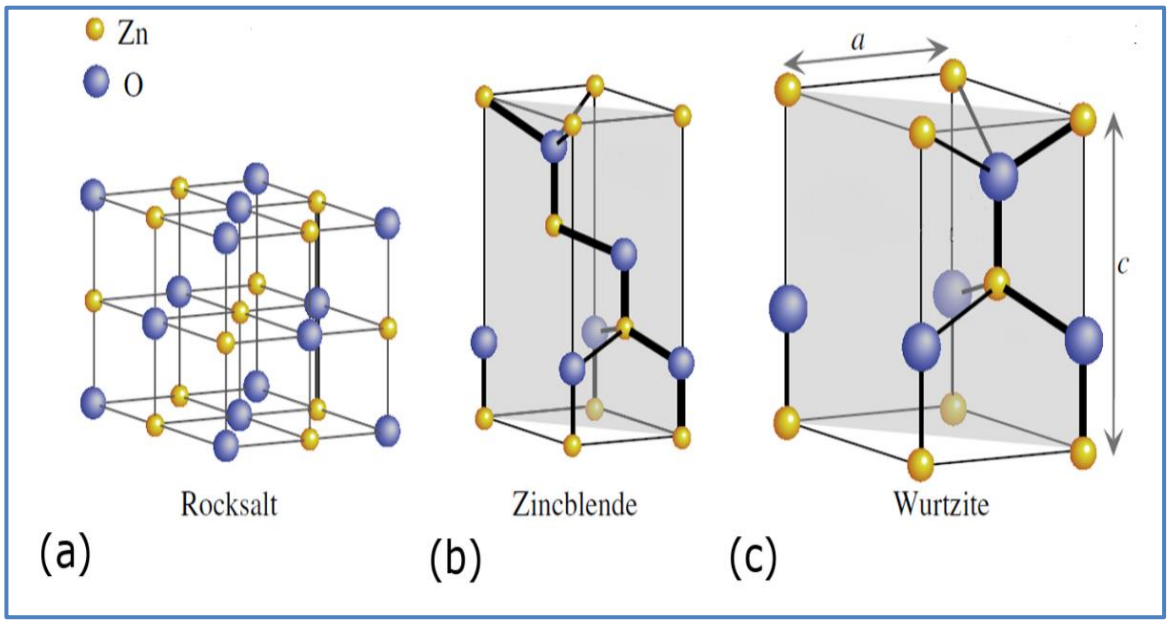
جدول (1-2) : بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لشبه الموصل اوكسيد الزنك (ZnO)

Properties	الخواص	Value القيمة
Molecular Weight	الوزن الجزيئي	(81.38) $g.mol^{-1}$
Melting Point	نقطة الانصهار	(1975) Co
Boiling Point	نقطة الغليان	(2360) Co
Density	الكثافة	(5.606) $g.cm^{-3}$
Crystal Structure	التركيب البلوري	Hexagonal Wurtzite
Direct Energy Gap at (300) K	فجوة الطاقة المباشرة عند (300) كلفن	(3.4) eV
Solubility in water	الذوبان في الماء	غير قابل للذوبان
Lattice Constant	ثابت الشبيكة	a= (3.250)A°, c= (5.206) A°
Type of Conductivity	نوع التوصيلية	n-type

اما التركيب البلوري لأوكسيد الزنك فيكون عادة في ثلاث حالات، كما مبين بالشكل (1-5):

- Hexagonal wurtzite
- Cubic Zinc blende
- Cubic rock salt

إلا أن التركيب البلوري Hexagonal wurtzite هو الأكثر شيوعاً في درجة حرارة الغرفة والضغط الجوي الطبيعي.



الشكل (1-4) التركيب البلوري لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) حيث (a) Cubic rocksalt. (c). Cubic zinc blende (b) hexagonal wurtzite [20].

(7-1) تطبيقات اغشية اوكسيد الزنك ZnO:

(Application of ZnO Thin Film)

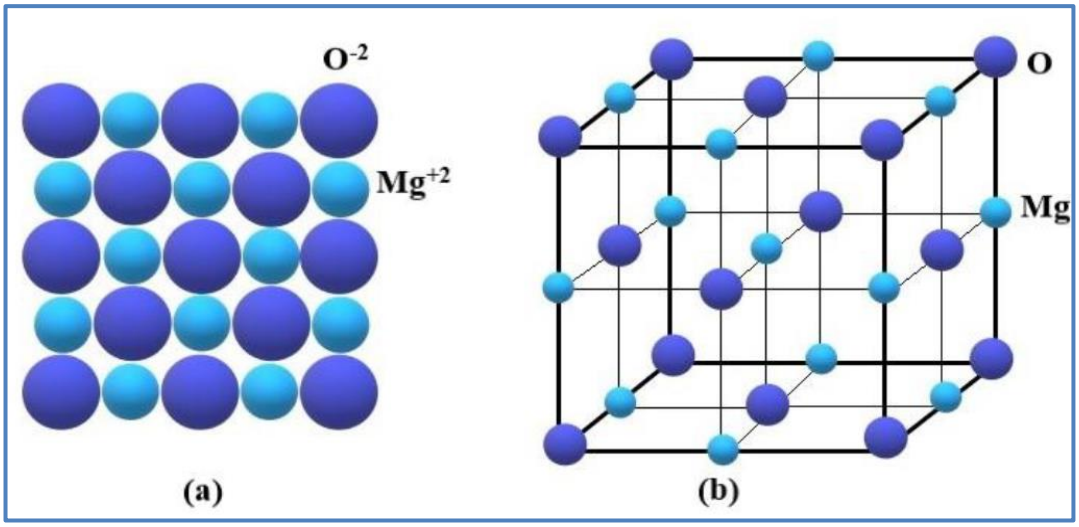
اكتسبت أغشية ZnO مؤخراً اهمية كبيرة لأسباب منها: مادة رخيصة الثمن نسبياً مقارنة بالمواد الأخرى، ويمكن انماءها على عدة أنواع من القواعد كالزجاج والكوارتز والسيلكون وفي درجات حرارية منخفضة نسبياً، كما ان لاوكسيد الزنك فجوة طاقة عريضة، وخواص بصرية ممتازة، كما ان له استقراراً كيميائياً وحرارياً، ولاستخدامها في تطبيقات عدة نذكر منها :[21,22]

1- يستعمل في الاقطاب الشفافة للصمامات الثنائية الليزرية.
2- يستعمل في الاقطاب الكهربائية الشفافة في لوحات العرض (البلورة السائلة، (LCD)، شاشات البلازما).
3- أشباه الموصلات المغناطيسية الخفيفة.
4- مجاميع الخلايا الشمسية الحرارية والكواشف الضوئية.
5- أجهزة تحسس الغازات.
6- يستعمل في صناعة ليزرات ومتحسسات الاشعة فوق البنفسجية.
7- يستعمل في التطبيقات الطبية حيث يستعمل في واقيات الشمس وفي علاج الطفح الجلدي والتهيجات الجلدية.

(1-8) الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأوكسيد المغنيسيوم (MgO):

(Chemical and physical properties for MgO)

أوكسيد المغنيسيوم (MgO) معدن ايوني مؤكسد متعدد الاستعمالات بسبب خواصه الفيزيائية والكيميائية المميزة، فضلا ان له مقاومة كبيرة لدرجات الحرارة بسبب درجة انصهاره العالية ($2852\ C^o$). اهتم الكثير من الباحثين بتحضير أوكسيد المغنيسيوم لما له من خصائص فريدة ويستعمل في تطبيقات واسعة، حيث يستعمل في مجال الطب وأجهزة الاستشعار والهندسة الالكترونية ويستعمل أيضا كمحفز في العديد من التفاعلات الكيميائية [23]. كذلك أن لأوكسيد المغنيسيوم فعالية عالية ضد البكتريا والفيروسات وذلك لامتلاكه مساحة سطحية كبيرة. أوكسيد المغنيسيوم يمتلك بنية بلورية مكعبة مستقرة Face- centered cubic (FCC)، كما موضح في الشكل (1-6):



الشكل (1-5) التركيب البلوري لأوكسيد المغنيسيوم (MgO), حيث (a) 2D و (b) 3D [24]

هذه البنية البلورية تعطي لأوكسيد المغنيسيوم خصائص فيزيائية فريدة، مثل ثابت عزل ومعامل انكسار منخفضين، والجدول (1-3) يوضح بعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية لأوكسيد المغنيسيوم.

جدول (1-3) الخصائص الكيميائية والفيزيائية لأوكسيد المغنيسيوم [25]

Properties	الخواص	Value القيمة
Molecular Weight	الوزن الجزيئي	(40.31) $kg.mol^{-1}$
Melting Point	نقطة الانصهار	(2852) C^o
Boiling Point	نقطة الغليان	(3600) C^o
Density	الكثافة	(3.58) $kg.\ m^{-3}$
Crystal Structure	التركيب البلوري	مكعب (FCC)
Direct Energy Gap at (300) K	فجوة الطاقة المباشرة عند (300) كلفن	(7.8) eV
Solubility	الذوبانية	يذوب في الاحماض والامونيا، لا يذوب في الكحول
Lattice Constant	ثابت الشبيكة	a= (4.212) A^o
Type of Conductivity	نوع التوصيلية	p-type

(1-9) الكواشف الضوئية: (Photodetectors)

تعرف الكواشف الضوئية بانها اجهزة الكترونية متخصصة تعمل على تحويل الطاقة الضوئية الساقطة عليها الى إشارات كهربائية على هيئة تيار أو جهد يمكن قياسها اعتماداً على المادة شبه الموصلة المصنوع منها الكاشف وعلى طبيعة التفاعل بين الأشعة الساقطة عليها ومادة الكاشف. تتميز جميع الكواشف الضوئية بكونها تتبع قانون التربيع العكسي، ما يعني انها تستجيب للقدرة او الشدة البصرية بدلاً من سعة المجال للإشارة الضوئية [26]. تصنف الكواشف الضوئية بشكل أساسي على صنفين رئيسيين بناءً على آليات التحويل المختلفة:

1- **الكواشف الحرارية (Thermal detectors):** تعتمد الكواشف الحرارية على مبدأ التأثير الحراري الضوئي (Photothermal effect)، حيث تتحول الطاقة الضوئية الممتصة إلى

حرارة عند امتصاص الضوء بواسطة هذه الكواشف، ترتفع درجة حرارة الجهاز، مما يؤدي بدوره الى تغيرات في معامل يعتمد على درجة الحرارة مثل التوصيلية الكهربائية. لذلك، تتناسب إشارة الإخراج للكواشف الحرارية مع كمية الطاقة الممتصة لكل وحدة زمن بواسطة الكاشف، وتكون هذه الاستجابة مستقلة عن الطول الموجي للضوء الساقط (بشرط ان كفاءة الامتصاص متماثلة عند جميع الاطوال الموجية). ومن الأمثلة الشائعة للكواشف الحرارية: الكواشف الكهروحرارية (Thermoelectric detectors)، مقاييس الاشعاع الحراري (Bolometer)، الكواشف العاملة بالهواء المضغوط (Pneumatic detectors) والكواشف البيروكهربائية (Pyroelectric detectors) [27].

2- **الكواشف الفوتونية (Photon detectors):** تعد الكواشف الفوتونية كواشف كمومية تستند الى مبدأ التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect)، حيث يتم تحويل الفوتون الواحد الى الكترون منبعث او زوج الكترون- فجوة. في هذه الحالة، يستجيب الكاشف الضوئي لعدد الفوتونات الممتصة. يمكن تصنيف هذا النوع من الكواشف على مجموعتين رئيسيتين: الاولى تعتمد على التأثير الكهروضوئي الخارجي، والأخرى تعتمد على التأثير الكهروضوئي الداخلي.

- الكواشف الضوئية المستندة الى التأثير الكهروضوئي الخارجي: هي اجهزة انبعاث ضوئي (Photo emissive devices)، مثل الثنائيات الضوئية المفرغة والانابيب المضاعفة الضوئية (Photomultiplier tubes)، حيث تنبعث الالكترونات الضوئية من سطح الكاثود الضوئي.
- الكواشف الضوئية المستندة الى التأثير الكهروضوئي الداخلي: هي اجهزة شبه موصلة، حيث يتولد زوج الكترون – فجوة داخل المادة اثناء امتصاص الفوتونات الساقطة. من أنواعها الشائعة الثنائيات الضوئية ذات الوصلة والترانزستورات الضوئية [28].

(10-1) الدراسات السابقة: (Previous Studies)

❖ قام الباحثين (T. Prasada Rao et al.) في عام (2010) بتحضير أغشية رقيقة من أوكسيد الزنك (ZnO) وذلك بترسيبها على قواعد زجاجية عند درجات حرارة مختلفة باستعمال تقنية التحلل الكيميائي الحراري ، هدفت هذه الدراسة الى فهم الخصائص التركيبية والبصرية والكهربائية لهذه الاغشية . أظهرت دراسة حيود الاشعة السينية (XRD) للعينات المحضرة نمواً عشوائياً للبلورات الدقيقة، مؤكدةً ان التركيب البلوري لأغشية ZnO هو من نوع (Wurtzite). فضلاً عن، كشفت فحوصات مطيافية الاشعة

السينية للصور الالكتروني (X-Ray photoelectron spectroscopy) عن وجود ايونات Zn^{+2} فضلاً عن الاوكسجين الممتزج كيميائياً ضمن الاغشية الرقيقة من أوكسيد الزنك. فيما يتعلق بالخصائص السطحية، اظهر الفحص المجهري للقوة الذرية (Atomic Force microscopy (AFM)) أن الأغشية المحضرة تتميز بشكل حبيبي متعدد التبلور، ولوحظ ازدياد في حجم وكثافة الحبيبات مع ارتفاع درجة حرارة القواعد المستعملة في الترسيب. اما من الناحية البصرية، فقد أظهرت جميع الاغشية المقاسة نفاذية بصرية تقارب 85% في المنطقة المرئية من الطيف الكهرومغناطيسي. فيما يخص الخصائص الكهربائية، وجد الباحثون ان الحساسية الكهربائية تتناقص في حين يزداد تركيز حاملات الشحنة وذلك بزيادة درجة حرارة القواعد [29].

- اما الباحثين (Linhua Xu et al.) في العام (2010) قاموا بتحضير اغشية رقيقة من اوكسيد الزنك ZnO باستعمال طريقة Sol-gel. تم ترسيب هذه الاغشية بسمك متفاوت وعلى قواعد زجاجية، وأجريت عليها مجموعة واسعة من الفحوصات بهدف تحليل خصائصها التركيبية والبصرية. شملت هذه الفحوصات: مجهر القوة الذرية AFM، مطياف الاشعة فوق البنفسجية- المرئية UV-Vis spectrophotometer، المستقطب البيضاوي والمطياف الضوئي الفلوري ellipsometer and fluorophotometer . بعد تحليل البيانات لجميع الاغشية المحضرة، وجد أن العينات تمتلك تركيباً بلورياً من نوع Wurtzite، مع توجيه مفضل باتجاه المحور C-axis عمودياً على سطح القاعدة. كما لاحظ الباحث أن زيادة سمك الغشاء تؤدي الى انخفاض الاضطرابات البنيوية مما يعكس تحسناً تدريجياً في الجودة البلورية. ولوحظ أيضاً انتقال في نمط البلورات من النمو الراسي (vertical growth) الى النمو الجانبي (lateral growth) وكانت نقطة الانتقال عند اسماك تتراوح بين (270nm و 360 nm). فيما يتعلق بالقياسات البصرية، أظهرت النتائج ان زيادة سمك الغشاء تؤدي الى تحسن في معامل الانكسار (refractive index) وشدة الانبعاث (emission intensity) في المنطقة فوق البنفسجية، ومع ذلك تأثرت النفاذية في المنطقة المرئية بشكل طفيف بالسمك، حيث كان متوسطها اعلى من 80% [30].
- في العام 2010 قام الباحث (M. Smirnov) بترسيب غشاء رقيق من اوكسيد الزنك ZnO على قواعد زجاجية باستعمال طريقه Spin- coating. اعتمدت هذه الطريقة على محلول مكون من اسيتات الزنك والايثانول وهيدروكسيد الالمنيوم. بعد التحضير الاولي للأغشية، تم تسخينها عند درجة حرارة C^{o} 100 لإزالة اي مواد غير

مرغوب فيها. تبع ذلك اجراء تلدين لجميع الاغشية عند درجة حرارة 500 C^o لضمان اكسدة كاملة، أظهرت قياسات حيود الاشعة السينية XRD ان اغشية ZnO متعددة التبلور وتتمتع بهيكل فورتزيت السداسي (Hexagonal wurtzite) مع اتجاه تفضيلي على طول المحور (002) وموازٍ لسطح الركيزة، أما بالنسبة للخصائص البصرية، فقد كشفت فحوصات مطياف الاشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis spectrophotometer) أن الأغشية تتمتع بنفاذية تزيد عن 75% في النطاق الطيفي (450nm الى 1300nm). عند تحليل اطياف الامتصاص، وجد الباحثون وجود انتقال مباشر بين النطاقات (band-to-band transition)، كما اظهرت الفحوصات أن فجوة الطاقة (Band gap) تتراوح بين (3.15eV و 3.25eV) ، وخلصت الدراسة الى وجود ارتباطات واضحة بين سرعة الدوران ودرجة حرارة المعالجة اللاحقة للترسيب، والتركيب البلوري والخصائص البصرية للأغشية الرقيقة المحضرة [31].

- في عام (2013) قام الباحثون (Nagarani Nagayasamy) وزملائه بتحضير اغشية رقيقة من أوكسيد الزنك ZnO بترسيبها على قواعد زجاجية باستعمال طريقة Spin coating. ركزت هذه الدراسة على استكشاف تأثير التراكيز المختلفة من الزنك Zn على التركيب الجزيئي وطوبوغرافية السطح والخواص البصرية للأغشية المحضرة، استعمل الباحثون خلات الزنك ثنائي الهيدرات (Zinc acetate dehydrate) كسلائف 2- ميثوكسي ايثانول (2 -Methoxy ethanol) كمذيب، ومونو ايثانولامين (Monoethanolamine) كمثبت. تم اجراء قياسات حيود الاشعة السينية (XRD) لتحديد التركيب البلوري واتجاه الميل للأغشية. اظهر الفحص أن أغشية اوكسيد الزنك متعددة التبلور ولها تركيب بلوري Wurtzite. إن أفضل تبلور لوحظ عندما كان تركيز 0.5 ml/L. أما بالنسبة لطوبوغرافية سطح الاغشية الرقيقة المحضرة، فقد تم دراستها بواسطة المجهر الالكتروني الماسح (SEM)، حيث كشفت النتائج أن الاغشية متجانسة ومتصلة ولا تحتوي على فجوات وتتميز بشكل مغزلي. فيما يخص الخواص البصرية، جرى دراستها بواسطة (UV-Vis spectrophotometer). لوحظ أن النفاذية تقل مع إزدياد تركيز الزنك في الاغشية الرقيقة المحضرة، أما فجوة الطاقة، فقد تناقصت قليلا مع الزيادة في تراكيز الزنك من (0.25m/L الى 0.75m/L) ثم ازدادت بشكل اكبر عندما تجاوز تركيز الزنك (0.75m/L وصولاً الى 1m/L) [32].
- الباحثين (S. Vishnoi) وآخرون في عام (2014) حضّروا أغشية رقيقة من اوكسيد الزنك ZnO باستعمال تقنية Pulls Laser deposition (PLD). تم ترسيب هذه

الاغشية على مجموعة مختلفة من الركائز، شملت: قواعد زجاجية، قواعد زجاجية مغطاة بأوكسيد القصدير والانديوم (ITO glass) وقواعد من السيليكون. خضعت جميع الأغشية المحضرة للدراسة باستعمال عدة تقنيات. تم تحليل الخصائص البصرية من خلال (UV-Vis spectrophotometer) لدراسة كل من الامتصاصية والنفاذية. تم تحديد فجوة الطاقة البصرية (Optical Band gap) من قياسات الامتصاص باستعمال علاقة تاوس (Taus relation)، فضلاً عن ذلك، تم تحديد الثوابت البصرية من قياسات النفاذية باستعمال طريقة (Manifacier's envelope method). كما تم دراسة الخصائص الهيكلية وحجم البلورات للأغشية المترسبة باستعمال حيود الاشعة السينية (XRD). ركزت هذه الدراسة على تحليل تأثير التباين بين شبائك الاغشية المحضرة مع شبائك القواعد على الخصائص الهيكلية وحجم البلورات للأغشية المترسبة [33].

- قام الباحثون (Z. Ghoranneris et al.) في عام (2014) بتحضير اغشية رقيقة من أوكسيد الزنك ZnO غير المشوبة واغشية مشوبة بالألمنيوم (ZnO: Al) على ركائز زجاجية وبدرجات حرارة مختلفة، باستعمال تقنية الترذيذ المغناطيسي بالتيار المستمر (DC Magnetron sputtering)، تميزت هذه الاغشية بخصائصها كمواد موصلة شفافة (transparent conducting Oxides (TCO)). ركزت الدراسة على تحليل تأثير درجة حرارة الركيزة على الخصائص الهيكلية، المورفولوجية، والبصرية للأغشية المحضرة. كشفت نتائج تحليل حيود الاشعة السينية (XRD) عن وجود اعتمادية قوية للخصائص البلورية للأغشية الرقيقة على درجة حرارة الركيزة المستعملة اثناء عملية التحضير. فضلاً عن ذلك، تم استخدام تقنيتي المجهر الالكتروني الماسح (SEM) ومجهر القوة الذرية (AFM) لتحديد التغيرات في النمو الهيكلي وخشونة السطح مع ازدياد درجة حرارة الركيزة. أظهرت النتائج المتعلقة بالخصائص البصرية والمستخلصة من أنماط الانتقال البصري انخفاضاً في الانتقالات البصرية بزيادة درجة حرارة الركيزة [34].
- قام الباحثون (A. Zaier et al.) في عام (2015) بدراسة تأثير التلدين على الخصائص التركيبية والكهربائية والبصرية لأغشية اوكسيد الزنك (ZnO) الرقيقة. تم تحضير هذه الاغشية باستعمال طريقة التبخير الحراري لمساحيق أوكسيد الزنك. تضمنت الدراسة تلدين الأغشية الرقيقة المحضرة في درجات حرارة مختلفة تراوحت بين ($200C^o$ و $500C^o$) وذلك لمدة ساعتين في الهواء. كشفت النتائج أن درجة حرارة التلدين تلعب دوراً مهماً في تغيير الخواص التركيبية والكهربائية لأغشية أوكسيد الزنك الرقيقة. أكد فحص حيود الاشعة السينية (XRD) أن الأغشية المحضّرة بهذه الطريقة تتمتع بتبلور

جيد وتركيب بلوري سداسي من نوع (hexagonal wurtzite). فيما يتعلق بالخواص البصرية، أظهرت النفاذية الضوئية تجاوزها لنسبة 90% عند منطقة الأطوال الموجية الضوئية. وتراوحت فجوة الطاقة البصرية بين (3.13ev) الى (3.25ev) كما تبين أن قيمة المقاومة للأغشية تغيرت بين (2.10^{-3}-4.10^{-2} Ωcm) مع درجة حرارة التلدين [35].

- أجرى (Ke Zhu) واخرون في عام (2015) دراسة حول ترسيب اغشية اوكسيد الزنك (ZnO) المشوبة بالألمنيوم (Al) والجاليوم (Ga) على قواعد زجاجية بدرجات حرارة مختلفة باستعمال تقنية الرش التردد الراديوي المغناطيسي المستمر، هدفت الدراسة الى تحليل تطور الخصائص التركيبية والمورفولوجية والكهربائية والبصرية للأغشية الرقيقة المحضرة لأغشية (AGZO) كدالة لدرجة حرارة الركيزة. اظهرت النتائج أن متوسط النفاذية البصرية لجميع الاغشية المحضّرة في نطاقي الموجات المرئية وتحت الحمراء القريبة (400nm-800nm) تجاوز82%، ولم تتغير النفاذية بشكل ملحوظ مع تغير درجة حرارة القاعدة، كما لوحظ زيادة في متوسط حجم الحبيبات من (20.6nm الى 51.4nm) بينما انخفض متوسط خشونة سطح الاغشية (RMS) من (21.1nm الى 4nm) وذلك عندما كانت درجة حرارة القاعدة تتراوح بين (450C°-150C°). وفيما يتعلق بالخصائص الكهربائية، زادت كل من كثافة حاملات الشحنة وحركية هول للأغشية الرقيقة المحضرة مع ارتفاع درجة حرارة الركيزة من (350C°-150C°). بعد ذلك، سجلت هذه القيم انخفاضاً مع الزيادة الاضافية في درجة حرارة القاعدة. وقد توصلت الدراسة الى ان اقل مقاومية كهربائية وأعلى قيم لحاملات الشحنة وحركية هول حصلوا عليها عندما كانت درجة حرارة القاعدة (350 C°) [36].
- في عام (2018) قام الباحث (A. Mahroug) وآخرون بتحضير أغشية رقيقة من اوكسيد الزنك (ZnO) سواء غير المشوبة او المشوبة بالمغنيسيوم (Mg) باستعمال تقنية Sol-gel، هدفت هذه الدراسة الى تحليل تأثير تشويب المغنيسيوم على الخصائص التركيبية والمورفولوجية والبصرية والكهربائية لهذه الاغشية. اوضحت نتائج فحص الاشعة السينية (XRD) ان جميع الأغشية المحضرة تمتلك تركيباً بلورياً سداسياً من نوع (Hexagonal wurtzite) حيث كانت اعلى قمة حيود تقع على طول المحور (002). لوحظ أن شدة هذه القمة تزداد بزيادة تركيز المغنيسيوم، كما أدى التشويب بالمغنيسيوم الى تقليل حجم البلورات حيث انخفض من (46nm الى 38nm) مع زيادة تركيز التشويب. كما اشارت دراسة مورفولوجية السطح باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) الى نمو موحد للأغشية الرقيقة، وانخفاض في حجم الحبيبات، وخشونة السطح

مع التشويب بالمغنيسيوم. وفيما يخص الخصائص البصرية، أظهرت جميع الاغشية متوسط نفاذية عالٍ تجاوز الـ 90% في نطاق الطيف المرئي. ولوحظ ايضاً ان زيادة تركيز المغنيسيوم أدت الى زيادة في فجوة الطاقة البصرية لأغشية اوكسيد الزنك الغير مشوبة. كما وتم قياس انماط رامان E_2L وE_2H لجميع الاغشية المحضرة. فضلاً عن ذلك، كشفت قياسات التألق الضوئي (Photoluminescence) عند درجة حرارة الغرفة عن قمة انبعاث الاشعة فوق البنفسجية UV-Vis وثلاث قمم انبعاث للعيوب في المجال المرئي. أدت زيادة تركيز المغنيسيوم الى زيادة في نسبة شدة انبعاث الاشعة فوق البنفسجية. واظهرت قياسات التيار الضوئي لجميع الاغشية المحضرة استجابات ضوئية متوافقة مع سلوك اشباه موصلات من نوع (n-type) [37].

- وفي عام (2018) اجرى الباحثون (Nilam B.Patil) وآخرون دراسة حول تحضير وتوصيف اغشية أوكسيد الزنك (ZnO) الرقيقة بهدف تطوير متحسساً غازياً. تم تحضير هذه الاغشية باستعمال تقنية المحلول الهلامي Sol-gel حيث تم ترسيب الاغشية على قواعد زجاجية. تمت دراسة الخصائص الهيكلية البلورية، مورفولوجية السطح، الخصائص البصرية والكهربائية للأغشية الرقيقة المحضرة وباستعمال تقنيات مختلفة مثل (UV-Vis spectrophotometer ،FTIR،HRTEM،XPS،FESEM،XRD). ركزت الدراسة بشكل خاص على أداء تحسس الغاز لغشاء أوكسيد الزنك عند درجات تشغيلية مختلفة وتعرضه لغازات متنوعة مثل أوكسيد النتروجين (NO_2، الامونيا NH_3، الميثانول CH_3OH، وكبريتيد الهيدروجين H_2S). أظهرت النتائج ان غشاء أوكسيد الزنك كان انتقائياً للغاية لغاز أوكسيد النتروجين وبلغت استجابته القصوى (12.3) عند تركيز (100 ppm) وعند درجة حرارة تشغيل تبلغ 200 C^o، كما وجد ان غشاء أوكسيد الزنك تمكن من اكتشاف تراكيز منخفضة من غاز NO_2 تصل الى (5 ppm) مسجلاً استجابة قدرها (4.1). اظهر غشاء ZnO حساسية عالية وثابتة وقابلة للتكرار فضلاً عن وقت استجابة معتدل لغاز NO_2 في نطاق تركيز (5-100ppm) [38].
- وقام الباحثون (Chien-Yie Tsay) وآخرون في عام (2019) بإجراء دراسة على تأثير التشويب بالمغنيسيوم (Mg) على التركيب البلوري والخصائص البصرية والكهربائية للأغشية الرقيقة لأشباه الموصلات الشفافة من أوكسيد الزنك (ZnO). تم تحضير هذه الاغشية باستخدام طريقة الـ Sol-gel. شملت الدراسة فحص الخصائص الكهروضوئية لأجهزة الكشف الضوئي المعتمدة على هذه الاغشية الرقيقة ($Mg_xZn_{1-x}O$). كشفت النتائج أن جميع الاغشية الرقيقة من ZnO أظهرت طوراً احادياً بتركيب بلوري من نوع

(Wurtzite)، وحققت متوسط نفاذية عالٍ نسبياً وصل الى (91%) في منطقة الطول الموجي المرئي. خلصت الدراسة إلى أن زيادة تركيز المغنيسيوم في الاغشية المحضّرة، أدى الى ارتفاع قيمة كل من فجوة الطاقة البصرية والمقاومية الكهربائية وذلك مقارنة بأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة. تم فحص قدرة الكشف الضوئي للأغشية تحت إضاءة الضوء المرئي والاشعة فوق البنفسجية من نوع UVA وUVC، تم الحصول على خصائص خطية (I-V) في أجهزة الكشف الضوئي لأغشية ZnO وتحت ظروف الإضاءة والظلام مما يشير الى اتصال اومي بين الأقطاب الذهب Au والاغشية الرقيقة لـ ZnO. فيما يتعلق بالخصائص الكهروضوئية، وجد ان اغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة اظهرت أفضل نسب للتوصيل الضوئي، فضلاً عن نسبة مئوية عالية للحساسية والاستجابية تحت اضاءة UVA. اما بالنسبة لإضاءة UVC فقد أظهرت الاغشية الرقيقة المشوبة :ZnO Mg كسباً في التوصيل الضوئي ونسبة مئوية للحساسية الضوئية اعلى من تلك الموجود في اجهزة الكشف الضوئي لأغشية ZnO غير المشوبة [39].

- في عام (2020) أجرى الباحثان (Sabrina Roguai و Abdelkader Djelloul) دراسة حول تحضير اغشية من اوكسيد الزنك (ZnO) المشوب بالنحاس (Cu). تم تحضير هذه الاغشية على قواعد زجاجية باستعمال طريقة الرش الكيميائي الحراري وذلك عند درجة حرارة $450C^{o}$ لمدة 30 دقيقة. هدفت الرسالة الى فحص تأثير التشويب بالنحاس على التركيب البلوري والخواص البصري للأغشية. أظهرت قياسات وتحليل نتيجة حيود الاشعة السينية (XRD) وجود درجة من عدم التنظيم في هيكل الغشاء، وقد اعتمد هذا على كمية التشويب بالنحاس، علاوة على ذلك، تم تأكيد فعالية عملية التطعيم بالنحاس من خلال استخدام تقنية تحليل التركيب الكيميائي بواسطة تقنية (EDS) للأغشية. فيما يخص الخصائص البصرية، لوحظ انه مع زيادة تركيز النحاس في الاغشية، انخفضت قيم النفاذية بينما ارتفعت قيم معامل الانكسار. كما شهدت فجوة الطاقة البصرية انخفاضاً مع زيادة نسبة التطعيم بالنحاس [40].
- في عام (2020) أجرى (R. Kara et al.) دراسة حول تحضير أغشية رقيقة من اوكسيد الزنك المشوبة بالمغنيسيوم. رسبت هذه الاغشية على قواعد زجاجية مطلية بمادة اوكسيد القصدير والفلور (FTO) باستعمال طريقة الترسيب الكهروكيميائي. استعمل الباحثون محاليل الكتروليتية مائية بتركيز (80 mM) من نترات الزنك مع تراكيز مختلفة من نترات المغنيسيوم. ركزت الدراسة على فحص الخصائص الالكترونية، البنية المجهرية، مورفولوجية السطح، والخواص البصرية والكهربائية للأغشية المحضرة. فضلاً

عن تأثير تركيز التشويب على هذه الخصائص. كشف تحليل نتائج (The Mott–Schottky (M–S) ان اغشية ZnO كانت من النوع n-type، وأن كثافة حاملات الشحنة ازدادت بشكل ملحوظ مع زيادة تراكيز المغنيسيوم. كما لوحظ أن زيادة تراكيز المغنيسيوم أدت الى أرتفاع مستويات طاقة فيرمي. واظهر تحليل نتائج حيود الاشعة السينية (XRD) أن جميع الاغشية المحضرة سواء كانت المشوبة أو غير المشوبة متعددة التبلور (polycrystalline) ولها بنية ذات اتجاه تفضيلي على طول المحور (002). مع زيادة تركيز المغنيسيوم انخفض ارتفاع قمة (002) بشكل ملحوظ. عند فحص الاغشية باستخدام المجهر الالكتروني الماسح (SEM) لوحظ انخفاض في حجم الحبيبات مع زيادة تركيز المغنيسيوم في المحلول. اما بالنسبة للخصائص البصرية، فقد كانت النفاذية البصرية في المنطقة المرئية من الطيف الضوئي عالية نسبياً حيث بلغت حوالي (85%). كما أظهرت الخصائص الكهربائية لأغشية أوكسيد الزنك الرقيقة تحسناً عند التشويب بالمغنيسيوم [41].

- قام الباحثون (Riffat Sagheer at al.) عام (2020) بتحضير جسيمات نانوية من ($Zn_{1-x}Mg_xO$) حيث تراوحت قيمة (x) (x= 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 1). استعمل تقنية الترسيب المشترك (Co-precipitation technique) في عملية التحضير. هدفت الدراسة إلى فحص تأثير التطعيم بعنصر المغنيسيوم على الخصائص البنيوية، وشكل السطح، والخواص البصرية والحرارية لجسيمات أوكسيد الزنك النانوية باستعمال عدة تقنيات تحليلية. أكد فحص حيود الاشعة السينية (XRD) ان الجسيمات النانوية كانت متعددة التبلور وذات بنية بلورية (hexagonal wurtzite) ولم تحتوِ على شوائب او اطوار أخرى. كما لوحظ ان حجم البلورات ازداد مع زيادة تركيز المغنيسيوم. كشف تحليل المجهر الالكتروني الماسح (SEM) عن تجمع حبيبات متعددة الأوجه مع زيادة التطعيم بالمغنيسيوم. وعند الوصول الى اعلى نسبة تشويب، تغيرت مورفولوجيا السطح تماماً مع تكوين اسلاك نانوية. في ما يخص فجوة الطاقة البصرية، أظهر التشويب بالمغنيسيوم زيادة في فجوة الطاقة مقارنة بالجسيمات النانوية لأوكسيد الزنك الغير مشوبة، كما لاحظ الباحثون انزياحاً نحو اللون الأزرق مع محتوى المغنيسيوم ($X=\leq 0.04$) تبعه انزياح نحو اللون الاحمر كلما ازداد محتوى المغنيسيوم. فضلاً عن ذلك، منح التشويب بالمغنيسيوم الجسيمات النانوية استقراراً حرارياً اعلى. خلصت الدراسة الى ان التشويب بالمغنيسيوم وتعديل فجوة الطاقة جعل من الجسيمات النانوية لأوكسيد الزنك مادة واعدة لتطبيقات التحفيز الضوئي والأجهزة الالكترونية الضوئية وأجهزة العرض [42].

❖ قامت الباحثة (Sema Kurtaran) في عام (2021) بتحضير أغشية رقيقة من أوكسيد الزنك (ZnO) المطعم بالألمنيوم (Al) بنسبة 8% باستعمال تقنية الرش الحراري بالموجات فوق الصوتية (USP) تمت عملية التحضير عند درجة حرارة قاعدة (350±5 C^o). بعد عملية التحضير خضعت الأغشية المحضرة لعملية تلدين حراري في الهواء عند درجة حرارة (400 C^o) ولأزمنة مختلفة. ركزت الدراسة على تحليل الخصائص التركيبية والسطحية والبصرية والكهربائية للأغشية المحضرة باستعمال تقنيات مختلفة شملت قياس حيود الاشعة السينية (XRD) ومطياف الاشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-Vis spectrophotometer) ومجهر القوة الذرية (AFM) وطريقة المسبار رباعي النقاط (Four-point probe method). أوضحت نتائج قياس حيود الاشعة السينية ان الاغشية أظهرت نمواً بلورياً متعدد التبلور، بتركيب بلوري من النوع (hexagonal wurtzite) مع اتجاه مفضل على طول المحور (101). كما كشف فحص سطح الاغشية باستعمال مجهر القوة الذرية عن وجود تكتلات على شكل جزر منتشرة على جميع اسطح الركائز ولوحظ ان زيادة زمن التلدين أدت الى تحسن في نعومة السطح، حيث انخفضت قيمة جذر متوسط مربع الخشونة (RMS) من (34nm الى 21nm) . على الرغم من ان قيم النفاذية البصرية للأغشية المحضرة كانت منخفضة نسبيا تتراوح من (40%-60%)، الا ان فجوة الطاقة البصرية (E_g) لجميع الأغشية المحضرة بلغت (Eg=3.3eV). اما بالنسبة للخصائص الكهربائية، فقد تم الحصول على اقل مقاومية كهربائية بقيمة ($1.39x10^1$ Ωcm) للأغشية الملدنة لمدة ثلاث ساعات، مع سمك غشاء بلغ (94nm). خلصت الدراسة إلى ان زمن التلدين يؤثر بشكل كبير على الخصائص البصرية والكهربائية والتركيبية للأغشية المحضرة [43].

❖ قام الباحثين (A. El Hamidi) وآخرون عام (2021) بترسيب أغشية رقيقة من اوكسيد الزنك (ZnO) على شرائح زجاجية باستعمال تقنية الطلاء بالدوران الهلامي (Sol-gel spin coating). تم تشويب اغشية أوكسيد الزنك بالمغنيسيوم (Mg) بنسب مختلفة بلغت (1%,2%,3%,4%,5%). هدفت الدراسة الى فحص الخصائص التركيبية، والمورفولوجية، لأغشية اوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بالمغنيسيوم. فضلاً عن تقييم مدى تأثير هذه الخصائص على أداء الخلايا الشمسية. تم اجراء الفحوصات باستعمال مجموعة متنوعة من التقنيات التحليلية. أظهرت نتائج حيود الاشعة السينية ان جميع الاغشية المحضرة تتميز بقمة حيود رئيسية باتجاه مفضل على طول المحور (002) بلغت هذه القمة اعلى شدة لها عند محتوى مغنيسيوم بنسبة (2%). يعزى هذا السلوك إلى

الاختلاف في السالبية الكهربائية بين ذرات الزنك والمغنيسيوم، فضلاً عن الاختلاف في حجم الحبيبات. كما أثر الاختلاف في السالبية الكهربائية على الخصائص البصرية للأغشية، فقد وصلت قيمة النفاذية البصرية إلى اقصاها (90%) عند نسبة تشويب (3%) من المغنيسيوم، فضلاً عن ذلك، سجلت أعلى قيمة لفجوة الطاقة البصرية في العينة التي أظهرت أكبر حجم بلوري وأعلى اتجاه مفضل وهو ما توافق مع نسبة تشويب (2%) من المغنيسيوم (Mg) [44].

- عام (2023) قام الباحثون (Ankur Rana at al.) بتحضير جسيمات اوكسيد الزنك النانوية المشوبة بالمغنيسيوم باستعمال طريقة الترسيب الكيميائي من المحلول. تم التحقق من تكوين المادة وخصائصها البنيوية البلورية بدقة من خلال تحاليل مطيافية فورييه لتحويل الاشعة تحت الحمراء (FTIR) وحيود الاشعة السينية (XRD). تم دراسة الخصائص البصرية للأغشية الرقيقة لأوكسيد الزنك المحضرة عن طريق قياس أطياف الامتصاص والنفاذية. أظهرت النتائج ان فجوة الطاقة البصرية لهذه الاغشية تزداد بزيادة تركيز المغنيسيوم المضاف. وبالنسبة للخصائص الكهربائية، لوحظ ان الموصلية الكهربائية والحركية للأغشية المشوبة بالمغنيسيوم تقل مع زيادة محتوى المغنيسيوم مقارنة بأغشية أكسيد الزنك غير المشوبة. استعملت الاغشية المحضرة كطبقة ناقلة للإلكترونات في أجهزة الكشف الضوئي المصنعة من مادة البيروفسكايت $MAPBI_3$.اظهرت هذه الاجهزة حساسية ملحوظة في النطاق (300nm الى 800nm) مع استجابة قصوى في منطقتي الأشعة فوق البنفسجية والزرقاء من الطيف المرئي. كشفت الفحوصات ان الأجهزة التي استعملت أغشية أوكسيد الزنك المشوبة بالمغنيسيوم أبدت استجابة أعلى بحوالي 15 مرة مقارنة بتلك التي استعملت اغشية اوكسيد الزنك غير المشوبة كطبقه لنقل الالكترونات. خلصت الدراسة إلى أن الاغشية الرقيقة من اوكسيد الزنك المشوبة بالمغنيسيوم توفر مستويات طاقة وواجهات محسنة للمواد الفعالة ضوئياً من البيروفسكايت [45].
- قام الباحثان (Samer H. Zyoud and Ahmad FairuzOmar) عام (2024) بتصنيع أغشية رقيقة من أوكسيد الزنك المشوب بالمغنيسيوم ($Mg_xZn_{(100-x)}O$) بتراكيز مختلفة من المغنيسيوم (x= 0.5%,1.0%,and 2.0%) تم ترسيب هذه الاغشية على قواعد زجاجية مغطاة بالفضة (Ag) لتكون بمثابة وصلات الاقطاب الكهربائية وذلك بهدف بناء كاشف ضوئي للأشعة فوق البنفسجية من نوع معدن- شبه موصل- معدن (MSM). استعمل الباحثان تقنية النمو الكيميائي بمساعدة الليزر (LACBG) (Laser-assisted chemical bath growth) لتحضير الاغشية. هدفت الدراسة الى

استكشاف الاستجابة الضوئية لهذه الاغشية لتطبيقات الكشف عن الاشعة فوق البنفسجية، وذلك باستعمال ليزر شبه موصل ذي موجة مستمرة بطول موجي (444.5nm) وقدره (1 W) مع فترة اشعاع مدتها 6 دقائق. تم تحليل الخصائص التركيبية والبصرية والكهربائية بشكل شامل، استخدم فحص حيود الأشعة السينية (XRD) والمجهر الالكتروني الماسح (SEM) لدراسة البنية البلورية ومورفولوجيا السطح للأغشية المحضرة، كشفت النتائج عن تشكل انابيب فرعية نانوية ذات تناظر سداسي ومتراصة عمودياً. اشارت اطياف الامتصاص في نطاقي الاشعة فوق البنفسجية والمرئية الى حدوث انزياح أزرق في حافة الامتصاص، وزيادة في فجوة الطاقة البصرية من (3.24eV إلى 3.67eV) مع ارتفاع تركيز المغنيسيوم المشوب. اظهرت كواشف الاشعة فوق البنفسجية خاصة تلك التي تحتوي على اغشية اوكسيد الزنك المشوبة بالمغنيسيوم بنسبه 2% استجابة محسنة وملحوظة للأشعة فوق البنفسجية. خلصت الدراسة الى ان الاغشية الرقيقة من اوكسيد الزنك المشوبة بالمغنيسيوم تمتلك امكانيات واعدة للاستخدام في تطبيقات الكشف الضوئي عالي الأداء [46].

(11-1) الهدف من البحث: (Aim of the Research)

يهدف البحث الى تحضير أغشية رقيقة من مادة أوكسيد الزنك (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بمادة أوكسيد المغنيسيوم (MgO) بنسب تشويب حجمية مختلفة. تم ترسيب الاغشية على قواعد من الزجاج والسيلكون المسامي عند درجة حرارة (360 C^o) باستعمال تقنية الرش الكيميائي الحراري ((Chemical Spray pyrolysis (CSP)، وذلك سعيا للحصول على أغشية رقيقة عالية التجانس مع التركيز على تحسين خصائصها الفيزيائية ضمن نطاقي الطيف المرئي والاشعة تحت الحمراء القريبة، حيث تعد هاتان المنطقتان الطيفيتان ذواتا أهمية بالغة نظراً لتطبيقاتهما العلمية المتعددة، لا سيما في مجال تصنيع الخلايا الشمسية والأجهزة الكهروضوئية. وكذلك دراسة تأثير اضافة شائبة أوكسيد المغنيسيوم لأغشية أوكسيد الزنك على الخصائص التركيبية، والمورفولوجية، والبصرية، والكهربائية، والاستشعارية للأغشية المحضرة، ومن ثم تحديد إمكانية استعمالها في تطبيقات الكواشف الضوئية.

(1-2) المقدمة (Introduction)

يتناول هذا الفصل المبادئ والمفاهيم النظرية الأساسية ذات الصلة بموضوع البحث، التي تشمل العلاقات الرياضية والايضاحات العلمية التي تم الاعتماد عليها لتفسير النتائج المتوصل اليها.

(2-2) التركيب البلوري للمواد الصلبة:

(Crystalline Structure of Solid Materials)

تصنف المواد الصلبة بناءً على تركيبها الذري على صنفين رئيسيين: المواد البلورية (Crystalline Materials) التي تتميز بترتيب ذري منتظم والمواد غير البلورية (Amorphous Materials) التي تتسم بتركيب عشوائي.

(1-2-2) المواد البلورية: (Crystalline Materials)

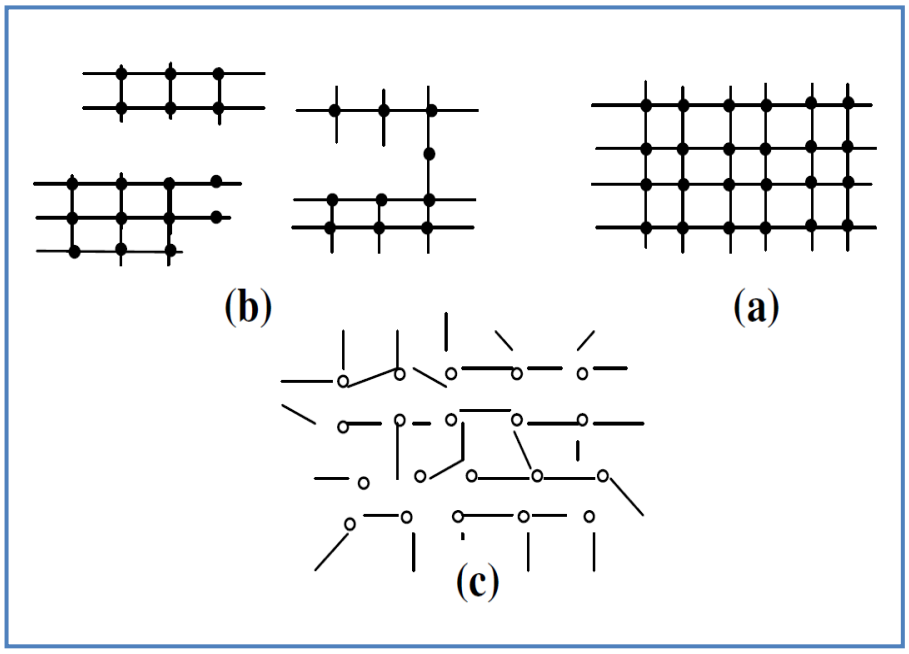
يعتمد تصنيف المواد كمادة بلورية او غير بلورية على مدى انتظام ذراتها وجزيئاتها في ترتيب دوري على المستوى المايكروسكوبي. تأكد هذا المفهوم علمياً في العام 1913م مع ظهور علم البلورات المعتمد على تقنيات الاشعة السينية وقدرتها في كشف البنية الذرية [47]. تقسم المواد البلورية على نوعين اساسيين:

1- **مواد بلورية احادية التبلور:** هي المواد التي تترتب ذراتها او جزيئاتها في الحالة المثالية بشكل هندسي دوري منتظم تعيد نفسها بصورة متكررة مكونة تشكيلة ثلاثية الابعاد مما يخلق نوعاً من التماثل، يمكن اعتبار تركيب هذه المواد ناتجاً عن تكرار وحدة الخلية (Unit cell) لتشغل جميع اجزاء المادة. هذا الترتيب المتماثل يمتد ليشمل المادة بأكملها ولهذا تمتلك هذه المواد ترتيب المدى الطويل (Long-range order) كما موضح بالشكل (2-1-a) [48].
2- **مواد بلورية متعددة التبلور:** تتكون المواد متعددة التبلور من عدد كبير جداً من البلورات المفردة الصغيرة التي تعرف باسم الحبيبات (Grains). على عكس المواد أحادية التبلور، يكون ترتيب الذرات ضمن هذه الحبيبيات عشوائياً (Random) بالنسبة لاتجاهات الحبيبات المختلفة. تفصل حدود الحبيبات (Grains boundary) بين هذه البلورات المفردة وعندها تتوقف دورية النمط الهندسي حيث لا يمتد هذا النمط ليشمل جميع أجزاء المادة كما في المواد أحادية التبلور. تمتلك كل حبيبة على حدة ترتيب المدى الطويل (Long-range order)، ولكن الحبيبات مجتمعة تمتلك ترتيب المدى القصير (Short-range order) ونتيجة للعشوائية

في اتجاهات الحبيبات، تكون خصائص المادة متعددة التبلور متماثلة الاتجاهات (Isotropic) كما يظهر في الشكل (2-1-b) [49].

(2-2-2) المواد ذات التركيب العشوائي: (Amorphous Materials)

هي المواد التي تتجمع ذراتها بشكل عشوائي غير منتظم. على عكس المواد البلورية، لا تتميز المواد غير المتبلورة بوجود تكرارية هيكلية لوحدة الخلية، حيث لا يشبه أي مقطع منها المقطع الذي يليه. تتصف هذه المواد بامتلاكها ترتيب قصير المدى (Short-range order) لذراتها. إن الطبيعة العشوائية لترتيب الذرات لا تعزى الى التكسر في الروابط الداخلية، بل هي سمة خاصة بتركيب ذرات المادة كما موضح بالشكل (2-1-c). تمثل النقطة الحرجة لحاجز الطاقة (Energy barrier) والمقاسة بالمقياس الذري الحد الفاصل بين المواد العشوائية والبلورية، فعند تسليط كمية من الطاقة كافية للتغيير في هذا الحاجز تتحول المادة من العشوائية الى البلورية [51,50]. يعود وجود هاتين الحالتين (المتبلورة وغير المتبلورة) الى كيفية تحضير المواد أو الكيفية التي تكونت بها، فعندما تتاح الفرصة للذرات لترتيب نفسها وتكون طاقتها أقل ما يمكن تنتج عنها مادة بلورية، أما إذا لم تتح الفرصة للذرات لترتيب نفسها فأنها تتجمع عشوائياً وتكون طاقتها في هذه الحالة أعلى مقارنة بحالة الذرات المتجمعة بانتظام، فينتج عنها مادة صلبة غير متبلورة (عشوائية) [52].

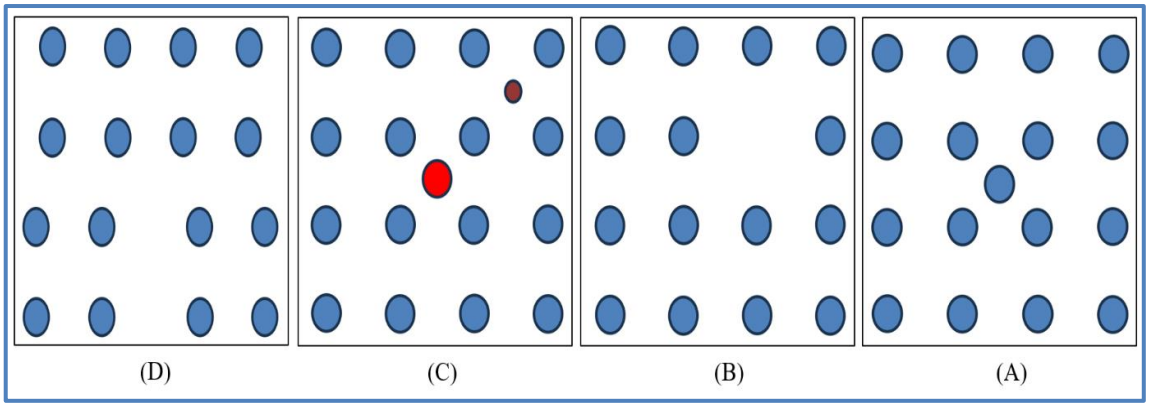


شكل (2-1) يبين المواد الصلبة تبعاً لتركيبها (a) مواد أحادية التبلور (Crystalline). (b) مواد متعددة التبلور (Polycrystalline). (c) المواد ذات التركيب العشوائي (Amorphous). [53]

(3-2) العيوب في المواد البلورية : (Defects in Crystalline Materials)

تتميز معظم المواد البلورية بتنظيم ذري دقيق ومنتظم في حالتها المثالية (الخالية من العيوب). يظهر هذا التنظيم على شكل متناسق بحيث تكون المادة وكانها مكونة من وحدات بناء متماثلة وذات أشكال هندسية منتظمة تتكرر بشكل دوري دون ظهور اي خلل في تسلسلها ويؤدي هذا الترتيب المنتظم إلى بناء بلورة كاملة من خلال الرص المتكرر للوحدة البنائية والتي تدعى بالخلية الابتدائية (Unit Cell). تحتوي هذه الوحدات على جميع المعلومات اللازمة لإعادة بناء مواقع الذرات في البلورة، وتتخذ هذه الخلايا في الغالب أشكالا هندسية تختلف عادة من مادة لأخرى إلا أنها تحافظ على التماثل نفسه في خلايا المادة نفسها، عندما تتكرر هذه الخلايا في الاتجاهات الثلاث فانها تشكل بلورة كبيرة من المادة الصلبة [54]. هناك اشكال مختلفة من العيوب البلورية يمكن تلخيصها بما يأتي [55]:

1- إشغال ذرة لموقع غير مخصص لها بين الذرات المكونة للشبيكة البلورية كما في الشكل (A-2-2).
2- فقدان ذرة لموقعها الأصلي مما يؤدي إلى نشوء فراغ داخل البنية البلورية (B-2-2).
3- وجود ذرات دخيلة أو شوائب ضمن التركيب البلوري (C-2-2).
4- احتمالية فقدان سلسلة متتابعة من الذرات نتيجة لظروف محددة، مما يستدعي إعادة ترتيب الذرات لتقليل التشوهات في الخواص البلورية (D-2-2).



شكل (2-2) بعض أنواع العيوب البلورية

في الواقع، لا توجد بلورة خالية من العيوب، لذلك اي انحراف أو اختلال في البلورة عن شبيكتها الدورية المثالية أو تركيبها المثالي يعد عيباً أو خللاً (Defect or Imperfection) في تلك البلورة، لذلك تشير كلمة عيب او خلل في البلورة إلى عدم انتظام (Irregularity) في التركيب

البلوري [56]. تتخلل البنية البلورية بعض العيوب اثناء عملية الانماء البلوري ومن المستحيل عملياً التخلص التام من هذه الشوائب أو العيوب، إلا أن تقليصها أصبح ممكناً باستعمال تقنيات متطورة وفعالة في انماء البلورات [57]. ومع ذلك، في بعض التطبيقات تكون هذه العيوب مرغوبة بشدة كما هو الحال عند تطعيم البلورات بذرات غريبة او شوائب (Impurities). يمكن ان تكون ذرات الشوائب واهبة للإلكترون (Electron Donors) أو تكون متقبلة للإلكترون (Electron Acceptors)، كلتا الحالتين تعدان ضروريتين في تغيير الخصائص الفيزيائية للمواد كالتوصيل الكهربائي والحراري والخصائص البصرية والميكانيكية، فضلاً عن تصنيع بعض الاجهزة الالكترونية الاساسية مثل الدايودات والترانزستورات وغيرها [58]. تصنف العيوب البلورية على نوعين رئيسيين هما: العيوب النقطية (Point Defects) وعيوب الشبيكة (Lattice Defects) ويمكن ايجازها بما يأتي [59]:

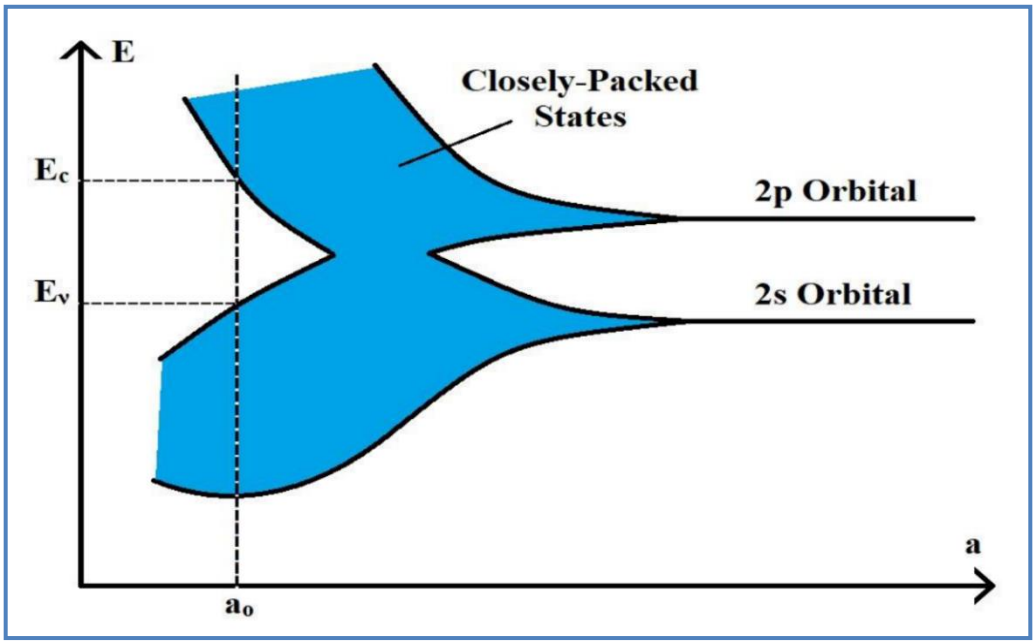
1- **العيوب النقطية:** هي العيوب التي تحدث في منطقة صغيرة جداً مقارنة بحجم البلورة، أي أنها انحراف أو اختلال في موقع ذرة واحدة او مواقع عدد قليل من الذرات المجاورة. تنشأ العيوب النقطية اما نتيجة لوجود فراغات (Vacancies) او نتيجة لذرات إضافية (Interstitials) داخل البنية البلورية [59].
2- **عيوب الشبيكة:** بينما تحدث العيوب النقطية في موقع ذرة أو موقع عدد قليل من الذرات، فأن امتد الاختلال أو العيب ليشمل مساحات كبيرة نسبياً من البلورة فيسمى عندئذ بالعيب الشبيكي. في هذه الحالة تعيد الذرات ترتيب نفسها بالأسلوب الذي يقلل تشوه البلورة إذ تزحف الذرات لسد الفجوة المتولدة حيث تبدو الذرات كأنها زحفت من مكانها الأصلي. تقسم العيوب الشبيكية ايضاً على نوعين رئيسيين من العيوب وهما العيوب الخطية والعيوب السطحية [60].

(4-2) حزم الطاقة في المواد الصلبة : (Energy Band in Solid Materials)

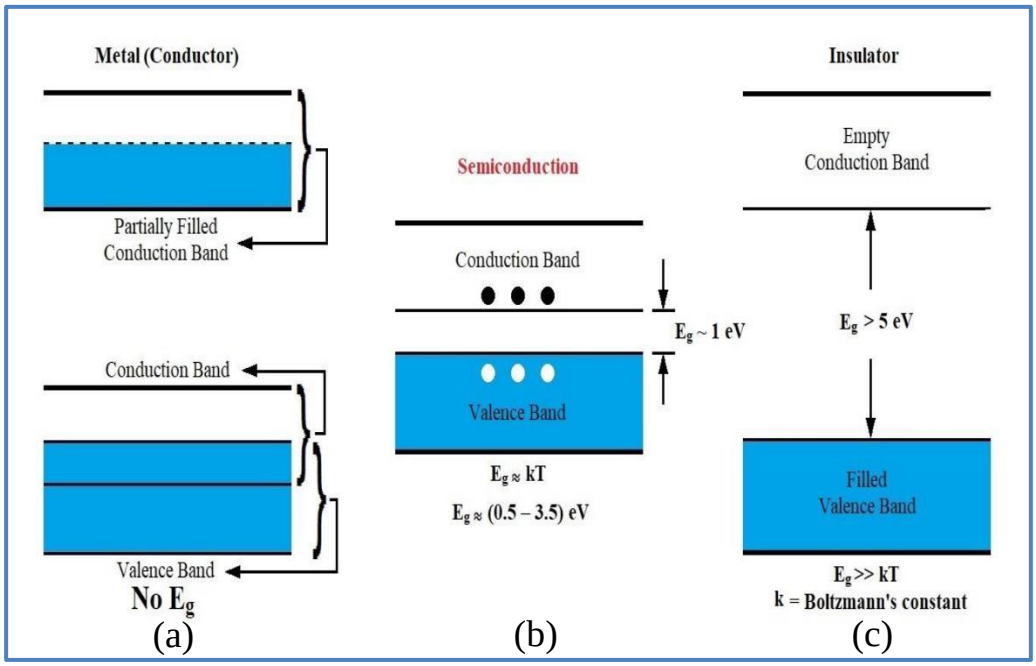
تعد حزم الطاقة (Energy Bands) من المفاهيم الأساسية التي تحدد الخصائص البصرية والكهربائية للمواد الصلبة. تتحدد هذه الخصائص بناءً على تركيب حزم الطاقة ومدى اشغالها بالإلكترونات. تترتب الالكترونات داخل المادة الصلبة ضمن حزم تعرف بحزم الطاقة (Energy Bands). في الذرة المفردة، تشغل الالكترونات مستويات طاقة محددة يحددها العدد الكمي الاساسي (n). يمكن لكل مستوى ان يستوعب الكترونين فقط ببرمين متعاكسين وفقاً لمبدأ باولي للاستبعاد [61]. عند اجتماع (N) من الذرات لتكوين بلورة واحدة فان التفاعل بين الذرات يؤدي الى عملية انشطار للمستوى الواحد الى (N) من المستويات الفرعية المنفصلة والمتقاربة فيما بينها، تشكل هذه المستويات المتجمعة حزماً متواصلة من مستويات الطاقة يكون عددها

مساوياً لعدد الذرات في البلورة، لذلك تبدو حزم الطاقة كما لو كانت متصلة الواحدة بالأخرى، وبهذا تفقد كل حزمة ناشئة عن مستوى منفصل هويتها الاصلية [58]. عندما تصبح المسافة بين الذرات مساوية لثابت الشبيكة (Lattice Constant) تنقسم الحزمة المتصلة الواحدة مرة اخرى على حزمتين تفصلهما منطقة لا يمكن للإلكترونات ان تتواجد فيها، وتعرف هذه المنطقة باسم فجوة الطاقة المحظورة (Forbidden Energy Gap) وتسمى الحزمة التي تعلو فجوة الطاقة بحزمة التوصيل (Conduction Bands) في حين تدعى الحزمة التي تقع اسفلها بحزمة التكافؤ (Valence Band) كما موضح في الشكل (2-3) [62]. إن لنموذج حزم الطاقة اهمية كبيرة في تحديد خصائص المواد الصلبة. بناءً على تركيب حزم الطاقة، تصنف المواد على ثلاثة انواع رئيسية: المواد الموصلة (Conductor Materials)، المواد العازلة (Insulator Materials) والمواد شبه الموصلة (Semiconductor Materials). يرتبط هذا التصنيف بشكل مباشر بمدى قدرة المادة على التوصيل الكهربائي الذي يحدث نتيجة لانتقال الالكترونات داخل المادة، ولما كان لابد للإلكترون أن يشغل مرتبة طاقية معينة داخل الحزمة، فان انتقاله يتم من مرتبة الى أخرى. في المواد الموصلة كالمعادن مثلا تكون حزمة التوصيل اما مشغولة جزئياً بالإلكترونات أو تكون متداخلة مع حزمة التكافؤ بحيث تختفي فجوة الطاقة المحظورة تماماً، يسمح ذلك للإلكترونات الموجودة في أعلى الحزم المشغولة جزئيا او تلك الواقعة في قمة حزمة التكافؤ بالانتقال بسهولة الى مستويات الطاقة الاعلى عند اكتسابها طاقة حركية من المجال الكهربائي المسلط، وبذلك يمكن للتيار الكهربائي أن يسري بسهولة عبر هذه المواد كما موضح في الشكل (2-4-a). تميز المواد الموصلة بقابلية توصيل كهربائية عالية جدا حيث تتراوح توصيليتها الكهربائية بين (10^{3}-10^{8} S/cm) ومن امثلتها النحاس والالمنيوم. اما في المواد العازلة فان فجوة الطاقة المحظورة كبيرة جداً وتكون جميع مستويات الطاقة في حزمة التكافؤ مشغولة بالكامل بالإلكترونات في حين تكون جميع مستويات الطاقة في حزمة التوصيل فارغة ولا تستطيع طاقة المجال الكهربائي رفع الالكترونات من أعلى حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل بسبب كبر الفجوة لذلك فان هذه المواد لا تستطيع نقل التيار الكهربائي كما في الشكل (2-4-c). تكون المواد العازلة ذات توصيلية كهربائية منخفضة جداً او معدومة وتتراوح قيمتها بين (10^{-18}-10^{-8} S/cm) مثل الزجاج والكوارتز.أما في المواد شبه الموصلة فأن فجوة طاقة تكون أصغر مقارنة بتلك الموجودة في المواد العازلة، هذا يجعل من السهل على بعض الالكترونات الانتقال من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل عبر فجوة الطاقة المحظورة عندما تكتسب طاقة كافية من المجال الكهربائي. عند انتقال الالكترون يترك خلفه فجوة (Hole) في حزمة التكافؤ وبفعل الطاقة المسلطة تكتسب الالكترونات في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ طاقة

حركية تسهم في عملية التوصيل الكهربائي، والمواد شبه الموصلة تقع توصيليتها الكهربائية بين المواد الموصلة والمواد العازلة حيث تتراوح توصيليتها الكهربائية بين (10^{-8}-10^{3} S/cm). كما موضح بالشكل (2-4-b) [66,65,64,63].



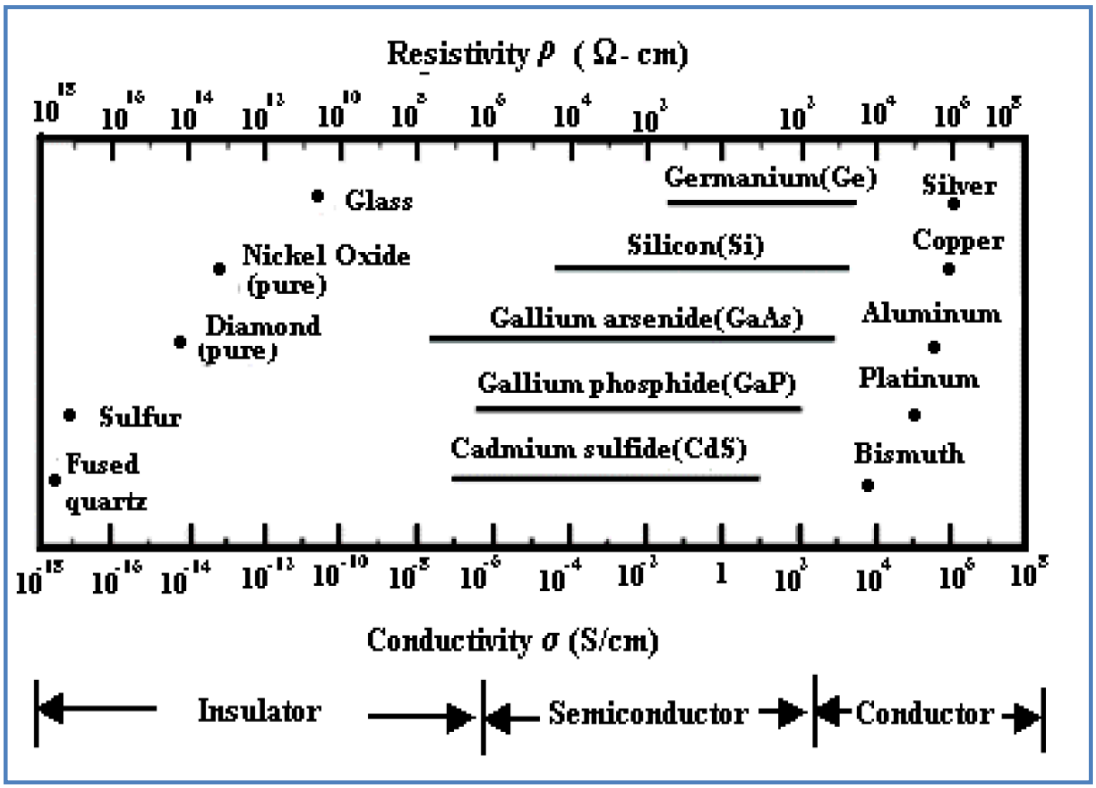
شكل (2-3) تكون حزمة الطاقة في المواد البلورية [67].



الشكل (2-4) مخطط يبين حزم الطاقة في المواد البلورية حيث (a) المواد الموصلة.

(b) المواد شبه الموصلة. (c) المواد العازلة [68].

تجدر الاشارة إلى أن المواد شبه الموصلة تمتاز بوصفها مواداً موصلة في ظروف معينة وعازلة في ظروف اخرى، فعند درجات الحرارة المنخفضة جداً التي تقترب من الصفر المطلق تظهر سلوكاً مشابهاً للمواد العازلة، في حين تصبح موصلة عند رفع درجة حرارتها. يبين الشكل (2-5) النطاقات التوصيلية للمواد الموصلة وشبه الموصلة والمواد العازلة لعدد من المواد الهامة والواقعة ضمن هذه الفئات.



شكل (2-5) يوضح مديات التوصيلية في بعض المواد العازلة، شبه الموصلة والموصلة [72].

(2-5) اشباه الموصلات: (Semiconductor)

بدأ الاهتمام بدراسة المواد شبه الموصلة في مطلع القرن التاسع عشر، ويعزى هذا الاهتمام بشكل أساسي إلى وفرة هذه المواد في الطبيعة. فعلى سبيل المثال، يعتبر السيليكون (Si) مادة شبه موصلة، وهو العنصر الثاني الأكثر انتشاراً في القشرة الأرضية بعد الاوكسجين، حيث تشكل مركبات السيليكا (الرمل) حوالي 25% من مكونات القشرة الأرضية [69]. بصورة عامة هناك الكثير من الخصائص التي تميز المواد شبه الموصلة وتجعلها ذات اهمية كبيرة في العديد من التطبيقات العلمية منها:

1- الحساسية للضوء: تعد اشباه الموصلات مواد حساسة للضوء، فعند تعرضها لضوء ذو طول موجي مؤثر يؤدي ذلك الى تغير في توصيليتها.
2- التوصيلية المحسنة بالشوائب: تمتاز بعض المواد شبه الموصلة بزيادة ملحوظة في التوصيلية الكهربائية عند احتوائها على ذرات شائبة.
3- مقاومة المعامل الحراري السالب: تمتلك اشباه الموصلات مقاومة ذات معامل حراري سالب (Negative Thermal Coefficient) مما يعني زيادة توصيليتها الكهربائية بزيادة درجة الحرارة.
4- المقاومة النوعية: تتراوح المقاومة النوعية لأشباه الموصلات في درجة حرارة الغرفة ما بين (10^{-3}-10^{8} Ω.cm).
5- آلية التوصيل الكهربائي: يتم التوصيل الكهربائي في اشباه الموصلات عن طريق نوعين من حاملات الشحنة: الالكترونات (Electrons) في أشباه الموصلات من النوع السالب (n-type)، والفجوات (Hole) في اشباه الموصلات من النوع الموجب (p-type) [71].

(6-2) أنواع أشباه الموصلات: (Semiconductors Type)

(1-6-2) أشباه الموصلات الذاتية: (Intrinsic Semiconductors)

تعرّف أشباه الموصلات النقية والخالية من الشوائب بأشباه الموصلات الذاتية، وفيها تكون حزمة التكافؤ مملوءة بالكامل بالإلكترونات في حين تكون حزمة التوصيل فارغة تماماً عند درجة حرارة الصفر المطلق [73]، ولهذا تعد المواد شبه الموصلة عازلة عند هذه الدرجة. عندما ترتفع درجة حرارة المادة شبه الموصلة الذاتية إلى درجة حرارة أعلى نسبياً، أي تكتسب الالكترونات طاقة كافية تساوي أو تتجاوز طاقة فجوة الطاقة المحظورة. يؤدي الى انتقال عدد معين من الإلكترونات الموجودة في حزمة التكافؤ التي تأثرت حرارياً وتنتقل إلى حزمة التوصيل مخلفةً ورائها عدداً من الفجوات (Holes)، ان الالكترونات التي تصل لحزمة التوصيل ستملأها جزئياً وتصبح جاهزة للتوصيل الكهربائي عند تسليط مجال كهربائي عليها. اما فيما يخص الفجوات المتكونة في حزمة

التكافؤ فأنها تحمل شحنة موجبة، أي أن وجود هذه الفجوات يسهل للإلكترونات التحرك لشغلها وبهذا يترك الالكترون فجوة في مكانه السابق وتظهر الفجوات كأنها تتحرك باتجاه المجال الكهربائي [63,74]. تعرف هذه المواد بأشباه الموصلات الذاتية أو النقية التي تمتلك اعداداً متساوية من حاملات الشحنة السالبة والموجبة (الالكترونات والفجوات) أي أن كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل تساوي كثافة الفجوات في حزمة التكافؤ.

(2-6-2) اشباه الموصلات غير الذاتية: (Extrinsic Semiconductor)

تعد عملية التحكم بتوصيل أشباه الموصلات عن طريق الحرارة أمراً غير مرغوب فيه عادةً في التطبيقات العملية التي تستخدم فيها أشباه الموصلات الذاتية، لذا تم تطوير طريقة اخرى بديلة تتمثل بإضافة نسب قليلة ومحدودة من الشوائب (Impurities) الى بلورة شبه الموصل وتدعى هذه العملية بالتطعيم (Doping)، تحدد كمية هذه الشوائب بمصطلح بمنسوب التطعيم (Doping level)، حيث إن إضافة بعض الشوائب تؤدي الى زيادة نوع معين من حاملات الشحنة على حساب النوع الاخر، مما يؤثر ذلك على الخصائص الكهربائية والبصرية والميكانيكية وغيرها من خصائص شبه الموصل. تسمى اشباه الموصلات في هذه الحالة بأشباه الموصلات غير الذاتية (المطعمة)[71]. أن إضافة الشوائب لأشباه الموصلات يعمل على تكوين مستويات طاقة جديدة تقع ضمن فجوة الطاقة المحظورة (Forbidden gap) بين حزمتي التوصيل والتكافؤ [74,63].

(2-7) تطعيم اشباه الموصلات: (Doping of Semiconductor)

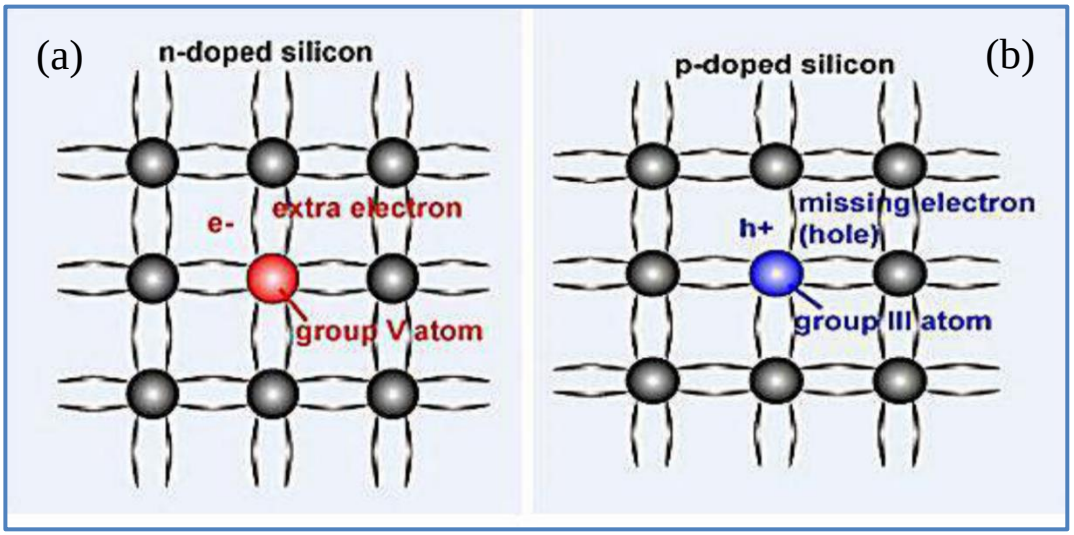
تصنف الشوائب على نوعين رئيسيين بناءً على كيفية احتلالها لموقعها داخل الشبيكة البلورية وهما [75]:

1- الشوائب الخلالية او البينية (Interstitial Impurities): تندمج هذه الشوائب في المواقع البينية بين الذرات الاصلية للبلورة المضيفة لها، يعود ذلك الى امتلاكها انصاف اقطار ذرية صغيرة مقارنة بالمسافات البينية الفاصلة بين المستويات الذرية للبلورة المستضيفة.
2- الشوائب الاستبدالية (Substitutional Impurities): تحل هذه الشوائب محل ذرات البلورة المضيفة في مواقعها الأصلية لتحل محلها نظراً لما تمتاز بها هذه الشوائب من حجم مقارب لحجم ذرات البلورة المضيفة او يزيد قليلاً. تصنف المواد شبه الموصلة المطعمة الى نوعين اساسيين حسب نوع الشوائب المضافة اليها [58]:

A- **شبه الموصل ذو النوع السالب (n-type):** يطلق على هذا النوع من أشباه الموصلات اسم (النوع السالب) لكون حاملات الشحنة الغالبية (Majority Carrier) فيه هي الالكترونات، بينما تكون حاملات الشحنة الاقلية (Minority Carries) هي الفجوات، يمكن الحصول على هذا النوع بإضافة شوائب مانحة (Doner Impurities) إلى شبه موصل نقي، ويبين الشكل (a-6-2) إضافة ذرة زرنيخ (As) التي تحتوي على خمسة الكترونات تكافؤ إلى ذرة سيليكون ذات الأربعة الكترونات تكافؤ، نتيجة لذلك، تتكون روابط تساهمية بين الالكترونات الأربعة لكل ذرة وبقاء الكترون واحد مرتبط بالذرة الام (ذرة زرنيخ)، لا يتطلب فصل هذا الالكترون عن الذرة طاقة كبيرة حيث انها اقل بكثير من الطاقة اللازمة لنقل الالكترون من حزمة التكافؤ الى

حزمة التوصيل في حالة اشباه الموصلات النقية، عند إضافة ذرة واحدة من الزرنيخ لكل (10^{10}) ذرات من السيلكون، يزداد عدد الكترونات التوصيل مقارنة بالسيلكون النقي، وظهور الالكترونات هذا لا يقابله ظهور فجوات في حزمة التكافؤ بل تنتقل من مستويات تقع تحت حافة حزمة التوصيل وعلى عمق قليل جداً وتسمى المستويات المانحة (Doner levels) وبما ان عدد الالكترونات أكبر من عدد الفجوات، فأن التيار الذي يمكن ان يسري في هذه المادة تحمله الالكترونات بشكل اساسي.

B- **شبه الموصل ذو النوع الموجب (p-type):** في هذا النوع من أشباه الموصلات تكون حاملات الشحنة الغالبية هي الفجوات (Holes). يوضح الشكل (2-6-b) إضافة شائبة ثلاثية التكافؤ مثل الكاليوم (Ga) إلى ذرة سيلكون رباعية التكافؤ، في هذه الحالة، كل ذرة ثلاثية التكافؤ ينقصها الكترون واحد ليكتمل ترابطها، أي أن الذرة الشائبة يمكنها بسهولة استقبال إلكترونات من الاواصر القريبة، مما يؤدي الى اكتمال روابطها، إلا أن هذا يترك فراغاً في الآصرة التي فقدت إلكترونها. وأن الطاقة (E_A) اللازمة لحدوث هذا الانتقال قليلة جداً، تسمى الذرات الشائبة التي تستقبل إلكتروناً بالذرات القابلة (Acceptors)، وكما هو الحال في الشوائب المانحة، فأن الشوائب القابلة تكوّن مستويات طاقة جديدة ضمن فجوة الطاقة وعلى مسافة قريبة جداً من حزمة التكافؤ ويطلق عليها المستويات القابلة (Acceptor Levels).



شكل (2-6) يبين تشويب شبه الموصل السيلكون (Si) (a) النوع السالب (n-type).
(b) النوع الموجب (p-type) [58].

(8-2) طرائق تشويب أشباه الموصلات (Semiconductors Doping Methods)

تعد عملية تشويب اشباه الموصلات (Doping) خطوة أساسية في تصنيع الأجهزة الالكترونية. تتعدد طرائق التشويب، وتتميز كل منها بخصائص وميزات تجعلها مناسبة لتطبيقات معينة، فيما يلي أبرز هذه الطرائق [76]:

1- **التشويب بالغرس الايوني (Ion Implantation Doping):** تعد طريقة الغرس الايوني من التقنيات المتقدمة والدقيقة لتشويب اشباه الموصلات، تتم هذه الطريقة بوضع شبه الموصل المراد تشويبه في حجرة مفرغة من الهواء مع وضع المادة الشائبة بالقرب منه. بعد ذلك، يسلط فرق جهد معين مما يؤدي الى تأين ذرات مادة الشائبة وتسرّع الايونات الناتجة. تحدث عملية التشويب عند اصطدام هذه الايونات السريعة بسطح المادة شبه الموصلة، فتندمج داخل بنيتها البلورية، وتعتمد كفاءة هذه الطريقة وخصائصها النهائية على طبيعة كل من المادة الشائبة وشبه الموصل الأصلي وطاقة التعجيل المطبقة على الايونات.

2- **التشويب بالتبخير الثنائي (Co-Evaporation Doping):** تستعمل طريقة التبخير الثنائي في تشويب الاغشية الرقيقة بشكل خاص. تعتمد هذه الطريقة على استخدام حوضين للتبخير. يوضع في أحدهما مادة الغشاء الرقيق المراد تشويبه، بينما توضع مادة التشويب في الحوض الاخر، يتم التحكم في معدلات تبخير كلا المادتين عن طريق التحكم في التيار المار في كل حوض باستعمال محولة تيار متردد، مع تغيير الجهد تدريجياً، يستمر الترسيب المشترك للمادتين حتى تتكون طبقة الغشاء الرقيق المشوبة بالتركيز المطلوب.

3- **التشويب بالليزر (Laser Doping):** تقدم طريقة التشويب بالليزر حلاً فعالاً للتحكم الدقيق في عمق الشوائب داخل شبه الموصل. تتم هذه العملية عن طريق صهر جزء من المادة المراد تشويبها باستعمال حزمة ليزر مركزة وذات طاقة محددة. تعمل الحرارة الناتجة عن الليزر على نشر الشوائب داخل المادة شبه الموصلة لعمق معين. ما يميز هذه الطريقة عن غيرها هو القدرة الفائقة على التحكم في عمق انتشار الشوائب، وذلك من خلال ضبط متغيرات الليزر مثل الطول الموجي المستعمل، وقدرة الليزر، وعدد النبضات، والزمن الكلي للتعرض.

4- **التشويب بالانتشار الحراري (Thermal Diffusion Doping):** من الطرائق التقليدية والشائعة في تشويب اشباه الموصلات. تتلخص العملية في ترسيب طبقة رقيقة من المادة الشائبة على سطح المادة شبه الموصلة المراد تشويبها. بعد ذلك، توضع المادة في فرن مفرغ من الهواء وتسخن الى درجة حرارة عالية ومحددة. عند هذه الدرجة، تنتشر ذرات

المادة الشائبة تدريجياً داخل البنية البلورية لذرات المادة المشوبة. تعتمد كفاءة ونتائج هذه الطريقة بشكل كبير على كل من درجة حرارة الانتشار والزمن المستغرق للعملية.

5- **التشويب بالخلط (Mixture Doping):** في طريقة التشويب بالخلط، تتم عملية التشويب بمزج المادة المراد تشويبيها مع المادة المشوبة مباشرةً، وذلك بنسب وزنية محددة. الشرط الأساسي لنجاح هذه الطريقة هو تقارب درجتي حرارة انصهار المادتين، حيث يتم صهرهما معاً لضمان تجانس الخليط وانتشار الشوائب بشكل متساو داخل المادة النهائية.

(9-2) الانتقالات الالكترونية (Electronic Transitions)

تعد الانتقالات الالكترونية في أشباه الموصلات من الظواهر الأساسية التي تحدد خصائصها البصرية والالكترونية. تحدث هذه الانتقالات بشكل رئيسي بين حزمتي الطاقة، حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل. تصنف الانتقالات الالكترونية على نوعين اساسيين: الانتقالات المباشرة والانتقالات غير المباشرة. يعتمد احتمال حدوث أي من هذين النوعين على توفر مستويات طاقة مشغولة بالإلكترونات في أعلى حزمة التكافؤ، بالإضافة الى وجود مستويات طاقة فارغة ومسموحة في أسفل حزمة التوصيل [77].

(1-9-2) الانتقالات الالكترونية المباشرة (Direct Transitions)

تُعرف أشباه الموصلات التي تظهر هذا النوع من الانتقالات بأشباه الموصلات المباشرة (Direct semiconductors). يتميز هذا النوع من الانتقالات بانتقال الإلكترون من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل عند نفس نقطة في فضاء متجه الموجة (k-space)، بمعنى اخر، يكون التغير في متجه الموجة (Δk) مساوياً للصفر ($\Delta k = 0$)، مما يعني أن الانتقال يحدث عمودياً على الرسم البياني للحزم الطاقية في فضاء (K). يحدث هذا الانتقال المباشر عندما يمتص إلكترون في حزمة التكافؤ الممتلئة تماماً فوتوناً تكون طاقته مساوية أو أكبر من طاقة فجوة الطاقة المحظورة، مما يمكنه من الانتقال إلى مكاناً فارغاً في حزمة التوصيل. هذه العملية، تحقق قانون حفظ الطاقة والزخم. [78] تُصنف الانتقالات الإلكترونية المباشرة إلى نوعين رئيسيين:

a- **الانتقال المباشر المسموح (Direct allowed transition):** يحدث هذا النوع من الانتقالات عندما ينتقل الإلكترون بشكل مباشر من قمة حزمة التكافؤ (VB) إلى قاع حزمة التوصيل (CB). يتحقق هذا الانتقال عندما يتطابق موقع قمة حزمة التكافؤ مع موقع قاع حزمة التوصيل عند نفس قيمة متجه الموجة، أي عندما يكون التغير في متجه الموجة (Δk) مساوياً للصفر ($\Delta k = 0$)[78] كما في الشكل (2-7-a).

b- الانتقال المباشر الممنوع (Direct forbidden transition): يحدث هذا النوع من الانتقالات بين النقاط المجاورة لأعلى نقط في حزمة التكافؤ والنقاط المجاورة لأوطأ نقطة في حزمة التوصيل، وبشكل مباشر أيضاً، وعند نفس قيمة متجه الموجة، أي عندما يكون التغير في متجه الموجة (Δk) مساويًا للصفر ($\Delta k = 0$). يمكن ايجاد قيمة فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح والممنوع باستخدام العلاقة (2-1)، كما في الشكل (2-7-b).

$$(\alpha\, h\nu) = B_x\,(h\nu - E_g)^r \qquad \text{..... (1-2)}$$

اذ ان:

r: معامل اسي يحدد نوع الانتقال.

B_x: ثابت يعتمد على طبيعة المادة.

E_g: تمثل فجوة الطاقة البصرية.

hv: طاقة الفوتون الساقط.

α: معامل الامتصاص.

إذا كان الأس ($r = 1/2$) يكون الانتقال مباشراً مسموحاً. أما إذا كان الأس ($r = 3/2$)، يكون الانتقال مباشراً ممنوعاً، كما هو موضح في الشكل (2-7) [77،79].

(2-9-2) الانتقالات الإلكترونية غير المباشرة (Indirect Transitions)

تعرف المواد شبه الموصلة التي تحدث فيها هذه الانتقالات بأشباه الموصلات غير المباشرة (Indirect semiconductors). تتميز هذه الانتقالات الإلكترونية بانتقال الإلكترون من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل بشكل غير عمودي، ولا تتساوى قيمة متجه الموجة للإلكترون (k) قبل وبعد الانتقال ($\Delta k \neq 0$). لذلك، تحدث هذه الانتقالات بمساعدة الفونون (Phonon) للحفاظ على الزخم (Conservation of momentum) الناتج عن تغير متجه الموجة للإلكترون (Wave vector)[80]. تصنف الانتقالات غير المباشرة على نوعين:

a- الانتقال غير المباشر المسموح (Indirect allowed transitions):

يحدث هذا النوع من الانتقالات بين اعلى نقطة في حزمة التكافؤ واوطأ نقطة في حزمة التوصيل في مناطق مختلفة في فضاء متجه الموجة (K)[81]. كما في الشكل (2-7-c).

b- الانتقال غير المباشر الممنوع (Indirect forbidden transitions):

يحدث هذا النوع من الانتقالات بين النقاط المجاورة لأعلى نقطة في حزمة التكافؤ وأوطأ نقطة في حزمة التوصيل كما في الشكل (2-7-d). يمكن ايجاد قيمة فجوة الطاقة للانتقال غير المباشر المسموح والممنوع باستعمال العلاقة (2-2)،

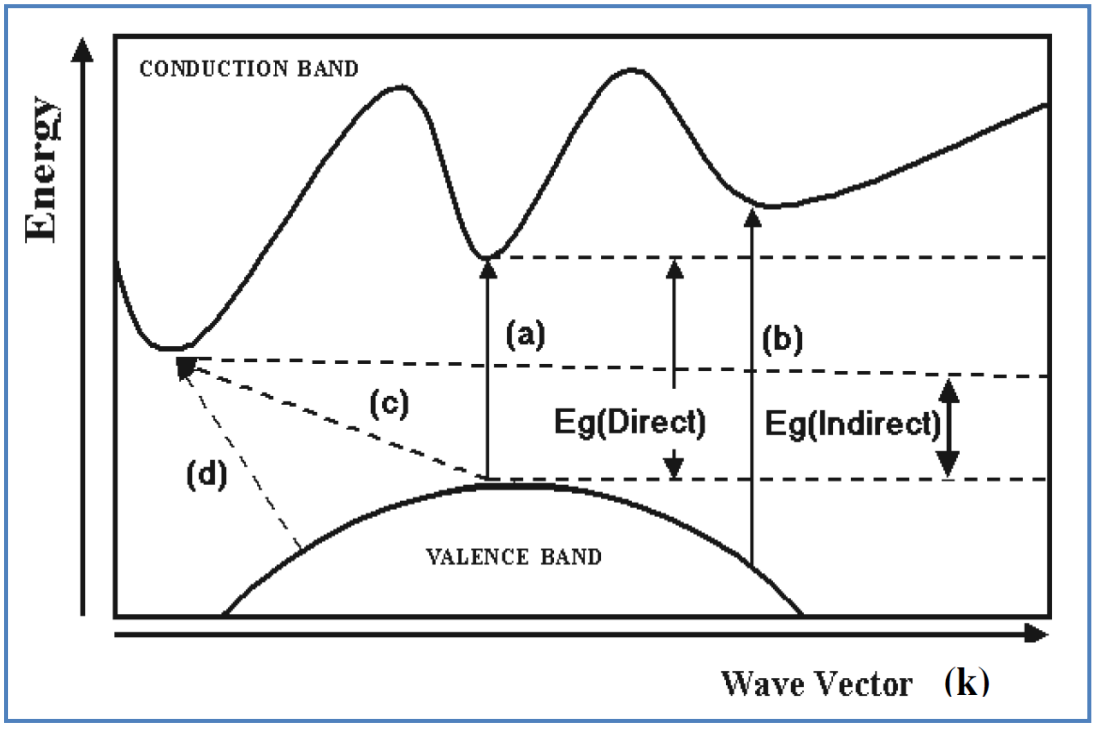
$$\alpha h\nu = B_x\left(h\nu - E_g \pm E_{Ph}\right)^r \qquad \text{..... (2-2)}$$

إذ إن: E_g: تمثل فجوة الطاقة البصرية.

E_{ph}: طاقة الفوتون المساعد.

الإشارة (-): تعني امتصاص فوتون، الإشارة (+): تعني انبعاث فوتون

إذا كان الأس (r = 2) يكون الانتقال غير مباشر مسموح. أما إذا كان الأس (r =3)، يكون الانتقال غير مباشر ممنوع، والشكل (2-7) يوضح انواع الانتقالات الالكترونية المختلفة [82].



الشكل (2-7) انواع الانتقالات الالكترونية حيث: (a) انتقال مباشر مسموح.

(b) انتقال مباشر ممنوع. (c) انتقال غير مباشر مسموح. (d) انتقال غير مباشر ممنوع [82].

(10-2) الخصائص التركيبية : (Structural Properties)

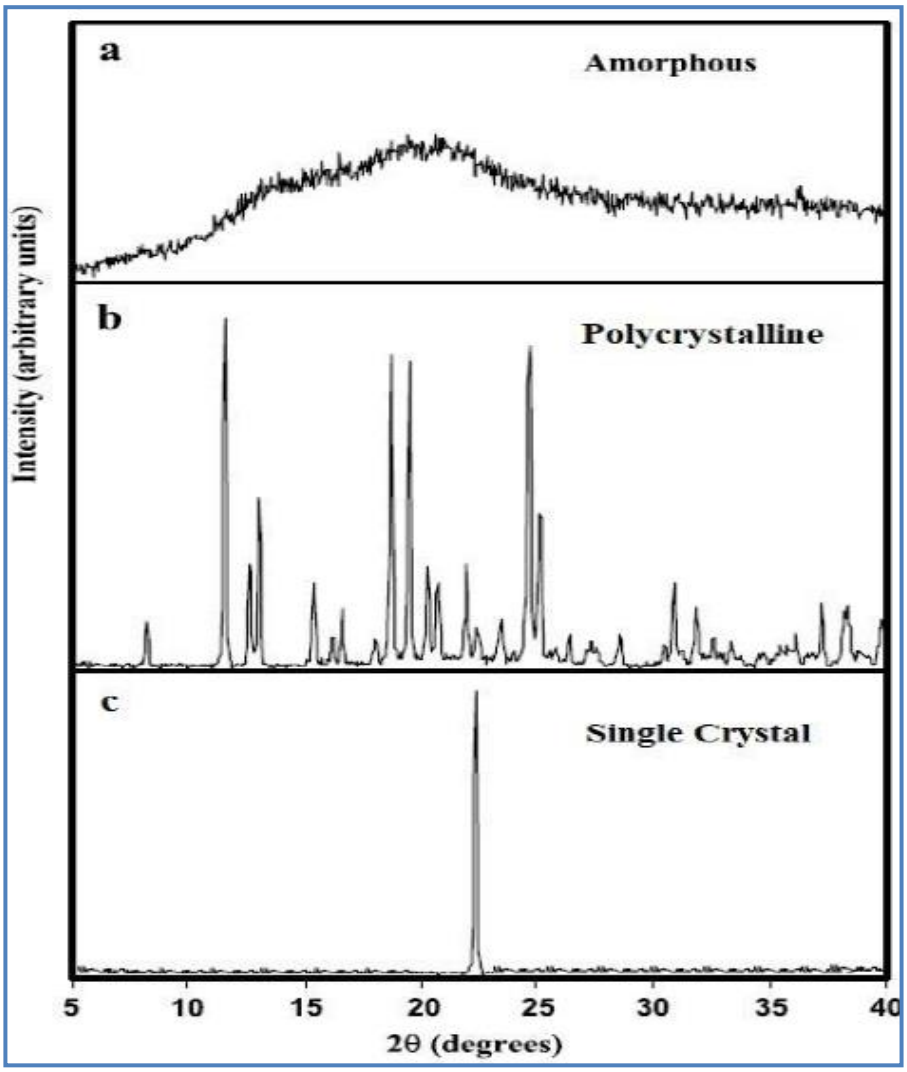
(1-10-2) حيود الاشعة السينية: (X-ray Diffraction (XRD))

الأشعة السينية موجات كهرومغناطيسية ذات اطوال موجية محددة تقع بين نطاقي الأشعة فوق البنفسجية وأشعة كاما، تتراوح أطوالها الموجية عادة ما بين ($10A^o$-$0.1A^o$) مما يجعلها أداة أساسية للاستخدام في معظم تجارب الحيود البلوري، تعود هذه الاهمية نظراً إلى إمكانية مقارنة أطوالها الموجية بالمسافات البينية الفاصلة بين الذرات في البنية البلورية، وبهذا توفر معلومات كافية ودقيقة عن انتظام ترتيب الذرات والاتجاه المفضل للنمو البلوري. يعتمد مبدأ حيود الأشعة السينية بشكل أساسي على التركيب البلوري للمادة، بالإضافة إلى الطول الموجي للأشعة المستخدمة. من الضروري أن يكون الطول الموجي للأشعة السينية المستخدمة مساوياً او أصغر من ضعف ثابت الشبيكة البلورية للمادة وفقاً لقانون براك (Bragg's law) [83]. تستعمل تقنية حيود الأشعة السينية بشكل واسع لتحديد طبيعة المادة قيد الدراسة، وما إذا كانت المادة التي تحت الاختبار متبلورة أم غير متبلورة (عشوائية) وعلى النحو الاتي [84]:

1- **الحيود في المواد غير المتبلورة (Amorphous):** في المواد غير المتبلورة أو العشوائية، لا يُلاحظ وجود انعكاسات حادة ومحددة مرتبطة بتبلور منتظم. بدلًا من ذلك، يظهر نمط الحيود عدداً من القمم العريضة (Broad Peaks)، كما هو موضح في الشكل (2-8-a). وهذا يشير إلى غياب الترتيب الذري بعيد المدى.

2- **الحيود في المواد متعددة التبلور (Polycrystalline):** تظهر المواد متعددة التبلور نمط حيود يتضمن مجموعة من القمم الحادة عند زوايا حيود مختلفة، تعكس هذه القمم وجود العديد من البلورات الصغيرة (الحبيبات) المتجهة بشكل عشوائي ضمن المادة، كما في الشكل (2-8-b).

3- **الحيود في المواد أحادية التبلور (Single Crystal):** في المواد أحادية التبلور يظهر نمط الحيود انعكاساً واحداً حاداً ومحدداً، وهذا يشير الى وجود بنية بلورية واحدة ومنتظمة تمتد عبر كامل العينة كما هو موضح في الشكل (2-8-c).



الشكل (2-8): حيود الاشعة السينية (XRD) في المواد (a) الحيود في المواد العشوائية. (b) الحيود في المواد متعددة التبلور. (c) الحيود في المواد احادية التبلور [85].

(2-10-2) قانون براك (Bragg's Law)

عندما تسقط الأشعة السينية على مادة ما ذات بنية بلورية منتظمة، حيث تترتب الذرات أو الجزيئات بمسافات محددة، تتفاعل الاشعة مع المادة، ونتيجة لهذا التفاعل تنحرف الأشعة عن مسارها الأصلي وهي ظاهرة تُعرف بالحيود، فإذا فقدت الفوتونات أو الجسيمات المشتتة جزءًا من طاقتها الحركية خلال هذا التفاعل، تعرف هذه العملية بالتشتت غير المرن (Inelastic Dispersion). أما إذا لم يطرأ أي تغيير في الطاقة، فإن العملية تُعرف بالتشتت المرن (Elastic Dispersion) [86].

لقد صاغ العالم براك قانونه بالاعتماد على مبدأ أساسي وهو أن فرق المسار بين أي شعاعين منعكسين يساوي طول موجة واحدة أو عدداً صحيحاً من الاطوال الموجية، يوضح الشكل (2-9)

توزيع المستويات البلورية وظاهرة حيود براك [86]. يتحقق انعكاس براك عندما يستوفي شرط أساسي محدد، وهو أن تتحقق المتباينة ($\lambda \leq 2d$). يُعبر عن هذا الشرط رياضياً بالمعادلة التالية [87]:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad \text{..... (3-2)}$$

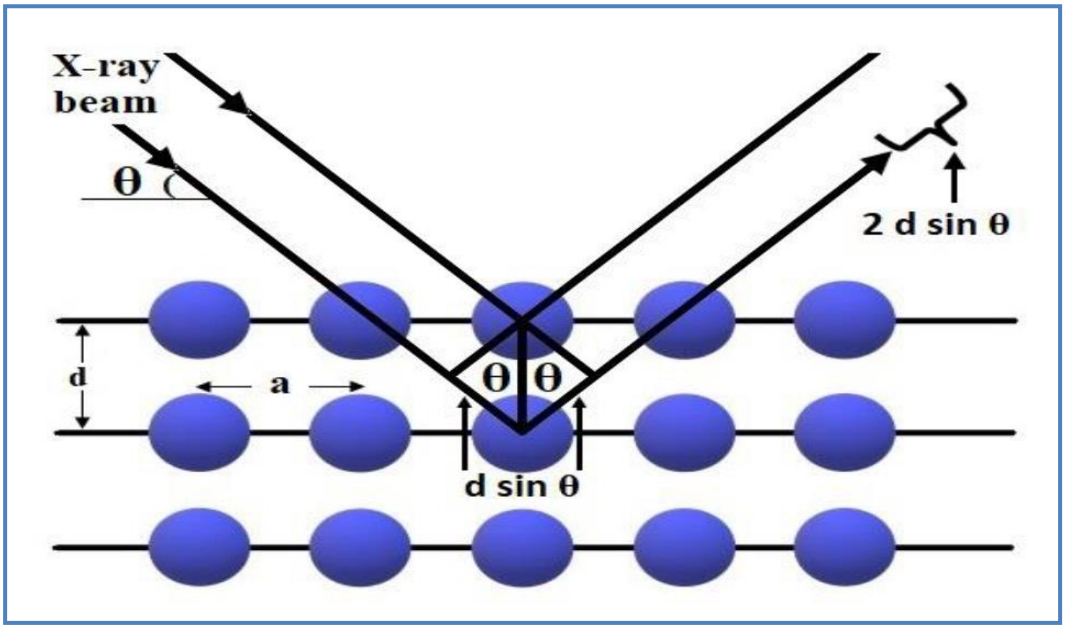
حيث إن:

n: عدد طبيعي يمثل مرتبة الحيود.

λ: الطول الموجي للأشعة الساقطة.

θ: زاوية حيود براك او زاوية السقوط بوحدة الدرجات (degree).

d_{hkl}: المسافة بين مستويين منعكسين في الشبكة البلورية.



الشكل (2-9): يبين المستويات البلورية وحيود براك [88].

(3-10-2) المعاملات التركيبية: (Structure Parameters)

(1-3-10-2) ثوابت الشبيكة: (Lattice Parameters)

هي وصف لأبعاد وحدة الخلية في الشبيكة السداسية التي تكون فيها ثوابت الشبيكة (a=b)، حيث تم حساب ثوابت (a) و(c) باستخدام العلاقة الاتية من العلاقة الاتية [89]:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3}\left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2}\right) + \frac{l^2}{c^2} \quad \text{..... (4-2)}$$

(2-3-10-2) الحجم الحبيبي (g.s) (Grain Size)

يمكن حساب معدل الحجم الحبيبي من خلال معادلة شيرر (Scherrer's Formula) [90].

$$G.s = \frac{k \times \lambda}{\beta cos\theta} \quad \text{..... (5-2)}$$

اذ ان: k: ثابت تشكيل الشبيكة (ثابت شيرر) وقيمته (0.9) ويعتمد على شكل الحبيبات.

β: عرض المنحني الكامل عند منصف القمة (Full width at half maximum) بقياس الوحدات النصف قطرية (Radian).

Θ: زاوية حيود براك.

λ: الطول الموجي للأشعة السينية.

(2-3-10-3) كثافة الانخلاعات (δ) وعدد البلورات (N_o)

(Dislocation Density and number of Crystallites)

تعرف كثافة الانخلاعات بأنها العدد الكلي لخطوط الانخلاع التي تقطع وحدة المساحة في البلورة. بعبارة أخرى، تمثل هذه الكثافة النسبة بين الطول الكلي لجميع خطوط الانخلاع داخل البلورة وحجم البلورة الكلي. وبمعرفة قيمة حجم البلورات يمكن حساب كثافة الانخلاعات، وخاصة الناتجة عن حجم البلورات باستعمال العلاقة التالية [91]:

$$\delta = 1/G^2 \quad \text{..... (6-2)}$$

اما لحساب عدد البلورات (N_o) لوحدة المساحة، فيمكن حسابها من العلاقة الاتية:[92]

$$N_o = t/G^3 \quad \text{..... (7-2)}$$

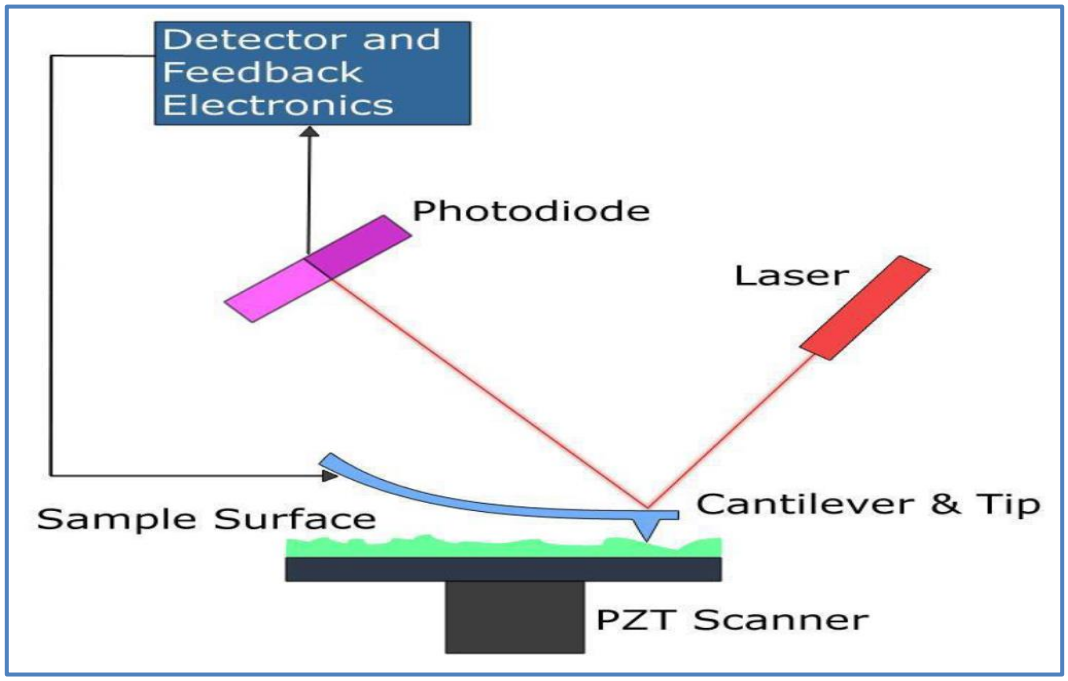
إذ إن: G: حجم البلورات. t: سمك الغشاء الرقيق.

(2-11) خصائص طوبوغرافية السطح: (Surface Topography properties)

(2-11-1) مجهر القوة الذرية: (Atomic Force Microscopy (AFM))

يعد مجهر القوة الذرية (AFM) أداة تحليلية متقدمة تتميز بقدرتها الفائقة على تحديد التضاريس السطحية بدقة متناهية. يتيح هذا الجهاز تحليل توزيع الأحجام الحبيبية ومعدل الخشونة

السطحية للأغشية الرقيقة، فضلاً عن تقييم مدى تجانسها. يعتمد مبدأ عمل جهاز مجهر القوة الذرية على ذراع مرن للغاية يعرف بـ (Cantilever) يحمل في نهايته مجساً (Probe). يتكون المجس من رأس حاد (Tip) يتصل بطرف الذراع ويمثل هذا الرأس الجزء الأكثر دقة والمسؤول عن فحص أسطح العينات. فضلاً عن ذلك، يحتوي الجهاز على وحدة مسح ثلاثية الاتجاهات (Piezo Electric xyz Scan Driver) التي تعمل على تحريك سطح العينة تحت المجس في جميع الاتجاهات، مما يسمح للمجس بمسح سطح العينة بالكامل. عند اقتراب رأس المجس من سطح العينة، تتولد قوى متبادلة بينهما، قد تكون هذه القوى من نوع فان دير فالز، أو قوى ميكانيكية، أو أنواع أخرى من القوى الفيزيائية. تؤدي هذه القوى إلى انحراف الذراع المرن والذي يخضع لقانون هوك. يتغير مقدار هذا الانحراف تبعاً لتكوين سطح العينة وتضاريسها، مما ينتج عنه تغير في قوة التفاعل بين رأس المجس والسطح [93]. يراقب هذا التغير في الانحراف بواسطة شعاع ليزر دقيق ينعكس من قمة الذراع. يسجل التغير في حركة شعاع الليزر بواسطة كاشف ضوئي حساس للغاية (Sensitive Photo Detector). تعالج الإشارات المرسلة من الكاشف الضوئي في وحدة المعالجة المركزية، ليتم إنتاج صورة ثلاثية الأبعاد لسطح العينة. يوفر مجهر القوة الذرية معلومات دقيقة للغاية حول خشونة سطح العينة، بما في ذلك جذر متوسط المربع ((Root Mean Square (RMS)، كما يتيح فهماً شاملاً لتضاريس سطح العينة وخصائصها [94]. يوضح الشكل (2-10) عملية المسح المجهري باستعمال مجهر القوة الذرية.



الشكل (2-10): مخطط لعمل مجهر القوة الذرية [94].

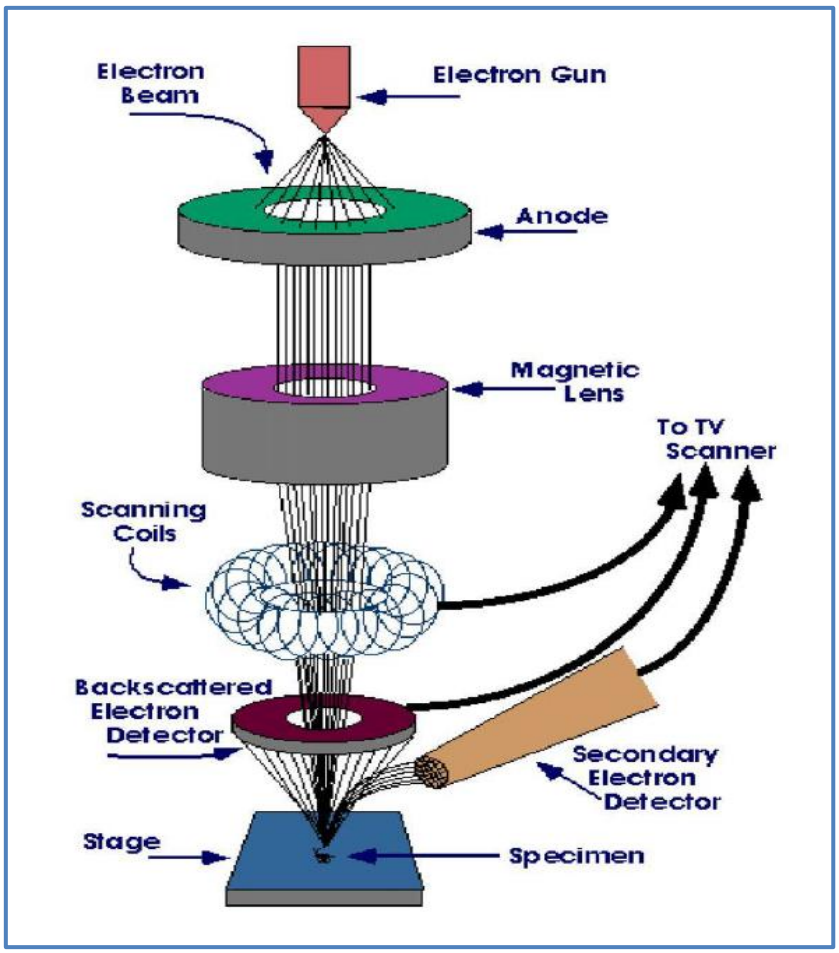
(2-11-2) المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال :

(Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM))

يعدّ المجهر الإلكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM) أداة أساسية لدراسة الخصائص المورفولوجية لأسطح الاغشية الرقيقة (Surface Morphology)، فضلاً عن الكشف عن مواقع العيوب، وتحديد شكل وكثافة الجسيمات. يعتمد مبدأ عمل الجهاز على توجيه حزمة دقيقة من الإلكترونات الأولية تبعث من المصدر وتعجل تدريجياً بواسطة مجال كهربائي داخل أنبوبة مفرغة بضغط منخفض يتراوح بين (10^{-10}-10^{-4} Torr) تتراوح طاقة هذه الالكترونات المعجلة بين مئات من الإلكترون فولت إلى عشرات من الكيلو إلكترون فولت، تركز هذه الحزمة بدقة متناهية باستعمال عدسات كهرومغناطيسية أولية وثانوية لتشكيل شعاع مسح ضوئي يمسح سطح العينة نقطة بنقطة. يتفاعل شعاع الإلكترونات الأولية الساقطة مع سطح العينة، وينتج عن هذا التفاعل إشارات متنوعة أبرزها الإلكترونات الثانوية والإلكترونات المرتدة، تحمل هذه الإشارات معلومات قيمة حول مورفولوجيا سطح العينة. تجدر الإشارة إلى أن بعض الإلكترونات الأولية تخضع لتبعثر مرن مع ذرات العينة، بينما يخضع البعض الآخر لتبعثر غير مرن يؤدي الى انبعاث إلكترونات ثانوية أو إلكترونات أوجيه (Auger electrons). تستخدم الإلكترونات الثانوية بشكل أساسي في تكوين الصورة، حيث تجمع بواسطة كاشف مخصص يقع بالقرب من منطقة تفاعل حزمة الإلكترونات مع سطح العينة. تعالج الإشارة الناتجة وتحلل لتكوين صورة متزامنة ثلاثية الأبعاد لسطح العينة. يلعب تيار الكاثود المستعمل في توليد حزمة الإلكترونات دوراً حاسماً في تحديد حجم البقعة النهائية للحزمة، وبهذا يؤثر بشكل مباشر على دقة الصورة. كما يمكن التحكم في عمق مجال الصورة النهائية من خلال التحكم في تيار العدسة. بالإضافة إلى ذلك، يتأثر وضوح الصورة وحجم البقعة النهائية ايضاً بنوع وتفاعل حزمة الإلكترونات مع العينة والذي يمتد من بضع نانومترات الى عدة ماكروميترات من سطح العينة [95]. يتميز جهاز (FE-SEM) بعدة مزايا تفوق جهاز (SEM) التقليدي نذكر منها [96]:

1- يمكن الحصول على صورة عالية الجودة باستعمال جهد منخفض نسبياً وشحن كهربائي قليل.
2- يتيح الجهاز الحصول على صور أكثر وضوحاً واقل تشوهاً مقارنة مع صور (SEM) حيث تصل دقتها إلى أجزاء من النانومتر، إذ تفوق قدرة تكبيره عن قدرة تكبير المجهر الالكتروني الماسح التقليدي بما يتراوح بين (3-6) اضعاف.

3- يقلل الجهاز من اختراق الالكترونات ذات الطاقة الحركية المنخفضة، مما يجعل الاختراق مقتصراً على سطح العينة فقط، وهذا يسهم في الحصول على معلومات سطحية دقيقة. الشكل (2-11) يوضح مخطط عمل جهاز المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال.



الشكل (2-11) مخطط المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM) [96].

(2-12) الخصائص البصرية لأشباه الموصلات

(Optical Properties of Semiconductors)

تعد دراسة الخصائص البصرية لأشباه الموصلات ذات أهمية بالغة من الناحيتين التقنية والتطبيقية، فهي توفر العديد من المعلومات القيمة حول أنواع الانتقالات الالكترونية داخل المادة سواء أكانت مباشرة أو غير مباشرة، فضلاً عن ذلك، تشمل الدراسات تحليل الامتصاصية، والنفاذية، والانعكاسية، وغيرها من الثوابت البصرية الاساسية، كما أنها تتيح فهم تركيب حزم الطاقة وتحديد الخصائص المميزة التي تحكم تفاعل الضوء مع المادة.

(1-12-2) تفاعل الضوء مع اشباه الموصلات

(The Interaction of Light with Semiconductor)

عندما يسقط شعاع ضوئي أحادي اللون بشكل عمودي على سطح شبه موصل، ينعكس جزء منه بينما ينتقل الجزء المتبقي الى داخل المادة. يتعرض الضوء المنتقل لعملية امتصاص داخل شبه الموصل، وذلك لأن طاقته تكون كافية لإثارة الإلكترونات ونقلها إلى مستويات طاقة أعلى غير مشغولة [76]. تتميز حزمة التوصيل بوجود عدد كبير من المستويات غير المشغولة بالإلكترونات، بينما تكون حزمة التكافؤ ممتلئة بعدد كبير من المستويات المشغولة بالإلكترونات، وتفصل بينهما فجوة الطاقة المحظورة (E_g)، لذا عندما تكون طاقة الضوء الساقط أكبر من طاقة الفجوة المحظورة لشبه الموصل، تزداد احتمالية الامتصاص بشكل كبير [65]. تتناسب شدة الضوء الساقط عند طول موجي معين طردياً مع نسبة امتصاص الضوء داخل شبه الموصل. يؤدي هذا التناسب إلى اضمحلال أسي لشدة الضوء احادي اللون أثناء مروره عبر البلورة،ويُعبر عن ذلك بعلاقة لامبرت التالية [97]:

$$I_t = I_o e^{-\alpha t} \quad \text{..... (8-2)}$$

حيث:

I_t: شدة الضوء بعد انتقاله داخل شبه الموصل مسافة (t).

I_o: شدة الضوء الساقط

α: معامل الامتصاص، وهو دالة للطول الموجي الساقط.

t: سمك الغشاء الرقيق.

(2-12-2) حافة الامتصاص الأساسية (Fundamental Absorption Edge)

تعرف حافة الامتصاص الاساسية بأنها الزيادة السريعة في الامتصاص التي تحدث عندما تكون طاقة الشعاع الممتص مساوية تقريباً لقيمة فجوة الطاقة البصرية (E_g)، هذه الخاصية مميزة لجميع أشباه الموصلات في المواد البلورية. تمثل حافة الامتصاص الحد الأدنى لفرق الطاقة بين أعلى مستوى في حزمة التكافؤ وأدنى مستوى في حزمة التوصيل، فتكون هذه الحافة حادة في أشباه الموصلات أحادية التبلور، بينما تكون أقل وضوحاً وحدة في أشباه الموصلات متعددة التبلور. تقسم مناطق الامتصاص على ثلاث مناطق رئيسية، كما موضح في الشكل (2-12) الذي يوضح العلاقة بين معامل الامتصاص (α) وطاقة الفوتون ($h\nu$) [98].

(1-2-12-2) منطقة الامتصاص العالي (High Absorption Region)

تُنتج منطقة الامتصاص العالي عند حدوث الانتقالات الالكترونية بين المستويات الطاقية الممتدة في حزمة التكافؤ إلى المستويات الممتدة في حزمة التوصيل، في هذه المنطقة، يتجاوز معامل الامتصاص (α) قيمة ($\alpha \geq 10^4$ cm^{-1}) كما هو موضح في الشكل (A-12-2) الذي يمثل منطقة الامتصاص العالي [67]. يمكن وصف معامل الامتصاص (α) في هذه المنطقة باستخدام المعادلة التالية [99]:

$$\alpha h\upsilon = P\left(h\upsilon - E_g\right)^r \quad \text{..... (9-2)}$$

إذ إن :

hν: طاقة الفوتون.

P: ثابت يعتمد على طبيعة المادة.

E_g: فجوة الطاقة البصرية.

r: معامل اسي يعتمد على طبيعة الانتقالات الالكترونية.

(2-2-12-2) منطقة الامتصاص الاسي (Exponential Absorption Region)

في هذه المنطقة، تحدث الانتقالات الإلكترونية من المستويات الموضعية في قمة حزمة التكافؤ إلى المستويات الممتدة في حزمة التوصيل. يقع معامل الامتصاص (α) في هذه المنطقة ضمن النطاق ($1<\alpha<10^4$ cm^{-1})، كما موضح بالشكل (B-12-2). تزداد حافة الامتصاص اسياً في هذه المنطقة بسبب حدوث زيادة تدريجية في الامتصاص تمتد لبضعة الكترون فولت. تُستخدم المعادلة (10-2) لحساب معامل الامتصاص (α) في هذه المنطقة، وتعرف بعلاقة أورباخ (Urbach) [100]

$$\alpha = \alpha_o e^{h\upsilon/E_u} \quad \text{..... (10-2)}$$

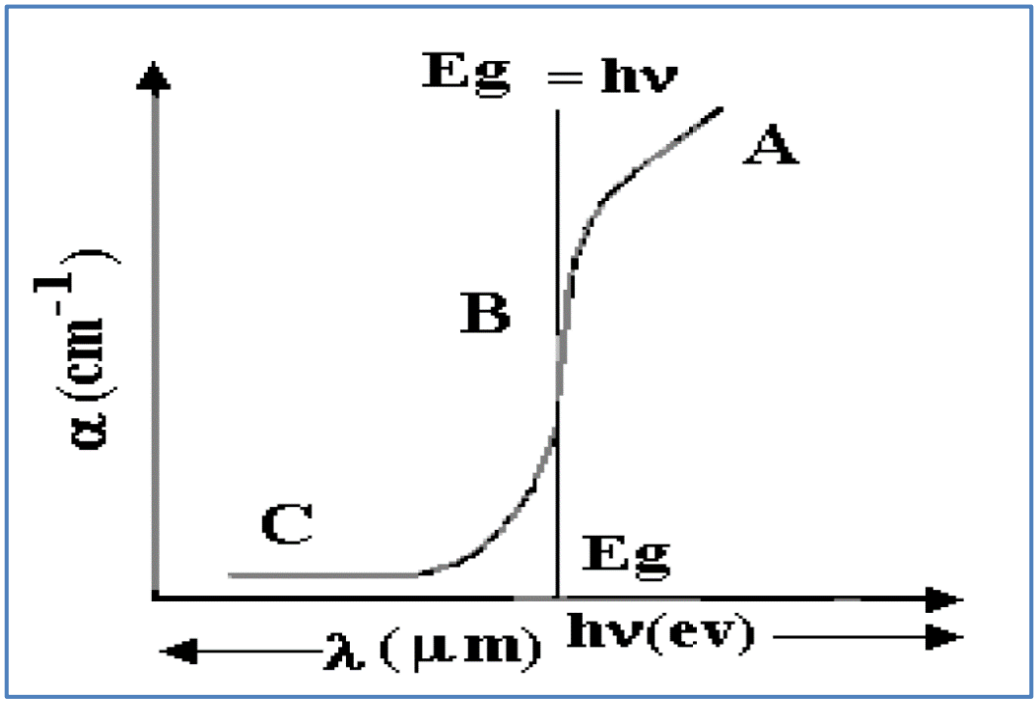
إذ إن:

α_o : معامل الامتصاص عند الطاقات الصفرية.

E_u: (طاقة ذيول اورباخ) وتمثل عرض الذيول للمستويات الموضعية في منطقة فجوة الطاقة البصرية وتكون مساوية لمقلوب الميل الناتج من رسم العلاقة البيانية بين (hν) و (Ln α).

(3-2-12-2) منطقة الامتصاص الواطئ (Low Absorption Region)

يكون الامتصاص في هذه المنطقة ضعيفاً، ويكون معامل الامتصاص ذا قيمة صغيرة جداً ($\alpha<10^4\ cm^{-1}$)، تحدث الانتقالات الالكترونية في هذه المنطقة بين النطاقات (Intraband) نسبة إلى كثافة الحالات داخل الفجوة الحركية الناتجة عن العيوب البلورية كما في الشكل (2-12-C):



الشكل (2-12) مناطق الامتصاص حيث: (A) منطقة الامتصاص العالي. (B) منطقة الامتصاص الآسي. (C) منطقة الامتصاص الواطئ [98].

(3-12-2) النفاذية T : (Transmittance)

تعرّف النفاذية (Transmittance) بانها النسبة بين شدة الاشعاع النافذ عبر الغشاء (I_t) وشدة الاشعاع الساقط عليه (I_o). تعد النفاذية كمية فيزيائية خالية من الوحدات ويمكن حسابها من العلاقة التالية [101,102]:

$$T = \frac{I_t}{I_o} \quad \text{..... (11-2)}$$

عند سقوط حزمة من الاشعاع على مادة شبه موصلة، ينفذ جزء من هذا الاشعاع عبر المادة. تعتمد شدة الاشعاع النافذ بشكل كبير على عدة عوامل، منها طاقة الفوتونات الساقطة، الخصائص الجوهرية

لمادة شبه الموصل، سمك الاغشية، ونسبة الشوائب المضافة. ويمكن حساب النفاذية بدلالة الامتصاصية (A) من العلاقة الاتية [75]:

$$T = e^{-2.303\,A} \quad \text{..... (12-2)}$$

(4-12-2) الامتصاصية (A) : (Absorption)

تعرّف الامتصاصية (Absorption) بانها النسبة بين شدة الاشعاع الممتص بواسطة الغشاء (I_A) الى شدة الاشعاع الساقط (I_o) وهي كمية خالية من الوحدات، ويعبر عنها بالعلاقة التالية[103]:

$$A = \frac{I_A}{I_0} \quad \text{..... (13-2)}$$

تعتمد الامتصاصية على طبيعة وسمك غشاء شبه الموصل، ويمكن حسابها بدلالة النفاذية من العلاقة الاتية [77]:

$$A = \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad \text{..... (14-2)}$$

(5-12-2) الانعكاسية (R) : (Reflectance)

تعرّف الانعكاسية (Reflectance) بأنها النسبة بين شدة الشعاع المنعكس (I_R) وشدة الاشعاع الساقط (I_o) عندما تسقط حزمة ضوئية ذات طول موجي محدد على سطح ما. ويمكن التعبير عن الانعكاسية بالعلاقة الاتية [77]:

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad \text{..... (15-2)}$$

وفقاً لقانون حفظ الطاقة، يمكن حساب قيمة الانعكاسية من خلال توفر قيمة كل من النفاذية والامتصاصية باستعمال العلاقة الاتية [104]:

$$A+T+R=1 \quad \text{..... (16-2)}$$

(6-12-2) فجوة الطاقة البصرية: (Optical Energy Gap)

تعد فجوة الطاقة (Energy gap) من الثوابت البصرية الأساسية في المواد شبه الموصلة، وهي تحدد بشكل أساسي خصائصها البصرية مثل امتصاص او انبعاث الضوء وخصائصها الالكترونية كالتوصيل الكهربائي [47]. تمثل فجوة الطاقة الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لإثارة

الكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل. كما تجدر الإشارة الى ان فجوة الطاقة في اشباه الموصلات النقية لا تكون خالية تماماً من المستويات الالكترونية، بل تحتوي على مستويات موضعية (Localized states) ناتجة عن العيوب البلورية الموجودة في المادة. يمكن حساب فجوة الطاقة البصرية باستعمال عدة طرق، ومن أبرزها نموذج تاوك (Tauc model). في هذه الطريقة، يتم رسم العلاقة البيانية بين x-axis (hv) وy-axis $(\alpha hv)^2$، ثم يتم مد أفضل خط مستقيم ويمتد ليقطع محور طاقة الفوتون (hv). تحدد قيمة فجوة الطاقة من نقطة التقاطع مع المحور x-axis [105].

(13-2) الثوابت البصرية: (Optical Constant)

(1-13-2) معامل الامتصاص (α): (Absorption Coefficient)

يعرف معامل الامتصاص (α) بأنه نسبة النقص الحاصل في فيض طاقة الاشعاع الساقط بالنسبة إلى وحدة المسافة باتجاه انتشار الموجة داخل الوسط، فعند سقوط حزمة ضوئية على غشاء رقيق، فأن جزءاً منها سوف ينعكس عن السطح وجزءاً اخر سينفذ عبر الغشاء، بينما جزءاً اخر ستمتصه مادة الغشاء الرقيق. تعتمد كمية الطاقة المنعكسة والنافذة والممتصة على عدة عوامل منها طبيعة مادة الغشاء الرقيق وخصائص سطحه والطول الموجي للحزمة الضوئية الساقطة [103,106]. يعتمد معامل الامتصاص على طاقة الفوتونات الساقطة (hv) وعلى الخصائص الفيزيائية لمادة شبه الموصل. من خلال دراسة قيم معامل الامتصاص، يمكن تحديد طبيعة الانتقالات الالكترونية في المادة سواء كانت مباشرة (Direct) او غير مباشرة (Indirect)، فاذا كانت قيمة (α) مرتفعة، أي أن ($\alpha > 10^4\ cm^{-1}$) فهذا يشير الى احتمالية حدوث انتقال الكتروني مباشر، في حين تدل القيمة المنخفضة لمعامل الامتصاص ($\alpha < 10^4\ cm^{-1}$) على احتمالية حدوث انتقال الكتروني غير مباشر [107]، ويمكن حساب معامل الامتصاص من خلال العلاقة الاتية [104]:

$$\alpha = 2.303\ A/t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (17\text{-}2)$$

حيث إنّ :

A: يمثل الامتصاصية. t: يمثل سمك الغشاء.

(2-13-2) معامل الانكسار (n_o): (Refractive Index)

معامل الانكسار (n_o) هو النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ (c) وسرعته في الوسط (υ)، يعد معامل الانكسار من الخصائص البصرية الهامة التي تعتمد على عدة عوامل منها نوع المادة

وتركيبها البلوري، ومن الملاحظ أن قيمته تتغير تبعاً للحجم الحبيبي للمادة حتى لو كان التركيب البلوري ثابتاً، ويعبر عن معامل الانكسار بالعلاقة الاتية [108]:

$$n_o = \left[\left(\frac{1+R}{1-R}\right)^2 - (k_o^2 + 1)\right]^{1/2} + \frac{1+R}{1-R} \quad \text{..... (18-2)}$$

إذ إن :

n_o: معامل الانكسار.

K_o: معامل الخمود.

(3-13-2) معامل الخمود (K_o) : (Extinction Coefficient)

معامل الخمود (K_o) هو مقدار التوهين الذي يحدث في شدة الاشعة الكهرومغناطيسية عند مرورها عبر المادة، كما يمكن تعريفه بانه كمية الطاقة التي تمتصها الكترونات المادة من طاقة الفوتونات الساقطة عليها نتيجة تفاعل الاشعة الكهرومغناطيسية مع جسيمات مادة الغشاء الرقيق، ويمكن حساب معامل الخمود للأغشية الرقيقة باستخدام العلاقة الاتية [102]:

$$k_o = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad \text{..... (19-2)}$$

إذ إن: λ يمثل الطول الموجي للحزمة الضوئية الساقطة.

(4-13-2) ثابت العزل الكهربائي (ε): (Dielectric Constant)

يمثل ثابت العزل قابلية المادة على الاستقطاب، إذ يمثل استجابة المادة لترددات مختلفة وبسلوك معقد، فعند حدوث تفاعل ما بين الموجات الضوئية وشحنات الوسط نتيجة امتصاص الطاقة في المادة، تكون نتيجة هذا التفاعل استقطاب في ذلك الوسط، وعادة يوصف التفاعل ما بين الضوء والمادة وما ينتج عنه من استقطاب لشحنات الوسط بثابت العزل المعقد (ε)، ان درجة استقطاب المادة تعتمد على المجال الكهربائي والخصائص الجزيئية للمادة، ويمكن حساب قيمة ثابت العزل المعقد من المعادلة الاتية [49,86]:

$$\varepsilon = \varepsilon_r - i\varepsilon_2 \quad \text{..... (20-2)}$$

إذ إن: ε ثابت العزل المعقد

ε_r وε_2: الجزء الحقيقي والخيالي لثابت العزل على التوالي.

ويرتبط ثابت العزل المعقد بمعامل الانكسار(n) بالعلاقة الاتية [77]:

$$\varepsilon = n^2 \quad \text{..... (21-2)}$$

وبالتعويض عن قيمة (ε) وقيمة (n) نحصل على:

$$\varepsilon_r - i\varepsilon_2 = (n_o - iK_o)^2 \quad \text{..... (22-2)}$$

ويتم كتابة ثابت العزل المعقد الحقيقي والخيالي على النحو الاتي [86]:

$$\varepsilon_r = n_o^2 - k_o^2 \quad \text{..... (23-2)}$$

$$\varepsilon_2 = 2n_o k_o \quad \text{..... (24-2)}$$

(14-2) الخصائص الكهربائية: (Electrical Properties)

تتأثر الخصائص الكهربائية لأشباه الموصلات متعددة التبلور بجملة من العوامل، التي تشمل الضوء، وتركيز ذرات الشوائب داخل المادة، ودرجة الحرارة المحيطة، والمجال المغناطيسي. تكتسب دراسة هذه الخصائص أهمية بالغة كونها توفر معلومات تفصيلية عن طبيعة حاملات الشحنة (الكترونات او فجوات) وتركيزها الحجمي، فضلاً عن آليات التوصيل الكهربائي في المادة [109].

(1-14-2) تأثير هول : (Hall Effect)

تركيز حاملات الشحنة في أشباه الموصلات قد يختلف عن تركيز ذرات الشوائب المطعمة، ويعزى ذلك بشكل أساسي إلى اعتماد كثافة الشوائب المتأينة على درجة الحرارة ومستويات طاقة الشوائب. ونظراً لأن المقاومية الكهربائية هي حاصل ضرب التحركية في تركيز حاملات الشحنة فأن تأثير هول يعد الطريقة الأكثر شيوعاً وفعالية لقياس هذا التركيز بشكل مباشر. يعد هذا التأثير أحد الوسائل الأساسية المستخدمة لدراسة الخصائص الكهربائية لأشباه الموصلات. وينسب اكتشاف هذه الظاهرة إلى العالم الأمريكي إدوين هول (E.H. Hall) في عام 1879 [110]. يعرف تأثير هول بأنه التغير في توزيع التيار الكهربائي داخل شريحة من مادة شبه موصلة أو موصلة عند تعرضها لمجال مغناطيسي عمودي على اتجاه التيار [111]. لهذا لتأثير هول تطبيقات عديدة أبرزها في مجال أشباه الموصلات، حيث يستعمل لحساب تركيز حاملات الشحنة وتحركيتها، وتحديد نوع شبه الموصل (سالب n-type او موجب p-type) فضلاً عن حساب قيمة التوصيلية الكهربائية. تتمثل آلية تأثير هول بانه عند تطبيق مجال مغناطيسي (B_Z) عموديًا على تيار كهربائي (I_x) يمر عبر شريحة شبه موصلة في الاتجاه السيني، فإن حاملات الشحنة (الإلكترونات في هذه الحالة)

تنحرف نحو أحد جانبي الشريحة كما موضح في الشكل (2-13). هذا الانحراف يؤدي الى تراكم الشحنات على أحد الجانبين، مما يجعله سالباً مقارنة بالجانب الاخر. وينتج عن ذلك فرق جهد يُعرف بجهد هول (V_H). يحدث هذا الإنحراف في أشباه الموصلات من النوع السالب (n-type)، بينما يكون اتجاه الانحراف معاكساً في أشباه الموصلات من النوع الموجب (p-type). ينشأ هذا الانحراف نتيجة لقوة لورنتز (Lorentz Force)، وهي قوة عمودية على كل من اتجاه المجال المغناطيسي واتجاه التيار الكهربائي. يمكن تحديد اتجاه قوة لورنتز باستعمال قاعدة اليد اليمنى. مع استمرار تراكم الشحنات على الجانبين، يتولد مجال كهربائي بينهما يُعرف بمجال هول (E_H)، يعمل هذا المجال على توليد قوة معاكسة لقوة لورنتز، مما يؤدي في النهاية إلى حالة اتزان ديناميكي. يمكن التعبير عن مجال هول بالعلاقة التالية [111,112]:

$$E_H = -\frac{1}{n_e} I_x B_z \qquad \text{..... (25-2)}$$

حيث ان:

n: تركيز الإلكترونات. e: شحنة الإلكترون.

I_X: التيار المار بالشريحة.

B_Z: شدة المجال المغناطيسي.

وتوضح المعادلة (2-26) أن التيار المار بالشريحة (I_X) وشدة المجال المغناطيسي (B_Z) يتناسبان طردياً مع مجال هول في أشباه الموصلات السالبة. يعرف ثابت التناسب بمعامل هول (R_H)، ويُعبر عنه بالعلاقة التالية [112]:

$$R_H = -\frac{1}{n_e} = \frac{V_H \cdot t}{I_x \cdot B_z} \qquad \text{..... (26-2)}$$

حيث:

R_H: معامل هول.

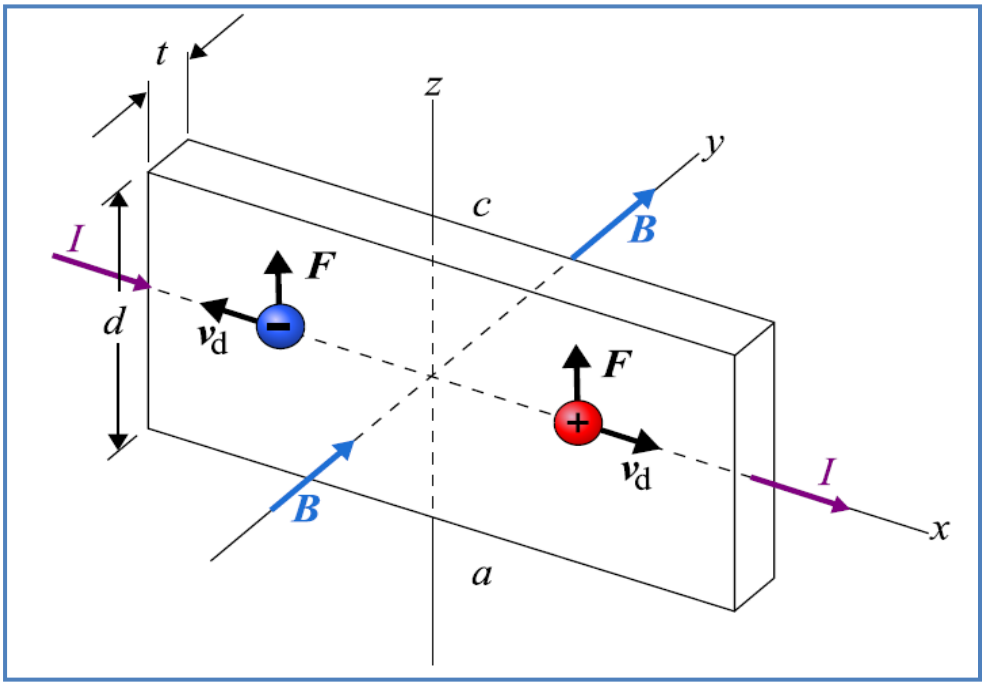
t: سمك الشريحة.

V_H: جهد هول.

I_X: التيار المار بالشريحة.

تمكننا قيمة واشارة معامل هول (R_H) من تحديد نوع وكثافة الشحنة المساهمة في التوصيل، حيث تكون الشحنة سالبة لأشباه الموصلات من النوع السالب (n-type) وموجبة لأشباه الموصلات من النوع الموجب (p-type). بعد حساب قيمة التوصيلية الكهربائية (σ)، يمكن حساب قيمة تحركية هول (μ_H) (Hall Mobility) التي تمثل تحركية حاملات الشحنة الغالبة في المادة ويمكن حسابها من العلاقة الاتية [113]:

$$\mu_H = |R_H|\sigma \quad \text{..... (27-2)}$$



الشكل (2-13) مخطط توضيحي لظاهرة تأثير هول [113].

(15-2) معاملات الكاشف: (Parameters of Detector)

تستخدم عدة معلمات أساسية لتعريف خصائص اداء الكاشف الضوئي. تعتبر هذه المعلمات بمثابة ارقام جودة (Figure of Merit) للكاشف. وتستخدم للمقارنة بين الكواشف الضوئية المختلفة، وكذلك لتحديد مدى ملائمة كاشف ضوئي معين لتطبيق محدد.

(1-15-2) الكفاءة الكمية: (Quantum Efficiency)

تعد قابلية امتصاص الضوء من الخصائص الشائعة لكل كاشف، تعرف الكفاءة الكمية (η) بأنها احتمالية توليد حامل شحنة في كاشف ضوئي لكل فوتون يسقط عليه. يمكن تعريفها ايضاً كنسبة

مئوية لعدد حاملات الشحنة المولدة ضوئياً (N) (سواء كانت الكترونات ضوئية أو أزواج الكترون – فجوة) التي تسهم فعلياً في التيار الكهروضوئي الى عدد الفوتونات الساقطة (S). يمكن التعبير عن الكفاءة الكمية بالمعادلة التالية:

$$\eta = N/S \quad \text{..... (28-2)}$$

كما يمكن التعبير عنها بدلالة القدرة البصرية (P_S) والتيار الضوئي (I_{ph}):

$$\eta = \frac{I_{Ph}/q}{P_S/h\upsilon} \quad \text{..... (29-2)}$$

حيث:

I_{ph}: التيار المتولد ضوئياً بواسطة امتصاص القدرة البصرية الساقطة P_o عند الطول الموجي λ.

q: شحنة الالكترون.

يمكن ايضاً حساب الكفاءة الكمية عملياً بدلالة الطول الموجي والاستجابية الطيفية.

$$\eta(\lambda) = \frac{R(\lambda)hc}{q\lambda} \quad \text{..... (30-2)}$$

حيث: $R(\lambda)$: الاستجابة الطيفية.

h: ثابت بلانك ، c: سرعة الضوء.

q: شحنة الالكترون

(λ): الطول الموجي للشعاع الساقط.

إن الكفاءة الكمية للكاشف الضوئي هي دالة للطول الموجي للفوتونات الساقطة، واعتمادية الكفاءة الكمية على الطول الموجي لا تظهر فقط من الاعتمادية على التردد υ في العلاقة (2-29) ولكن من اعتمادية النسبة I_{ph}/P_s على الطول الموجي والتي تعرف باستجابية الكاشف الضوئي [109].

(2-15-2) الاستجابية الطيفية (R): (Spectral Responsivity)

تعد الاستجابية الطيفية (R) معلماً مهماً للكاشف الضوئي، إذ تسمح بتحديد إشارة الإخراج المتاحة للكاشف عند وجود إشارة بصرية معطاة. تعرف استجابية الكاشف الضوئي بانها نسبة إشارة

تيار أو فولتية الإخراج إلى قدرة إشارة الدخل البصرية. بالنسبة للكاشف الضوئي الذي يمتلك إشارة تيار أو فولتية إخراج، تكون الاستجابية هي:

$$R_\lambda = V_{ph}/P_{in} \quad \text{او} \quad R_\lambda = I_{ph}/P_{in} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (31\text{-}2)$$

حيث:

I_{ph} و V_{ph}: التيار والفولتية الناتجة عن الإضاءة.

P_{in}: قدرة الاشعة الداخلة.

عادةً ما توصف الاستجابة الطيفية للكاشف الضوئي كدالة للطول الموجي $R(\lambda)$ بالاستجابية الطيفية. فضلاً عن أن الاستجابية للكواشف الضوئية هي ايضاً دالة لتردد الإشارة υ، واعتماديتها على التردد $R\upsilon$ تصف استجابية ترددية للكاشف [114].

(3-15-2) الكشفية النوعية (D*) (Specific Detectivity)

تعرف الكشفية (Detectivity) بأنها اقل قدرة يستطيع أن يتحسسها الكاشف، والكشفية تمثل مقلوب قوة الضوضاء المكافئة (NEP) (Noise Equivalent Power) وتعطى بالعلاقة:

$$D_\lambda = 1/NEP \qquad (32\text{-}2)$$

حيث:

NEP: الحد الأدنى من القدرة الضوئية التي يمكن للمتحسس الضوئي اكتشافها.

ونظراً لأن NEP تعتمد على مساحة الكاشف، فقد تم تعريف مصطلح الكشفية كمقياس أداء يعكس الخصائص الجوهرية للكاشف بدلالة حجمه الفعلي.

أما الكشفية النوعية التي يرمز لها بالرمز (D*) فتعطى بالعلاقة:

$$D^* = 1/\ NEP\ (A.\ \Delta f)^{1/2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (33\text{-}2)$$

حيث:

A: مساحة الكاشف

Δf: عرض حزمة الضوضاء

كما يمكن التعبير عن الكشفية النوعية بدلالة الكفاءة الكمية بالعلاقة:

$$D^* = \frac{\eta_\lambda}{2hC}\left[\frac{qA}{Is}\right] \quad \text{..... (34-2)}$$

حيث:

I_s: تيار الاشباع.

وكذلك يمكن التعبير عن الكشفية النوعية بدلالة الاستجابية الطيفية والطول الموجي بالعلاقة :

$$D^* = R_\lambda \left(\frac{A \cdot \Delta f}{In}\right)^{1/2} \quad \text{..... (35-2)}$$

حيث:

I_n: تمثل تيار الضوضاء ويمكن حسابها من خلال العلاقة:

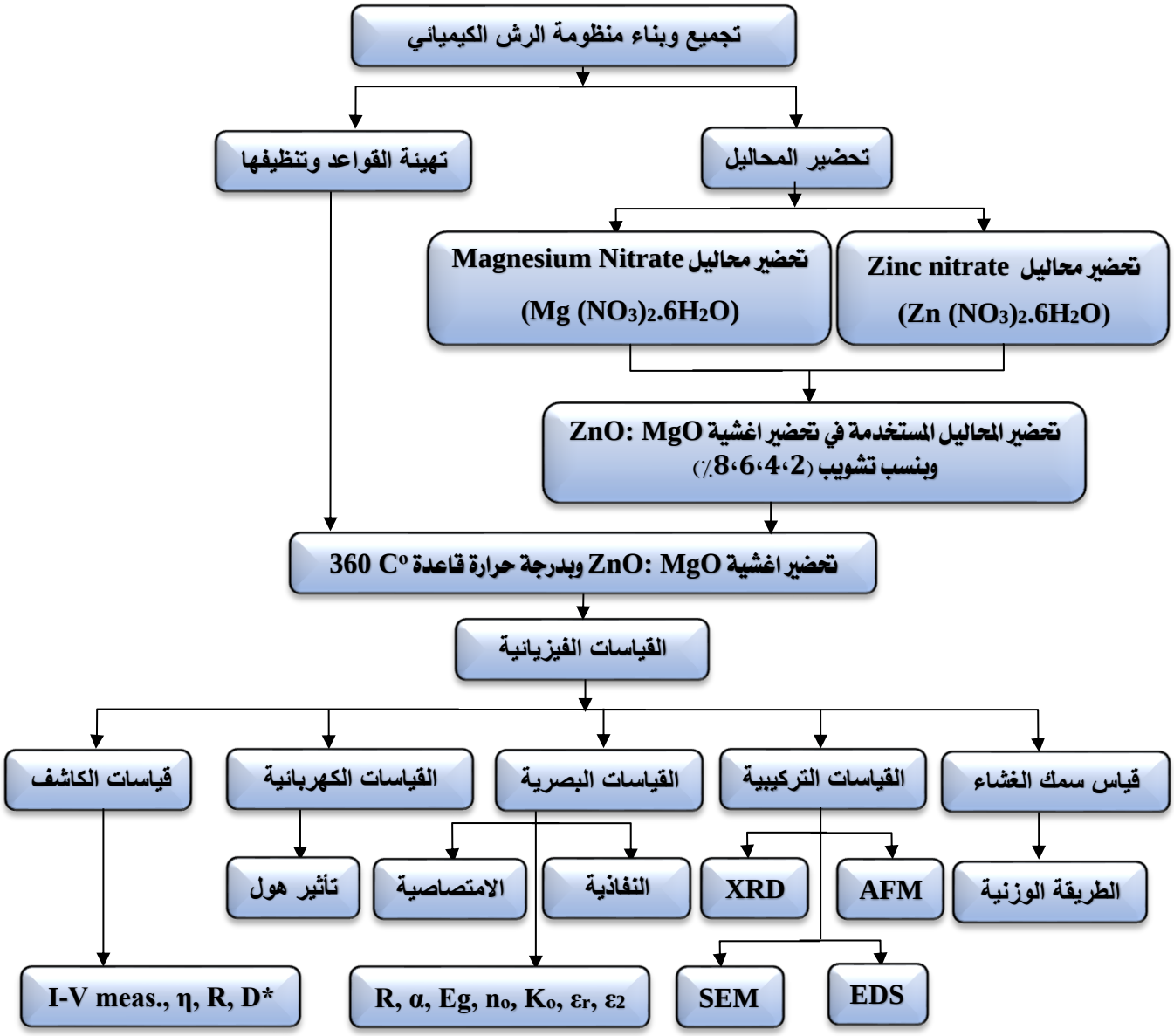
$$I_n = \sqrt{2qI_d\Delta f} \quad \text{..... [36-2]}$$

حيث:

I_d: تمثل تيار الظلام [72].

(1-3) المقدمة (Introduction)

يتناول هذا الفصل شرحاً مفصلاً للجانب العملي المتبع في هذا البحث، بدءاً من تجميع وبناء منظومة الرش الكيميائي الحراري ووصف مكوناتها الأساسية، كما يتضمن وصفاً عاماً للأجهزة والمواد الكيميائية المستخدمة في العمل وطريقة تحضير أغشية أوكسيد الزنك (ZnO) سواء غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) بنسب حجمية مختلفة. تضمن كذلك طريقة تحضير القواعد والمحاليل المستخدمة في عملية التحضير والعوامل المؤثرة للحصول على اغشية متجانسة وعالية الجودة. يقدم هذا الفصل ايضاً وصفاً دقيقاً للأجهزة المستخدمة في فحص وتشخيص الاغشية المحضرة وتحديد طبيعتها وخصائصها، فضلاً عن تفاصيل القياسات التي أجريت عليها. ويوضح الشكل (1-3) مخططاً للخطوات المنهجية المتبعة في الجانب العملي لهذا البحث.

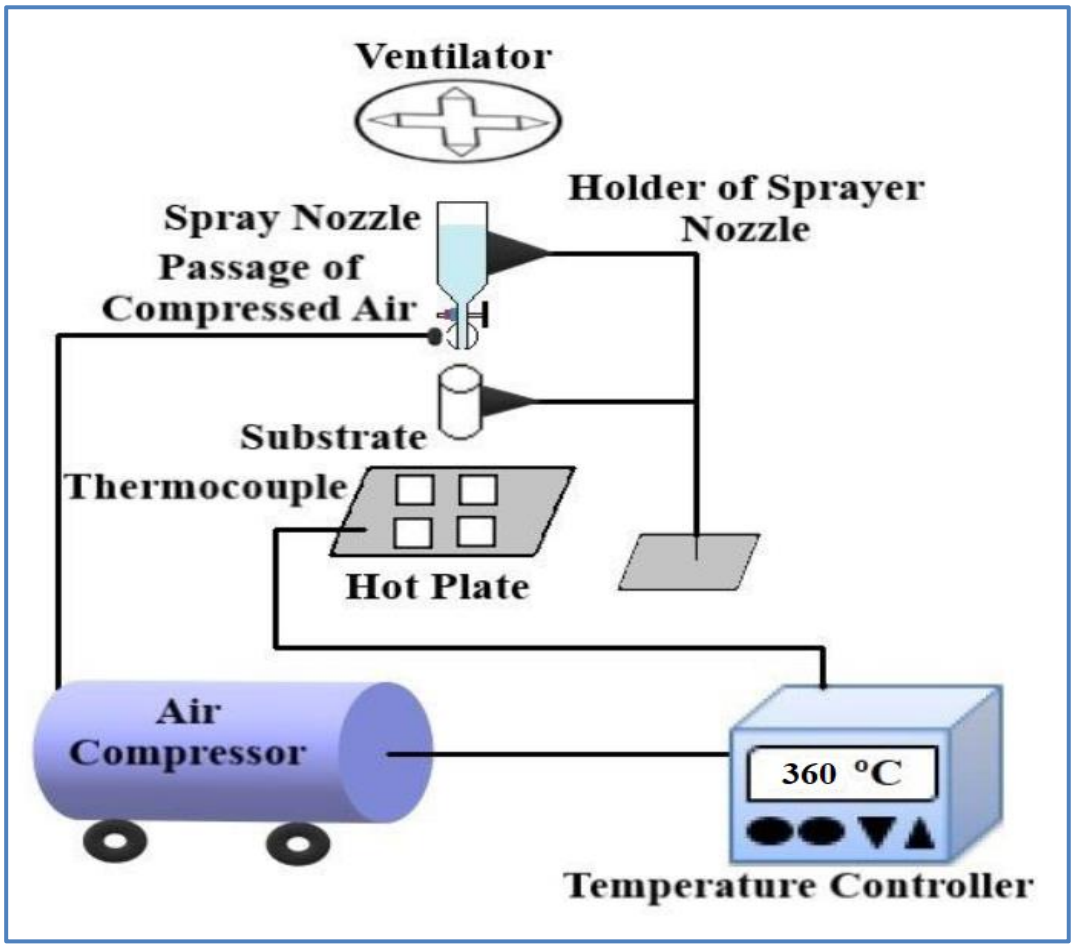


الشكل (1-3) الخطوات العملية المتبعة في الجزء العملي.

(2-3) منظومة الرش الكيميائي الحراري:

(Chemical Spray Pyrolysis System)

تعد تقنية ترسيب الاغشية الرقيقة بالرش الكيميائي الحراري (CSP) إحدى الطرائق الفعالة والمهمة في إنتاج أغشية ذات خصائص ومواصفات جيدة. تتميز هذه التقنية ببساطة مكوناتها، حيث تتألف منظومة الرش الكيميائي الحراري من عدة أجزاء صمم وصنع بعضها محلياً، وكما يوضح الشكل (3-2):

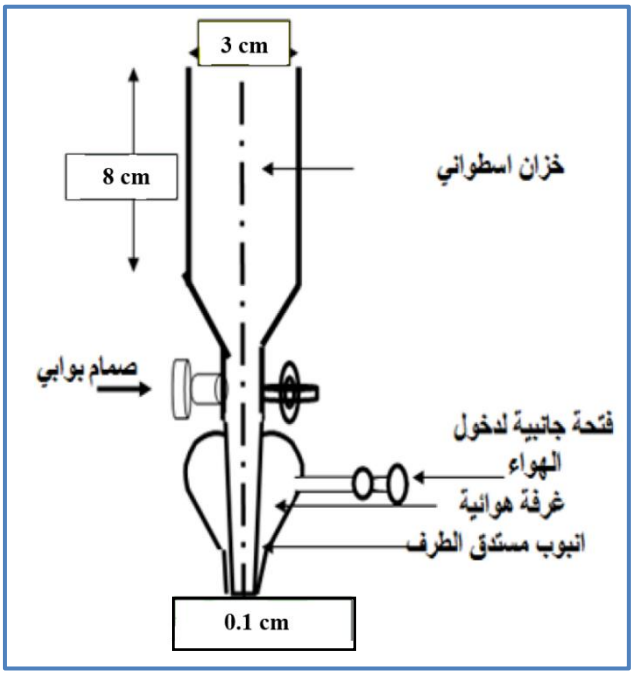


الشكل (3-2) مخطط لمنظومة الرش الكيميائي الحراري [76].

1- جهاز الرش: (Sprayer device (Nozzle))

يعد جهاز الرش (المرذاذ) المكون الأهم في منظومة الرش الكيميائي الحراري، إذ تم تصنيعه محلياً من الزجاج الاعتيادي. يضم الجهاز خزاناً لوضع المحلول المراد ترذيذه، بسعة تقديرية حوالي (100 ml). الخزان مفتوح بفتحة علوية بقطر (3 cm) وطوله (8 cm) تقريباً ،

يكون الجهاز مزوداً بصمام للتحكم في كمية المحلول النازل الى الانبوبة الشعرية ، التي يبلغ قطرها (1 mm) وطولها حوالي (6 cm) وتتصل هذه الانبوبة بأسفل الخزان، تحاط الأنبوبة الشعرية بغرفة زجاجية مخروطية الشكل ومنتفخة، هذه الغرفة مغلقة من الأعلى حيث تتصل بالأنبوبة الشعرية ومفتوحة من الأسفل، بحيث تحيط الفتحة السفلية للغرفة بفتحة الانبوبة الشعرية و بالمستوى نفسه، تزود هذه الغرفة بفتحة جانبية مخصصة لدخول الهواء المضغوط، يعمل الهواء على تخلخل الضغط داخل الغرفة الزجاجية ثم يخرج من الفتحة السفلية التي تحيط بجوانب فتحة الأنبوبة الشعرية. فيمتزج المحلول الخارج مع الهواء المضغوط لينتج عنه رذاذ على هيئة مخروط يكون رأسه عند الانبوبة الشعرية وقاعدته تتجه نحو الأسفل باتجاه المسخن الذي ترسيب عليه الاغشية، ويبلغ الطول الكلي للمرذاذ حوالي (20 cm). يوضح الشكل (3-3) تفاصيل جهاز الرش. ومن الجوانب المهمة التي يجب مراعاتها عند تصميم جهاز الرش لضمان كفاءته ودقته، التأكد من أن تكون نهاية الأنبوب الشعري في مركز فتحة الغرفة الهوائية وأن تكون المسافة الفاصلة بينهما لا تتجاوز (0.1cm) من جميع الجهات، كذلك ان يكون السطح الداخلي للأنبوب الشعري خالياً من أي خدوش او تكسرات لضمان تدفق سلس وموحد للمحلول.



الشكل (3-3) مخطط توضيحي لجهاز الرش

2- حامل جهاز الرش : (Holder of Sprayer Nozzle)

لضمان دقة عملية الترسيب، يثبت جهاز الرش على حامل معدني مزود بمشبك تثبيت يتيح تعديل موقع الجهاز في مختلف الاتجاهات. يتيح هذا المشبك تعديل موضع الجهاز بدقة، مما يضمن

التحكم الأمثل في ارتفاع فوهة جهاز الرش بالنسبة لسطح المسخن الكهربائي الواقع أسفله. كما يمكن ضبط وضعية جهاز الرش بحيث تكون فوهته السفلية المسؤولة عن خروج المحلول متعامدة تماماً مع سطح القاعدة المراد ترسيب الغشاء الرقيق عليها. يثبت دورق زجاجي حراري على الحامل أسفل جهاز الرش مباشرة لجمع أي سائل فائض أو متساقط خلال فترة الانتظار أو المعالجة.

3- المسخن الكهربائي: (Electrical Heater)

لتحقيق درجة الحرارة المطلوبة للقاعدة اثناء عملية ترسيب الغشاء الرقيق، يستخدم مسخن كهربائي (Hot plate). وهو عبارة عن صفيحة مستوية (مصنوعة محلياً) من مادة الفولاذ وقد ربطت بوحدة تحكم الكترونية دقيقة تتيح التحكم في درجة حرارة القاعدة وتثبيتها عند القيمة المحددة.

4- الثرموميتر والمزدوج الحراري: (Thermometer and Thermocouple)

لمراقبة وقياس درجة حرارة القواعد (Substrate) الموضوعة على المسخن الكهربائي بدقة، يستعمل منظم حراري الكتروني حساس (Digital Thermometer) يتحكم بدرجة حرارة الترسيب المطلوبة ويثبتها بدقة عالية. يتكون المنظم من مزدوج حراري (Thermocouple) يثبت بتماس مباشر مع سطح المسخن الكهربائي ويرتبط بمسيطر رقمي (Digital controller)، يعمل بمدى درجات حرارة ما بين (C^o 1100-50) يضمن تثبيت درجة الحرارة.

5- مضخة الهواء: (Air Pump (Compressor))

تستعمل مضخة الهواء لدفع الهواء المضغوط داخل الغرفة الزجاجية في جهاز الرش. تحتوي المضخة على منظم يسمح بالتحكم في ضغط الهواء لضمان نزول المحلول على القاعدة بشكل رذاذ دقيق جداً وبسرعة مناسبة. يعد التحكم في سرعة الرذاذ امراً بالغ الأهمية لتجنب أي انخفاض مفاجئ في درجة حرارة القاعدة الذي قد يؤدي الى حدوث تشوهات في الغشاء الرقيق المحضر. استعملت مضخة من نوع (Ac25508) ومجهزة من شركة (INGCO).

(3-3) تحضير الاغشية الرقيقة: (Preparation of Thin Film)

(3-3-1) تهيأة القواعد الزجاجية: (Glass Substrates cleaning)

تعد جودة القواعد المستخدمة ونظافتها من الأمور المهمة التي تؤثر بشكل مباشر في جودة الاغشية الرقيقة المحضرة ومدى تجانسها، لذلك تمر القواعد بعدة مراحل لتهيئتها. استعمل لتحضير الاغشية الرقيقة قواعد من شرائح زجاجية (Microscope slides) من منشأ الماني انتاج شركة

(ISOLAB) بأبعاد ($2.5\times7.5\ cm^2$) وبسمك (0.1 cm) تقريباً. جرى إعداد هذه القواعد وفق خطوات متسلسلة ومترابطة مع بعضها بعضاً وهي:

أولاً - تقطيع الشراح الزجاجية الى مربعات صغيرة وبأبعاد تقريبية ($2.5 \times 2.5\ cm^2$).

ثانياً - تغسل القواعد جيداً بالماء الجاري لإزالة أي عوالق ناتجة من العوامل الخارجية ثم تشطف بالماء المقطر.

ثالثاً - تغمر القواعد في وعاء زجاجي (بيكر) يحتوي على الاسيتون بدرجة نقاوة (99.99%) لمدة نصف ساعة لضمان التخلص من أية آثار دهنية او عوالق متبقية على سطح القواعد، بعد ذلك تغسل القواعد مرة اخرى جيدا بالماء المقطر.

رابعاً - تجفف القواعد باستعمال قطعة قماش مخصصة لتنظيف العدسات البصرية التي لا تترك أي آثار أو شوائب على سطح القواعد الزجاجية.

خامساً - تحفظ القواعد النظيفة والجاهزة لعملية الترسيب في حافظات مناسبة، بعد حساب كتلة كل منها وتسجيلها على الحافظة الخاصة بها.

(2-3-3) تحضير المحاليل الكيميائية: (Preparation of Chemical Solutions)

(1-2-3-3) تحضير محلول نترات الزنك: (Preparation Zinc Nitrate Solution)

لتحضير المحلول اللازم لتصنيع أغشية أوكسيد الزنك (ZnO) الرقيقة، استعملت مادة نترات الزنك المائية ذات اللون الأبيض التي رمزها الكيميائي ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) ووزنها الجزيئي (297.49) وبنقاوة (98%) والمجهزة من شركة (LOBA CHEMIE PVT.LTD.) الهندية، حضر محلول نترات الزنك بتركيز (0.1M) بإذابة (2.9749g) من المادة في (100 ml) من الماء المقطر، تم تطبيق العلاقة (3-1) للحصول على الوزن المراد اذابته [115].

$$M = \frac{W_t}{M_{Wt}} \times \frac{1000}{V} \quad \text{..... (1-3)}$$

ولضمان الذوبان التام للمحلول استعمل خلاطاً مغناطيسياً (Magnetic Stirrer) لمدة (30) دقيقة وبوجود الحرارة كعامل مساعد، بعدها تم ترشيح المحلول بواسطة ورق الترشيح للتأكد من الحصول على محلول رائق ومتجانس. بعد رش الخليط على القواعد الساخنة وبفعل عملية التحلل الحراري، نحصل على غشاء رقيق من أوكسيد الزنك (ZnO). وفقاً للمعادلة الكيميائية الاتية [116]:

$$2Zn(NO_3)_2 \xrightarrow{\Theta} 2\,ZnO + 2\,NO_2\uparrow + O_2\uparrow$$

(2-2-3-3) تحضير محلول نترات المغنيسيوم:

(Preparation of Magnesium Nitrate Solution)

تم تحضير محلول نترات المغنيسيوم المستخدم في تشويب أغشية أوكسيد الزنك باستعمال نترات المغنيسيوم المائية ورمزها الكيميائي ($Mg(NO_3)_2.6H_2O$) وهي مادة على شكل مسحوق ابيض ووزنها الجزيئي (256.41) وبنقاوة (98%) والمجهز من شركة (LOBA CHEMIE PVT.LTD.) الهندية. ولإيجاد كتلة مادة نترات المغنيسيوم الداخلة في التفاعل نستخدم المعادلة (3-1). حضّر محلول نترات المغنيسيوم بتركيز (0.1M) بإذابة (2.5641g) من المادة في (100 ml) من الماء المقطر، ولضمان الذوبان التام للمحلول أُستعمل خلاطاً مغناطيسياً (Magnetic Stirrer) لمدة (30) دقيقة بوجود الحرارة كعامل مساعد، يرشح المحلول النهائي بورقة ترشيح لنحصل على محلول خالي من الشوائب.

(3-2-3-3) تحضير المحلول المستخدم في ترسيب اغشية (ZnO: MgO):

Preparation of the Solution used in the Deposition of (ZnO: MgO) Films

تم اعداد المحلول المستخدم لتحضير اغشية (ZnO: MgO) بإضافة محلول نترات المغنيسيوم الى محلول نترات الزنك بنسب حجمية محددة كما في الجدول (3-1). تم خلط المزيج الناتج باستعمال الخلاط المغناطيسي لضمان تجانس المحلول.

جدول (3-1) النسب الحجمية للمحلول المستخدم في تحضير اغشية (ZnO: MgO)

Magnesium Nitrate ($Mg(NO_3)_2.6H_2O$) (ml)	Zinc nitrate ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) (ml)	Percentage%
0	100	Pure
2	98	2%
4	96	4%
6	94	6%
8	92	8%

(4-3) العوامل المؤثرة في تحضير الاغشية الرقيقة:

(Factors Affecting Thin Films Preparation)

تتأثر عملية تحضير الأغشية الرقيقة بواسطة منظومة الرش الكيميائي الحراري بعدة عوامل ينبغي مراعاتها لضمان جودة الأغشية المحضرة وخواصها. من اهم هذه العوامل:

1- **درجة حرارة القاعدة (Substrate Temperature):** تعدّ درجة حرارة القاعدة من أهم العوامل التي تؤثر بشكل كبير في تجانس وتماسك الأغشية الرقيقة المحضرة والتصاقها بالقاعدة، لذلك من الضروري عند تحضير الأغشية الحفاظ على درجة الحرارة ثابتة تقريباً طول مدة الترسيب من دون تغيير. أي تغيير في درجة الحرارة أثناء عملية الترسيب قد يؤدي الى تشوه الغشاء وعدم اكتمال التفاعل الكيميائي بين المواد المكونة للغشاء. في هذا البحث تم انتخاب درجة الحرارة ($360\ C^o$) لترسيب الاغشية.

2- **معدل الرش (Spraying Rate):** يؤثر معدل الرش بشكل مباشر على تجانس الغشاء الرقيق المتكون، لذلك يجب ان يكون معدل الرش ثابتاً طول مدة عملية الرش. أي زيادة أو نقصان في هذا المعدل قد يؤدي الى تشوه الغشاء. يتم التحكم في معدل الرش باستعمال صمام خاص موجود في جهاز الرش، ويحسب معدل الرش عن طريق قياس معدل تدفق المحلول في الدقيقة الواحدة، وكان معدل الرش في هذا البحث هو ($7\ ml/min$).

3- **زمن الرش (Spraying Time):** يؤثر زمن الرش على التجانس والنمو البلوري للمادة المترسبة، إذ لا يمكن رش المادة دفعة واحدة على القواعد لتجنب برودتها وتشقق الغشاء الرقيق وانكساره، لهذا تم تحديد مدة الرش في هذه الدراسة بـِ ($10\ sec$) يليها توقف عن الرش لمدة ($2\ min$)، تكرر هذه العملية عدة مرات وبالوتيرة ذاتها إلى أن نحصل على سمك الغشاء المطلوب.

4- **المسافة العمودية (Vertical Distance):** تعرف المسافة العمودية بأنها المسافة بين نهاية الانبوبة الشعرية لجهاز الرش وسطح القاعدة الزجاجية التي عليها ترسب الاغشية الرقيقة. إن تثبيت المسافة العمودية على ارتفاع مناسب يضمن عدم تجمع رذاذ المحلول في بقعة واحدة أو تطايره بعيداً عن القاعدة الزجاجية، مما يؤدي الى تكون غشاء متجانس وملتصق بقوة بالقاعدة الزجاجية ولا يوجد تباين في سمك الغشاء. في هذه البحث، وجد ان أفضل مسافة عمودية أدت لتكوّن غشاء متجانس وذو مواصفات جيدة جدا هي ($29\ cm$) تقريباً.

5- **ضغط الهواء (Air Pressure):** يتم تثبيت ضغط الهواء في جهاز الرش لضمان خروج المحلول من الانبوبة الشعرية على شكل رذاذ دقيق اثناء تحضير الاغشية الرقيقة. هذا الإجراء

يمنع تبريد القاعدة الزجاجية وتكسرها، ويساهم في الحصول على غشاء متجانس للمادة المحضرة. في هذه الدراسة، استخدم ضغط هواء بلغ (1.5 bar).

(5-3) ترسيب الاغشية الرقيقة: (Thin Film Deposition)

تعد عملية الترسيب خطوة أساسية في تحضير الأغشية الرقيقة. بعد الانتهاء من مرحلة تهيئة القواعد لعملية الترسيب، يتم وضعها على سطح المسخن الكهربائي (Electrical Heater)، بعد مراعاة ضمان تجانس درجة حرارة سطح المسخن، تترك القواعد لفترة زمنية مناسبة تتراوح بين (15-20min) قبل بدء عملية الترسيب لضمان وصول سطح القواعد الى درجة الحرارة المناسبة لعملية الترسيب. كما يتم تحديد وقياس المسافة الفاصلة بين سطح الركيزة وفوهه جهاز الرش لضمان جودة الترسيب. عند وصول درجة الحرارة الى درجة الحرارة المطلوبة (360 C^o) والتي تقرا من خلال قراءة العداد الرقمي والمزود بالمزدوج الحراري، تبدأ عملية رش المحلول المحضر، من خلال فتح الصمام الموجود في جهاز الرش مع تحديد معدل انسياب المحلول بـ (7 ml/min) وضغط هواء (1.5 bar). يعد التحكم الدقيق في تدفق المحلول واتجاهه عمودياً امراً مهماً لضمان جودة الغشاء المحضر. بعد فتح الصمام لمدة (10 sec) نغلقه، وتتبع ذلك فترة انتظار لمدة (2 min) للسماح بإتمام عملية النمو البلوري على القواعد وكذلك عودة درجة حرارة المسخن الى درجة حرارة الترسيب. تكرر هذه العملية عدة مرات حتى يتم الوصول الى السمك المطلوب للغشاء. بعد الانتهاء من عملية الرش، تترك الأغشية المرسبة على سطح المسخن بعد اطفاءه دون رفعها حتى تبرد لدرجة حرارة الغرفة. تسهم هذه الخطوة في ضمان اكتمال التفاعلات الكيميائية وعملية النماء البلوري وتجنب تكسر الغشاء الرقيق بسبب التبريد المفاجئ.

(6-3) قياس سمك الاغشية الرقيقة:

(Thin Film Thickness Measurement)

يعد سمك الغشاء من العوامل المهمة عند الحديث عن دراسة التطبيقات والخواص الفيزيائية للأغشية الرقيقة. توجد عدة طرائق لقياس سمك الاغشية، ومنها الطريقة الوزنية (Weight Method) وهي الطريقة المتبعة في هذا البحث. تم قياس كتلة القواعد الزجاجية النظيفة قبل عملية الترسيب (w_1) باستخدام ميزان حساس من شركة (Kern) الماني المنشأ بحساسية (10^{-4}g)، بعد عملية الترسيب، يتم إعادة قياس كتلة القواعد الزجاجية بعد ترسيب

الاغشية الرقيقة عليها (w_2) يحسب الفرق في الكتلة (Δw) بين القياسين، ومن خلال العلاقة (2-3) يتم حساب سمك الغشاء. [112].

$$t = \frac{\Delta w}{\rho \cdot S} \quad \text{..... (2-3)}$$

حيث:

t: سمك الغشاء (cm).

Δw: الفرق بين كتلة الغشاء قبل وبعد عملية الترسيب (w_1-w_2 g).

ρ: كثافة مادة الغشاء (g/cm^3)

s: مساحة الغشاء (cm^2).

عند حساب سمك الغشاء، يجب مراعاة نسبة الشوائب وكثافتها، ففي حالة الاغشية المشوبة تمثل الكثافة الكلية (ρ_{total}) كثافة المواد المكونة للغشاء المشوب، والعلاقة الاتية تبين طريقة حساب الكثافة الكلية:

الكثافة الكلية (ρ_{total}) = [كثافة مادة (ZnO) × نسبتها في المحلول] + [كثافة مادة (MgO) × نسبتها في المحلول]

(7-3) فحص وتشخيص الاغشية المحضرة: (Thin Film Test)

(1-7-3) القياسات التركيبية : (Structural Measurements)

لتحديد طبيعة التركيب البلوري للأغشية الرقيقة المحضرة تصنف القياسات التركيبية الى الأنواع التالية:

(1-1-7-3) التشخيص بتقنية حيود الاشعة السينية (XRD):

(X-Ray Diffraction Measurements)

لتحديد الطبيعة البلورية للأغشية الرقيقة المحضرة، استخدمت تقنية حيود الاشعة السينية (X-Ray Diffraction)، تم فحص العينات باستعمال جهاز توليد الاشعة السينية وبالمواصفات التالية :

جدول (3-2) مواصفات جهاز حيود الاشعة السينية (XRD)

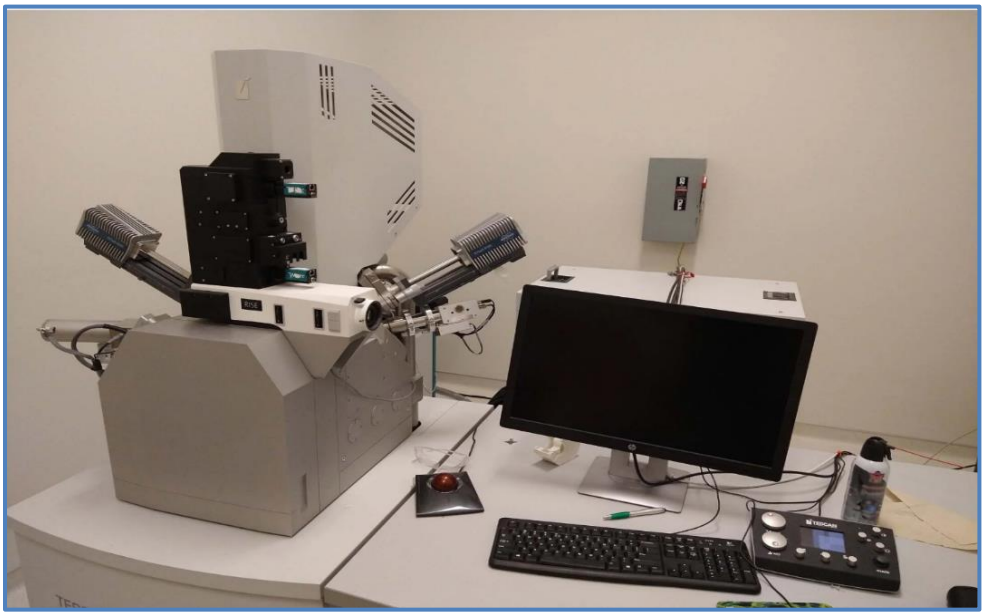
مواصفات الجهاز	
Type	PHILIPS, PW1730
Target	Cu-Ka
Wave Length	1.54060 A°
Voltage	40 Kv
Current	30 mA
Speed	3 deg/min
Range	10° – 80°

شكل (3-4) يبين صورة لجهاز (X- ray Diffraction)

(2-1-7-3) قياسات الاغشية بالمجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FESEM) :

(Filed Emission Scanning Electron Microscopy Measurements)

لغرض دراسة مورفولوجية السطح لجميع الاغشية المحضرة، استعمل جهاز المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM)، من نوع (TESCAN, MIRA3,Czechia). لمعرفة شكل الجسيمات وتجانسها بالإضافة الى الكشف عن مواقع العيوب المحتملة في التركيب البلوري، كما تم اجراء تحليلات التحلل الطيفي لطاقة الاشعة السينية المتشتتة (EDS) لتحديد التركيب الكيميائي للعناصر المكونة للأغشية المحضرة.



شكل (3-5) يبين صورة لجهاز (FE-SEM)

(3-1-7-3) فحوصات الاغشية بمجهر القوة الذرية (AFM):

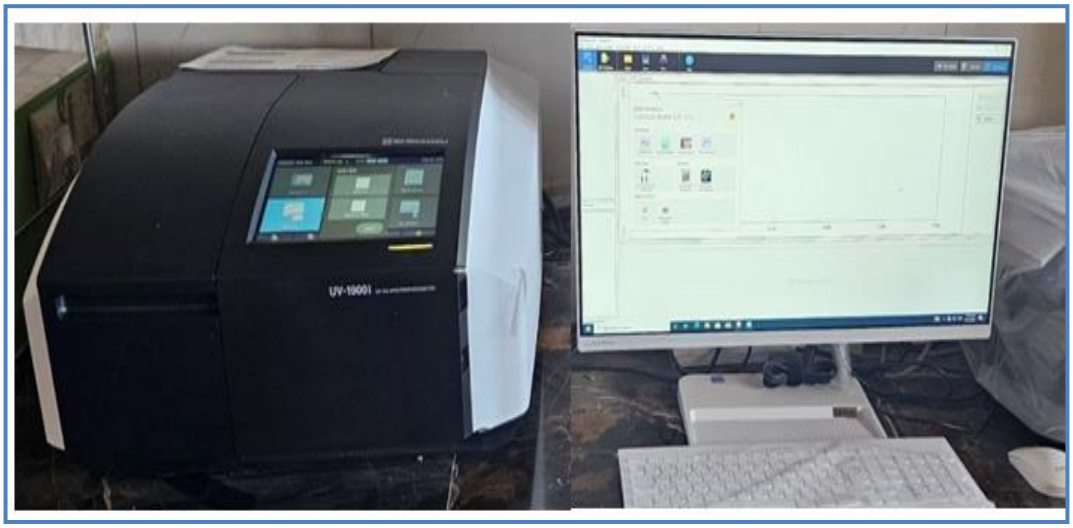
(Atomic Force Microscope Measurements)

يعد مجهر القوة الذرية (AFM) أداة أساسية لتحديد الطوبوغرافية السطحية للأغشية المحضرة، يتميز هذا الجهاز بقدرة تحليلية عالية ويوفر صوراً ثنائية وثلاثية الابعاد تمكن من تحديد توزيع الحبيبات واحجامها ومدى تجانسها ضمن الاغشية. كما يتيح مجهر القوة الذرية قياس معدل خشونة السطح (Average Roughness) وجذر متوسط المربع (RMS). والجهاز المستعمل في هذا البحث نوع (AFM workshop, TT-2 , USA).

شكل (3-6) يبين صورة مجهر القوى الذرية (AFM).

(2-7-3) القياسات البصرية: (Optical Measurements)

أجريت قياسات الخصائص البصرية الامتصاصية (Absorbance) والنفاذية (Transmittance) لجميع الاغشية المحضرة والمرسبة على القواعد الزجاجية. واستخدم في ذلك مطياف ثنائي الحزمة من نوع (UV-Visible) والمجهز من شركة (SHIMADZU) والمتوفر في مختبر كلية التربية الأساسية/جامعة ميسان. غطت القياسات نطاقاً من الاطوال الموجية امتد من (300-900 nm) وذلك بهدف تحديد العلاقة بين الخصائص البصرية والطول الموجي. شملت الدراسة أغشية أوكسيد الزنك (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) وبتراكيز حجمية مختلفة.



شكل (3-7) يبين صورة لجهاز (UV-Vis spectrophotometer).

(8-3) القياسات الكهربائية : (Electrical Measurements)

(1-8-3) تأثير هول : (Hall Effect)

لقياس الخصائص الكهربائية للأغشية الرقيقة المحضرة. تم استعمال منظومة من نوع (ECOPIA) وبلد المنشأ (South Korea) لقياس تأثير هول. تهدف هذه القياسات الى تحديد نوع توصيلية المادة فيما إذا كانت من النوع السالب (n-type) أو من النوع الموجب (p-type) ومعرفة تركيز حاملات الشحنة ومعامل هول (R_H) والتحركية (Mobility) والتوصيلية الكهربائية للمادة شبه الموصلة عند درجة حرارة الغرفة. أجريت القياسات اعتماداً على الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل (3-8) عند درجة حرارة الغرفة، اذ يوضع الغشاء بشكل عمودي امام مجال مغناطيسي ثابت (B_Z) شدته (5.53×10^{-5} Web/cm^2)، وربط قطبان من أقطاب الغشاء بمجهز قدرة مستمرة (D.C Power Supply) ووصل معهما مقياس للتيار (Ammeter) على التوالي، اما القطبان الاخران فربطا بطرفي مقياس للفولتية (Voltmeter). عند تغيير الفولتية المستمرة بزيادة ثابتة. يتم قراءة التيار المار عبر الغشاء (I) والذي يتزامن مع تغير في فولتية هول المتولدة (V_H) عبر الغشاء. ومن هذه القياسات، يمكن حساب معامل هول (R_H) من العلاقة (3-3) [117]:

$$R_H = \frac{V_H}{I} \times \frac{t}{B} \quad \text{..... (3-3)}$$

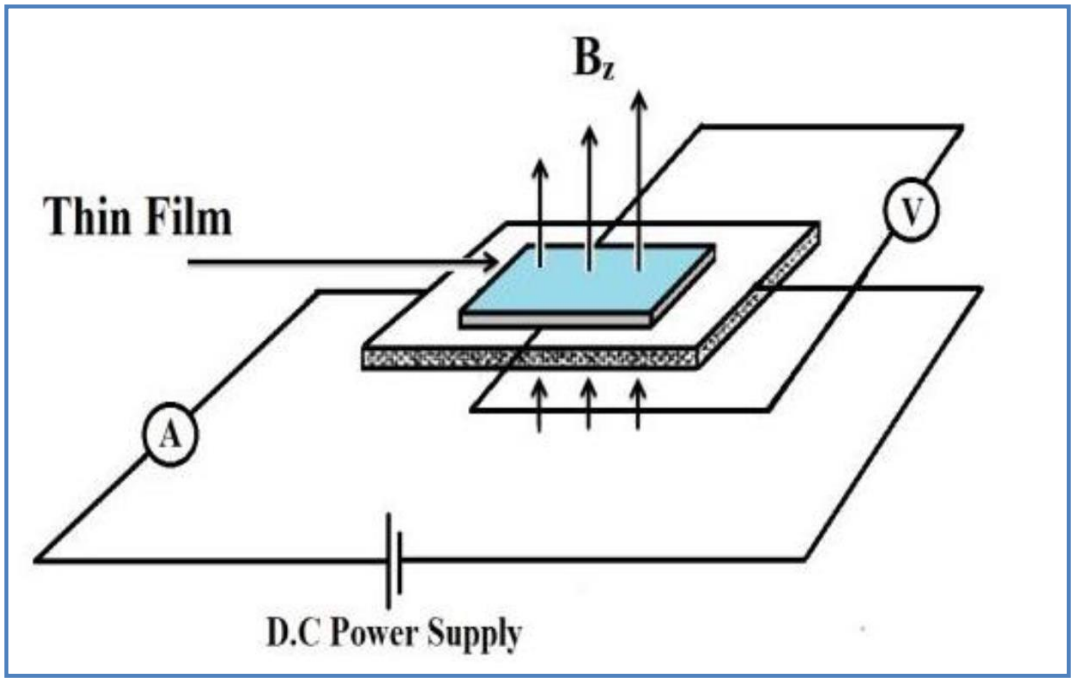
حيث: I: التيار المسلط خلال العينة.

V_H: فولتية هول المتولدة.

t: سمك الغشاء الرقيق.

B: المجال المغناطيسي المسلط على العينة.

تحدد إشارة معامل هول (R_H) نوع التوصيلية في المادة شبه الموصلة، فاذا كانت الإشارة سالبة فأن شبه الموصل من نوع n-type، اما إذا كانت الإشارة وموجبة فان شبه الموصل من نوع p-type.



شكل (3-8) مخطط توضيحي لدائرة قياس تأثير هول الكهربائية [117].

(9-3) توصيف الكاشف الضوئي : (Photodetector Description)

(1-9-3) الخصائص الكهربائية للكاشف الضوئي:

(The Electrical properties of Photodetector)

تم دراسة الخصائص الكهربائية للمتحسسات الضوئية المحضرة بترسيب أوكسيد الزنك غير المشوب والمشوب بنسب حجمية مختلفة من أوكسيد المغنسيوم على قواعد من السيلكون المسامي، شملت القياسات تحديد منحنيات تيار-جهد في (I-V) في حالتي الظلام والاضاءة، إضافة الى قياسات الاستجابية الطيفية (Spectral Responsivity) والكفاءة الكمية (Efficiency Quantum) والكشفية النوعية (Specific Detectivity).

(3-9-1-1) قياس تيار – جهد: (Current – Voltage (I-V) Measurement)

استعمل جهاز مكون من عدة أجزاء وهي:

(Keithly-616 digital electrometer, Tektronics CDM 250 multimeter and a dual Farnel LT30/2, 0 to 10V power supply).

لقياس تيار – جهد في الأغشية المحضرة، تم تسجيل التيار بالانحياز الامامي عند تطبيق فولتية موجبة على اقطاب الالمنيوم المتصلة والموجودة على قاعدة السيلكون المسامي. ويعطى عامل المثالية (The ideality factor) (n) بواسطة المعادلة التالية:

$$n = \frac{q}{k_B T}\frac{\Delta v}{Ln\frac{I}{I_B}} \quad \text{..... (4-3)}$$

حيث:

q: الشحنة ، ΔV: فولتية الانحياز الامامي.

K_B: ثابت بولتزمان.

I: تيار الانحياز الامامي. I_B: تيار الاشباع.

(3-9-1-2) الاستجابة الطيفية (R_λ): (Spectral Responsivity)

إجريت قياسات الاستجابة الطيفية لجميع الاغشية الرقيقة المحضرة باستعمال مطياف ضوئي ثنائي الشعاع من نوع (UIR – 210A) والذي يعمل ضمن مدى الاطوال الموجية (200-1000nm)، تم قياس الإشارات الناتجة بدقة باستخدام جهاز قياس رقمي متعدد (8010 DMM Fluke) وقد حددت الاستجابية الطيفية باستخدام المعادلة (2-31) .

(3-9-1-3) الكفاءة الكمية: (Quantum Efficiency)

يتم حساب الكفاءة الكمية كدالة للطول الموجي من خلال معرفة الاستجابة الطيفية وحسب العلاقة (2-30).

(3-9-1-4) الكشفية النوعية (D*): (Specific Detectivity)

تم قياس الكشفية النوعية باستخدام المعادلة (2-32) .

(1-4) المقدمة (Introduction)

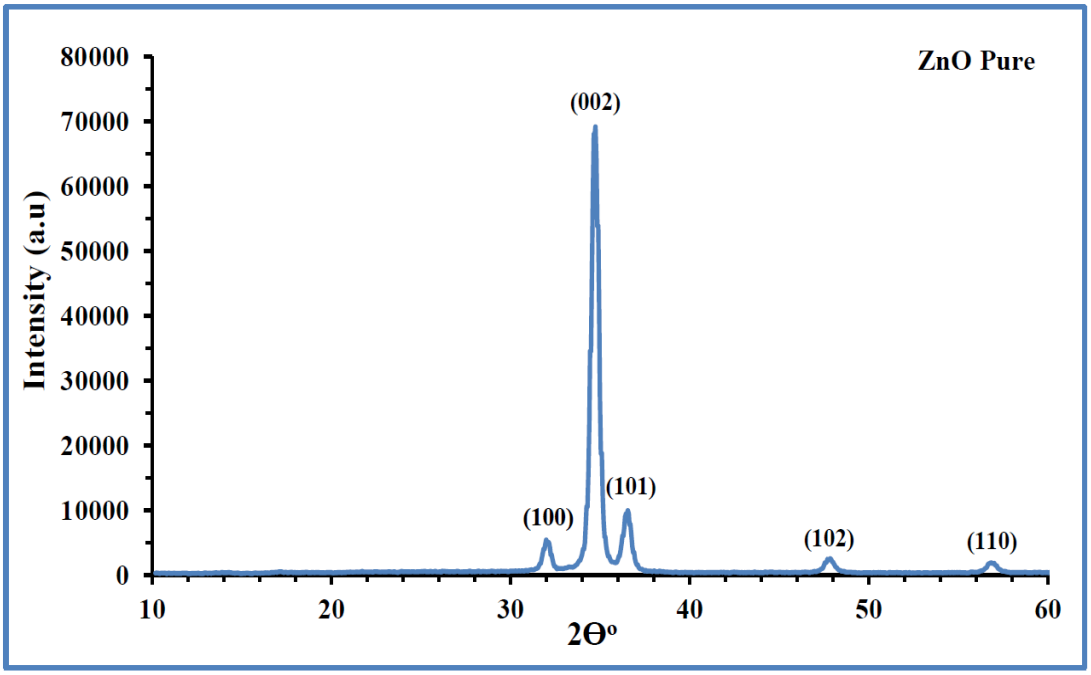
يتناول هذا الفصل عرض النتائج المستخلصة من دراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) سواء المشوبة او غير المشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) بنسب حجمية (2%,4%,6%,8%) التي حضرت بطريقة الرش الكيميائي الحراري عند درجة حرارة (360 C^o) و رسبت على قواعد من الزجاج والسيلكون المسامي. شملت الدراسة التحليل الشامل للخصائص التركيبية والمتضمنة تحليل حيود الاشعة السينية (XRD) واستخدامها في حساب المعلمات التركيبية الأساسية. كذلك تضمن عرضاً لنتائج فحوصات طوبوغرافية سطح الاغشية المحضرة باستخدام تقنيتي المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM) ومجهر القوة الذرية (AFM)، مما وفر رؤى تفصيلية حول مورفولوجيا السطح. كما استعرضت نتائج فحوصات الخصائص البصرية للأغشية التي تضمنت قياسات الامتصاصية، النفاذية، وحساب فجوة الطاقة البصرية فضلاً عن تحديد الثوابت البصرية المختلفة. وتم عرض نتائج فحوصات الخصائص الكهربائية بما في ذلك حساب تأثير هول (Hall Effect) وخصائص الكاشف الضوئي (Photodetector).

(2-4) الخصائص التركيبية: (Structural Properties)

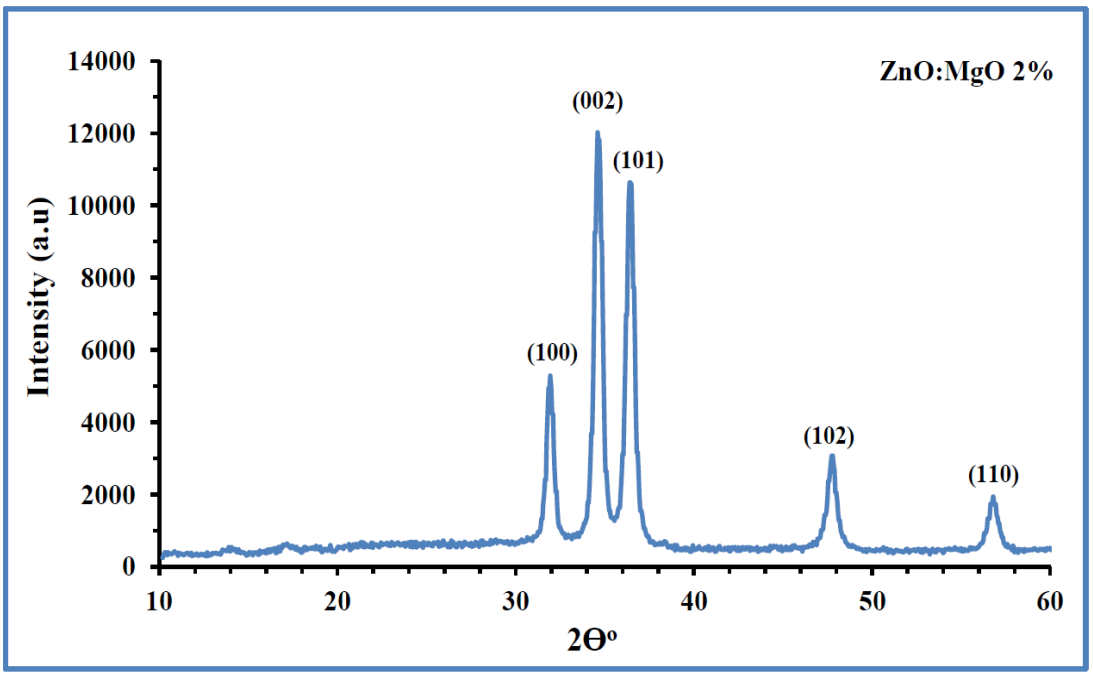
(1-2-4) نتائج فحص حيود الاشعة السينية: (Results of XRD)

اجري فحص حيود الاشعة السينية (XRD) لتحديد نوع التركيب البلوري (Crystalline Structure Type) وحجم البلورات (Crystallite Size) للأغشية المحضرة، أظهرت النتائج أن جميع الاغشية المحضرة (ZnO: MgO) والمشوبة بنسب التشويب (2%, 4%, 6% and 8%) ذات تركيب متعددة التبلور (Polycrystalline) ومن النوع السداسي المتراص (Hexagonal Wurtzite) عند المستويات البلورية (100) , (002) , (101) , (102) , (110) بحيث يتاح لها بأن تتداخل تداخلاً بناءً عند توفر شرط براغ وان الاتجاه السائد للنمو (002) وهذا ما يتوافق مع نتائج الابحاث المنشورة [118,119,120,121]. كما وجد ايضاً أن هذه النتائج متفقة الى حد كبير مع البطاقة الدولية القياسية (International Centre for Diffraction Data) ذات الرقم (ICDD Card no. 00-036-1451). توضح الاشكال (4-1 الى 4-5) ان شدة القمة (002) تقل بزيادة نسبة التشويب بالمغنيسيوم مقارنة بالغشاء غير المشوب على الرغم من بقاء حدتها، كذلك حدوث زيادة في قيم القمم الأخرى وأصبحت أكثر حدة وهذا يؤكد ان نسبة التبلور قد ازدادت، ولوحظ ان نسبة التشويب (4%) شدة القمة (002) فيها أكبر من بقية نسب التشويب الأخرى. إن الزيادة في

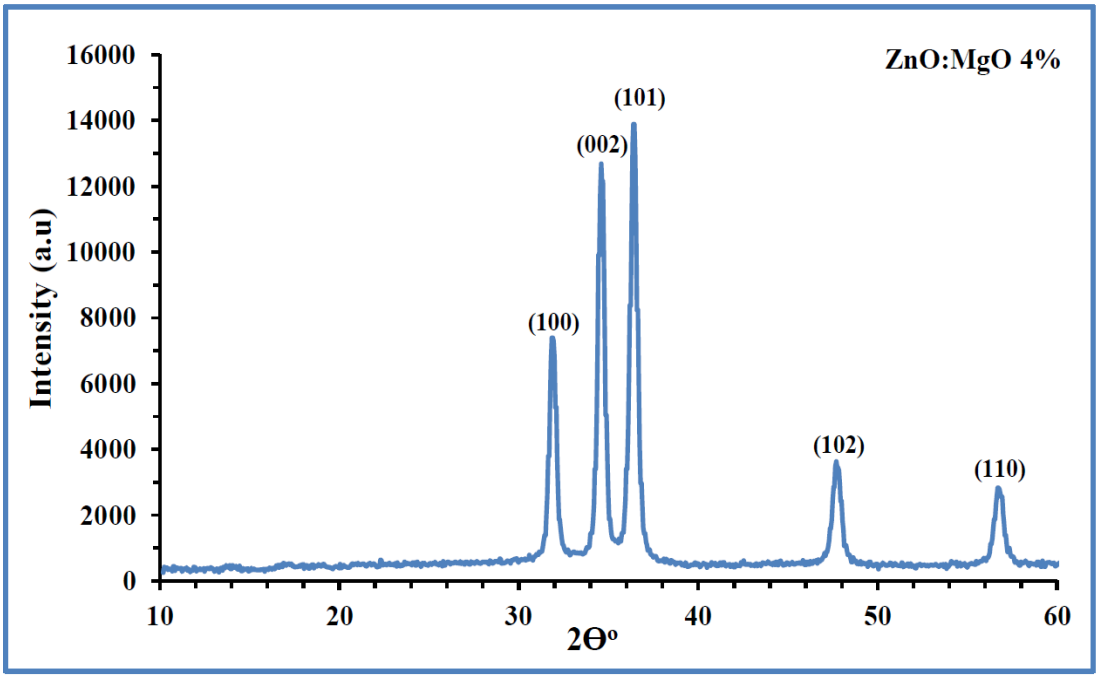
شدة بعض القمم يشير إلى أن إضافة المغنيسيوم يعمل على تحسين التبلور وتقليل العيوب البلورية ويعزز كذلك من عملية الانماء البلوري المنتظم داخل الشبيكة [119].



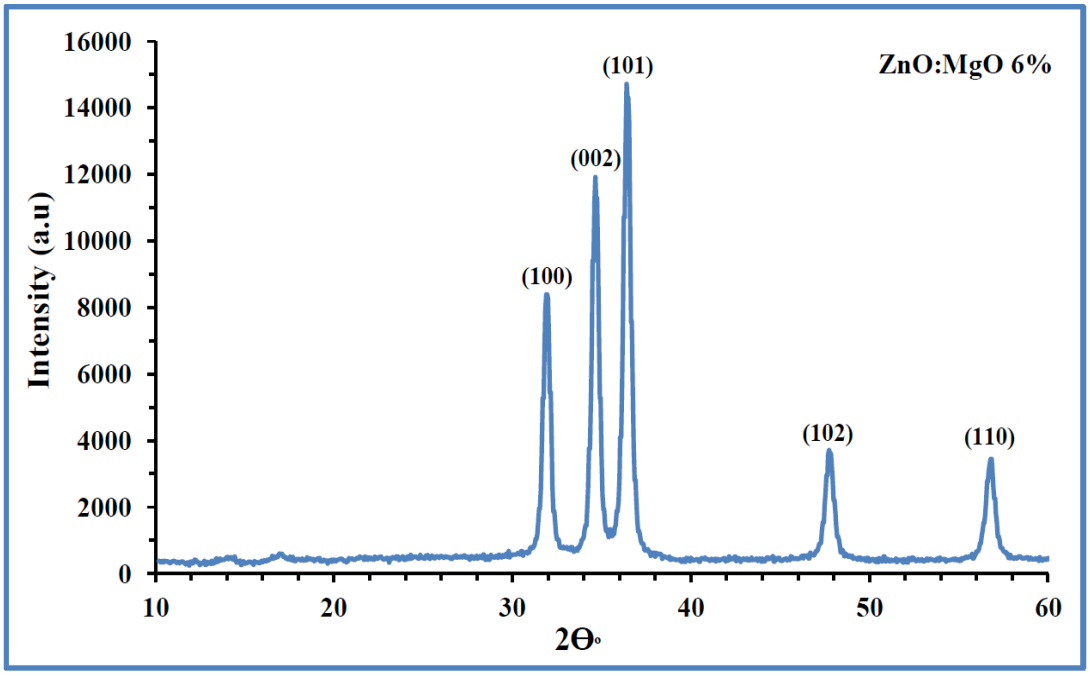
شكل (4-1) أنماط حيود الاشعة السينية لغشاء (ZnO pure).



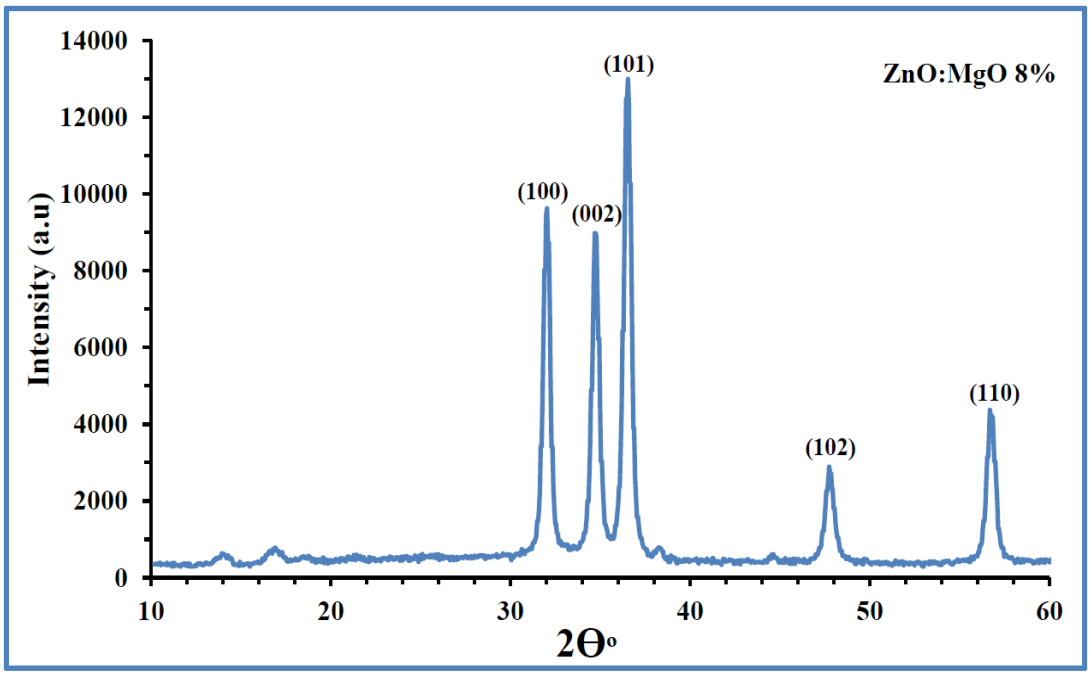
شكل (4-2) أنماط حيود الاشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 2%).



شكل (4-3) أنماط حيود الاشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 4%).



شكل (4-4) أنماط حيود الاشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 6%).



شكل (4-5) أنماط حيود الاشعة السينية لغشاء (ZnO: MgO 8%).

لتحليل الخصائص التركيبية للأغشية، أجريت الحسابات التالية بناءً على بيانات حيود الاشعة السينية:

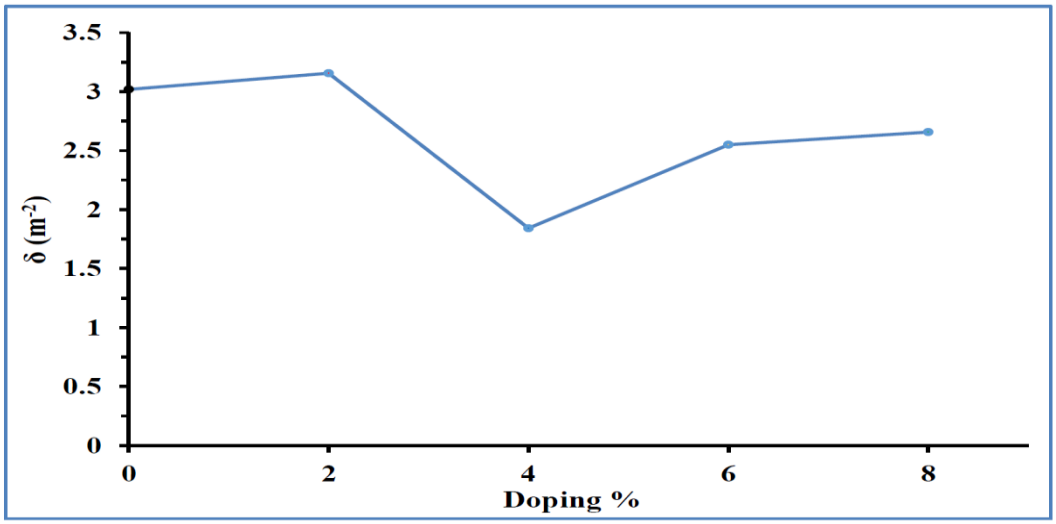
1-**المسافة بين المستويات البلورية (d_{hkl}):** تم حساب المسافة البينية بين المستويات البلورية (d_{hkl}) للاتجاهات المطلوبة باستخدام قانون براك (Bragg's Law) الموضح في العلاقة (2-2)، وقد وجد أن هذه النتائج تتوافق بشكل كبير مع البيانات القياسية المعتمدة في البطاقة الدولية (International Centre for Diffraction Data) ذات الرقم (ICDD Card no. 00-036-1451) ووجد ان هناك تغيراً قليلاً بعد التشويب بأوكسيد المغنيسيوم وهذا يؤكد ان التشويب اثر في التركيب البلوري لأوكسيد الزنك وكما هو موضح بالجدول (4-1) .

2-**ثابت الشبيكة (a,c) (Lattice Constant):** تم حساب ثوابت وحدة الخلية (Lattice Constants) (a) و(c) للتركيب السداسي من المعادلة رقم (2-4) وقد تطابقت هذه النتائج مع قيم الموجودة في بطاقة (ICDD Card)، ووجد أن قيم الثابتين (a) و (c) تتغيران بشكل طفيف بعد التشويب بأوكسيد المغنيسيوم بنسب مختلفة. يشير هذا التغير الى ان التشويب بأوكسيد المغنيسيوم قد أثر بالفعل في التركيب البلوري لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) كما موضح بالجدول رقم (4-2).

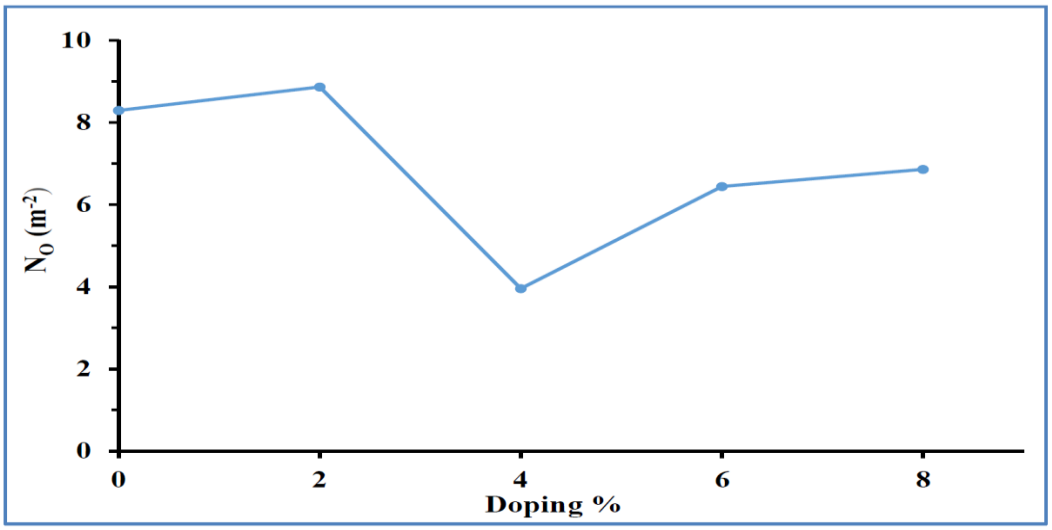
3-**معدل حجم الحبيبات (Average Grain Size):** تم حساب معدل حجم الحبيبات (G.S) باستخدام صيغة شيرر (Scherrer formula) وفقاً العلاقة (2-5) لكافة الأغشية المحضرة عند الاتجاه (002) تراوحت قيم حجم الحبيبات ما بين (17.8nm – 23.3 nm) كما هو مبين في الجدول (4-2).

4-**كثافة الانخلاعات (δ):** باستخدام المعادلة (2-6) تم حساب قيمة كثافة الانخلاعات (δ) لجميع الأغشية المحضرة، سواء كانت غير مشوبة أو المشوبة بأوكسيد المغنيسيوم، يظهر الجدول (4-2) ان كثافة الانخلاعات تتناقص بزيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم مقارنة بالأغشية غير المشوبة، مع ذلك، لوحظت زيادة طفيفة في كثافة الانخلاعات عند نسبة (2%) يشير هذا الانخفاض العام في كثافة الانخلاعات الى تحسن واضح في التركيب البلوري للأغشية، والذي يعزى الى الزيادة في حجم الحبيبات، مما يؤدي الى تقليل الحدود الحبيبية التي غالباً تتواجد فيها الانخلاعات، وكما موضح في الشكل (4-6) .

5-**عدد البلورات لوحدة المساحة (N_o):** تم حساب عدد البلورات لوحدة المساحة من المعادلة (2-7) لجميع اغشية (ZnO: MgO) المحضرة. كانت النتائج كما موضحة في الجدول (4-2) حيث لوحظ سلوكاً مشابهاً لما عليه كثافة الانخلاعات (δ) وكما مبين في الشكل (4-7):



الشكل (4-6) تغيير كثافة الانخلاعات مع نسبة التشويب لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO: MgO).



الشكل (4-7) تغيير عدد البلورات مع نسبة التشويب لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO: MgO).

جدول رقم (4-1): يبين جزء من بطاقة (ICDD Card) والنتائج التي تم الحصول عليها من حيود الاشعة السينية لأغشية (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بالمغنيسيوم (Mg)

Sample	Angle (2Ɵ) (Observed)	Angle (2Ɵ) (Standard)	d (Å) (Observed) (Å)	d (Å) (Standard) (Å)	(hkl)
ZnO (Pure)	31.993	31.7690	2.8067	2.8143	(100)
	34.743	34.4210	2.6111	2.6033	(002)
	36.543	36.2520	2.457	2.4759	(101)
	47.693	47.5380	1.905	1.9111	(102)
	56.793	56.6020	1.619	1.6247	(110)
ZnO: MgO (2%)	31.943	31.7690	2.7995	2.8143	(100)
	34.593	34.4210	2.638	2.6033	(002)
	36.393	36.2520	2.4669	2.4759	(101)
	47.743	47.5380	1.9036	1.9111	(102)
	56.793	56.6020	1.619	1.6247	(110)
ZnO: MgO (4%)	31.893	31.7690	2.8041	2.8143	(100)
	34.593	34.4210	2.6101	2.6033	(002)
	36.443	36.2520	2.463	2.4759	(101)
	47.693	47.5380	1.905	1.9111	(102)
	56.693	56.6020	1.622	1.6247	(110)
ZnO: MgO (6%)	31.893	31.7690	2.8041	2.8143	(100)
	34.643	34.4210	2.6111	2.6033	(002)
	36.393	36.2520	2.4669	2.4759	(101)
	47.743	47.5380	1.9036	1.9111	(102)
	56.793	56.6020	1.619	1.6247	(110)
ZnO: MgO (8%)	32.043	31.7690	2.801	2.8143	(100)
	34.693	34.4210	2.621	2.6033	(002)
	36.543	36.2520	2.457	2.4759	(101)
	47.743	47.5380	1.903	1.9111	(102)
	56.693	56.6020	1.622	1.6247	(110)

جدول (4-2): النتائج التي تم الحصول عليها من حيود الأشعة السينية.

Sample		ZnO Pure	ZnO: MgO 2%	ZnO: MgO 4%	ZnO: MgO 6%	ZnO: MgO 8%
$2\Theta^{o}_{(002)}$		34.743	34.593	34.593	34.643	34.693
d (002) (Å)		2.6111	2.638	2.6101	2.644	2.621
FWHM (002)(deg.)		0.4757	0.488	0.408	0.441	0.448
G.S (nm)		18.2	17.8	23.3	19.8	19.4
Lattice constants	a (Å)	3.233	3.270	3.237	3.2369	3.223
	c (Å)	5.2222	5.276	5.2202	5.288	5.242
$\delta \times 10^{15}$ (m^{-2})		3.0189	3.156	1.842	2.550	2.657
$No \times 10^{16}$ (m^{-2})		8.293	8.865	3.9547	6.441	6.857

(4-2-2) نتائج فحوصات مجهر القوة الذرية (AFM):

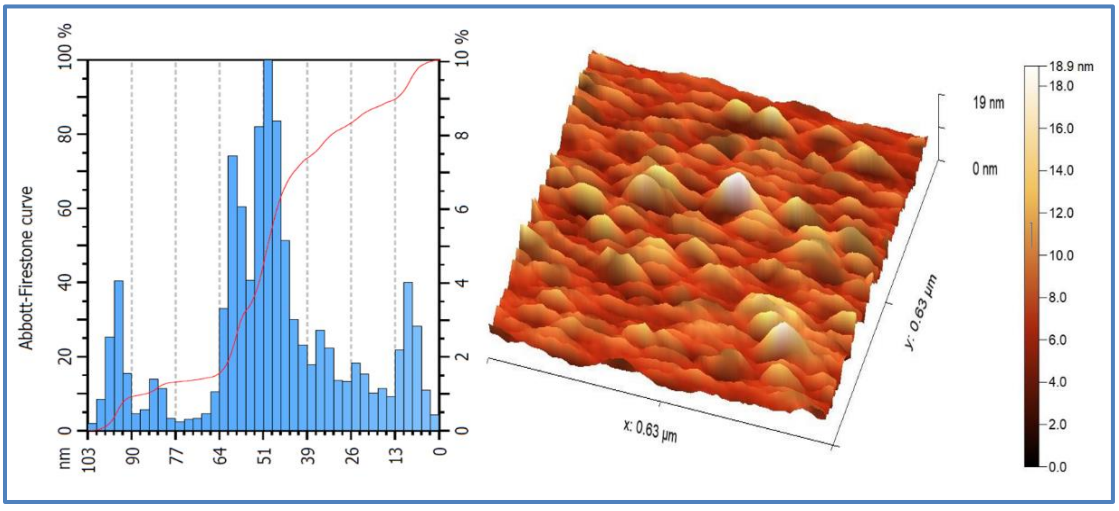
(Results of Atomic Force Microscopy Tests)

تُظهر دراسة الطوبوغرافية السطحية للأغشية المحضرة من أوكسيد الزنك (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) ذي القدرة على تصوير السطوح وتحليلها وإعطاء قيم دقيقة عن معدل حجم الحبيبات وتوزيعها وعن قيم خشونة السطح أن الأغشية غير المشوبة والمشوبة على حد سواء تتميز بتوزيع متجانس من خلال التشخيص بمجهر القوة الذرية مع ملاحظة عدم وجود تجمعات او تكتلات غير منتظمة او فراغات على سطح الغشاء وكما موضحة بالأشكال (4-8) الى (4-12). يشير تحليل النتائج الواردة في الجدول (4-3) إلى زيادة ملحوظة في متوسط خشونة السطح (Roughness average) وجذر متوسط المربع (Root mean square) مع زيادة نسبة التشويب الى (6% و8%) ونظراً إلى أن معدل الجذر التربيعي يتناسب طردياً مع معدل حجم الحبيبات، فأن هذه النتائج تؤكد الزيادة في حجم الحبيبات ونقصان في الحدود الحبيبية، تتوافق هذه الاستنتاجات مع نتائج حيود الاشعة السينية والتي تضمنت حساب معدل حجم الحبيبات في الجدول (4-2). وتعزى الزيادة في معدل خشونة السطح الى الاختلاف في حركية ذرات المادة الشائبة مع ذرات المادة المضيفة. كما ساهمت الزيادة في حجم الحبيبات عند التشويب في ارتفاع معدل خشونة السطح وهذا يتفق مع نتائج الدراسة [122]. فضلاً عن ذلك، تُشير القيم الموجبة لالتواء السطح (Surface Skewness) إلى أن التوزيع الطوبوغرافي للسطح يغلب عليه الارتفاعات، بينما يتطلب التوزيع المتماثل للسطوح ان تكون قيمة التواء السطح

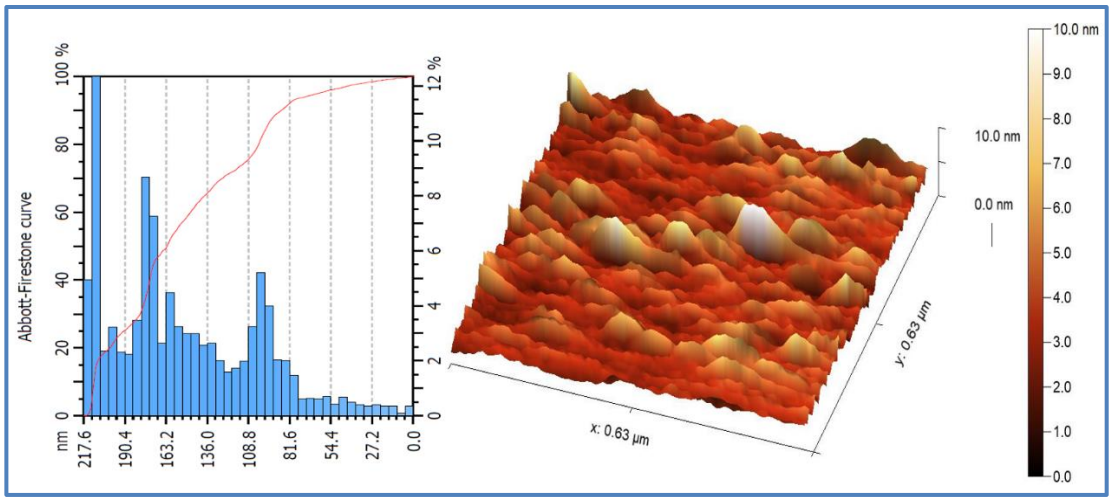
مساوية للصفر [123]. والشكل (4-13) يبين رسم بعض المعلمات الطوبوغرافية مع نسبة التشويب لجميع الاغشية المحضرة.

جدول (4-3) يوضح بعض المعلمات الطوبوغرافية لجميع الاغشية المحضرة.

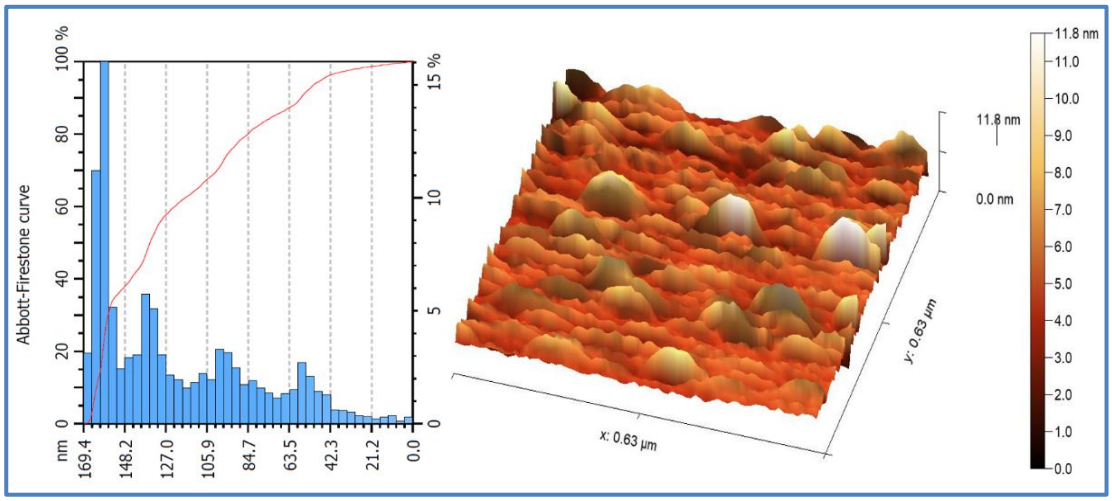
Sample	Average Roughness Sa (nm)	RMS (nm)	Surface Skewness Ssk (nm)	Surface Kurtosis SKu (nm)	Maximum Height Sz (nm)
ZnO (Pure)	1.491	1.978	0.657	2.273	25.634
ZnO: MgO (2%)	1.134	1.527	0.483	2.372	21.480
ZnO: MgO (4%)	0.948	1.252	0.313	1.421	13.446
ZnO: MgO (6%)	1.793	2.516	0.518	2.760	34.621
ZnO: MgO (8%)	1.771	2.560	0.722	4.592	35.713



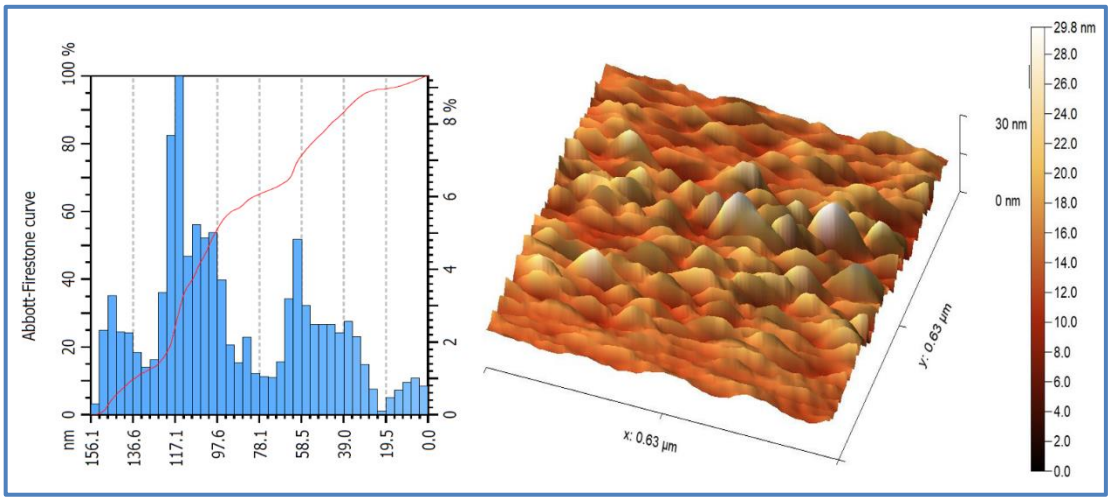
شكل (4-8) صور مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO) غير المشوب.



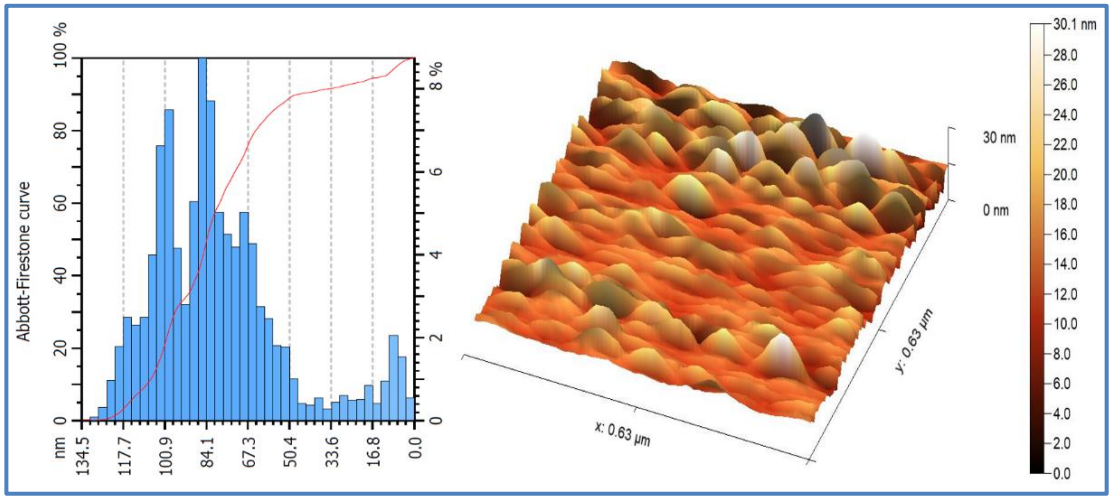
شكل (4-9) صور مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 2%).



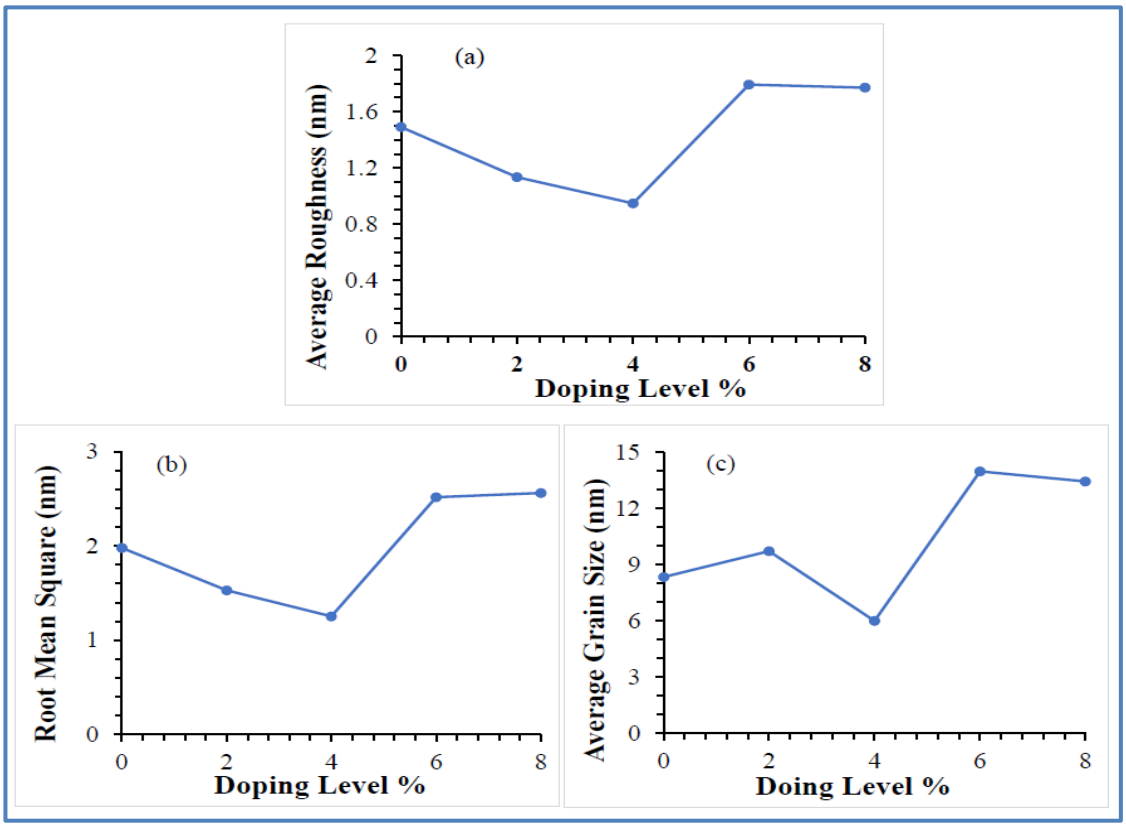
شكل (4-10) صور مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 4%).



شكل (4-11) صور مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 6%).



شكل (4-12) صور مجهر القوة الذرية (3D) ومخطط التوزيع الاحصائي لمعدلات الحجوم الحبيبية لغشاء (ZnO: MgO 8%).

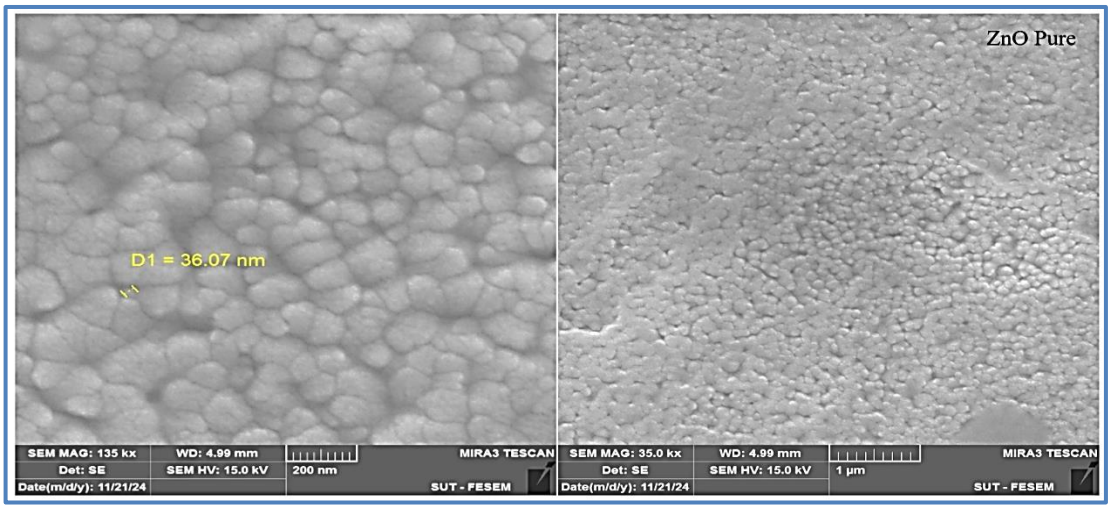


شكل (4-13) يبين العلاقة بين (a) معدل خشونة السطح مع نسبة التشويب. (b) معدل الجذر التربيعي مع نسبة التشويب. (c) معدل الحجم الحبيبي مع نسبة التشويب.

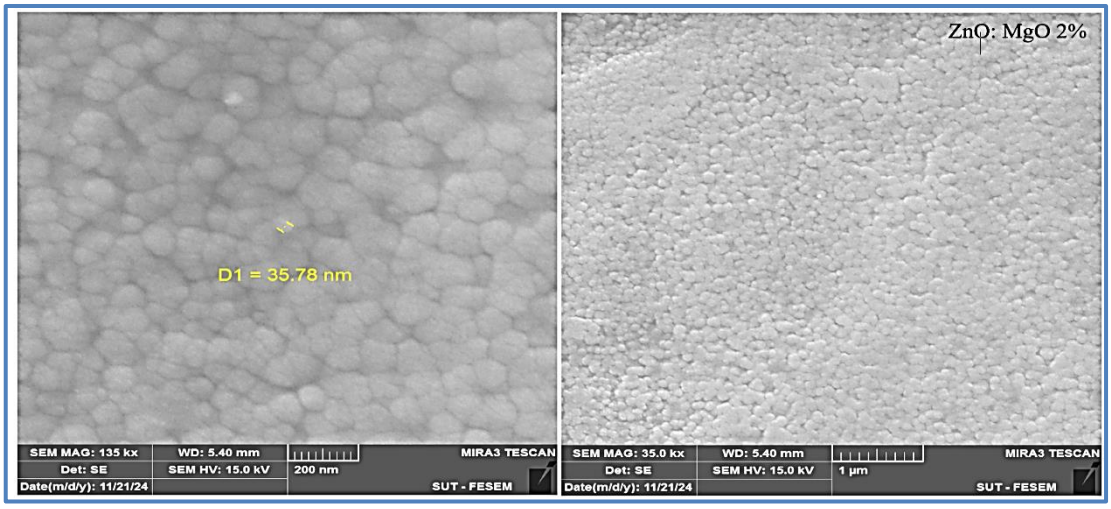
(4-2-3) نتائج فحوصات المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM):

(Results of Field Emission Scanning Electron Microscopy Tests)

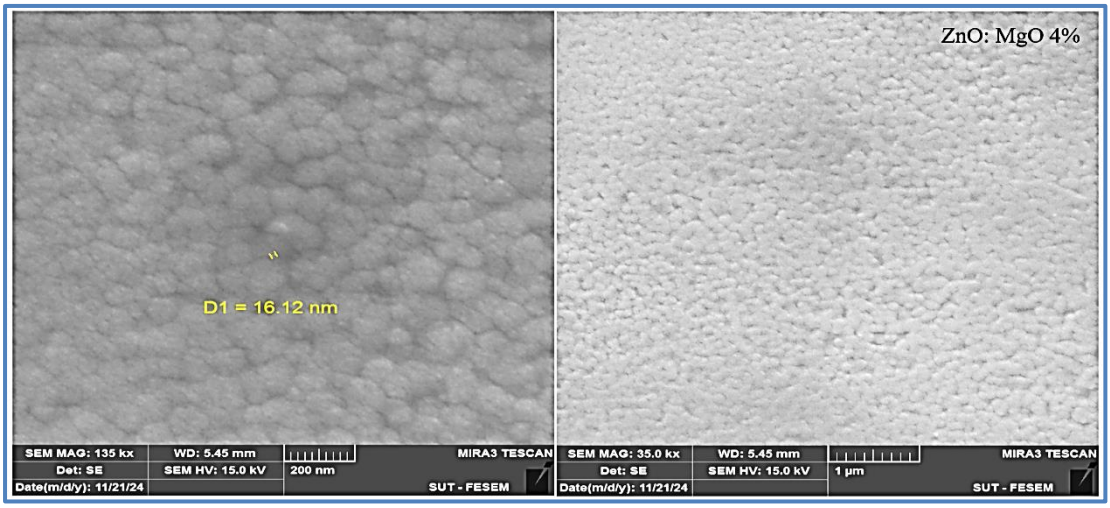
تم دراسة الخصائص الطوبوغرافية لأسطح جميع الاغشية الرقيقة المحضرة من أوكسيد الزنك الغير مشوب والمشوب بأوكسيد المغنيسيوم باستعمال المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM) حيث توضح الاشكال (4-14) الى (4-18) ان الأغشية المحضرة تتميز بتوزيع ذري متجانس بشكل ملحوظ، كما أن أسطحها خالية من الجزر أو الفراغات مما يشير إلى تكوّن طبقة رقيقة عالية الجودة. ولوحظ أن الذرات المكونة لهذه الاغشية تتخذ اشكالاً كروية او شبه كروية وهذا ما يتوافق مع النتائج المنشورة في الدراسة [124]، فضلاً عن ذلك، كشفت نتائج فحص (FE-SEM) عن حدوث اندماج واضح لذرات المغنيسيوم ضمن الشبيكة البلورية لأوكسيد الزنك، مما يؤكد نجاح عملية التشويب. كما تبين أن زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم الى نسبة 8% أدت إلى نمو غير منتظم للحبيبات كما موضح بالشكل (4-18). يعزى هذا إلى أن نسب التشويب العالية من المواد الشائبة قد تؤثر على انتظام نمو البلورات وبالتالي على الخصائص المورفولوجية.



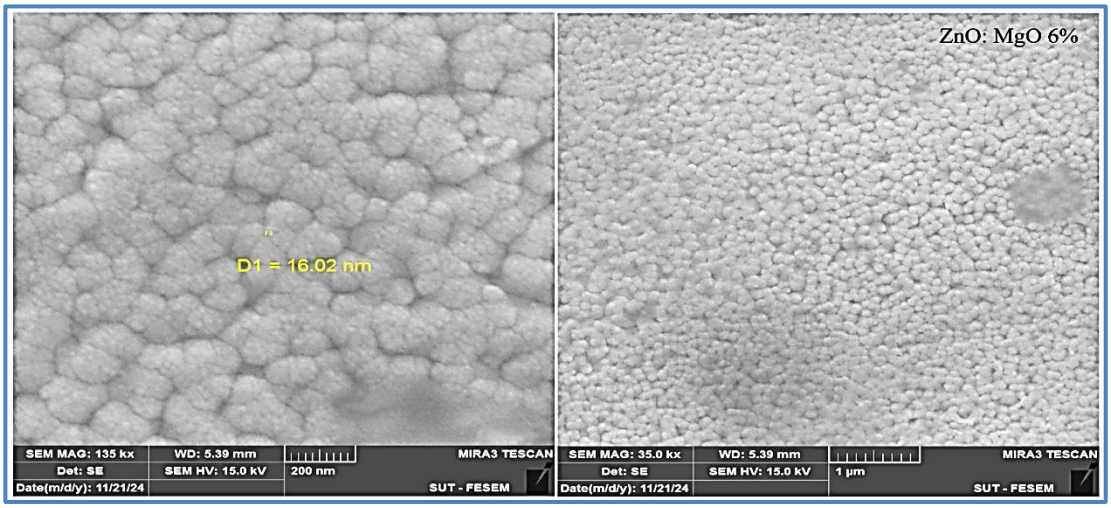
شكل (4-14) صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO) غير المشوب.



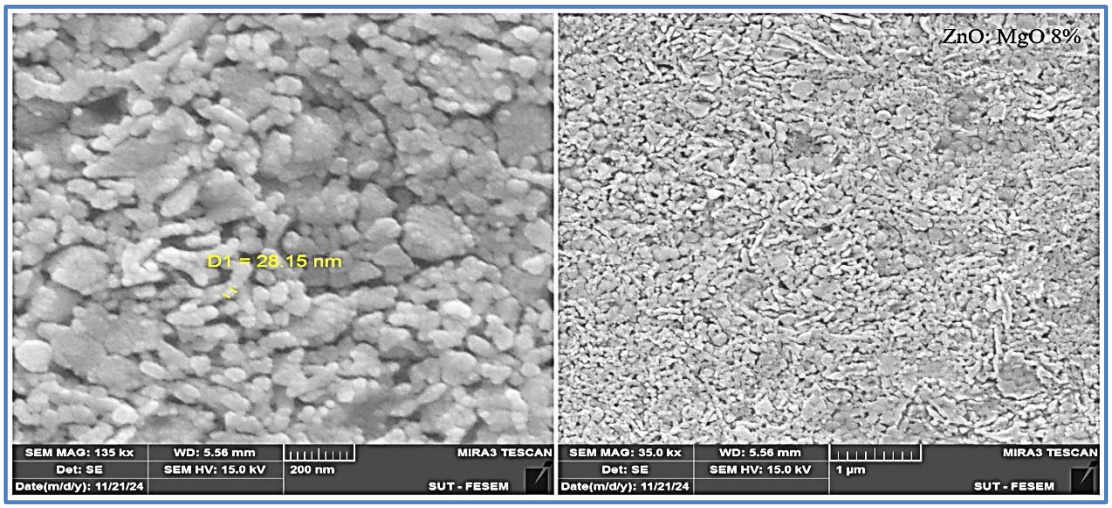
شكل (4-15) صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 2%).



شكل (4-16) صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 4%).



شكل (4-17) صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 6%).

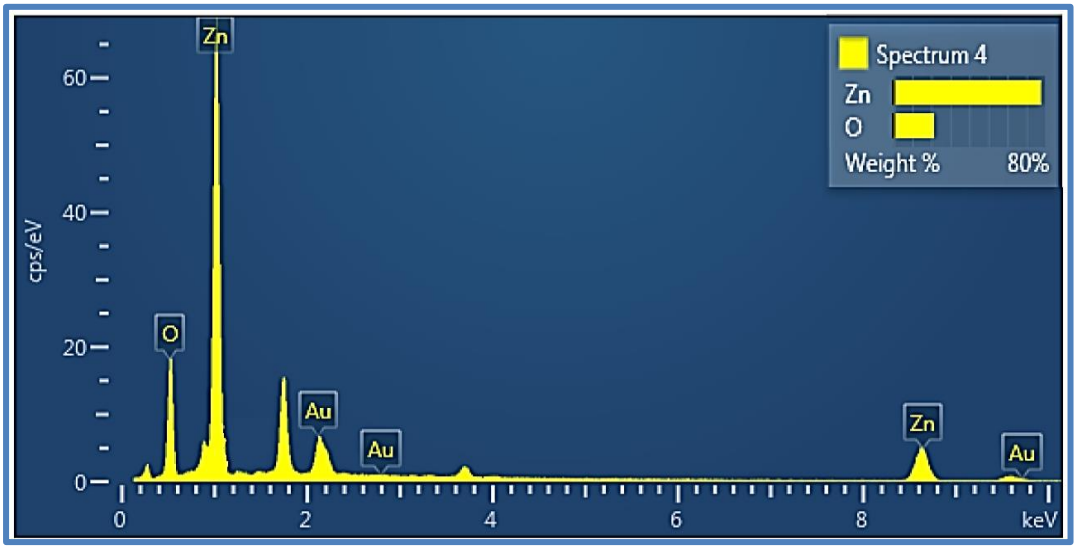


شكل (4-18) صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال لغشاء (ZnO: MgO 8%).

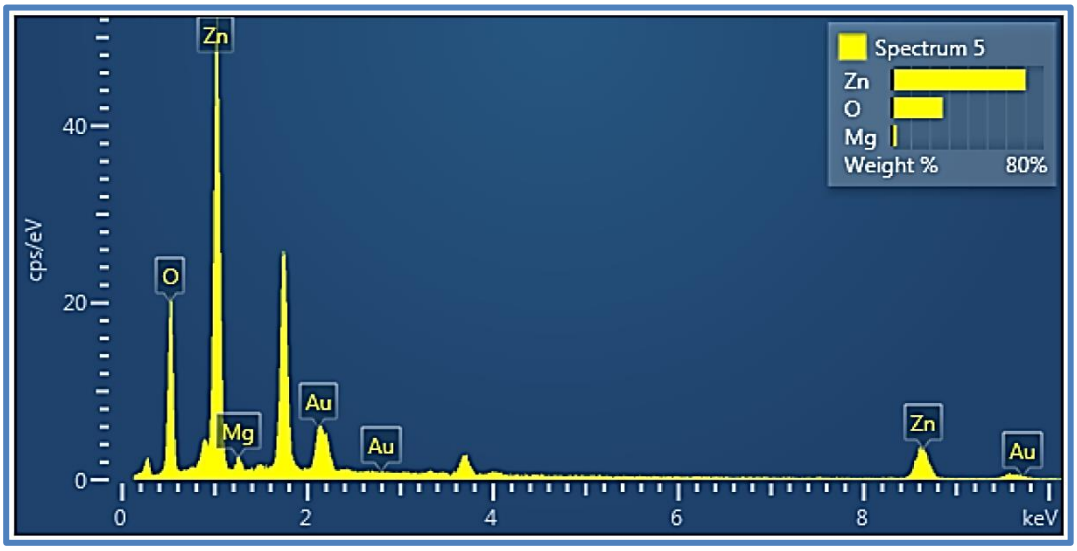
(4-2-4) نتائج فحص مطياف تشتت الطاقة (EDS) :

(Results of Energy Dispersive Spectrometer Test)

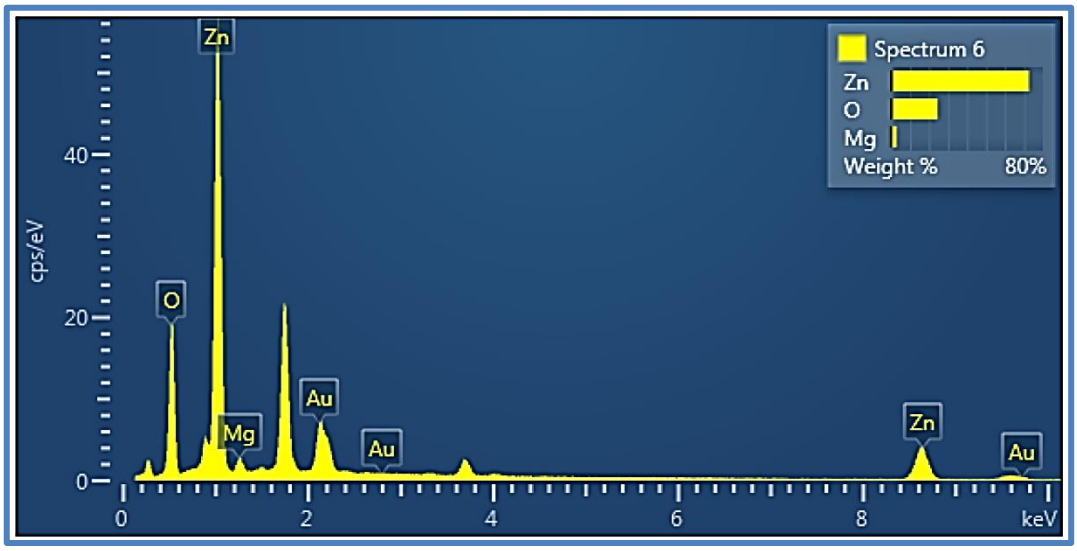
للتأكد من التركيب الدقيق للأغشية الرقيقة المحضرة، أجري تحليل مطياف تشتت الطاقة (EDS). يعد هذا التحليل ضرورياً لتحديد النسب الوزنية والذرية للعناصر المكونة للأغشية، هذه معلومات لا يمكن الحصول عليها من قياسات حيود الاشعة السينية (XRD) وحدها. تظهر الأشكال من (4-19) الى (4-23) مخططات تحليل (EDS) لجميع الاغشية المحضرة. ونلاحظ ايضاً ان زيادة نسب التشويب أدى الى زيادة تركيز عنصر المغنيسيوم في الغشاء وكما مبين في الجدول (4-4) الذي يوضح النسب الوزنية والذرية للعناصر التي تم تحديدها بواسطة (EDS) لهذه الاغشية.



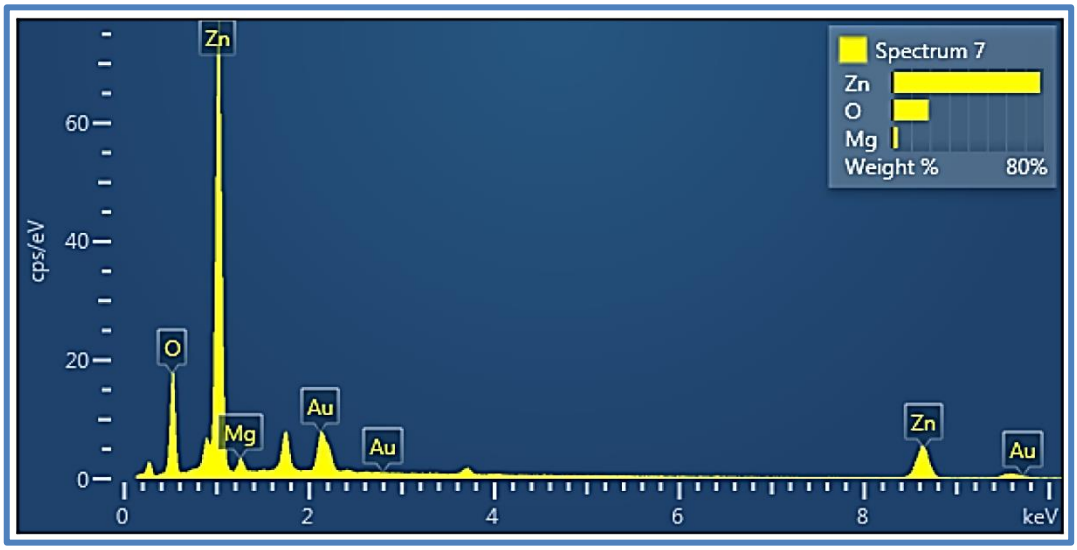
شكل (4-19) مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO) غير المشوب.



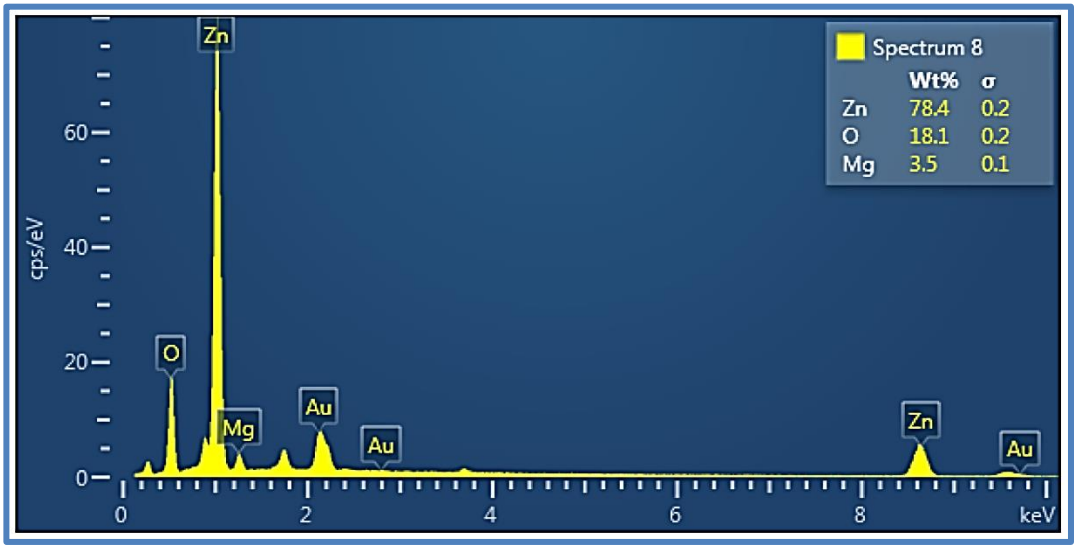
شكل (4-20) مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 2%).



شكل (4-21) مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 4%).



شكل (4-22) مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 6%).



شكل (4-23) مخطط تحليل (EDS) لغشاء (ZnO: MgO 8%).

جدول (4-4) يوضح نسب العناصر الوزنية والذرية لتحليل (EDS) لجميع الاغشية المحضرة.

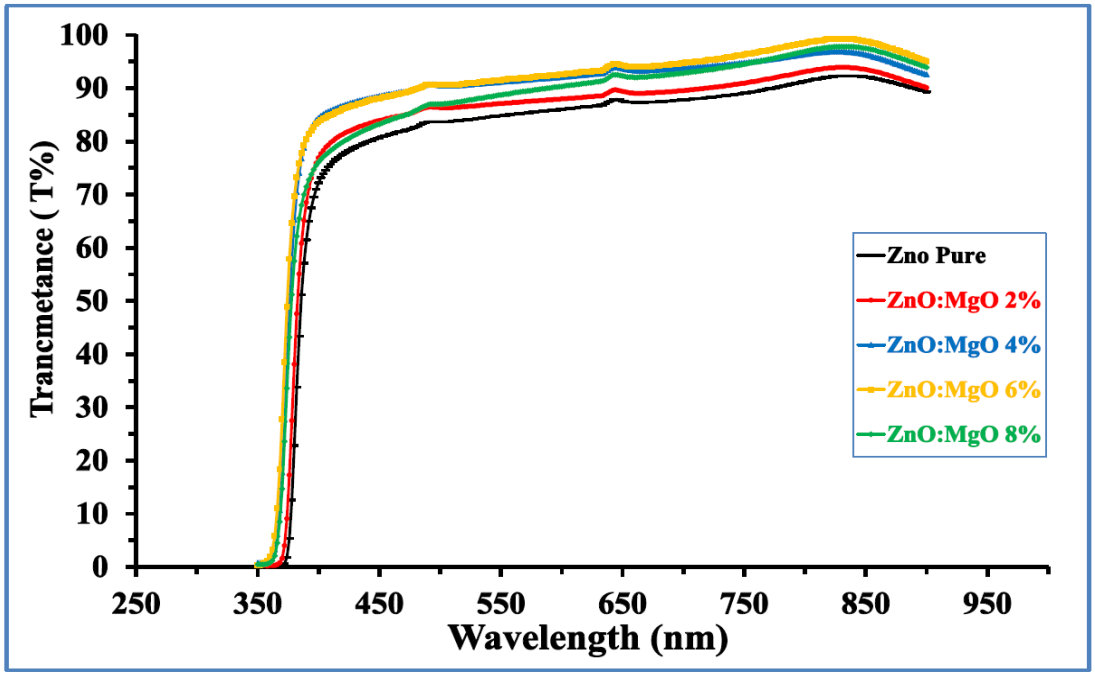
Sample	Element	Weight (%)	Atomic (%)
ZnO (Pure)	Zn	78.52	52.37
	Mg	0	0
	O	21.48	47.64
Total		100	100
ZnO: Mg (2%)	Zn	70.52	37.66
	Mg	2.64	3.79
	O	26.84	58.55
Total		100	100
ZnO: Mg (4%)	Zn	72.65	40.24
	Mg	2.79	4.15
	O	24.57	55.61
Total		100	100
ZnO: Mg (6%)	Zn	77.90	47.46
	Mg	2.90	4.74
	O	19.20	47.79
Total		100	100
ZnO: Mg (8%)	Zn	78.40	48.46
	Mg	3.50	5.81
	O	18.11	45.73
Total		100	100

(3-4) نتائج القياسات البصرية: (Results of Optical Measurements)

تعد دراسة الخصائص البصرية لأشباه الموصلات أمراً بالغ الأهمية لفهم طبيعة هذه المواد وتحديد مجالات تطبيقاتها المتنوعة. يمكن استخلاص المعلومات حول الخصائص البصرية من خلال تحليل حافة الامتصاص الأساسية للمادة، بالإضافة إلى قياسات طيف النفاذية والامتصاصية عند أطوال موجية مختلفة. تسمح هذه القياسات بحساب الثوابت البصرية المتعددة وتحديد فجوة الطاقة البصرية بدقة. في هذا السياق، سنعرض النتائج المتحصل عليها من القياسات البصرية لأغشية اوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم حيث تم ترسيب هذه الأغشية على قواعد زجاجية باستخدام طريقة الرش الكيميائي الحراري، وعند درجة حرارة ($360\ C^o$).

(1-3-4) طيف النفاذية البصرية (T): (Optical Transmittance Spectrum)

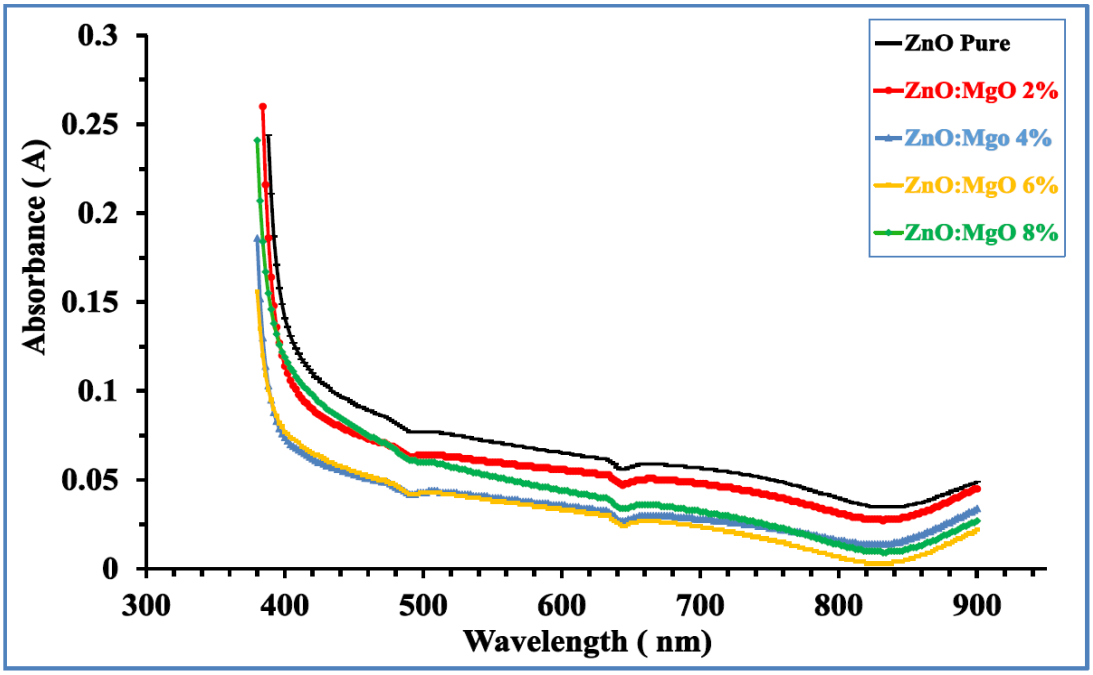
تم دراسة طيف النفاذية البصرية في مدى الاطوال الموجية (300 – 900 nm) لكل الأغشية غير المشوبة لأوكسيد الزنك والمشوبة بأوكسيد المغنسيوم وبنسب التشويب (2,4,6,8%)، نلاحظ من الشكل (4-24) ان النفاذية للأغشية المحضرة تزداد بزيادة الطول إذا تتراوح قيمتها من 88 % عند غشاء أوكسيد الزنك غير المشوب لتصل أعلى قيمة 94.5% عند نسبة التشويب 6% بأوكسيد المغنيسيوم عند الطول الموجي (750 nm). يظهر منحني النفاذية للأغشية، سلوكاً بصرياً متشابهاً حيث يبدي زيادة قوية ومفاجئة عند الطول الموجي (360 nm) ثم يميل إلى الاستقرار عن الطول الموجي (450 nm) مما يدل على ان هذه الاغشية تصلح كنافذة بصرية للخلايا الشمسية حيث تقع في المنطقة المرئية من الطيف وهذا ما يبرر الاهتمام المتزايد من قبل الباحثين في استخدام اغشية أوكسيد الزنك في تطبيقات الخلايا الشمسية. ونلاحظ ايضاً انزياح طيف النفاذية نحو الاطوال الموجية الأقل مع زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم.



شكل (4-24) يبين النفاذية كدالة للطول الموجي لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب تشويب حجمية مختلفة.

(2-3-4) طيف الامتصاصية البصرية : (Optical Absorbance Spectrum)

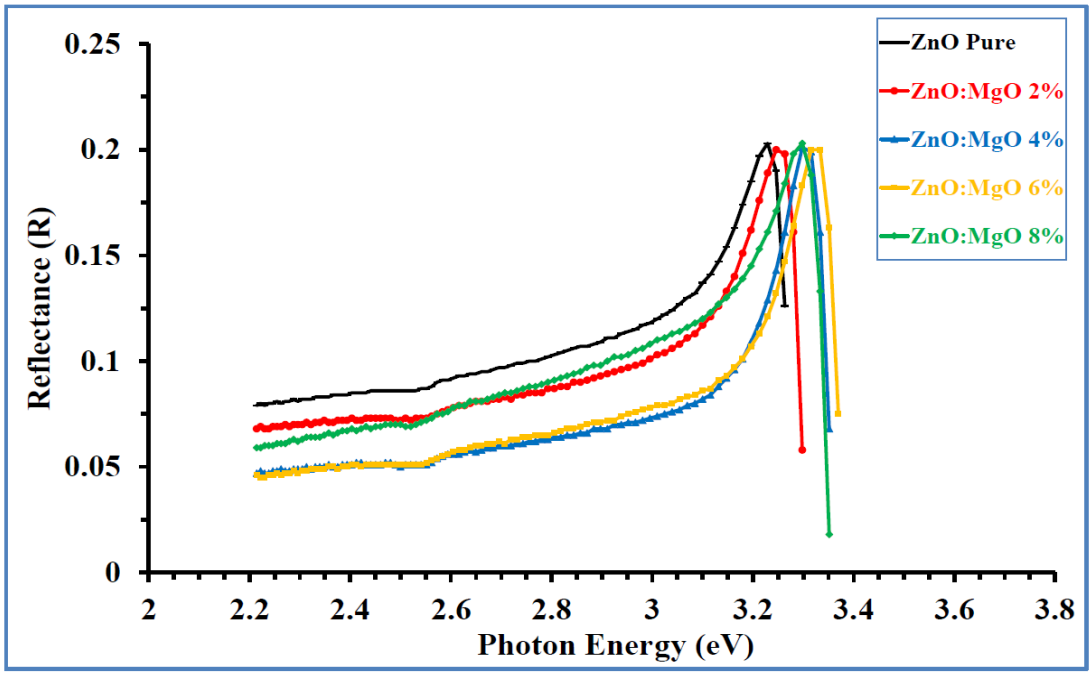
الشكل (4-25) يوضح طيف الامتصاصية البصرية للأغشية المحضرة كدالة للطول الموجي وذلك ضمن مدى الاطوال الموجية (300-900 nm)، يظهر هذا الشكل أن هناك علاقة عكسية بين طيف الامتصاصية البصرية والطول الموجي، فمع زيادة الطول الموجي تتناقص قيم الامتصاصية. كما نلاحظ انخفاضاً ملحوظاً في قيم الامتصاصية البصرية بعد عملية التشويب. ويزداد هذا الانخفاض بزيادة نسبة التشويب، يشير هذا السلوك إلى أن مستويات الشوائب قد تخللت الحزم الذاتية للمادة مما أدى الى تكوين حزم طاقية جديدة. يرتبط تأثير الشوائب بشكل أساسي بتعديل البنية المجهرية أو التركيب الدقيق للمادة، هذا التعديل يؤدي بدوره الى تغيير في الحزم الممنوعة (Forbidden Bands)، يتفق هذا التفسير مع النتائج التي توصل اليها باحثون اخرون في هذا المجال.



شكل (4-25) يبين طيف الامتصاصية كدالة للطول الموجي لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.

(3-3-4) طيف الانعكاسية البصرية (R): (Optical Reflectance Spectrum)

تمثل دراسة طيف الانعكاسية البصرية جانبا حيوياً لفهم الخصائص البصرية للأغشية الرقيقة. جرى حساب الانعكاسية للأغشية المحضرة بالاعتماد على طيفي الامتصاصية والنفاذية وذلك وفقاً لمبدأ حفظ الطاقة والموضح بالعلاقة (2-16). يوضح الشكل (4-26) سلوك الانعكاسية كدالة لطاقة الفوتون لجميع الأغشية المحضرة، يتضح من الشكل أن منحنى الانعكاسية يظهر زيادة تدريجية مع ارتفاع طاقة الفوتون ضمن نطاق معين، ثم يبدا بالانخفاض بشكل ملحوظ عند الطاقات الفوتونية الأعلى، يمكن تفسير هذا السلوك بناءً على آليات الامتصاص، ففي نطاق الطاقات الفوتونية الأقل من قيمة فجوة الطاقة ($h\upsilon<Eg$) يكون الامتصاص ضئيلاً للغاية، مما يفسر الزيادة الأولية في الانعكاسية. مع اقتراب طاقة الفوتون من قيمة فجوة الطاقة تقريباً يزداد الامتصاص بشكل ملحوظ، ويعزى هذا إلى حدوث انتقالات الالكترونية مكثفة من حزمتي التكافؤ إلى حزمة التوصيل تؤدي هذه الزيادة في الامتصاص الى انخفاض في قيم الانعكاسية، حيث يتم امتصاص جزءاً أكبر من الفوتونات بدلاً من انعكاسها. علاوة على ذلك، لوحظ تأثير التشويب بأوكسيد المغنيسيوم على قيم الانعكاسية، فأظهرت النتائج تناقصاً في قيمة الانعكاسية مع زيادة نسب التشويب، كما يتجه منحنى الانعكاسية نحو الطاقات الفوتونية الأعلى، مما يشير إلى تغيرات في البنية الالكترونية والخصائص البصرية للأغشية نتيجة إضافة الشوائب.

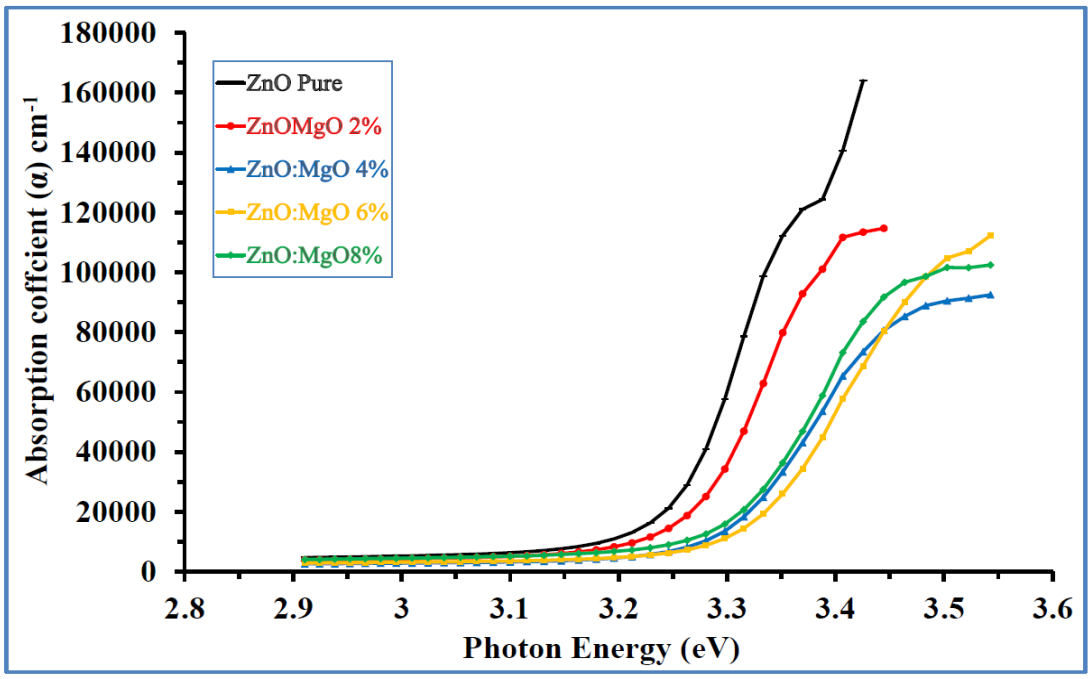


شكل (4-26) يبين طيف الانعكاسية كدالة لطاقة الفوتون لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.

(4-3-4) معامل الامتصاص (α) : (Absorption Coefficient)

تم حساب معامل الامتصاص (α) لجميع الاغشية المحضرة من أوكسيد الزنك غير المشوب والمشوب بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة وذلك بالاعتماد على العلاقة (2-17)، يعد معامل الامتصاص خاصية أساسية تعتمد بشكل مباشر على طاقة الفوتونات الساقطة، بالإضافة الى الخصائص الجوهرية للمادة شبه الموصلة، التي تشمل فجوة الطاقة ونوع الانتقالات الالكترونية التي تحدث بين حزم الطاقة المختلفة. يوضح الشكل (4-27) العلاقة بين معامل الامتصاص (α) كدالة لطاقة الفوتون (hυ)، يتبين من هذا الشكل ان سلوك منحني معامل الامتصاص يظهر نمطاً متشابهاً لكافة العينات، ففي نطاق الطاقات الفوتونية المنخفضة، تكون قيم معامل الامتصاص منخفضة جداً مما يشير إلى أن احتمالية حدوث انتقالات الكترونية في هذا النطاق تكون ضئيلة للغاية. ومع زيادة طاقة الفوتون، تبدأ قيم معامل الامتصاص في الارتفاع بشكل ملحوظ عند حافة الامتصاص الأساسية باتجاه الطاقات الفوتونية العالية. عند هذه الطاقات، تتجاوز قيمة معامل الامتصاص (10^4 cm^{-1}) وهي قيمة نموذجية للانتقالات الالكترونية المباشرة المسموحة (Direct allowed transitions) في اشباه الموصلات، مما يدعم حدوث هذا النوع من الانتقالات في المواد المحضرة [125]. اظهرت القياسات الموضحة بالشكل (4-27) ان بزيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم يلاحظ انخفاض عام في قيم معامل الامتصاص عند طاقات الفوتون العالية مع حدوث إزاحة طفيفة في حافة الامتصاص

الأساسية نحو الطاقات الأعلى. فنلاحظ عند تركيز 2% تكون قيم الامتصاص أعلى مقارنة بالعينة ذات التراكيز الأعلى من MgO (4%،6%،8%). هذا الانخفاض التدريجي يمكن ان يعزى لعدة عوامل منها زيادة في عيوب الشبيكة البلورية أو الاضطرابات الناتجة عن التشويب التي تعمل كمراكز تشتت للفوتونات او تقلل كفاءة الامتصاص البيني لحزم الطاقة. يعد هذا السلوك في معامل الامتصاص مؤشراً هاماً على الخصائص البصرية للمواد المحضرة، ويدعم بأن التشويب بأوكسيد المغنيسيوم يؤثر بشكل مباشر على البنية الالكترونية والانتقالات البصرية في أغشية أوكسيد الزنك الرقيقة.

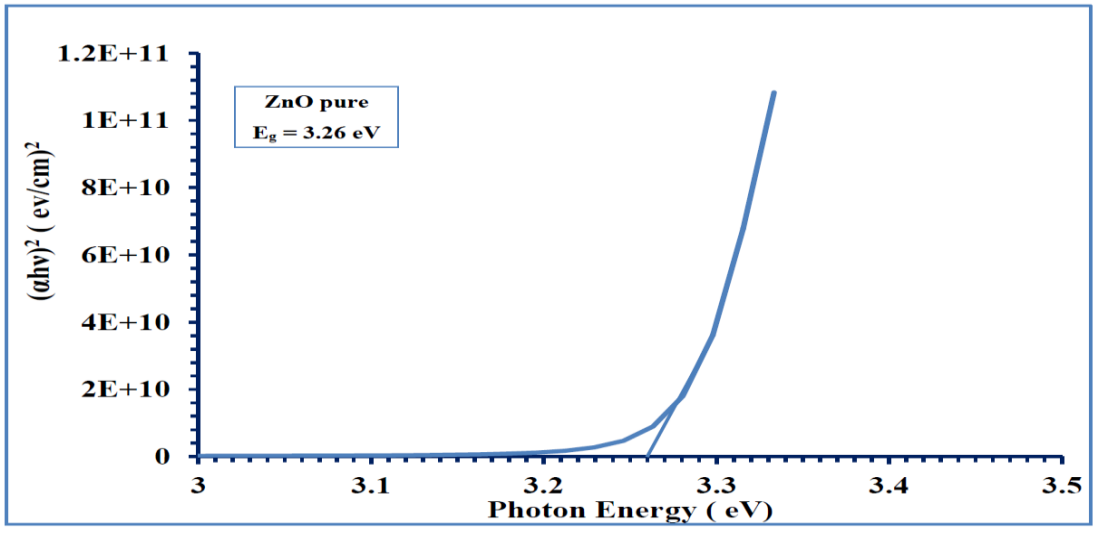


شكل (4-27) يبين معامل الامتصاص كدالة لطاقة الفوتون لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.

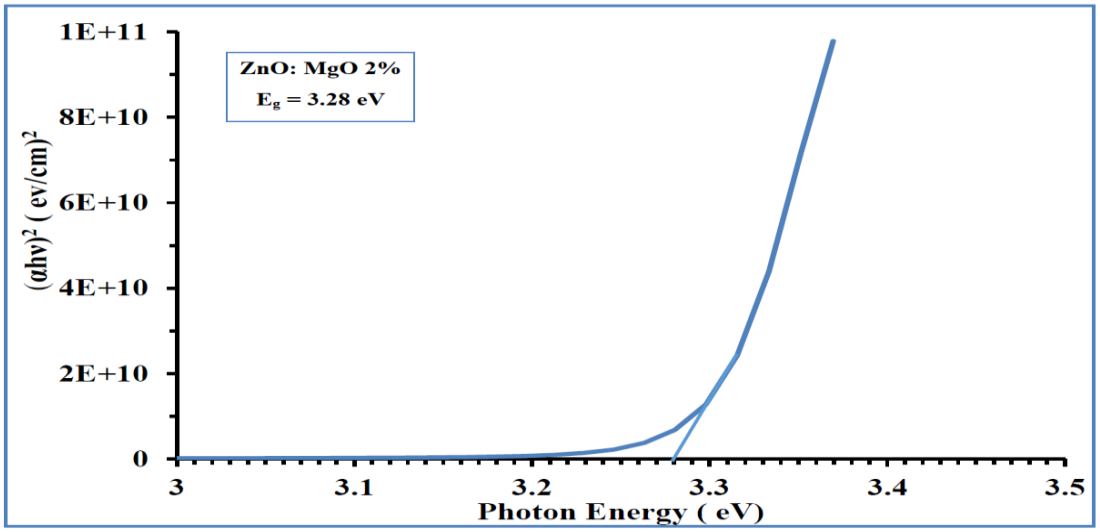
(5-3-4) فجوة الطاقة البصرية (E_g) : (Optical Band Gap)

تلعب فجوة الطاقة البصرية (E_g) دوراً حيوياً في فيزياء أشباه الموصلات، حيث تعد مؤشراً حاسماً لإمكانية استعمال هذه المواد في تطبيقات متنوعة منها الخلايا الشمسية، والكواشف الضوئية وغيرها من الأجهزة البصرية والالكترونية. توفر فجوة الطاقة البصرية فهماً عميقاً لسلوك الامتصاص البصري للمادة. تتأثر قيمة فجوة الطاقة بشكل كبير بعدة عوامل تشمل نوع المادة المكونة للغشاء الرقيق، ونوع مادة الشائبة ونسبتها، بالإضافة الى ظروف التحضير وطبيعة البنية التركيبية للأغشية المحضرة. تم حساب قيم فجوة الطاقة البصرية للانتقالات الالكترونية المباشرة المسموحة لجميع الاغشية المحضرة باستعمال العلاقة (1-2) عند قيمة الثابت (r= ½)، ومن خلال العلاقة البيانية ما بين $(\alpha h\upsilon)^2$ وطاقة الفوتون الساقط ($h\upsilon$)، بعد حافة الامتصاص الأساسية، يتم رسم خط

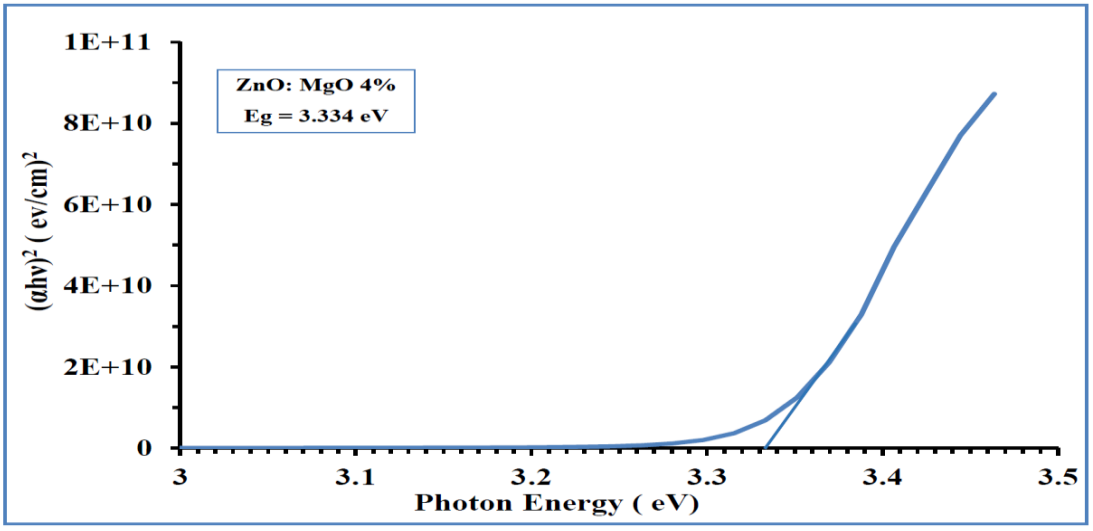
مستقيم ومده ليقطع محور طاقة الفوتون الساقط عند النقطة عندها $(\alpha h\upsilon)^2 = 0$. تمثل نقطة التقاطع هذه قيمة فجوة الطاقة البصرية للأغشية المحضرة. تبين الاشكال (4-28) الى (4-32) قيم فجوة الطاقة البصرية للأغشية المحضرة كدالة لطاقة الفوتون الساقط، نلاحظ ان عملية التشويب بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) أدت الى زيادة في قيم فجوة الطاقة والتي تكون ضمن المدى (3.26 eV) لغشاء أوكسيد الزنك غير المشوب الى (3.344 eV) لنسبة التشويب 6% بأوكسيد المغنيسيوم. هذه الزيادة في فجوة الطاقة تشير الى إزاحة حافة الامتصاص نحو الطاقات الأعلى، وهو ما يمكن تفسيره بظاهرة إزاحة بورشتاين- موس (Burstein – Moss Shift) [126]. تنص هذه الظاهرة على أنه في أشباه الموصلات المشوبة بشدة، تكون المستويات القريبة من حزمة التوصيل ممتلئة بالإلكترونات. ونتيجة لذلك، تحتاج الإلكترونات إلى طاقة أكبر للانتقال من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل، مما يؤدي ظاهرياً إلى زيادة في قيمة فجوة الطاقة. مع ذلك ،يلاحظ من الشكل (4-28) ان فجوة الطاقة البصرية لغشاء أوكسيد الزنك المشوب بأوكسيد المغنيسيوم بنسبة (8%)، قد انخفضت قليلاً الى (3.324 eV)، هذا الانخفاض في فجوة الطاقة يمكن تفسيره إلى أن الشوائب بأوكسيد المغنسيوم أدت الى تكوين مستويات مانحة داخل فجوة الطاقة وبالقرب من حزمة التوصيل وبالتالي امتصاص الفوتونات ذات الطاقة القليلة وكما أن هناك عدة عوامل ممكن أن تؤثر كذلك منها : زيادة العيوب والاضطرابات الهيكلية بسبب نسبة التشويب العالية نسبياً، وتكتل مادة التشويب وهذا يؤدي إلى ظهور مناطق ذات خصائص الكترونية مختلفة، او حدوث اجهاد للشبيكة (Lattice Strain)، هذا يحصل بسبب ادخال ذرات المغنيسيوم في شبيكة الزنك وبتراكيز عالية نسبياً قد يؤدي الى تشوهات تقلل من جودة البلورة وتؤثر على فجوة الطاقة. بناءً على النتائج المرصودة، يشير النمط العام الى ان التشويب بـ MgO يؤثر في فجوة الطاقة لـ ZnO، وهي ظاهرة مرغوبة في تطبيقات معينة.



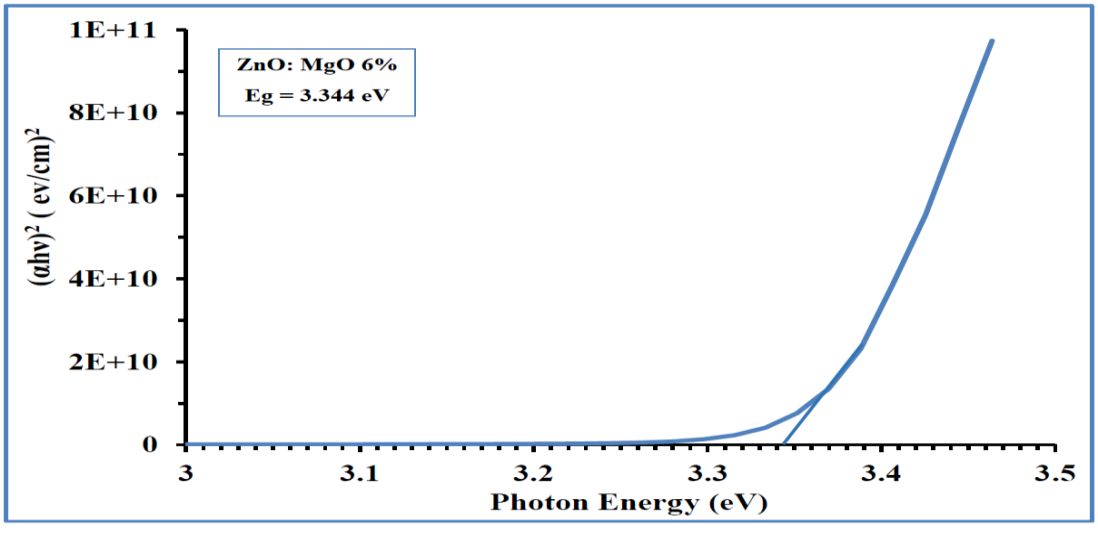
شكل (4-28) يبين فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة.



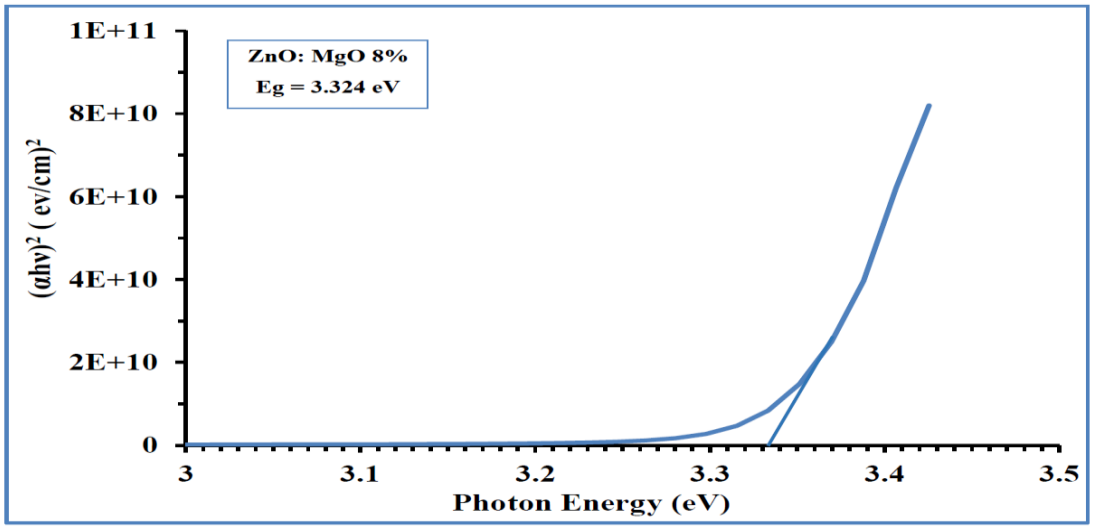
شكل (4-29) يبين فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 2%).



شكل (4-30) يبين فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 4%).



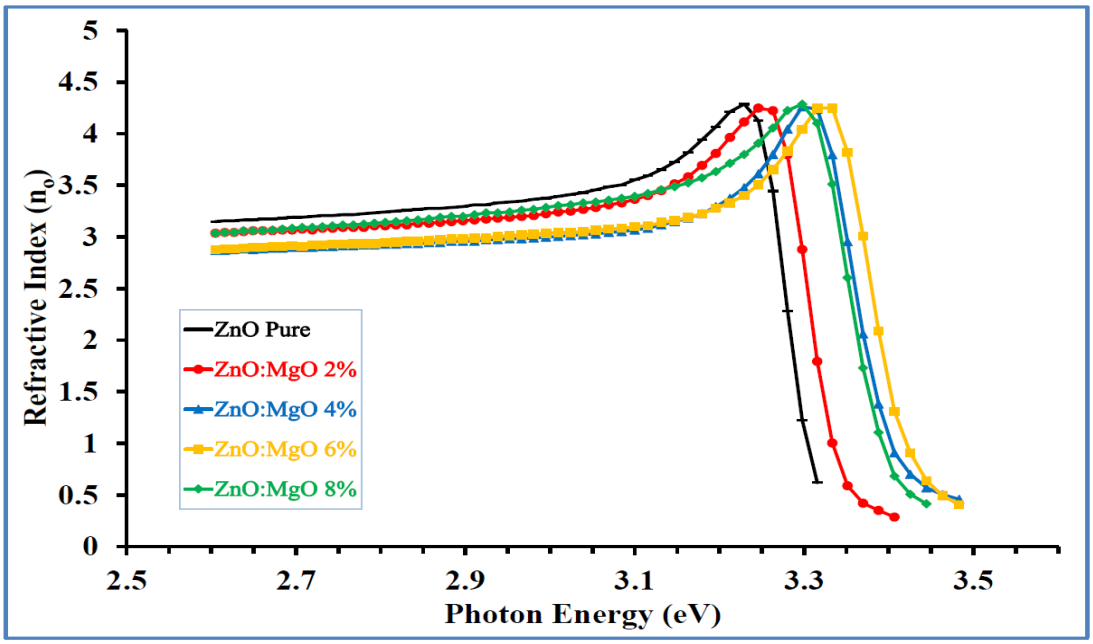
شكل (4-31) يبين فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 6%).



شكل (4-32) يبين فجوة الطاقة البصرية كدالة لطاقة الفوتون لغشاء (ZnO: MgO 8%).

(6-3-4) معامل الانكسار (n_o): (Refractive Index)

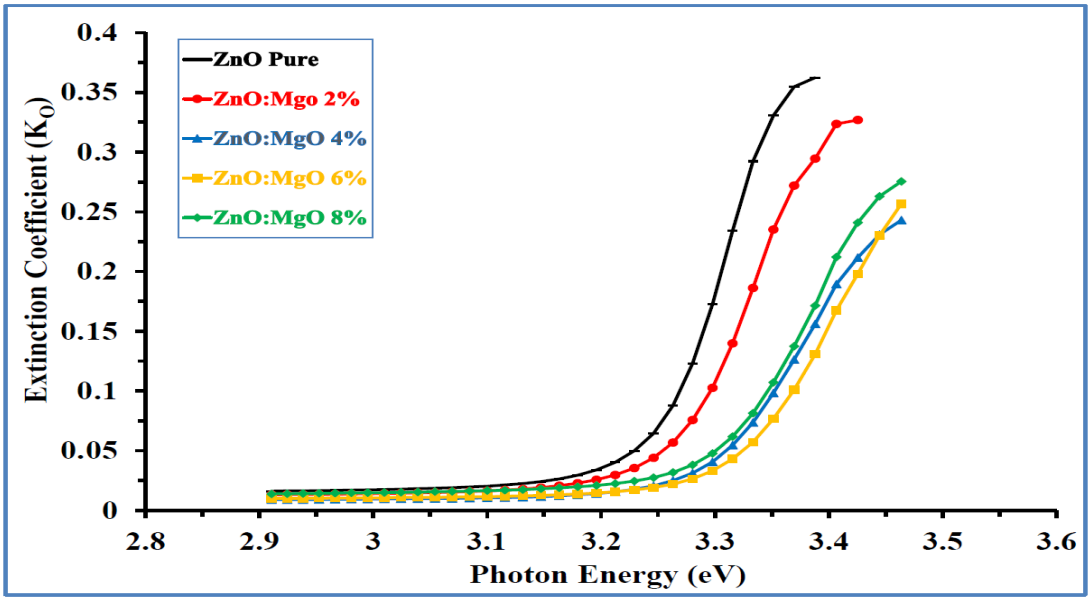
يعرف معامل الانكسار (n_o) بأنه النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ وسرعته داخل المادة، يتأثر معامل الانكسار بعدة عوامل منها نوع المادة وتركيبها البلوري، تم حساب معامل الانكسار لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بنسب حجمية مختلفة من أوكسيد المغنيسيوم (MgO) وذلك بالاعتماد على العلاقة (2-18). يلاحظ من الشكل (4-33) أن سلوك منحنى معامل الانكسار مشابه لطبيعة منحنى الانعكاسية وذلك لارتباط الانعكاسية مع معامل الانكسار وفقاً للمعادلة اعلاه، وتظهر النتائج بشكل واضح أن قيم معامل الانكسار تتناقص مع زيادة نسب التشويب بأوكسيد المغنيسيوم وباتجاه الطاقات العالية ، يعزى هذا الانخفاض إلى تأثير شائبة أوكسيد المغنيسيوم على البناء البلوري للمادة، فإضافة أوكسيد المغنيسيوم تعمل على زيادة حجم الحبيبات البلورية، مما يؤدي الى زيادة كثافة المادة (زيادة كثافة التعبئة) هذه الزيادة في الكثافة تؤدي بدورها الى تقليل سرعة انتشار الضوء خلال المادة، وهو ما يتوافق تماماً مع تعريف معامل الانكسار، يتفق هذا السلوك المرصود لمعامل الانكسار مع ما جاء في الدراسات السابقة [127].



شكل (4-33) يبين معامل الانكسار كدالة لطاقة الفوتون لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.

(7-3-4) معامل الخمود (K_o) : (Extinction Coefficient)

يعرّف معامل الخمود (K_o) بأنه مقياس للخمود الذي تتعرض له الموجات الكهرومغناطيسية عند اختراقها للمادة، ويعبر عن كمية طاقة الفوتونات الساقطة التي تمتصها الكترونات المادة. تم حساب قيم معامل الخمود لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنسيوم بنسب حجمية مختلفة باستخدام قيم معامل الامتصاص والمحسوبة من أطياف الامتصاصية باستعمال العلاقة (2-19). يوضح الشكل (4-34) تغير معامل الخمود مع طاقة الفوتون. يلاحظ أن منحنيات معامل الخمود تتشابه بشكل كبير مع منحنيات معامل الامتصاص، وهذا التشابه يعزى إلى أن حساب قيم معامل الخمود يعتمد بشكل مباشر على قيم معامل الامتصاص. يظهر سلوك منحنى معامل الخمود لغشاء أوكسيد الزنك غير المشوب انخفاضاً طفيفاً عند النطاقات الفوتونية المنخفضة، ثم يزداد بشكل حاد ضمن نطاق الطاقات المقابلة لحافة الامتصاص الاسية (الطاقات الفوتونية العالية). يمكن أن تعزى هذه الزيادة السريعة إلى الارتفاع المفاجئ في معامل الامتصاص عند هذه الطاقات، مما يشير الى حدوث انتقالات الكترونية مباشرة. أما بالنسبة لسلوك منحنى الأغشية المشوبة بأكسيد المغنيسيوم، فيلاحظ ازدياده تدريجياً مع زيادة طاقة الفوتون، ويصل إلى قيمته العظمى عند الطاقات المقابلة لحافة الامتصاص الأساسية. علاوة على ذلك، أدت الزيادة في نسبة التشويب إلى انخفاض قيم معامل الخمود.

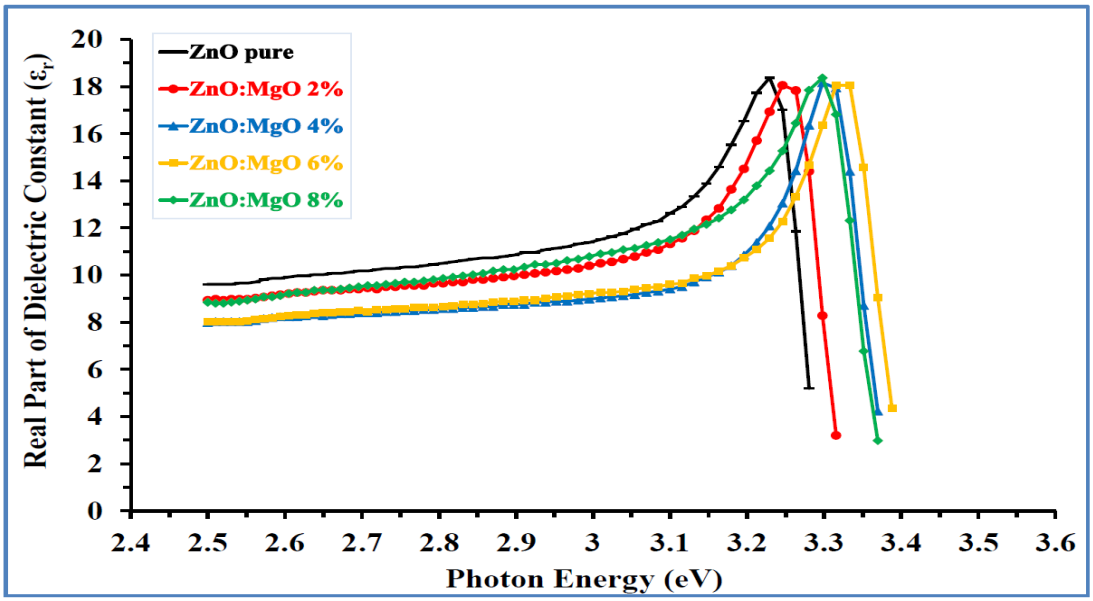


شكل (4-34) يبين معامل الخمود كدالة لطاقة الفوتون لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.

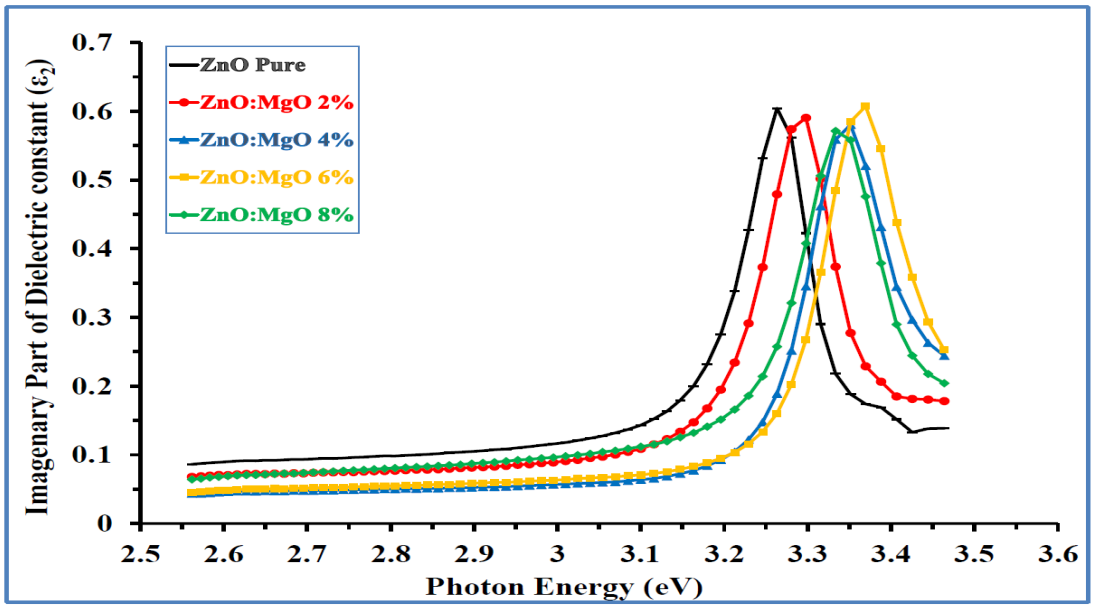
(4-3-8) ثابت العزل الكهربائي (ε): (Dielectric Constant)

يعرف ثابت العزل الكهربائي بأنه مقياس لسلوك المادة عند تعرضها لمجالات كهربائية عالية التردد، مثل تلك المصاحبة للموجات الكهرومغناطيسية في نطاق الضوء المرئي، تم حساب الجزء الحقيقي من ثابت العزل الكهربائي(ε_r) (Real part of Dielectric Constant) كدالة لطاقة الفوتون الساقط لجميع الاغشية المحضرة، إذ تم حسابه باستعمال العلاقة (2-23). يظهر الشكل (4-35) أن قيمة الجزء الحقيقي من ثابت العزل الكهربائي تتزايد مع زيادة طاقة الفوتون الساقط لجميع الاغشية المحضرة، كما يلاحظ ان سلوك منحنيات الجزء الحقيقي من ثابت العزل الكهربائي يتشابه الى حد كبير مع سلوك منحنيات معامل الانكسار. يمكن تفسير هذا التشابه بان تأثير معامل الخمود يكون ضئيلاً جداً ويمكن اهماله مقارنة بتأثير معامل الانكسار، خاصة عن الطاقات الفوتونية المنخفضة. كما تبين النتائج ان قيمة الجزء الحقيقي من ثابت العزل الكهربائي تنخفض مع زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنسيوم (MgO) وتتجه المنحنيات نحو قيم طاقات فوتونية اعلى. وهذا يشير أيضا الى ان إضافة أوكسيد المغنسيوم تؤثر على الخصائص البصرية للمادة بطريقة تقلل من استجابتها للمجال الكهربائي عند طاقات معينة. اما فيما يخص الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي (ε_2) (Imaginary Part Of Dielectric Constant) فقد تم حسابه من العلاقة (2-24) حيث يوضح الشكل (4-36) تغير الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي كدالة لطاقة الفوتون الساقط لجميع الاغشية المحضرة، من الشكل نلاحظ أن سلوك منحنيات الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي يماثل

سلوك منحنيات معامل الخمود حيث يكون تأثير معامل الانكسار هنا محدوداً للغاية ولهذا يمكن اهماله. كما يلاحظ أن زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم تؤدي الى تقليل قيمة الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي ويعزى هذا التغير الى ادخال ذرات أوكسيد المغنيسيوم في التركيب البلوري لغشاء أوكسيد الزنك غير المشوب، يؤدي هذا الدمج الى تغيير في التركيب الالكتروني للمادة مقارنة بالغشاء غير المشوب، مما يؤثر بدوره على آليات الامتصاص وفقد الطاقة في المادة وبالتالي ينعكس على الجزء الخيالي لثابت العزل الكهربائي.



شكل (4-35) يبين ثابت العزل الحقيقي كدالة لطاقة الفوتون لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.



شكل (4-36) يبين ثابت العزل الخيالي كدالة لطاقة الفوتون لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.

(4-4) نتائج القياسات الكهربائية : (Results of Electrical Measurement)

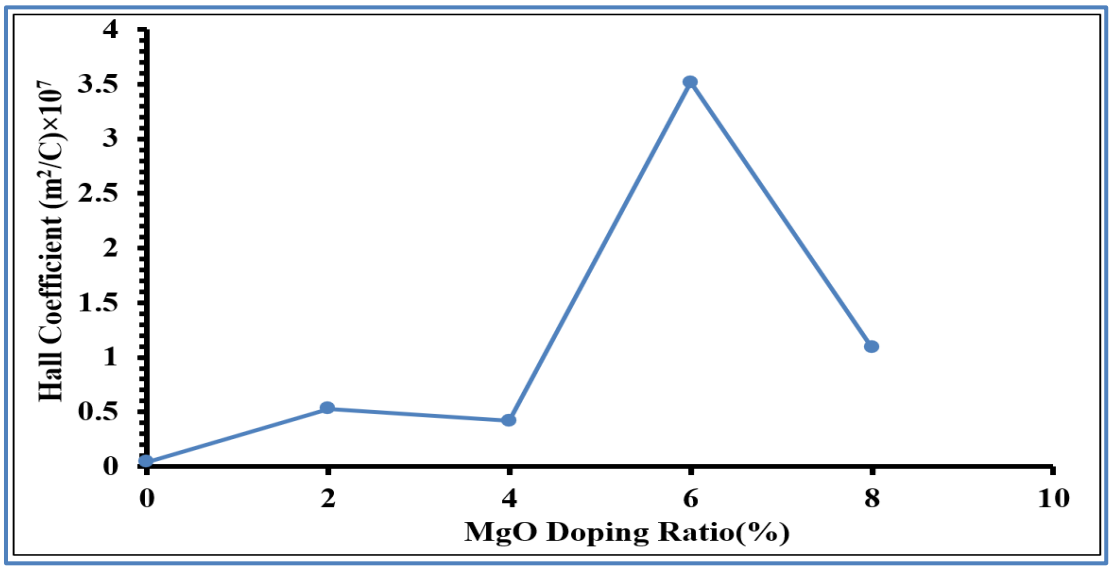
(4-4-1) تأثير هول : (Hall Effect)

تم دراسة قياسات تأثير هول للأغشية الرقيقة المحضرة من أوكسيد الزنك غير المشوب والمشوب بنسب حجمية مختلفة من أوكسيد المغنيسيوم لغرض تحديد نوع وتركيز حاملات الشحنة، بالإضافة الى قيم معامل هول (Hall Coefficient) والتوصيلية الكهربائية (Conductivity) والمقاومية (Resistivity) والتحركية (Mobility). أجريت جميع هذه القياسات بدرجة حرارة الغرفة. أظهرت النتائج ان الاغشية (ZnO: MgO) غير المشوبة والمشوبة (عدا نسبة التشويب 8%) تظهر توصيلية من النوع السالب (n-type) مما يشير الى ان الالكترونات هي حاملات الشحنة الأغلبية، بينما تشكل الفجوات حاملات الشحنة الأقلية، وهذه النتيجة تتفق مع الدراسة [128]، بينما لوحظ تحول في نوع التوصيلية إلى النوع الموجب (p-type) بنسبة تشويب (8%) من أوكسيد المغنيسيوم، يعزى هذا التحول الى الزيادة الكبيرة في تركيز حاملات الشحنة الموجبة مقارنة بحاملات الشحنة السالبة ، وهو ما نتج عن وجود أوكسيد المغنيسيوم بنسبة تشويب عالية نسبياً، أي ان التوصيلية تغيرت بزيادة نسبة التشويب. وهذا يتفق مع الدراسة [129]. ويبين الجدول (4-5) نتائج قياسات تأثير هول (Hall Effect).

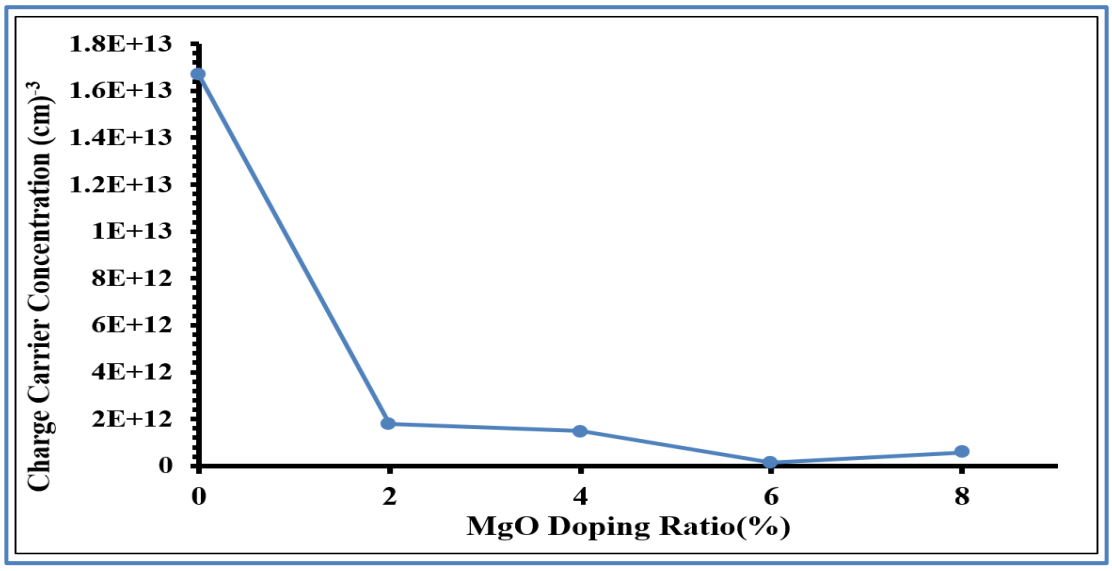
جدول (4-5) قيم معامل هول والتوصيلية الكهربائية والتحركية الكهربائية وتركيز حاملات الشحنة لأغشية أوكسيد الزنك الغير مشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم بنسب حجمية مختلفة.

Sample	Type	Concentration $(cm)^{-3}$	Hall Coefficient $RH(m^2/C)$	Conductivity $(\Omega.cm)^{-1}$	Resistivity $(\Omega.cm)$	Mobility $(cm^2/v.s)$
ZnO (Pure)	n-type	-1.67×10^{13}	-3.75×10^{5}	1.63×10^{-4}	6.15×10^{3}	6.10×10^{1}
ZnO: MgO (2%)	n-type	-1.79×10^{12}	-5.29×10^{6}	3.10×10^{-5}	3.23×10^{4}	1.64×10^{2}
ZnO: MgO (4%)	n-type	-1.48×10^{12}	-4.21×10^{6}	2.72×10^{-5}	3.67×10^{4}	1.15×10^{2}
ZnO: MgO (6%)	n-type	-1.51×10^{11}	-3.52×10^{7}	1.31×10^{-5}	7.64×10^{4}	4.61×10^{2}
ZnO: MgO (8%)	p-type	5.71×10^{11}	1.09×10^{7}	1.40×10^{-5}	7.14×10^{4}	1.53×10^{2}

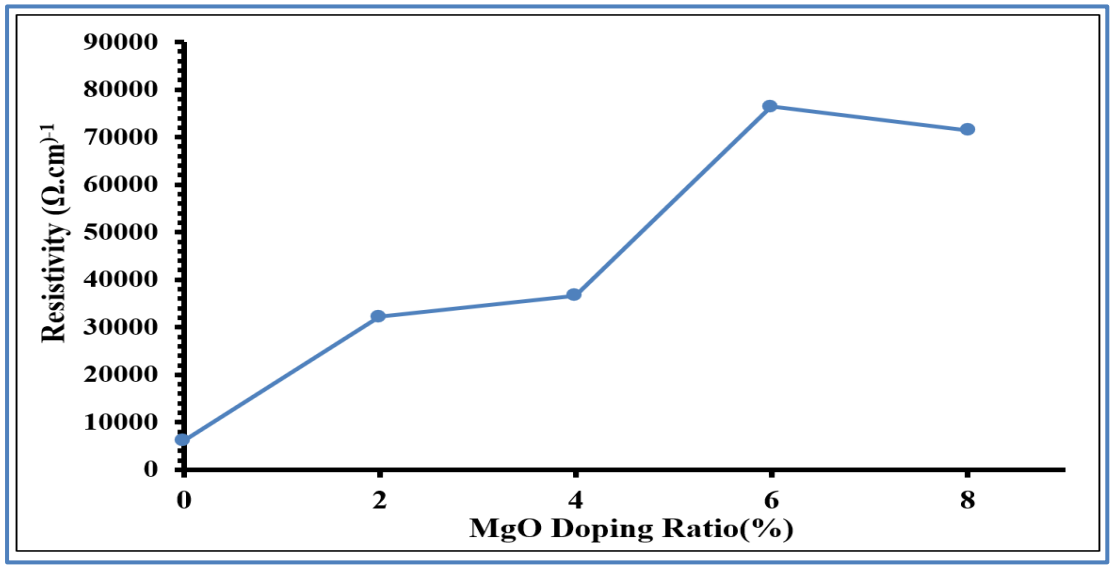
من خلال البيانات الموضحة في الجدول (4-5) والاشكال (4-37) الى (4-39) نلاحظ عدة تغييرات في الخصائص الكهربائية لأغشية أوكسيد الزنك مع زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم. يتبين من النتائج أن تركيز حاملات الشحنة السالبة (الالكترونات) يتناقص بشكل ملحوظ بزيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم، ويرجع هذا الانخفاض الى زيادة تركيز ايونات المغنيسيوم (Mg^{+2}) ضمن التركيب البلوري للأغشية على حساب ايونات الزنك. عند وصول نسبة التشويب الى (8%) يحدث تحول جذري في نوع حاملات الشحنة الرئيسية حيث تصبح الفجوات (Holes) هي السائدة. يشير هذا التحول إلى أن عدد الفجوات المتولدة يتجاوز عدد الالكترونات الموجودة فعلياً، مما يؤدي الى هيمنة الفجوات كحاملات شحنة رئيسية في هذه الاغشية. تظهر التوصيلية الكهربائية (Conductivity) انخفاضاً واضحاً مع زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم حتى نسبة (6%) يفسر هذا الانخفاض بتناقص تركيز الالكترونات التي تعد حاملات الشحنة الرئيسية في الاغشية من النوع (n). عند نسبة تشويب (8%) بأوكسيد المغنيسيوم، تبقى التوصيلية منخفضة نسبياً، ويعود ذلك الى التركيز المنخفض للفجوات التي أصبحت حاملات الشحنة الرئيسية في الاغشية من نوع (p). وبما ان المقاومية الكهربائية (Resistivity) هي مقلوب التوصيلية ($\rho=1/\sigma$) فمن المتوقع ان ترتفع المقاومية تدريجياً بزيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنسيوم من (2%) الى (6%)، وعند نسبة التشويب (8%) تبقى المقاومية مرتفعة نسبياً وهذا يتوافق مع قيمة التوصيلية الكهربائية. تظهر الحركية (Mobility) سلوكاً متذبذباً (ما بين الزيادة والنقصان) في اغشية أوكسيد الزنك الغير مشوبة وحتى نسبة التشويب (6%)، اما عند نسبة التشويب (8%) فيلاحظ انخفاضاً في الحركية. يعزى هذا الانخفاض إلى أن الفجوات التي اصبحت حاملات الشحنة الرئيسية في هذه العينة، تكون اقل حركية بطبيعتها من الالكترونات، ويرجع هذا الاختلاف بشكل أساسي الى التباين في الكتل الفعالة بين الالكترونات والفجوات.



شكل (4-37) معامل هول كدالة لنسب التشويب للأغشية المحضرة.



شكل (4-38) تركيز حاملات الشحنة كدالة لنسب التشويب للأغشية المحضرة.



شكل (4-39) المقاومية كدالة لنسب التشويب للأغشية المحضرة.

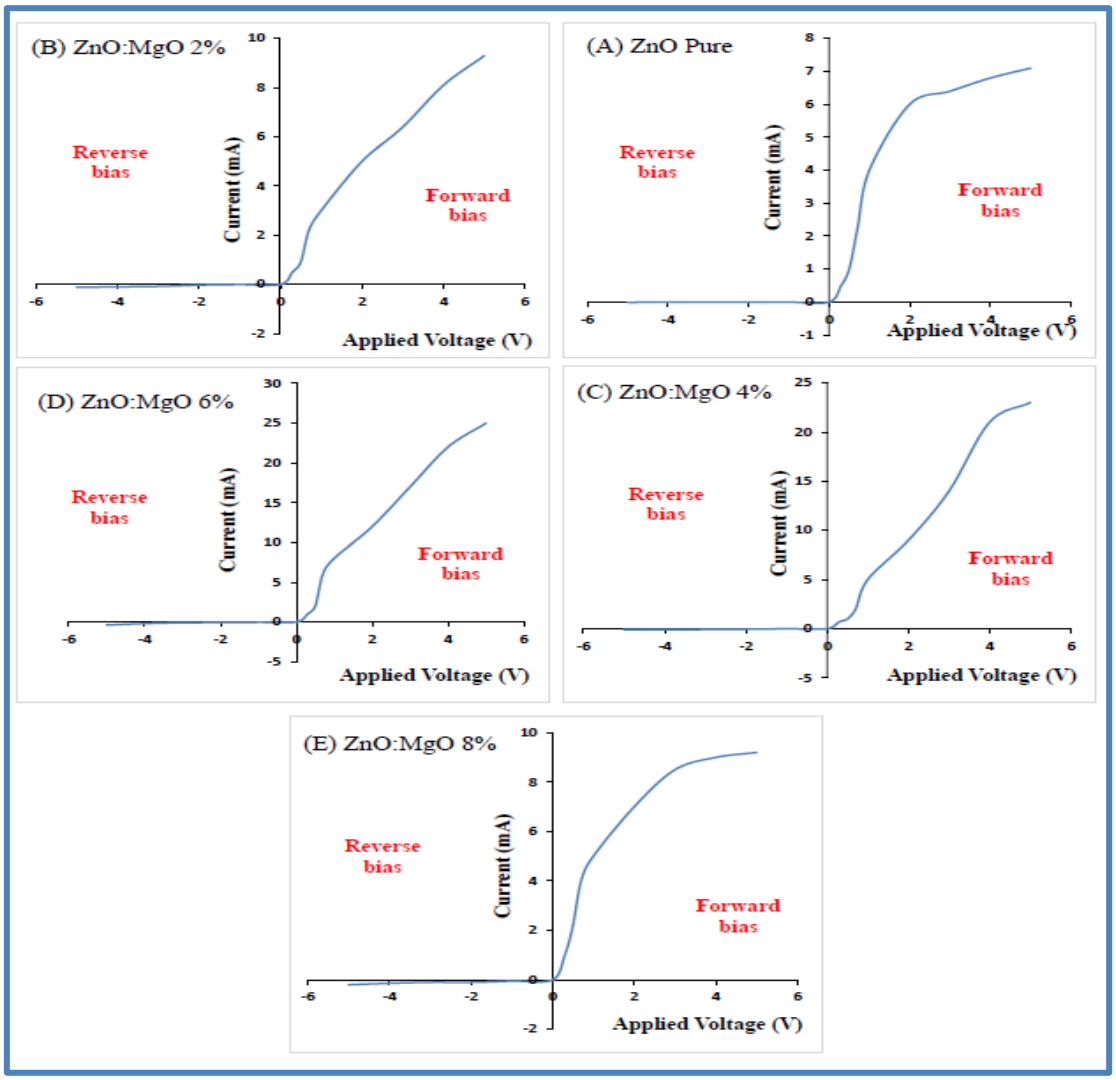
(2-4-4) قياسات تيار – جهد: (Current – Voltage (I-V) Measurements)

(1-2-4-4) قياسات التيار – الجهد في حالة الظلام:

(Dark Current-Voltage Measurements)

يوضح الشكل (4-40) اعتماد تيار الظلام (Dark Current) على الجهد المطبق عند الانحياز الامامي والعكسي لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) غير المشوبة والمشوبة بنسب مختلفة من أوكسيد المغنيسيوم (MgO). وتهدف هذه القياسات إلى استكشاف تأثير نسبة التشويب على الخصائص الكهربائية لهذه الاغشية في غياب الإضاءة. يظهر الشكل زيادة تدريجية في قيم التيار في الانحياز

الامامي مع زيادة الجهد المطبق، أي انها تشير الى تحسن التوصيلية في الظلام. فبالنسبة الى عينة أوكسيد الزنك غير المشوبة بلغ التيار (7.1 Am)عند 5 فولت. وعند التشويب بأوكسيد المغنيسيوم لوحظ تحسن ملحوظ في التوصيلية، حيث بلغت ذروتها عند غشاء ZnO: MgO وبنسبة تشويب 6% (25 mA) عند 5 فولت، يعزى هذا التحسن الملحوظ في التوصيلية في الظلام الى تأثيرات متعددة ناجمة عن إضافة أوكسيد المغنيسيوم حيث أدت الى تحسن جودة البلورة وتقليل الكثافة الكلية للعيوب البلورية، مما يؤدي الى زيادة حركية حاملات الشحنة وتوافرها للتوصيل. اما عند التشويب بنسبة 8% فيلاحظ سلوكاً مختلفاً حيث انخفضت قيمة التيار الامامي الى 9.2 mA عند جهد 5V، هذا التدهور في التوصيلية يعزى الى تأثير نوع القاعدة p-type حيث أثر هذا على آلية نقل الشحنات. اما لنطاق للانحياز العكسي، فأظهرت جميع الاغشية تيار تسرب (Leakage Current) منخفضاً للغاية، وهذا يشير الى الجودة العالية في منع تدفق التيار في الاتجاه العكسي وعدم وجود عيوب كبيرة تعمل كمسارات تسرب للتيار وهذه الخاصية مرغوبة جداً لتطبيقات أجهزة الاستشعار.

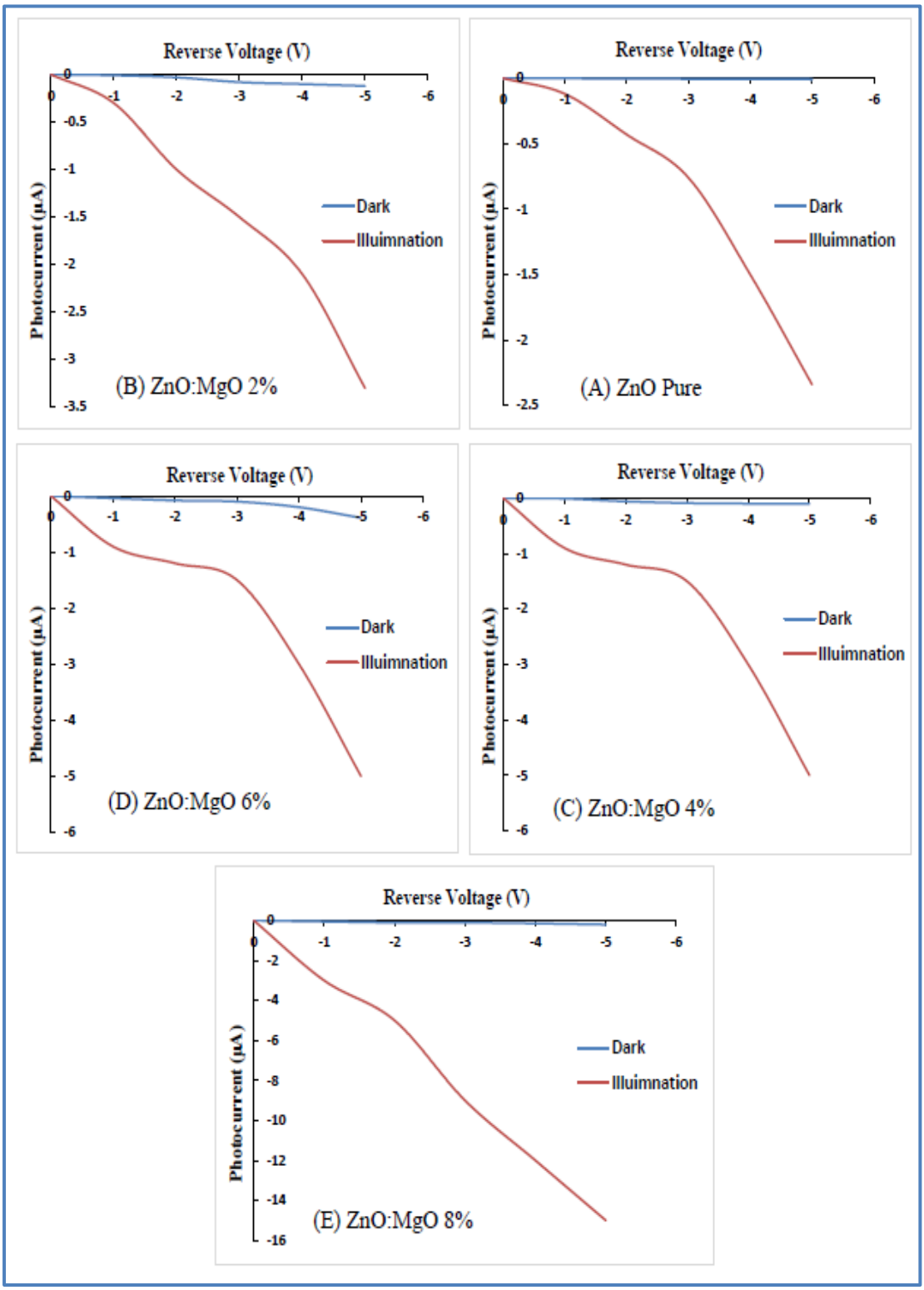


شكل (4-40) يبين تيار -جهد في حالة الظلام عند الربط الامامي والعكسي لجميع الاغشية المحضرة

(2-2-4-4) قياسات التيار – الجهد في حالة الإضاءة:

(Illuminated Current-Voltage Measurement)

يظهر الشكل (4-41) الخصائص الكهربائية للمتحسسات الضوئية المحضرة من اغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم والمرسبة على قواعد من السيلكون المسامي، تقدم هذه الخصائص رؤية معمقة لأداء هذه الاغشية في كل من الظلام وتحت الإضاءة في نطاق الانحياز العكسي. ان تيار الظلام (Dark Current) المشار اليه بالخط الأزرق في الرسم البياني يظهر قيماً منخفضة للغاية تقترب من الصفر في جميع نطاقات الجهد العكسي المطبقة ولجميع العينات المحضرة. تعد هذه الخاصية بالغة الاهمية لأداء المتحسسات الضوئية، حيث تساهم في تقليل الضوضاء الخلفية وتحسين نسبة الإشارة الى الضوضاء (Signal – to-Noise Ratio)، يعزز هذا الانخفاض في تيار الظلام من قدرة الكاشف على الكشف عن الإشارات الضوئية الضعيفة بدقة عالية. يشير هذا السلوك الى جودة العزل الكهربائي للأغشية وغياب مسارات تسرب كبيرة للتيار في غياب الإضاءة. في المقابل، وعند التعرض للإضاءة (المشار اليه بالخط الأحمر)، يظهر التيار الضوئي (Photocurrent) استجابة مميزة، حيث يزداد التيار الضوئي مع زيادة الجهد العكسي المطبق. تسجل عينة ZnO غير المشوبة استجابة ضوئية واضحة حيث يصل التيار الضوئي (Photocurrent) الى حوالي (-2.4 µA) عند جهد (-5V). هذا يشير إلى امتصاص جيد للفوتونات وتوليد فعال لحاملات الشحنة في غشاء ZnO غير المشوب. في المقابل، يلاحظ تحسن ملحوظ في الأداء الكهروضوئي مع زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم، وصولاً الى ذروته عند نسبة التشويب 8%. حيث سجل التيار الضوئي قيمة تقارب من (-15µA)، وهذا يشير إلى أن التشويب بـِ MgO يلعب دوراً ايجابياً في تعزيز كفاءة المتحسسات الضوئية المصنعة من أغشية أوكسيد الزنك في نطاق الانحياز العكسي، مما يجعلها واعدة للتطبيقات التي تتطلب حساسية ضوئية عالية.

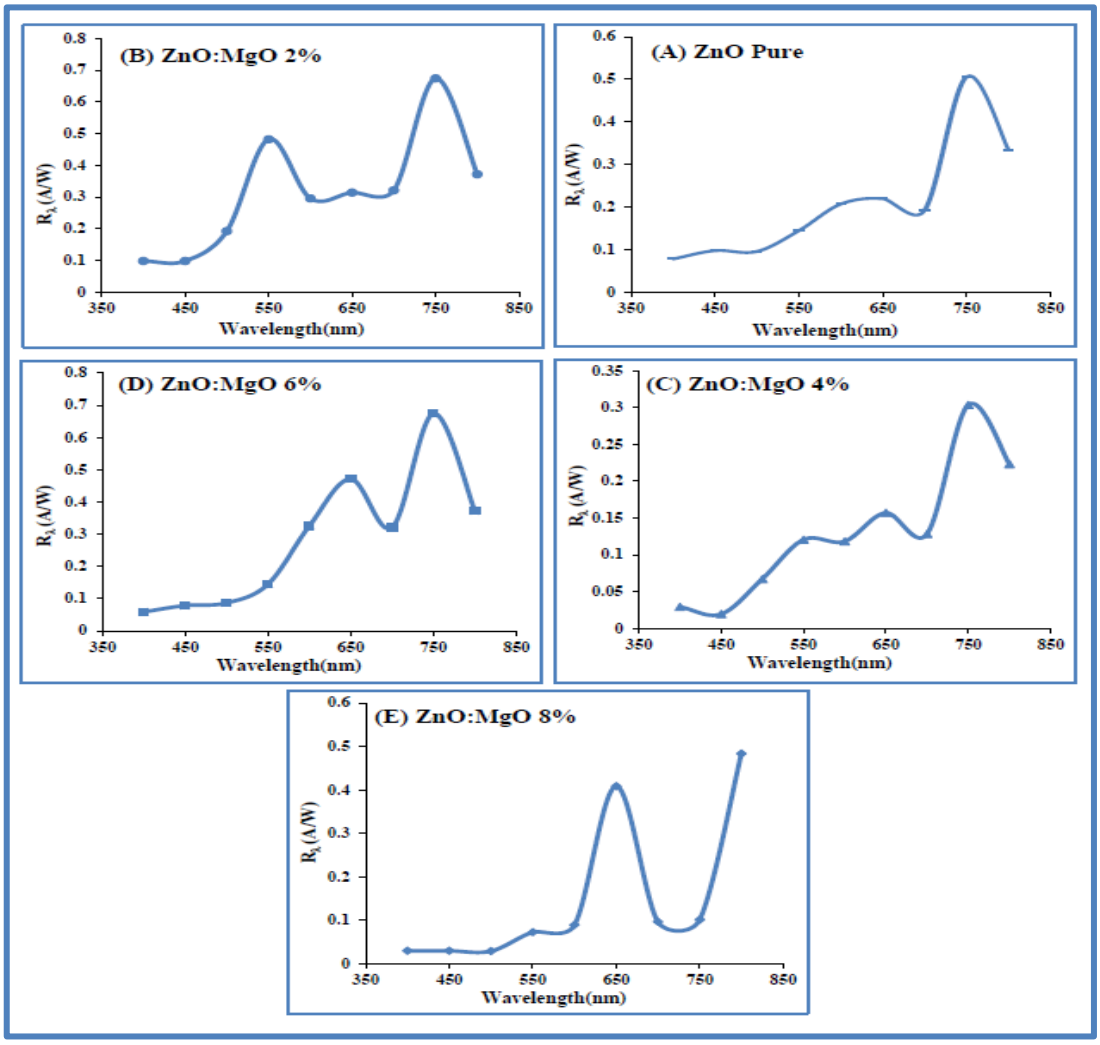


شكل (4-41) يبين تيار -جهد في حالة الاضاءة عند الجهد العكسي لجميع الاغشية المحضرة

(5-4) نتائج الخواص الكشفية: (The Detective Characteristics Results)

(1-5-4) الاستجابية الطيفية : (Spectral Responsivity (R_λ))

تعد الاستجابية الطيفية (R_λ) معياراً حاسماً لتقييم كفاءة المتحسسات الضوئية ضمن نطاقات الأطوال الموجية المتعددة. توضح البيانات المقاسة اعتماد الاستجابية بوحدة (A/W) على الطول الموجي لأغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة والمشوبة بنسب حجمية مختلفة من أوكسيد المغنيسيوم والمرسبة على قواعد من السيلكون المسامي، يظهر الشكل (4-42) استجابة مميزة لغشاء أوكسيد الزنك غير المشوب حيث تبدأ في نطاق الطيف فوق البنفسجي القريب/ المرئي حوالي (380 - 450 nm) والتي تعزى بشكل أساسي إلى امتصاص الحزمة الأساسية (Band-to-band absorption) لأوكسيد الزنك، كما تزداد الاستجابية تدريجياً لتصل الى قمة واضحة ذروتها عند الطول الموجي (750 nm) ثم تتناقص، ويعزى هذا الى مستويات عيوب داخل فجوة الطاقة مثل وجود ذرات زنك بينية التي يمكن ان تولد مستويات طاقة وسطية تسهل امتصاص الفوتونات ذات الطاقة المنخفضة. ان التشويب بأوكسيد المغنيسيوم يحدث تغييرات معقدة في الاستجابة الطيفية لهذه الاغشية، فنتائج العينات المشوبة بأوكسيد المغنيسيوم تبرز استجابة طيفية متعددة القمم مما يدل على تعقيد آليات الامتصاص بسبب وجود مستويات طاقة وسطية نتيجة التشويب أو وجود تأثيرات بصرية داخلية (مثل التداخل او الانعكاس) ضمن بنية (الغشاء/قاعدة) والذي يلعب دوراً في تشكيل الاستجابية الطيفية وظهور قمم متعددة. كما أن التغير في فجوة الطاقة البصرية بسبب التشويب بأوكسيد المغنيسيوم كونه يمتلك فجوة طاقة أوسع مما هي عليه في أوكسيد الزنك وهذا بالتالي يؤثر على منطقة الامتصاص الأساسية. وبناءً على النتائج، تظهر عينة غشاء أوكسيد الزنك المشوب بنسبة (2%) بأوكسيد المغنيسيوم اعلى قيمة استجابية حيث تشير هذه القيمة المرتفعة الى وجود آلية كسب ضوئي (Photo Gain) فعالة. هذا الأداء الجيد يبرز كمرشح واعد للتطبيقات التي تتطلب حساسية عالية للأطوال الموجية المحددة.

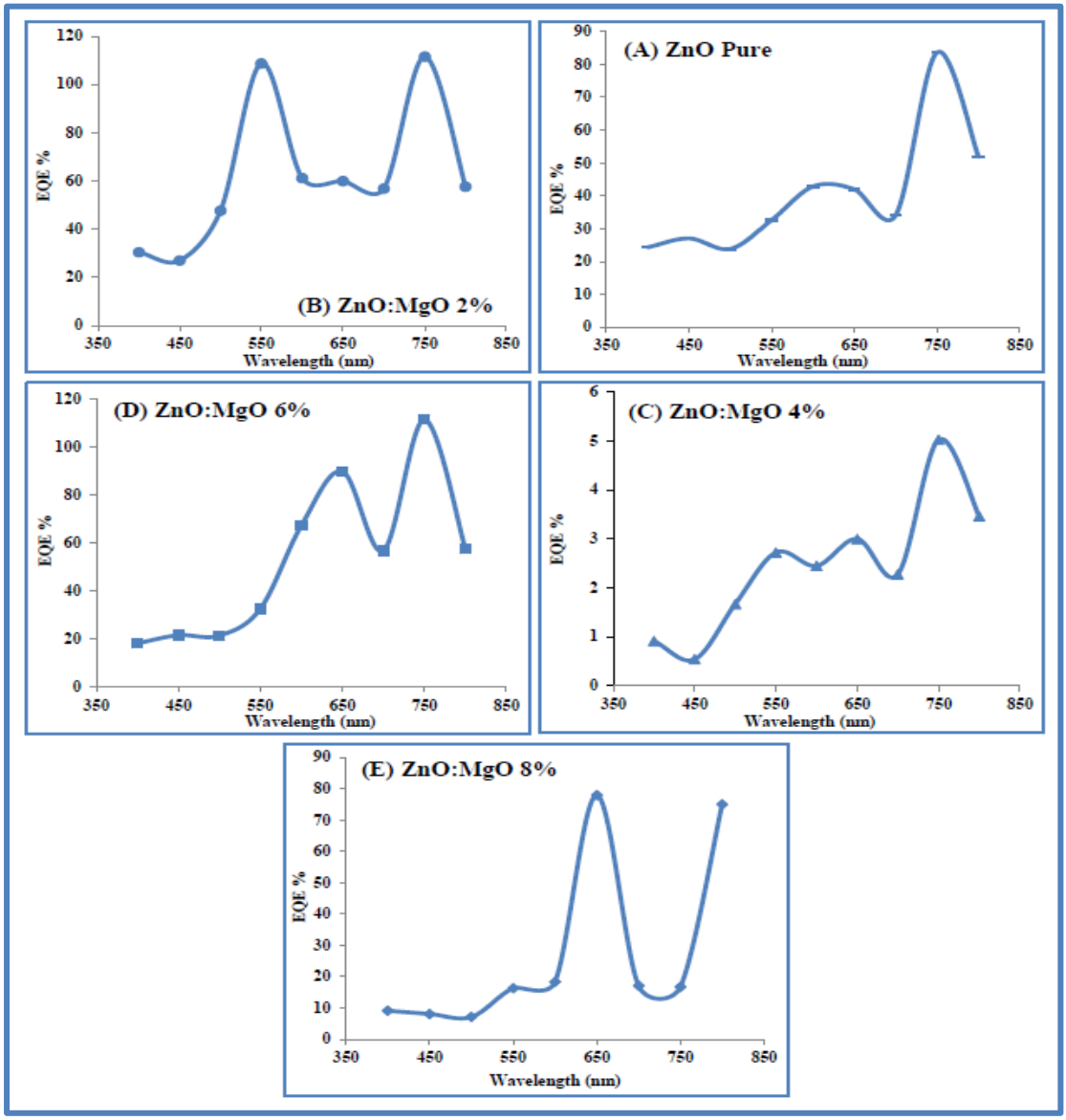


شكل (4-42) يبين تغير الاستجابية الطيفية كدلالة للطول الموجي لجميع الاغشية المحضرة.

(2-5-4) الكفاءة الكمية: (Quantum Efficiency)

تعد الكفاءة الكمية الخارجية (EQE) مقياساً بالغ الأهمية لأداء المتحسسات الضوئية حيث تعبر عن النسبة المئوية للفوتونات الساقطة التي تتحول الى الكترونات او (ازواج الكترون- فجوة) وتساهم في التيار الكلي. توضح البيانات في الشكل (4-43) أن غشاء أوكسيد الزنك غير المشوب يظهر استجابة معقولة في الكفاءة الكمية حيث تتجاوز الـ (40%) في نطاق الضوء المرئي، كما يظهر نسبة جيدة في الكفاءة الكمية، حيث تتجاوز (80%) في منطقة الاشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) عند الطول الموجي حوالي (750 nm)، يشير هذا إلى كفاءة عالية في تحويل الفوتونات إلى حاملات شحنة في هذه الاطوال الموجية، وهذا يعزى الى خصائص أوكسيد الزنك في امتصاص الضوء وتوليد حوامل الشحنة. إن التشويب بأوكسيد المغنيسيوم قد أثر تأثيراً مباشراً على الكفاءة الكمية الخارجة الاغشية المحضرة، حيث ان قيم الكفاءة الكمية الخارجة تتجاوز (100%) في

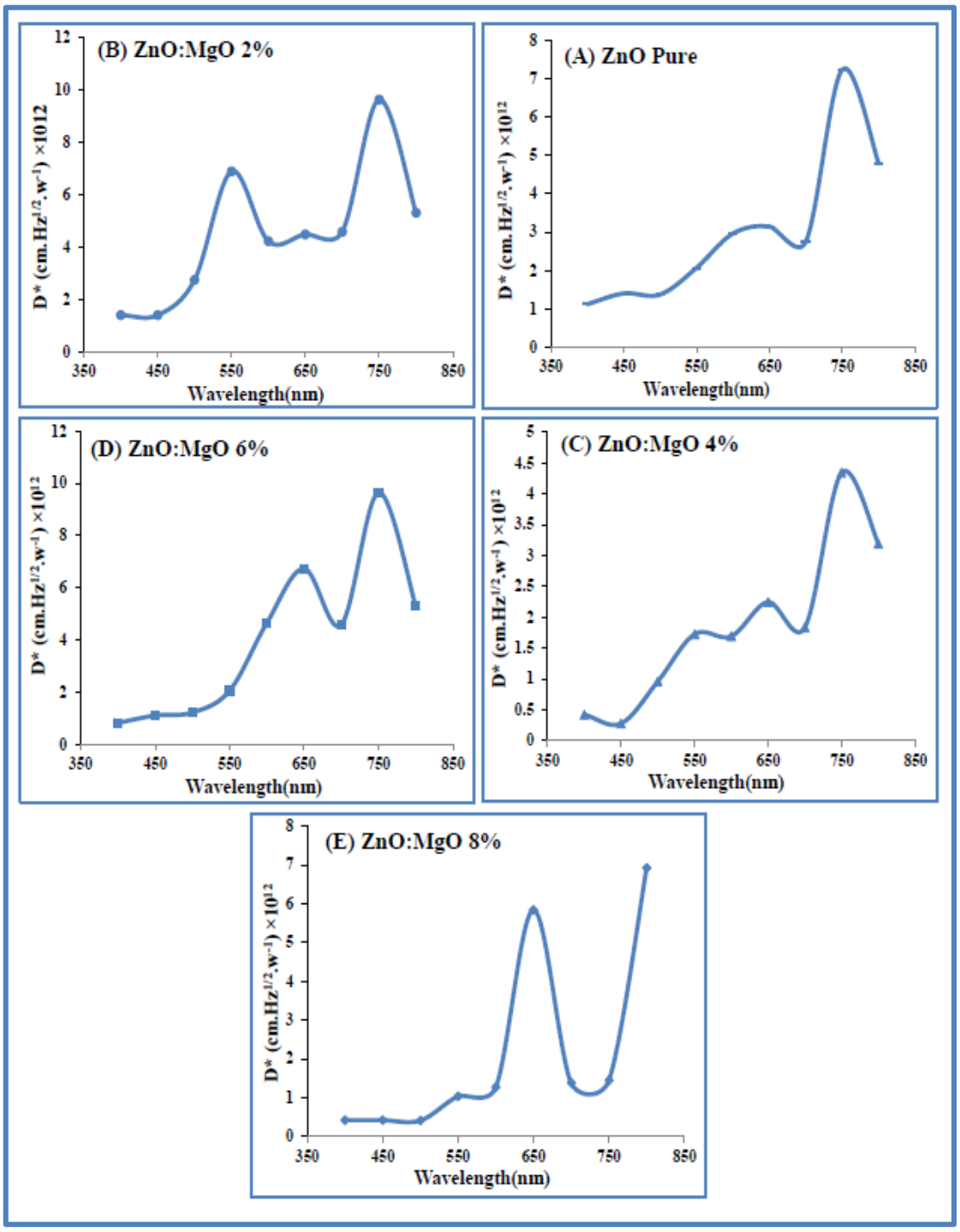
نطاقات موجية معينة كما في نسب التشويب (2% و6%). وهذا يشير بوضوح الى وجود آلية كسب ضوئي (Photo Gain) فعال داخل المادة. يحدث الكسب الضوئي عندما يولد فوتون واحد ممتص عدداً من حاملات الشحنة (الكترونات او فجوات) يساهم في التيار الكلي، وتفسر هذه الالية عادةً عن طريق وجود مراكز المحاصرة (Trap Centers) تعمل على إطالة عمر حوامل الشحنة من نوع معين مثل (الفجوات) بينما تسمح لحوامل الشحنة من النوع الاخر (الالكترونات) بالمرور عبر الدائرة الخارجية عدة مرات قبل إعادة الاتحاد. وتؤكد نتائج الكفاءة الكمية الخارجة على أن التشويب بأوكسيد المغنيسيوم ساهم في تحسين أداء المتحسسات الضوئية القائمة على أغشية أوكسيد الزنك الغير مشوبة. حيث تظهر معظم العينات المشوبة كسباً ضوئياً فعالاً، مما يدل على قدرتها في تحويل الفوتونات الى إشارة كهربائية.



شكل (4-43) يبين تغير الكفاءة الكمية كدلالة للطول الموجي لجميع الاغشية المحضرة.

(3-5-4) الكشفية النوعية (D*) : (Specific Detectivity)

تعد الكشفية النوعية (D*) مقياساً حاسماً لأداء المتحسسات الضوئية، حيث تحدد مدى حساسية الكاشف للضوء وقدرته على اكتشاف الإشارات الضوئية الضعيفة في وجود الضوضاء الكهروضوئية، يظهر الشكل (4-44) أن هناك ارتباطاً ما بين الكشفية النوعية والكفاءة الكمية، فالأغشية التي لديها كفاءة كمية كبيرة تظهر بالمقابل قيماً مرتفعة للكشفية النوعية وهذا الارتباط يبرر الأهمية البالغة آليات تضخيم الإشارة الداخلية في تحسين حساسية الكاشف وقدرته على التمييز بين الإشارة الضوئية والضوضاء. تظهر الكشفية النوعية لعينة أوكسيد الزنك غير المشوبة تزايداً تدريجياً مع الزيادة بالطول الموجي لتصل ذروتها عند الطول الموجي حوالي (750 nm) ثم تتناقص بعد ذلك. ويشير هذا إلى أن أوكسيد الزنك غير المشوب يظهر استجابة جيدة للكشف الضوئي بسبب الخصائص الالكترونية والبصرية لأوكسيد الزنك حيث يتم امتصاص الفوتونات ذات الطاقة المطابقة لفجوة الطاقة للمادة، مما يؤدي الى توليد حوامل شحنة وارتفاع في الكشفية الضوئية. كما تظهر النتائج ان التشويب بأوكسيد المغنيسيوم يؤثر بشكل كبير على الكشفية النوعية، وان تركيز التشويب (2%) يظهر أفضل أداء كاشف ضوئي ويحقق اعلى قيمة للكشفية النوعية، وهذا يشير الى تحسن كبير في كفاءة الكشف الضوئي في منطقة الاطوال الموجية تحت الحمراء القريبة حوالي (750 nm). ويمكن تفسير هذا السلوك بناءً على عدة عوامل منها: تغيير في فجوة الطاقة وهذا يؤثر على امتصاص الفوتونات واستجابة المادة للأطوال الموجية وحوامل الشحنة. وكذلك تحسين جودة البلورة وزيادة تركيز حوامل الشحنة حيث يعمل التشويب بأوكسيد المغنيسيوم على التقليل من العيوب البلورية وتحسين حجم البلورات كما يعمل أوكسيد المغنيسيوم كمتبرع أو مستقبل، مما يؤثر على تركيز حوامل الشحنة الحرة في المادة ويعزز التوصيلية الضوئية. بشكل عام، من الممكن ان يكون التشويب بأوكسيد المغنيسيوم استراتيجية فعالة في تحسين أداء الكواشف الضوئية القائمة على أوكسيد الزنك مع ضرورة تحديد التركيز الأمثل للتشويب لتحقيق أعلى كفاءة ممكنة. وكما تظهر البيانات بوضوح أن زيادة الكشفية النوعية في المنطقة تحت الحمراء القريبة، تجعل من هذه الاغشية مرشحاً للتطبيقات التي تتطلب استجابة في هذا النطاق الطيفي، مثل أجهزة الاستشعار الضوئية او الخلايا الشمسية.



شكل (4-44) يبين تغير الكشفية النوعية كدلالة للطول الموجي لجميع الاغشية المحضرة.

(6-4) الاستنتاجات: (Conclusions)

1- اظهرت فحوصات حيود الاشعة السينية (XRD) أن أغشية أوكسيد الزنك (ZnO) الرقيقة غير المشوبة والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم (MgO) تتمتع بتركيب متعدد التبلور ومن النوع السداسي المتراص مع اتجاه نمو مفضل (002).

2- كشفت تحليلات مجهر القوة الذرية (AFM) الى زيادة ملحوظة في متوسط خشونة السطح ومعدل الجذر التربيعي مع زيادة نسبة التشويب الى (6% و8%).

3- من خلال صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال (FE-SEM) وجد أن هناك اختلافا في طبيعة السطوح حيث كلما زادت نسبة التشويب زاد حجم الحبيبات.

4- عند اجراء تحليل مطياف تشتت الطاقة (EDS) تبين وجود العنصرين المكونين لأوكسيد الزنك مع وجود عنصر الاشابة المغنيسيوم.

5- بينت نتائج الفحوصات البصرية (UV- Vis) أن قيم النفاذية تزداد مع زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم، حيث بلغت قيمتها العظمى 94.5% عند نسبة التشويب 6%.

6- كان سلوك المنحنيات (قيم الانعكاسية، ومعامل الامتصاص، ومعامل الانكسار، ومعامل الخمود، وثابت العزل الكهربائي بجزئيه الحقيقي والخيالي) متشابهاً وان القمم تزحف نحو الطاقات الفوتونية العالية.

7- وجد ان قيمة معامل الامتصاص تتجاوز (10^4 cm^{-1}) مما يشير الى حدوث انتقالات الالكترونية مباشرة مسموحة.

8- لوحظ ان قيم فجوة الطاقة البصرية تزداد قيمتها مع زيادة نسبة التشويب بأوكسيد المغنيسيوم باستثناء نسبة (8%). وكانت قيمها ضمن المدى (3.26-3.344 eV).

9- اظهرت نتائج قياسات تأثير هول (Hall Effect) ان اغشية أوكسيد الزنك غير المشوبة وتلك المشوبة بنسبة (2,4,6%) بأوكسيد المغنيسيوم هي من النوع (n-type)، بينما الغشاء المشوب بنسبة (8%) من أوكسيد المغنيسيوم (MgO) قد تحولت فيها حاملات الشحنة إلى النوع (p-type).

10- اشارت جميع قياسات المعلمات الكشفية للأغشية النقية والمشوبة ان التشويب كان له تأثيراً كبيراً وملحوظاً على تحسن الخصائص الكشفية للأغشية المحضرة.

11- من العلاقة بين الاستجابية الطيفية، الكفاءة الكمية والكشفية النوعية مع الطول الموجي، وجد ان أفضل قيمة للمعلمات الكشفية كانت عند نسبة التشويب 2% بأوكسيد المغنيسيوم.

12- إمكانية استعمال الاغشية المحضرة في تطبيقات الخلايا الشمسية.

(7-4) المشاريع المستقبلية: (Future Works)

1- تحضير ودراسة بعض الخصائص الفيزيائية لأغشية (ZnO_{1-x} CuO_x) الرقيقة والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري.

2- تحضير ودراسة الخواص البصرية والتركيبية والكهربائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بالفاناديوم (V).

3- دراسة تأثير السمك والتلدين على الخواص التركيبية والبصرية والكهربائية لأغشية أوكسيد الزنك والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري.

4- تحضير ودراسة الخواص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بأوكسيد المغنيسيوم. وتطبيقها في الخلايا الشمسية (Solar Cells).

5- دراسة الخصائص الفيزيائية لأغشية أوكسيد الزنك والمشوب بأوكسيد المغنيسيوم والمحضرة باستعمال طريقة الطلاء البرمي.

6- تأثير التشعيع بليزر النتروجين على الخواص التركيبية لأغشية أوكسيد الزنك النانوية المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري.

References: المصادر:

[1] K. L. Chopra, “Thin Film Phenomena” , R. E. Krieger Publishing Company, 1979.

[2] G. Hammond, “Concise Dictionary of Physics and Related Subjects (2nd ed)” , Physics Bulletin, Vol. 30, No. 12,P. 532, 1979.

[3] N. J. Ghdeed, E. K. Jabur, N. H. Harb, and N. K. Abdalameer, “Studying Structural Morphological and Optical Properties of Cadmium Oxide’, Advances in Natural and Applied Sciences, Vol. 12, No. 2, pp. 21-26, 2018.

[4] D. Makarov, R. Pallesche, M. Maret, T. Ulbrich, G. Schatz, and M. Albrecht, “Growth of Pt thin film on Wse2’, Surface science, Vol.601, No. 9, pp. 2032-2037, 2007.

[5] S. A. Abdulridha, “High sensitivity photoconductive for ZnO: MgO Nanoparticles”, Energy Procedia, Vol. 157, pp. 355-361, 2019.

[6] K. Chopra, “Thin film device applications’, Springer Science & Business media, 2012.

[7] S. Jeong, J. Lee, S. Lee, and J. Boo, “Deposition of aluminum-doped Zinc oxide films by RF magnetron sputtering and study of their structural, electrical and optical properties”, Thin solid films, Vol. 435, No. 1-2, pp. 78-82, 2003.

[8] S. Major, A. Banerjee, and K. Chopra, “highly transparent andconducting indium-doped zinc oxide films by spray pyrolysis”, Thin solid films, Vol. 108, No.3, pp. 333-340, 1983.

[9] L. Eckertova, “physics of thin film”, Plenum Press, New York and London p.15, 1977.

[10] D. L. Smith and D. W. Hoffman, “Thin film deposition: principles and practice”, Physics Today, Vol. 49, No.4, p. 60, 1996.

[11] Z. Zhang and M. G.Lagally, “tomistic processes in the early stages of thin-film growth”, Science, Vol. 276, No. 5311, pp. 377-383, 1997.

[12] A. Tribble, “Electrical Engineering Materials and Devices”, University of Iowa, 2002.

[13] C. Falcony, M. A. Aguilar-Frutis, and M. Garcia-Hipoito, “Spray pyrolysis technique”, high-k dielectric films and luminescent materials: a review”, Micromachines, Vol. 9, No. 8, P. 414, 2018.

[14] L. Filipovic, S. Selberherr, G. C. Mutinati, E. Brunet, S. Steinhauer, A. Köck, and F. Schrank, “Modeling spray pyrolysis deposition”, Proceedings of the world congress on engineering, Vol. 2, pp. 987-992, 2013.

[15] R. M. Balabai, and P. V. Merzlikin, “Electronic properties of doped ZnO films: AB initio calculations”, Journal of Physics, Vol. 55, 2010.

[16] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Dogan, V. Avrutin, S. J. Cho, and H. Morkocd, “Applied Physics Reviews, Vol. 89, pp. 1-301, 2005.

[17] P. J Durrant, Bulter and Tanner Ltd, “General and Inorganic Chemistry, “3rd Ed, London, 1964.

[18] T. J. Coutts, D. L. Young and X. Li, “Infrared Physics”, Vol.22,No.81, pp. 22-81, 1982.

[19] D. R. Lide,”In chemical rubber company hand book of chemistry and physics”, CRC press, Bocaraton, Florida, USA, 77th edition, 1996.

[20] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Dogan, V. Avrutin, S. J. Cho, and H. Morkocd, “Applied Physics Reviews, Vol. 89, pp. 1-301, 2005.

[21] Keran Zhang, Furong Zhu, C. H. A. Huan, A. T. S. Wee and T. Osipowicz, “Indium-doped zinc oxide films prepared by simultaneous r. f. and d. c. magnetron sputtering”, Surface and Interface Analysis, Vol. 28. Pp. 271-274, 1999.

[22] T. K. Subramanyam, B. Srinivasulu and S. Uthanna, “Physical properties of zinc oxide films prepared by dc reactive magnetron sputtering at different sputtering pressures”, Crystal Research and Technology, Vol.35, pp. 1193, 2000.

[23] M. Ferrante, G. O. Conti, Z. Rasic- Milutinovic, and D. Jovanovic, "Health effects of metals and related substances in drinking water", IWA Publishing, 2013.

[24] C. Jin, “Growth and characterization of ZnO and ZnO based alloys MgxZn1-xO and MnxZn1-xO”, Ph.D. Thesis, University of Carolina, 2003.

[25] A. M. E. Raj, M. Jayachandran, and C. Sanjeeviraja, "Fabrication techniques and material properties of dielectric MgO thin films—A status review", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 92-113, 2010.

[26] J. Wilson & J. Hawkes," Optoelectronics – An introduction", Third Edition, Prentice Hall Europe, 1998.

[27] J. Singh, "Semiconductor optoelectronics: physics and Technology", McGraw – Hill, Inc., 1995.

[28] S. L. Chuang," Physics of Optoelectronic Devices", John Wiley & Sons. Inc. New York, 1995.

[29] T. Prasada Rao, M. C. Santhosh Kumar, A. Safarulla, V. Ganesan, S. R. Barman and C. Sanjeeviraja, "Physical properties of ZnO thin film deposited at various substrate temperatures using spray pyrolysis" Physica B, Vol. 405, pp. 2226-2231, 2010.

[30] Linhua Xu, Xiangyin Li, Yulin Chen and Fei Xu, "Structural and optical properties of ZnO thin films prepared by sol-gel method with different thickness", Applied Surface Science, Vol. 257, pp. 4031-4037, 2011.

[31] M. Smirnov, C. Baban, G. I. Rusu, "Structural and optical characteristics of spin-coated ZnO thin films", Applied Surface Science, Vol. 256, pp. 2405-2408, 2010.

[32] Nagarani Nagayasamy, Saroja Gandhimathination and Vasu Veerasamy, "The effect of ZnO thin film and its structural and optical properties prepared by Sol-Gel spin coating method", Open Journal of Metal, Vol. 3, pp. 8-11, 2013.

[33] S. Vishnoi, R. Kumar, B. P. Singh, "Effect of substrate on physical properties of pulse laser deposited ZnO thin film", Journal of intense pulsed lasers and applications in advanced physics, Vol. 4, No. 1, pp. 35-39, 2014.

[34] Z. Ghorannevis, M. T. Hosseinnejad, M. Habibi, and P. Golmahdi, "Effect of substrate temperature on structural, morphological and optical properties of deposited Al/ZnO films" H Theor. Appl. Phys. Vol. 9, pp. 33-38, 2015.

[35] A. Zaier, A. Meftah, A. Y. Jaber, A. A. Abdelaziz, and M.S. Aida, "Annealing effects on the structural, electrical and optical properties of ZnO thin films prepared by thermal evaporation technique" Journal of king saud university, Vol. 27(4), pp. 356-360, 2015.

[36] Ke Zhu, Ye Yang and Weijie Song, "Effects of substrate temperature on the structural, morphological, electrical and optical properties of Al and Ga co-doped ZnO thin film grown by DC magnetron sputtering", materials letters, Vol. 145, pp. 279-282, 2015.

[37] A. Mahroug, B. Mari, M. Mollar, I. Boudjadar, L. Guerbous, A. Henni, and N. Selmi," Studies on structural, surface morphological, optical, luminescence and Uv photodetection properties of sol-gel mg- doped Zno thin films", Surface review and letters, Vol.26 (3), pp.1850167, 2018.

[38] Nilam B. patil, Amol R. Nimbalkar, Maruti G. Patil," ZnO thin film prepared by a sol-gel spin coating technique for No_2 detection", Materials Science & Engineering B, Vol. 227, pp. 53-60, 2018.

[39] Chien-Yie Tsay, Shih-Ting Chen and Man-Ting Fan," Solution-Processed Mg-Substituted ZnO thin films for Metal-Semiconductor-Metal Visible-Blind Photodetectors", MDPI, Vol. 9 (4), pp. 277, 2019.

[40] Sabrina Roguai and Abdelkader Djelloul," A structural and optical properties of Cu-doped ZnO films prepared by spray pyrolysis", Applied Physics A, Vol.126, pp.126, 2020.

[41] R. Kara, L. Mentar, and A.Azizi," Synthesis and characterization of Mg-doped ZnO thin-film electrochemically grown on FTO substrates for optoelectronic applications", RSC Advances, Vol.10, pp. 40467, 2020.

[42] Riffat Sagheer, Momina Khalil, Momina Khalil, Zohra Nazir Kayani, Unza Tariq and Faiza Ashraf," Effect of Mg doping on structural, morphological, optical and thermal properties of ZnO nanoparticles", Optik, Vol.200, pp. 163428, 2020.

[43] Sema Kurtaran," Al doped ZnO thin films obtained by spray pyrolysis technique: Influence of different annealing time", Optical Materials, vol. 114, 110908, 2021.

[44] A. El Hamidi, E. El Mahboub, K. Meziane, A. El Hichou, and A. Almaggoussi, "The effect of electronegativity on optical properties of Mg doped ZnO", Optik, Vol.241, pp. 167070, 2021.

[45] Ankur Rana, Abhishek sharma, Suraj p. Khanna, R.Srivastava, and C. K. Suman, " Effect of solution- processed Mg-doped ZnO electron transport layer on the photodetector properties of $MAPbI_3$ thin film", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 34, art. No. 1379, 2023.

[46] Samer H. Zyoud, and Ahmed Fairuz Omar," Enhanced UV photodetector using Mg-doped ZnO sub-micro tube films synthesized through laser-assisted chemical bath growth", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 379, pp. 115971, 2024.

[47] Lazim, Haidar Gazy, Khalid I. Ajeel, and Hussain A. Badran. "The photovoltaic efficiency of the fabrication of copolymer P3HT: PCBM on

different thickness nano-anatase titania as solar cell." Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Vol.145, 598-603, 2015.

[48] G. S. Ben and S. K. Banerjee, “Solid state electronic devices”, Hall International, Inc, USA, 1990.

[49] I. Ndukwe, “Solution growth, characterization and applications of zinc sulphide thin film”, Solar energy materials and solar cells, Vol. 40, No. 2, pp. 123-131, 1996.

[50] B. Sapoval and C. Hermann, "Physics of semiconductors", Springer Science & Business Media, 2003 .

[51] S. Kashyap, "Giant Magnetoresistance in Electrodeposited Nanogranular Thin Films", Physics And Technology Of Thin Films: IWTF 2003: World Scientific, pp. 228-248, 2004 .

[52] Badran, Hussain Ali, Khalid I. Ajeel, and Haidar Gazy Lazim. "Effect of nano particle sizes on the third-order optical non-linearities and nanostructure of copolymer P3HT: PCBM thin film for organic photovoltaics." Materials Research Bulletin Vol.76, 422-430, 2016.

[53] B. L. Mattes, “Polycrystalline and Amorphous thin films and devices”, Academic press, 1980.

[54] D. Brabazon and A. Raffer, "Advanced characterization techniques for nanostructures", in Emerging nanotechnologies for manufacturing: Elsevier, pp. 53-85, 2015.

[55] W. Bollmann,” Crystal defects and crystalline interfaces”, Springer Science & Business Media, 2012.

[56] Kittel C. Semiconductor Band Gaps. Introduction to Solid State Physics, 6th Ed., New York: John Wiley. 1986.

[57] B. J. Fogal, “Electrical Transport properties of stabilized amorphous selenium X-ray photoconductors”, M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, 2002.

[58] W. Bollmann, "Crystal defects and crystalline interfaces", Springer Science & Business Media, 2012 .

[59] رياض كمال الحكيم, عادل خضير حسين, " أسس الهندسة الالكترونية", مطبعة وزارة التعليم العالي, بغداد, 1980.

[60] M. P. Kitchin, “Theory of semiconductor heterostructures for infrared applications”, Ph.D thesis, University of Newcastle, 1999.

[61] سلوان كمال جميل، بتول درعم بلاده،" مبادئ الالكتروبصريات" , جامعة بغداد، 1990.

[62] B. en. G. Streeman,”Solid state electronic devices”, 2nd Edition springer- Verlage, Germany, 1979.

[63] S. M. Sza,” Semiconductors devises physics and technology”, translated to Arabic by F. G. Hagaty and H. A. Ahmed, Baghdad, 1990.

[64] صبحي سعيد الراوي،" فيزياء الالكترونيات"، مطبعة جامعة الموصل، (1980).

[65] S. Ben,”Solid state electronic devices”, Hall International, Inc, USA, 1990.

[66] M.K.Jaaraj, Aldrin Antong and Major. Bull Mater Sci., vol. 25,(2002), pp.227.

[67] B. Sapoval and C. Hermann, "Physics of semiconductors", Springer Science & Business Media, 2003.

[68] B. G. Streetman and S. Banerjee, "Solid state electronic devices", Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, 2006.

[69] M. G. Yousif, “Solid Sate Physics”, Baghdad University Press2, Arabic Version,1989.

[70] B.Sapoval and C. Hermann, "Physics of Semiconductors", Springer Inc, Verlag, New York, (1995).

[71] G. E. Mc Guire," Characterization of semiconductor materials", Noyes Publications, New Jersey, U.S.A., (1989).

[72] S.M. sze, "semiconductors Devices" John Wiley and sons, Ins, New York, 2002.

[73] Zollner, Stefan, Carlos A. Armenta, Sonam Yadav, and José Menéndez. "Conduction band nonparabolicity, chemical potential, and carrier concentration of intrinsic InSb as a function of temperature." Journal of Vacuum Science & Technology A 43, no. 1,2025.

[74] Y. N. AL-Jammal," Solid State Physics", AL-Mousul University Press, Arabic Version ,1990.

[75] A. G. Milnes, "Deep impurities in semiconductors", Wiley-Intercedence, 1973.

[76] حسين صبحي عبد الرحمن،" تحضير ودراسة بعض الخصائص الفيزيائية لأغشية كبريتيد الزنك والمشوب بأوكسيد المغنيسيوم نانوية التركيب بطريقة التحلل الحراري الكيميائي، رسالة ماجستير، جامعة ديالى، كلية العلوم، 2022.

[77] S. O. Kasap, "Principles of electronic materials and devices", McGraw-Hill New York, 2006.

[78] اقبال عبد الجليل مهدي، "تحضير ودراسة اغشية رقيقة من أوكسيد الزركون والمشوب بالكوبلت والتيتانيوم نانوية التبلور بطريقة الترسيب بالرش الكيميائية الحراري والحصول على متحسس غازي" رسالة ماجستير، جامعة القادسية، كلية التربية، 2016.

[79] H. Ahmed, B. H. Rabee, A. H. Hussein Hakim, and S. R. Salman, "Preparation and Study of Optical Properties of (Polymer-Nickel Nitrate) Composite", 2013.

[80] I. U. r. I. Sirotin and M. P. Shaskol′skaia, "Fundamentals of crystal physics", MIR publishers, 1982 .

[81] N. F. Mott and E. A. Davis, "Electronic processes in non-crystalline materials", Oxford university press, 2012.

[82] A. Li, "Interaction of nanoparticles with radiation", arxiv preprint astro-ph/0311066, 2003.

[83] J. Schors, K.-W. Harbich, M. P. Hentschel, and A. Lange, "Non-destructive micro crack detection in modern materials", Proceedings of the ECNDT, Berlin, Germany, 2006.

[84] S. Suresh, "The Growth and the Optical, Mechanical, Dielectric and Photoconductivity Properties of a New Nonlinear Optical Crystal L-Phenylalanine-4-nitrophenol NLO Single Crystal", Journal of Crystallization Process and Technology, Vol. 03, No. 3, p. 5, 2013.

[85] C. Nunes, A. Mahendrasingam, and R. Suryanarayanan, "Quantification of crystallinity in substantially amorphous materials by synchrotron X-ray powder diffractometry", Pharmaceutical research, Vol. 22, No. 11, pp. 1942 - 1953, 2005.

[86] Mongan, Sean, Zengye Huang, Trinanjan Datta, Takuji Nomura, and Dao-Xin Yao. "Detecting crystallographic lattice chirality using resonant inelastic x-ray scattering." *Scientific reports* 9, no. 1, 2019.

[87] M. P. Stevens, "Polymer chemistry", Oxford university press New York, 1990.

[88] S. J. Ling, J. Sanny, W. Moebs, G. Friedman, S. D. Druger, A. Kolakowska, D. Anderson, D. Bowman, D. Demaree, and E. Ginsberg, "University Physics Volume 2", 2016.

[89] F. Zakerian and H. Kafashan, "Investigation the effect of annealing parameters on the physical properties of electrodeposited ZnS thin films", Superlattices and Microstructures, Vol. 124, pp. 92-106, 2018.

[90] O. Anazia "Chemistry of Zirconia and Its Bio analytical Applications",

M.Sc. Thesis & Specialist Projects. Western Kentucky University, 127, (2009).

[91] M. Thirumoorthi and J. T. J. Prakash, "A study of Tin doping effects on physical properties of CdO thin films prepared by sol–gel spin coating method", Journal of Asian Ceramic Societies, Vol. 4, No. 1, pp. 39-45, 2016.

[92] عبد الفتاح الشاذلي،" فيزياء الجوامد"، الطبعة الأولى، الدار العربية للنشر والتوزيع، مدينة نصر، 2003.

[93] M. Grundmann, "Physics of semiconductors", Springer, 2010.

[94] زهير متي قصير، ادمون ميخائيل حنا، عبد اللطيف عبد الحليم،" أسس الكيمياء التحليلية"، الجزء الأول، كلية العلوم، جامعة البصرة،1986.

[95] R.H.French, S.J.Glass and F.S.Ohuchi, "Experimental and Theoretical Determination of the Electronic Structure and Optical Properties of Three Phases of ZrO2", Physical Review B Condensed Matter, Vol.49, No.8,5133-5142, (1994).

[96] امير عبد الحسين صالح العبادي،" دراسة تأثير درجة حرارة القاعدة والتشويب بالنحاس على بعض الخصائص التركيبية والبصرية لأغشية كبريتيد الكادميوم النانوية"، رسالة ماجستير، الجامعة المستنصرية، 2012.

[97] N. F. Mott and E. A. Davis, "Electronic processes in non-crystalline materials", Oxford university press, 2012.

[98] J. Mullerova and P. Sutta, "On some ambiguities of the absorption edge and optical band gaps of amorphous and polycrystalline semiconductors", Communications-Scientific letters of the University of Zilina, Vol. 19, No. 3, pp. 9-15, 2017.

[99] V. Mote, Y. Purushotham, R. Shinde, S. Salunke, and B. Dole, "Structural, optical and antibacterial properties of yttrium doped ZnO nanoparticles", Cerâmica, Vol. 61, pp. 457-461, 2015.

[100] H. Fujiwara and R. W. Collins, "Spectroscopic Ellipsometry for Photovoltaics: Volume 2: Applications and Optical Data of Solar Cell Materials", Springer, 2019.

[101] B. G. Yacobi, “Semiconductor Materials”, Kluwer Academic Publishers, New York, 2004.

[102] M. Fox, “Optical Properties of solide,” Oxford University press inc, New York, 2001.

[103] O. Stenzel, "The Physics of Thin Film Optical Spectra, Surface Sciences", ed: Springer, Berlin, 2005.

[104] Haider Gazy Lazim Al-Sabah,” Preparation of nanostructure thin films (TiO2) and their investigation for solar cell application”, P.hD thesis, University of Basrah, 2014.

[105] J. Taus, “Amorphous and liquid semiconductors”, Plenum press, London, N.Y., 1974.

[106] عادل حبيب عمران، " دراسة الخواص البصرية والكهربائية لأغشية (CuO , CdO) ومزيجهما بطريقة الرش الكيميائي الحراري"، رسالة ماجستير، جامعة بابل ، 1998.

[107] J. I. Pankove, "Optical processes in semiconductors Prentice-Hall", New Jersey, Vol. 92, p. 36, 1971.

[108] N. A. Bakr, A. Funde, V. Waman, M. Kamble, R. Hawaldar, D. Amalnerkar, S. Gosavi, and S. Jadkar, "Determination of the optical parameters of a-Si: H thin films deposited by hot wire–chemical vapour deposition technique using transmission spectrum only,"Pramana, Vol. 76, No. 3, pp. 519-531, 2011.

[109] S. Sze and K. K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices”. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.,2007.

[110] C. Feng, Z. Chen, J. Jing, M. Sun, H. Tong, and J. Hou, "Band structure and enhanced photocatalytic degradation performance of Mg-doped CdS nanorods", Physica B: Condensed Matter, Vol. 594, p. 412363, 2020.

[111] C. Feng, Z. Chen, J. Jing, M. Sun, H. Tong, and J. Hou, "Band structure and enhanced photocatalytic degradation performance of Mg-doped CdS nanorods", Physica B: Condensed Matter, Vol. 594, p. 412363, 2020.

[112] L. Eckertova, "Physics of thin films", Springer Science & Business Media, 2012.

[113] F. F. Wang, "Introduction to solid state electronics", Elsevier, 2012.

[114] J. Liu,"Photonic Devices", Cambridge University Press, 2005.

[115] جي.اي.د.," الكيمياء اللاعضوية العامة", ترجمة د. حبيب عبد الاحد، مطبعة الموصل, 1986.

[116] جاجز زدا، ك. هوليدي, ترجمة الدكتور وسام إبراهيم عزيز والسيد ادريس عبد القادر خطاب ," الكيمياء اللاعضوية الحديثة", مطبعة الموصل, 1980.

[117] Ng, Kwok Kwok. Complete guide to semiconductor devices. IEEE Press, 2002.

[118] Rouchdi, Mustapha, E. Salmani, B. Fares, N. Hassanain, and Ahmed Mzerd. "Synthesis and characteristics of Mg doped ZnO thin films: Experimental and ab-initio study." Results in physics 7, pp. 620-627, 2017.

[119] Rembeza, Ekaterina S., Sirojiddin Z. Zaynobiddinov, and Markhabo B. Rasulova. "Structural and optical properties of Mg-doped ZnO films obtained by spray pyrolysis." Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy Condensed Matter and Interphases 27, no. 2, 302-307,2025.

[120] Kurtaran, S. E. M. A., S. Aldag, G. Ofofoglu, I. Akyuz, and F. E. R. H. U. N. D. E. Atay. "Transparent conductive ZnO thin films grown by chemical spray pyrolysis: the effect of Mg." Journal of Materials Science: Materials in Electronics 27, 8478- 8485, 2016.

[121] Bouachiba, Y., A. B. D. E. L. O. U. A. D. O. U. D. Mammeri, Abderrahmane Bouabellou, O. Rabia, Saber Saidi, Adel Taabouche, Badis Rahal, Lyes Benharrat, Hacene Serrar, and Moukhtar Boudissa. "Optoelectronic and birefringence properties of weakly Mg-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis." Journal of Materials Science: Materials in Electronics 33, no. 9, pp.6689-6699,2022.

[122] Goudarzi, S., and K. Khojier. "Role of substrate temperature on the ammonia gas sensing performance of Mg-doped ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique: application in breath analysis devices." Applied Physics A 124, no. 9,2018.

[123] B. Bhushan, "Surface roughness analysis and measurement techniques",Modern tribology handbook, CRC press, pp. 79-150, 2000.

[124] Dahamni, Mohamed Amine, Mostefa Ghamnia, Salah Eddine Naceri, Carole Fauquet, Didier Tonneau, Jean-Jacques Pireaux, and Abed Bouadi. "Spray pyrolysis synthesis of pure and Mg-doped manganese oxide thin films." Coatings 11, no. 5, 2021.

[125] I. R. Agool, K. J. Kadhim, and A. Hashim, "Fabrication of new nanocomposites:(PVA-PEG-PVP) blend-zirconium oxide nanoparticles) for humidity sensors", International Journal of Plastics Technology, Vol. 21, No. 2, pp. 397-403, 2017.

[126] Rana, N., Subhash Chand, and Arvind K. Gathania. "Band gap engineering of ZnO by doping with Mg." Physica Scripta 90, no. 8 ,2015.

[127] Biswas, Mitali, Mehnaz Sharmin, Chitra Das, Jibon Poddar, and Shamima Choudhury. "Structural and optical characterization of magnesium doped zinc oxide thin films deposited by spray pyrolysis." Dhaka University Journal of Science 64, no. 1,2016.

[128] Urban, Daniel F., Wolfgang Körner, and Christian Elsässer. "Mechanisms for p-type behavior of ZnO, Zn 1− x Mg x O, and related oxide semiconductors." Physical Review B 94, no. 7 ,2016.

[129] Bose, Sourav, Christyves Chevallier, Sidi Ould Saad Hamady, and Nicolas Fressengeas. "Optical and Electrical Properties of ZnMgO with High Mg Content Elaborated by Ultrasonic Spray Pyrolysis Using Water-Based Solutions." physica status solidi (a) 219, no. 16 ,2022.

Abstract:

Undoped and magnesium oxide (MgO)-doped zinc oxide (ZnO) thin films were prepared with varying doping concentrations (2, 4, 6, and 8 %) on glass and porous silicon substrates. The films were synthesized using the chemical spray pyrolysis (CSP) technique with a 0.1 M concentration, a substrate temperature of 360 C^o, and a spray rate of 7 ml/min. The resulting films had a thickness of approximately 500±10nm.

The prepared films' structural, morphological, optical, electrical, and photo-sensing properties were comprehensively studied using a range of advanced characterization techniques. These included X-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), UV-Visible spectrophotometry, and Hall effect measurements. The photo-sensing characteristics were further evaluated through current-voltage measurements, spectral responsivity, quantum efficiency, and specific detectivity.

The XRD analysis revealed that all prepared films exhibited a polycrystalline structure with a preferred growth orientation along the (002) plane, confirming a hexagonal wurtzite crystal structure. A notable observation was the decrease in the intensity of the (002) peak with increasing MgO doping concentration. The interplanar spacing (d_{hkl}) was calculated and found to be in close agreement with standard international card data. The average crystallite size, determined using the Scherrer formula, ranged from 17.8 nm to 23.3 nm across all samples.

AFM results indicated an increase in both average roughness and root mean square (RMS) roughness with higher MgO doping percentages. FE-SEM analysis confirmed that the film surfaces were composed of homogenous, dense, spherical, and semi-spherical nanoparticles. The average grain size was also observed to increase with higher MgO doping, suggesting that the dopant significantly influences grain growth. The precise elemental

composition and atomic percentages of the thin films were verified through energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis.

Optical investigations using a UV-Vis spectrophotometer in the 300-900 nm range showed that the prepared films possess a direct allowed electronic transition band gap ranging from 3.26 eV to 3.344 eV. The transmittance was found to increase with increasing MgO doping, reaching a maximum of 94.5% at a 6% doping concentration. Conversely, the absorbance decreased as the doping ratio was increased. Other optical parameters, including reflectance, absorption coefficient, refractive index, extinction coefficient, and the real and imaginary parts of the dielectric constant, were also calculated. The high absorption coefficient (α>104 cm^{-1}) for all films is indicative of a direct allowed electronic transition.

Electrical measurements via the Hall effect revealed that the undoped ZnO films and those doped with 2, 4, and 6% MgO exhibited n-type conductivity. Interestingly, the film doped with 8% MgO showed a transition in conductivity type to p-type. With increasing doping concentration, a significant decrease in both charge carrier concentration and electrical conductivity was observed, while the electrical resistivity increased.

The photo-sensing properties of the films were significantly enhanced by MgO doping, suggesting their promising potential for applications in photosensors and solar cells.

Republic of Iraq

Ministry of Higher Education and

Scientific Research

University of Misan

College of Basic Education

General Sciences Department

(Preparation and Study of the Physical Properties of Pure and Magnesium Oxide (MgO) Doped Zinc Oxide (ZnO) Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis and their Application in Photodetectors)

A Thesis

Submitted to the Council of the College of Basic Education,
University of Misan

In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master in General Sciences (Specialized General Sciences)

By:

Ahmed Mohammed Abdulateef Ali

Supervised By:

Prof. Dr. Haidar Gazy Lazim

1447 A.H. 2025 A.D.