



جامعة بابل
كلية التربية للعلوم الصرفة
قسم الفيزياء

دراسة الخصائص التركيبية والبصرية للأغشية الرقيقة المحضرة بتقنية الترسيب بالليزر النبضي [Pulsed Laser Deposition]

بحث
تقدمت به الطالبة
ملاك كريم حسن

الى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة
وهي جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في الفيزياء

بإشراف
م.م.قنوت محمد هادي

2026م

1447هـ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ﴾

بِسْمِ اللَّهِ
الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المجادلة - ١١

الإهداء:

لم تكن الرحلة قصيرة ولا الطريق محفوفاً بالتسهيلات ولكنني فعلتها،
فالحمد لله الذي يسر البدايات وبلغنا النهايات بفضلته وكرمه
اهدي هذا النجاح لنفسى الطموحة اولا ابتدأت بطموح وانتهت بنجاح ثم
الى كل من سعى معي

لإتمام مسيرتي الجامعية مرحلة البكالوريوس دمتم لي سنداً لا عُمر له

وبكل حب أهدي ثمرة نجاحي وتخرجي:

اهدي تخرجي وجهدي وحصاد ما زرعتة سنينا طويلة في سبيل العلم
الى...
من أكرمني الله به وجعله من بين صفوف الرجال أباً لي وزادني به شرفاً
وعلوأ واعتزازاً

(أبي الحبيب)

والى أنيسة العمر وحببية الروح وأعظم نعم الله علي التي ضمت اسمي
بدعواتها في ليلا ونهارها وأضاءت بالحب دربي وآنارت باللطف والود
طريقي وكانت لي سحاباً ماطرأ بالحب والبذل والعطاء وكانت سبباً بعد
الله فيما انا عليه الان

(أمي الحبيبة)

الباحثة
ملاك كريم حسن

الشكر و التقدير:

الحمدُ لله الذي بنعمته تتمّ الصالحات، وبتوفيقه تُنجز الأعمال
وتتحقق الغايات.

أتقدّم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى مشرفة البحث م.م
قنوت محمد هادي، لما قدّمته من توجيهٍ علميٍّ سديد
وملاحظاتٍ قيّمةٍ أسهمت في إنجاز هذا البحث وإخراجه بهذه
الصورة.

كما أتوجّه بخالص الشكر والتقدير إلى أساتذتي الأفاضل في
جامعة بابل - كلية التربية للعلوم الصرفة - قسم الفيزياء، لما
بذلوه من جهودٍ مباركةٍ في ترسيخ المبادئ العلمية وتنمية روح
البحث والاستقصاء.

ولكل من وقف إلى جانبي وساندني بكلمةٍ طيبةٍ أو دعاءٍ صادقٍ
خلال إعداد هذا البحث.
وللجميع أقدمّ خالص الشكر والامتنان.

الخلاصة

يهدف هذا البحث إلى تحضير الأغشية الرقيقة ودراسة خصائصها التركيبية والسطحية والبصرية باستخدام تقنية Pulsed Laser Deposition، والتي تُعد من التقنيات المتقدمة في مجال تحضير المواد الرقيقة لما توفره من دقة عالية في التحكم بظروف الترسيب. تم تحضير الأغشية تحت ظروف مختلفة من معاملات الترسيب لدراسة تأثيرها في البنية البلورية والمورفولوجيا السطحية والخصائص البصرية للأغشية المحضرة. جرى تحليل الخصائص التركيبية باستخدام تقنية X-Ray Diffraction لتحديد الأطوار البلورية وحساب حجم البلورات ودرجة التبلور، حيث أظهرت النتائج تكوّن بنية بلورية واضحة مع اختلاف في شدة القمم البلورية تبعاً لظروف التحضير. كما تمت دراسة مورفولوجيا السطح باستخدام Atomic Force Microscopy، والتي أظهرت تغيراً في توزيع الحبيبات والخشونة السطحية للأغشية. إضافة إلى ذلك، تم تحليل الخصائص البصرية من خلال قياس أطيايف الامتصاص لتحديد معامل الامتصاص وفجوة الطاقة البصرية. أظهرت النتائج وجود علاقة واضحة بين ظروف الترسيب والبنية المجهرية والخصائص البصرية للأغشية الرقيقة. وتشير هذه النتائج إلى إمكانية تحسين خصائص الأغشية المحضرة من خلال التحكم في معاملات الترسيب، مما يفتح المجال لاستخدامها في العديد من التطبيقات التكنولوجية مثل الخلايا الشمسية والأجهزة البصرية والإلكترونية الحديثة.

فهرس المحتويات

الموضوع	الصفحة	
الاية الكريمة	أ	
الأهداء	ب	
الشكر والتقدير	ت	
الخلاصة	ث	
فهرست المحتويات	ج	
الفصل الأول: مقدمة عن الخلايا الشمسية وتطبيقاتها		
1.1	المقدمة	9
1.2	المواد النانوية	10
1.3	تصنيف المواد النانوية	11
1.4	الأكاسيد الموصلة الشفافة (TCOs)	13
1.5	الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة	15
1.6	أشباه الموصلات وخصائصها	16
الفصل الثاني: وصف الاجهزة وطرق الترسيب المستخدمة		
2.1	المقدمة	20
2.2	طرق تحضير الأغشية الرقيقة	21
2.3	الترسيب بالليزر النبضي (PLD)	22
2.4	آليات الترسيب بالليزر	23
2.5	تفاعل الليزر مع الهدف	26
2.6	الليزر المستخدم في تقنية PLD	27
2.7	آلية نمو الأغشية النانوية	29

الفصل الثالث: دراسة الخواص التركيبية والبصرية للمواد

3.1	دراسة الخواص التركيبية للأغشية الرقيقة	33
3.2.1	حيود الأشعة السينية (XRD)	34
3.2.2	مجهز القوة الذرية	37
3.3	الخواص البصرية لأشياء الموصلات	38
3.3.1	الامتصاص البصري وحافة الامتصاص	39
3.3.2	الثوابت البصرية	43

الفصل الرابع : مناقشة النتائج والاستنتاجات

المصادر

الفصل الأول

مقدمة عن الخلايا
الشمسية
وتطبيقاتها

الفصل الأول

1.1. المقدمة

تُعد الخلايا الشمسية الكهروكيميائية الضوئية (Photo electrochemical Solar Cells) من التقنيات الواعدة في مجال استثمار الطاقة المتجددة، لما تمتلكه من قدرة على تحويل الطاقة الشمسية مباشرةً إلى طاقة كهربائية أو كيميائية اعتماداً على مبادئ كهروكيميائية وضوئية متداخلة. ويقوم مبدأ عمل هذه الخلايا على استغلال التفاعلات الكهروكيميائية التي تحدث عند الواجهة الفاصلة بين مادة شبه موصلة فعالة ضوئياً وإلكتروليت مناسب، مما يجعلها تختلف جوهرياً عن الخلايا الشمسية التقليدية المعتمدة على الوصلات الصلبة فقط (1)

وقد حظيت هذه الأنظمة باهتمام متزايد نظراً لإمكانية توظيفها في تطبيقات متنوعة، مثل إنتاج الهيدروجين بالطاقة الشمسية، ومعالجة المياه، بالإضافة إلى توليد الطاقة الكهربائية. يتكون النظام الأساسي للخلية الشمسية الكهروكيميائية الضوئية عادةً من قطب عامل مصنوع من شبه موصل ذي خصائص ضوئية وكهروكيميائية مناسبة، وقطب مقابل قد يكون معدنياً أو شبه موصلًا، إضافةً إلى إلكتروليت يحتوي على أزواج أكسدة-اختزال تضمن استمرارية التفاعلات الكهروكيميائية داخل الخلية. ويؤدي اختيار نوع شبه الموصل، وطبيعة الإلكتروليت، وكذلك تصميم الأقطاب، دوراً محورياً في تحديد أداء الخلية وكفاءتها، إذ يجب أن تتوافق مستويات الطاقة لشبه الموصل مع الجهود الكهروكيميائية للتفاعلات الحاصلة في الإلكتروليت (2).

عند تعريض واجهة شبه الموصل-الإلكتروليت لإشعاع ضوئي ذي طاقة تفوق فجوة الطاقة لشبه الموصل، يحدث امتصاص للفوتونات يؤدي إلى توليد أزواج من الإلكترونات والفجوات داخل المادة شبه الموصلة. وتُفصل هذه الحوامل الشحنة المتولدة بفعل المجال الكهربائي الداخلي الناتج عن انحناء الحزم الطاقية عند الواجهة، حيث تتحرك الحوامل الأقلية نحو سطح شبه الموصل الملامس للإلكتروليت لتشارك في تفاعلات الأكسدة أو الاختزال، في حين تنتقل الحوامل الأكثرية نحو الجهة الخلفية لشبه الموصل. ومن خلال ركيزة جامعة للشحنة ودائرة خارجية، يتم نقل هذه الشحنات إلى القطب المقابل، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي يمكن قياسه والاستفادة منه. أظهرت الدراسات الرائدة الأولى في هذا المجال إمكانية توليد تيار

ضوئي فعال باستخدام أقطاب معدنية، مثل البلاتين، مغمورة في إلكتروليات تحتوي على أملاح هاليدات معدنية، الأمر الذي فتح آفاقاً واسعة لتطوير هذا النوع من الخلايا(3).

كما بينت الأبحاث اللاحقة أن استخدام أغشية أكسيدية ذات فجوة طاقة واسعة، مثل أكاسيد الفلزات الانتقالية، يسهم في تقليل ظاهرة انتقال الإلكترونات العكسي إلى الإلكتروليت، مما يحد من إعادة الاتحاد بين الإلكترونات والفجوات ويؤدي إلى تحسين كفاءة التحويل الكهروضوئي. إضافة إلى ذلك، تلعب الطبقات الطلائية والأغشية النانوية المسامية دوراً مهماً في زيادة المساحة السطحية الفعالة وتعزيز امتصاص الصبغات أو الضوء الساقط، وهو ما ينعكس إيجاباً على زيادة التيار الضوئي المتولد وتحسين الأداء العام للخلية. وبناءً على ما تقدم، يمكن القول إن الخلايا الشمسية الكهروكيميائية الضوئية تمثل نظاماً متكاملًا يجمع بين مفاهيم فيزياء أشباه الموصلات والكيمياء الكهروكيميائية وعلوم المواد، الأمر الذي يجعل تطويرها وتحسين كفاءتها محوراً أساسياً للبحوث الحديثة في مجال الطاقة المستدامة(3).

1.2. المواد النانوية

أدى التطور السريع في مجال تكنولوجيا النانو إلى إحداث نقلة نوعية في فهم خصائص المواد عند الأبعاد الذرية والجزيئية، حيث تصبح الظواهر الكمومية ذات تأثير واضح، وتقل أهمية القوانين الفيزيائية الكلاسيكية مقارنةً بالفيزياء المجهرية. ويُقصد بالمواد النانوية تلك المواد التي تمتلك بُعداً واحداً على الأقل في مدى يتراوح بين (1-100) نانومتر، وتُظهر خصائص فيزيائية وكيميائية تختلف بشكل ملحوظ عن خصائصها في الحالة الحجمية (Bulk). يرجع الاهتمام المتزايد بالمواد النانوية إلى امتلاكها نسبة مساحة سطح إلى حجم عالية جداً، مما يفتح آفاقاً واسعة لتطبيقات جديدة في مجالات متعددة، مثل التحفيز غير المتجانس، والإلكترونيات، والطاقة، والطب. كما أن تغير حجم المادة إلى المقياس النانوي يؤدي إلى تغير ملحوظ في خصائصها، حيث يمكن لبعض المواد الخاملة أن تكتسب نشاطاً تحفيزياً، وقد تتحول بعض أشباه الموصلات إلى مواد ذات توصيلية أعلى(3).

توجد عدة تقنيات لتحضير المواد النانوية، من أبرزها الترسيب بالبخر الكيميائي (CVD) أو الترسيب بالليزر، إضافةً إلى النمو الموجه بالقوالب. وتعد طريقة النمو باستخدام القوالب من

الطرق المهمة لإنتاج تراكيب نانوية ذات انتظام عالٍ في الأقطار والأطوال، حيث تُملأ المسام النانوية للقالب بمواد كيميائية أو عبر الترسيب الكهروكيميائي، ثم يُزال القالب للحصول على أسلاك أو أنابيب نانوية مطابقة لأبعاد المسام(4).

1.3. تصنيف المواد النانوية

يمكن تصنيف المواد النانوية وفق عدد من المعايير العلمية التي تعكس خصائصها الفيزيائية والكيميائية، ومن أهمها التصنيف بحسب الأبعاد الهندسية، أو الشكل المورفولوجي، أو التركيب الكيميائي، إضافةً إلى طبيعة الانحصر الكمي للإلكترونات داخل هذه المواد. ويُعد التصنيف القائم على عدد الأبعاد الواقعة ضمن المقياس النانوي من أكثر التصنيفات شيوعاً وأهمية، نظراً لارتباطه المباشر بالسلوك الإلكتروني والبصري والكهروكيميائي للمواد النانوية، وهو ما ينعكس بشكل واضح على تطبيقاتها في مجالات الطاقة، والإلكترونيات، والتحفيز، والطب.

تُصنّف المواد النانوية ذات الانحصر الصغري الأبعاد (Zero-Dimensional Nanomaterials) على أنها مواد تكون أبعادها الثلاثة جميعها ضمن النطاق النانوي، ومن أبرز أمثلتها النقاط الكمومية. تتميز هذه المواد بانحصر كامل لحركة حاملات الشحنة، مما يؤدي إلى ظهور مستويات طاقة منفصلة وسلوك بصري فريد يعتمد بشكل كبير على حجم الجسيم النانوي. وتُستخدم النقاط الكمومية على نطاق واسع في الخلايا الشمسية، والمجسات الضوئية، والتطبيقات الحيوية، لما تمتلكه من قدرة عالية على امتصاص وإصدار الضوء عند أطوال موجية محددة(5).

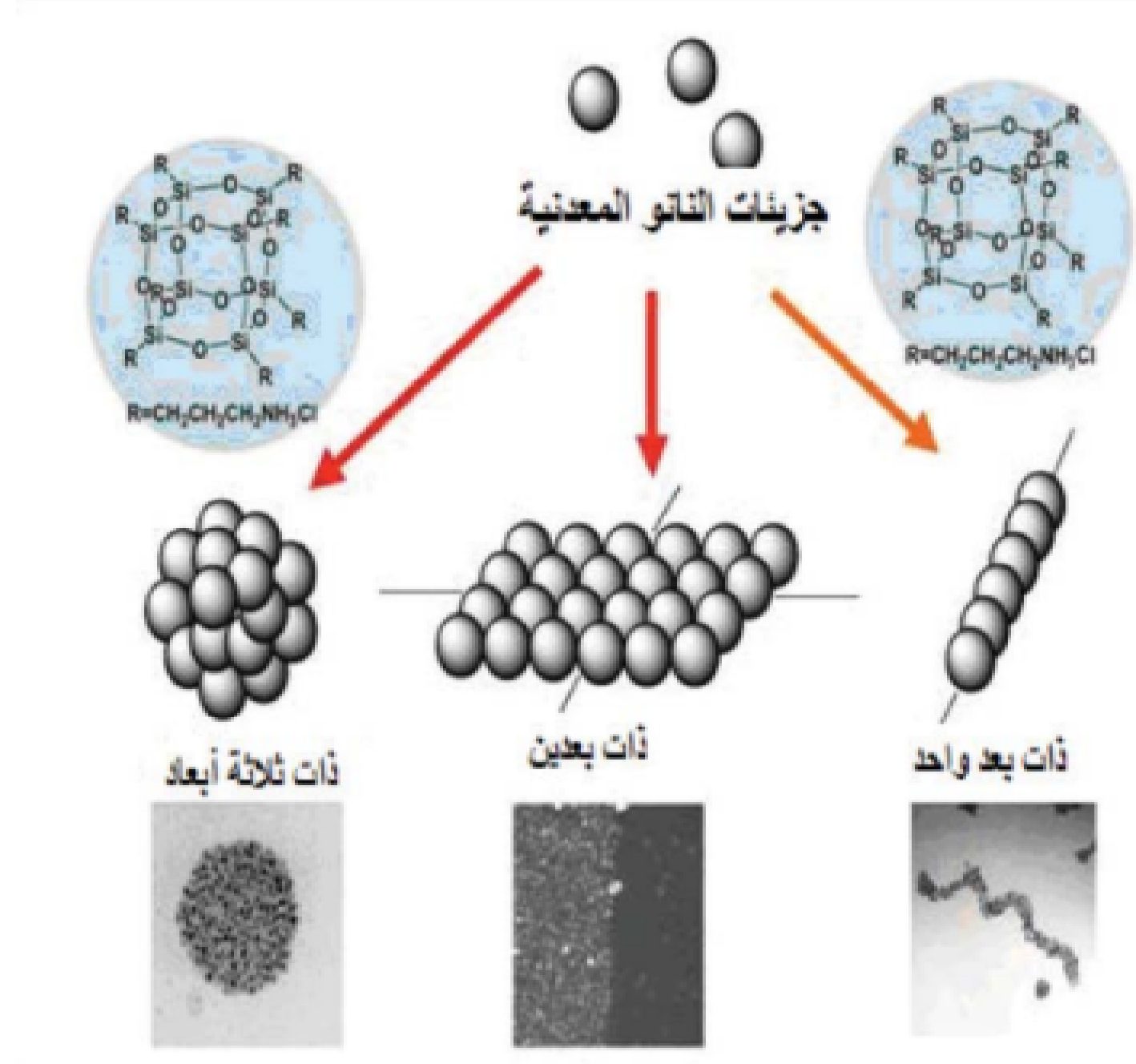
أما المواد النانوية ذات الانحصر أحادي البعد (One-Dimensional Nanomaterials)، مثل الأسلاك الكمومية والأنابيب النانوية، فيكون أحد أبعادها خارج النطاق النانوي بينما يبقى البعدان الآخران ضمن هذا النطاق. ويسمح هذا النوع من الانحصر بحركة حاملات الشحنة على طول بعد واحد فقط، الأمر الذي يمنح هذه المواد خصائص كهربائية وميكانيكية متميزة.

وتُعد الأسلاك الكمومية مكونات أساسية في العديد من التطبيقات، مثل النانوالإلكترونيات، وأجهزة الاستشعار، والخلايا الشمسية المتقدمة، نظراً لكفاءتها العالية في نقل الشحنة.

في حين تُصنّف المواد ذات الانحصار ثنائي الأبعاد (Two-Dimensional Nanomaterials)، مثل الآبار الكمومية والصفائح النانوية الرقيقة، على أنها مواد يكون أحد أبعادها فقط ضمن المقياس النانوي، بينما تمتد الأبعاد الأخرى إلى المقاييس الميكروية أو الأكبر. ويؤدي هذا النوع من الانحصار إلى تقييد حركة الإلكترونات في اتجاه واحد، مما يغير من البنية الحزمية وخواص الامتصاص الضوئي والتوصيل الكهربائي. وتستخدم هذه المواد بشكل واسع في التطبيقات الضوئية والإلكترونية، فضلاً عن دورها المهم في تحسين أداء الأقطاب في الأنظمة الكهروكيميائية(5).

أما المواد النانوية ثلاثية الأبعاد (Three-Dimensional Nanomaterials)، فهي مواد حجمية تحتوي على تراكيب نانوية داخل بنيتها، مثل المواد المسامية نانويًا أو المواد المركبة ذات الحبيبات النانوية. وعلى الرغم من أن أبعادها الكلية لا تقع ضمن المقياس النانوي، إلا أن وجود البنى النانوية الداخلية يمنحها خصائص محسنة مقارنة بالمواد التقليدية، مثل زيادة المساحة السطحية الفعالة وتحسين النشاط التحفيزي والكهروكيميائي. ولهذا السبب، تحظى هذه المواد بأهمية كبيرة في تطبيقات الخلايا الشمسية الكهروكيميائية، والمكثفات الفائقة، وعمليات التحفيز الكهروضوئي، (شكل 1) يوضح تصنيفات جزيئات النانو المعدنية .

وبذلك، يُظهر هذا التصنيف أن التحكم في أبعاد المادة على المستوى النانوي يمثل عاملاً حاسماً في تصميم مواد ذات خصائص وظيفية محسنة، الأمر الذي يجعل فهم تصنيف المواد النانوية خطوة أساسية في تطوير التقنيات الحديثة المعتمدة على النانو(5).



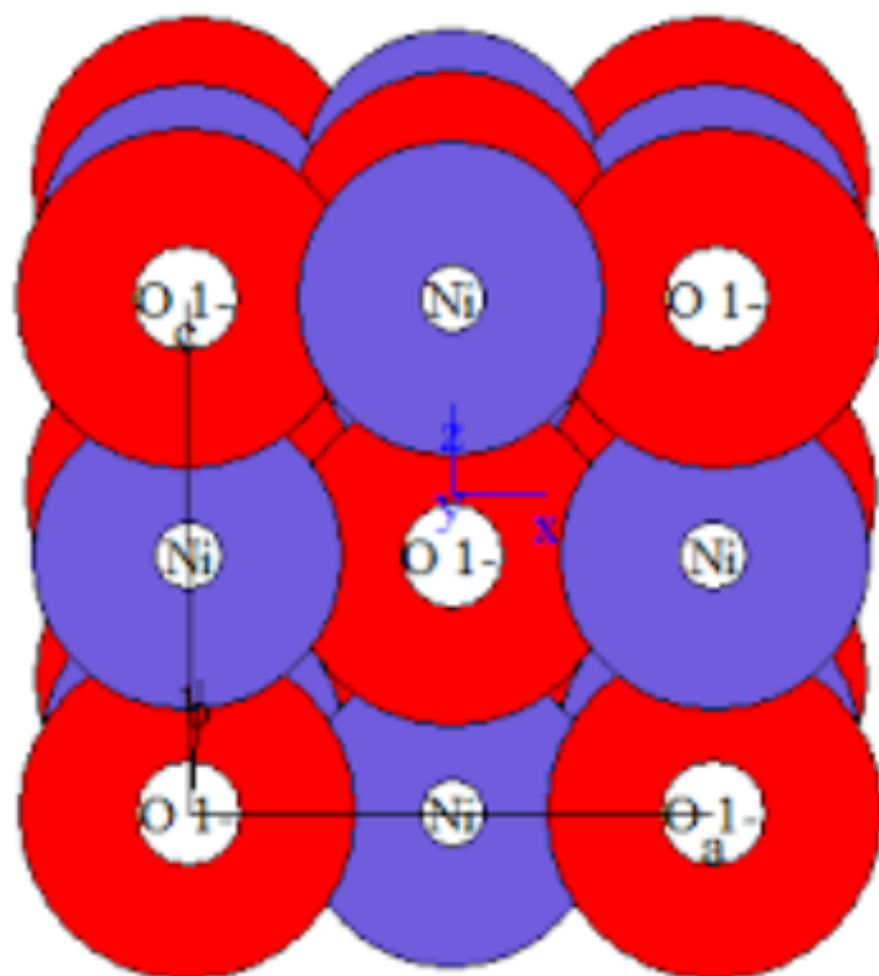
شكل (1) تصنيفات جزيئات النانو المعدنية [5].

1.4. الأكاسيد الموصلية الشفافة (Transparent Conductive Oxides, TCOs)

تُعد الأكاسيد الموصلية الشفافة من المواد المحورية في تقنيات الخلايا الشمسية والأجهزة الكهروضوئية الحديثة، نظراً لقدرتها الفريدة على الجمع بين خاصيتين تبدوان متناقضتين ظاهرياً، وهما النفاذية العالية للضوء المرئي والتوصيلية الكهربائية المرتفعة. وتُحقق هذه المواد هذا التوازن من خلال امتلاكها فجوة طاقة مباشرة وواسعة نسبياً، تسمح بمرور معظم الإشعاع في المجال المرئي دون امتصاص ملحوظ، في الوقت الذي توفر فيه تراكيز عالية من حوامل الشحنة الحرة المسؤولة عن التوصيل الكهربائي (6).

تتكون الأكاسيد الموصلية الشفافة عادةً من مواد شبه موصلة غير عضوية، مثل أكسيد الإنديوم، وأكسيد القصدير، وأكسيد الزنك، وأكسيد الكاديوم، وثاني أكسيد التيتانيوم، سواءً في صورتها النقية أو بعد تشويبها بعناصر مناسبة لتحسين خواصها الكهربائية. ويسهم التشويب في زيادة تركيز الإلكترونات الحرة داخل نطاق التوصيل، مما يؤدي إلى خفض المقاومة الكهربائية

للغشاء مع الحفاظ على نفاذيته الضوئية العالية. كما تلعب البنية البلورية وتقاوة المادة دوراً أساسياً في تحديد كفاءة الأداء الكهروضوئي لهذه الأكاسيد (شكل 2).



شكل (2) الأكاسيد الموصلية الشفافة [6].

تتميز أغشية الأكاسيد الموصلية الشفافة بنفاذية ضوئية قد تتجاوز 80% في نطاق الضوء المرئي، ويعتمد ذلك بشكل مباشر على طريقة الترسيب المستخدمة، مثل الترسيب بالرش الحراري أو الترسيب بالليزر النبضي أو الترسيب الكيميائي بالبخر، إضافة إلى سمك الغشاء ودرجة انتظامه البلوري. وفي الوقت نفسه، تُظهر هذه الأغشية موصلية كهربائية مرتفعة نسبياً، مما يجعلها مناسبة للاستخدام كأقطاب أمامية شفافة في الخلايا الشمسية، حيث تسمح بمرور الضوء إلى الطبقات الفعالة مع جمع ونقل الشحنات المتولدة بكفاءة (6).

ونتيجة لهذه الخصائص المتميزة، تُستخدم الأكاسيد الموصلية الشفافة على نطاق واسع في العديد من التطبيقات التكنولوجية المتقدمة، من أبرزها الخلايا الشمسية بمختلف أنواعها، والأجهزة الكهروضوئية، والمرايا الحرارية، والمقاومات الرقيقة، وحساسات الغازات، إضافة إلى دورها المهم في النوافذ الذكية، وشاشات العرض، وتطبيقات الطيران والمركبات. ويعكس هذا

التنوع في الاستخدامات الأهمية الاستراتيجية للمواد في تطوير تقنيات الطاقة المستدامة والأنظمة الإلكترونية الحديثة.

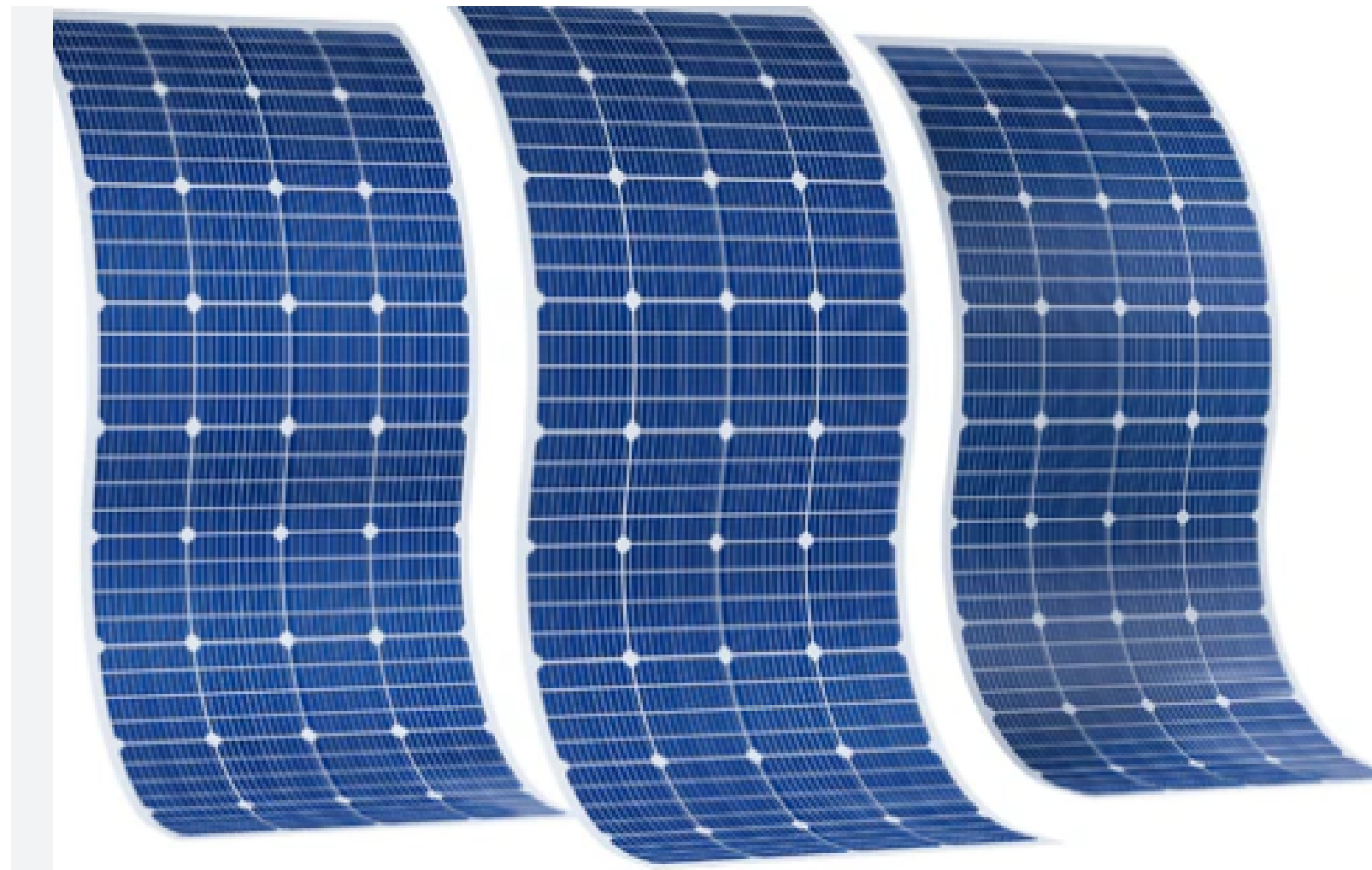
1.5. الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة (Thin-Film Solar Cells)

تعد الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة من الجيل الثاني للخلايا الشمسية، وتمثل خطوة متقدمة نحو تطوير أنظمة طاقة شمسية فعالة من حيث المواد والتكلفة. يتم تصنيع هذه الخلايا من خلال ترسيب طبقات رقيقة جداً من المواد الفعالة ضوئياً، عادة بسمك يتراوح من بضعة نانومترات إلى عدة ميكرومترات، على ركائز متنوعة تشمل الزجاج، أو البلاستيك المرن، أو المعادن، اعتماداً على التطبيق النهائي ومتطلبات الأداء الميكانيكي والحراري. وتتميز هذه الطريقة بقدرتها على تقليل استهلاك المواد النشطة بشكل كبير مقارنة بالخلايا الشمسية التقليدية القائمة على السيليكون البلوري (شكل 3).

تشمل تقنيات الأغشية الرقيقة الرئيسية تيلوريد الكاديوم (CdTe)، وسيلينيد النحاس والإنديوم والغالسيوم (CIGS)، والسيليكون غير المتبلور (a-Si)، إضافةً إلى تقنيات مبتكرة أخرى تعتمد على المواد العضوية أو النقاط الكمومية. وتتميز كل تقنية بخصائص كهربائية وضوئية محددة، مثل فجوة الطاقة، ومعامل الامتصاص، والمرونة الميكانيكية، مما يجعل اختيار المادة والتصميم خطوة حاسمة لتحقيق أداء عالٍ وكفاءة مستدامة في الظروف البيئية المختلفة (6).

من أهم مزايا الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة مقارنة بالخلايا السيليكونية التقليدية هو تقليل سماكة الطبقات الفعالة، مما يؤدي إلى خفض الوزن الكلي وزيادة المرونة، الأمر الذي يتيح استخدامها في التطبيقات المحمولة أو على الأسطح المنحنية، مثل النوافذ الشمسية أو واجهات المباني. كما أن تقليل سماكة المواد الفعالة يساهم في خفض تكلفة الإنتاج بشكل ملحوظ، نظراً لقلة استهلاك المواد الخام ومرونة طرق الترسيب مثل الترسيب بالبخار الكيميائي، والترسيب بالرداز، والترسيب بالليزر النبضي.

على الرغم من أن كفاءة هذه الخلايا كانت أقل مقارنة بالخلايا السيليكونية متعددة البلورات في الماضي، إلا أن التطورات الحديثة في هندسة الطبقات، وتقنيات التشويب، واستخدام الأغشية النانوية، أدت إلى تحقيق كفاءات مختبرية تجاوزت 21% لبعض تقنيات الأغشية الرقيقة، مما جعلها منافساً حقيقياً في السوق للطاقة الشمسية التقليدية. وإلى جانب الكفاءة، توفر هذه الخلايا مزايا إضافية مثل تحمل أعلى للظروف البيئية، وسهولة التكامل مع تطبيقات البناء الذكي، ما يعزز من مكانتها كخيار مستدام وفعال للطاقة الشمسية في المستقبل(7).



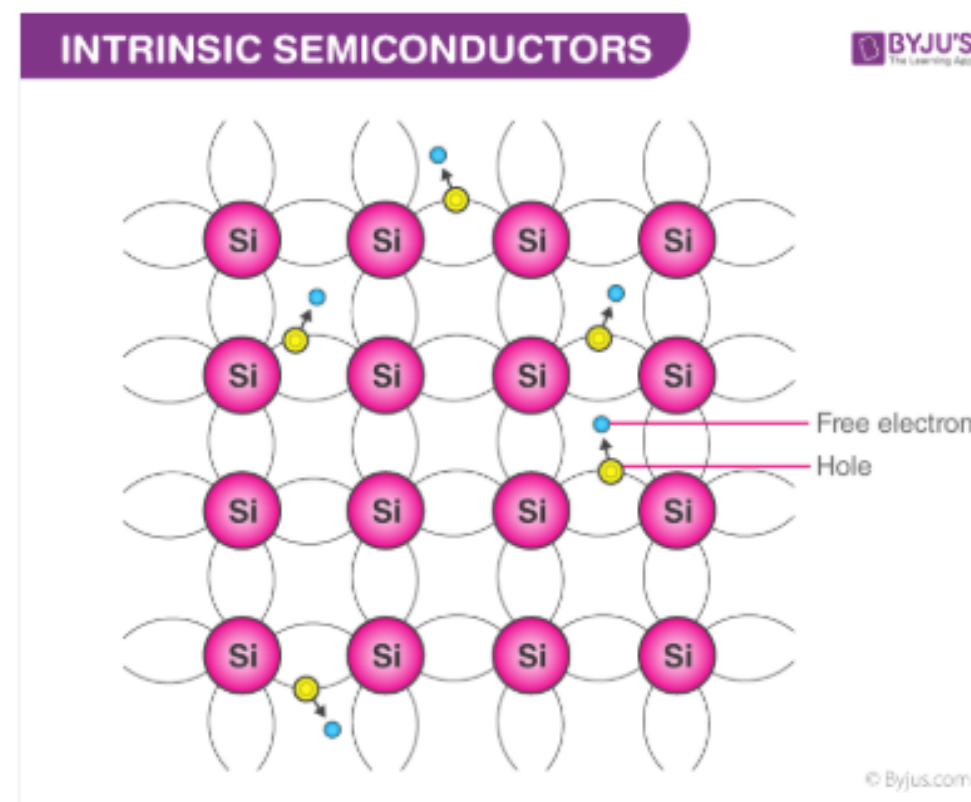
شكل (3) الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة(7).

1.6. أشباه الموصلات وخصائصها (Semiconductors and Their Properties)

تتميز المواد شبه الموصلة بخصائص كهربائية وحرارية فريدة تجعلها عناصر أساسية في العديد من التطبيقات التقنية، وخصوصاً في أنظمة الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية. فهي تمتلك مقاومة كهربائية متوسطة تقع بين العوازل والمعادن،

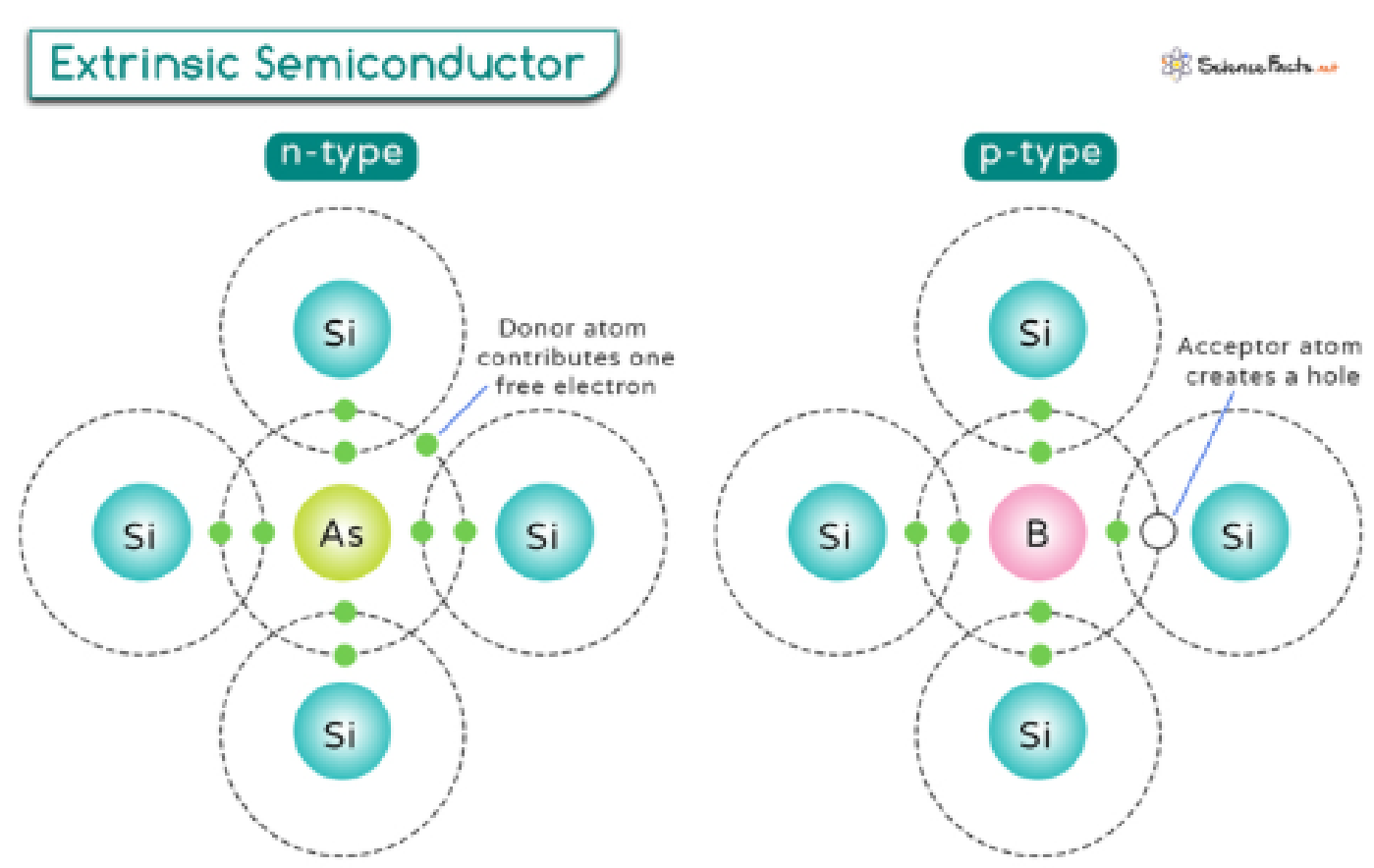
مما يمنحها القدرة على التحكم في تدفق التيار الكهربائي بشكل دقيق عند التعرض لمحفزات خارجية. ومن المميزات الهامة لأشباه الموصلات أن موصليتها الكهربائية تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة، وهو سلوك معاكس للمعادن، حيث تقل موصليتها مع ارتفاع الحرارة بسبب زيادة تصادمات الإلكترونات. إضافةً إلى ذلك، تتأثر الموصلية بالإشعاع الضوئي، والمجالات الكهربائية والمغناطيسية، مما يجعل أشباه الموصلات قابلة للاستخدام في تطبيقات تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء، وأجهزة الاستشعار، والمكونات الإلكترونية الدقيقة. تنقسم أشباه الموصلات عموماً إلى نوعين رئيسيين اعتماداً على مصدر حاملات الشحنة وطبيعة التوصيل: (8).

1. **أشباه موصلات ذاتية (Intrinsic Semiconductors):** وهي المواد النقية التي تولد فيها الإلكترونات والفجوات بشكل طبيعي نتيجة التنشيط الحراري دون الحاجة لإضافة شوائب. ومن الأمثلة الكلاسيكية على هذه المواد الجرمانيوم والسيليكون النقيين. وتتميز هذه المواد بتوزيع متوازن للإلكترونات والفجوات، مما يجعل سلوكها الكهربائي حساساً للغاية للتغيرات في درجة الحرارة والإشعاع الضوئي، وهو ما يُستفاد منه في التطبيقات الكهروضوئية وأجهزة القياس الدقيقة (شكل 4).



شكل (4) أشباه موصلات ذاتية (8).

2. أشباه موصلات مطعّمة أو غير ذاتية (Extrinsic Semiconductors): يتم في هذا النوع التحكم بنوع وتركيز حاملات الشحنة عبر إدخال شوائب محددة في بلورة المادة شبه الموصلة. إضافة عناصر من المجموعة الخامسة في الجدول الدوري، مثل الفسفور إلى السيليكون، تؤدي إلى تكوين أشباه موصلات من النوع **n-type** تتميز بزيادة عدد الإلكترونات الحرة. أما إدخال عناصر من المجموعة الثالثة، مثل البورون، فينتج أشباه موصلات من النوع **p-type** تتميز بزيادة عدد الفجوات. ويتيح هذا التعديل الدقيق للخصائص الكهربائية إمكانية تصميم خلايا شمسية عالية الكفاءة، حيث تُنشأ وصلات p-n التي تعتبر العمود الفقري لعمل معظم الخلايا الكهروضوئية) شكل (5) (8).



شكل (5) أشباه موصلات غير ذاتية (مطعّمة) [8].

وبذلك، يظهر أن القدرة على التحكم في الخصائص الكهربائية لشبه الموصلات، سواء من خلال طبيعتها الذاتية أو عبر التشويب، تجعلها أساساً لتطوير أجهزة طاقة شمسية فعالة، فضلاً عن تطبيقاتها الواسعة في الإلكترونيات، والضوئيات، والحساسات الذكية، والدوائر المتكاملة، مما يبرز أهميتها الحيوية في مجال التكنولوجيا الحديثة (9).

الفصل الثاني

وصف الأجهزة
وطرق الترسيب
المستخدمة

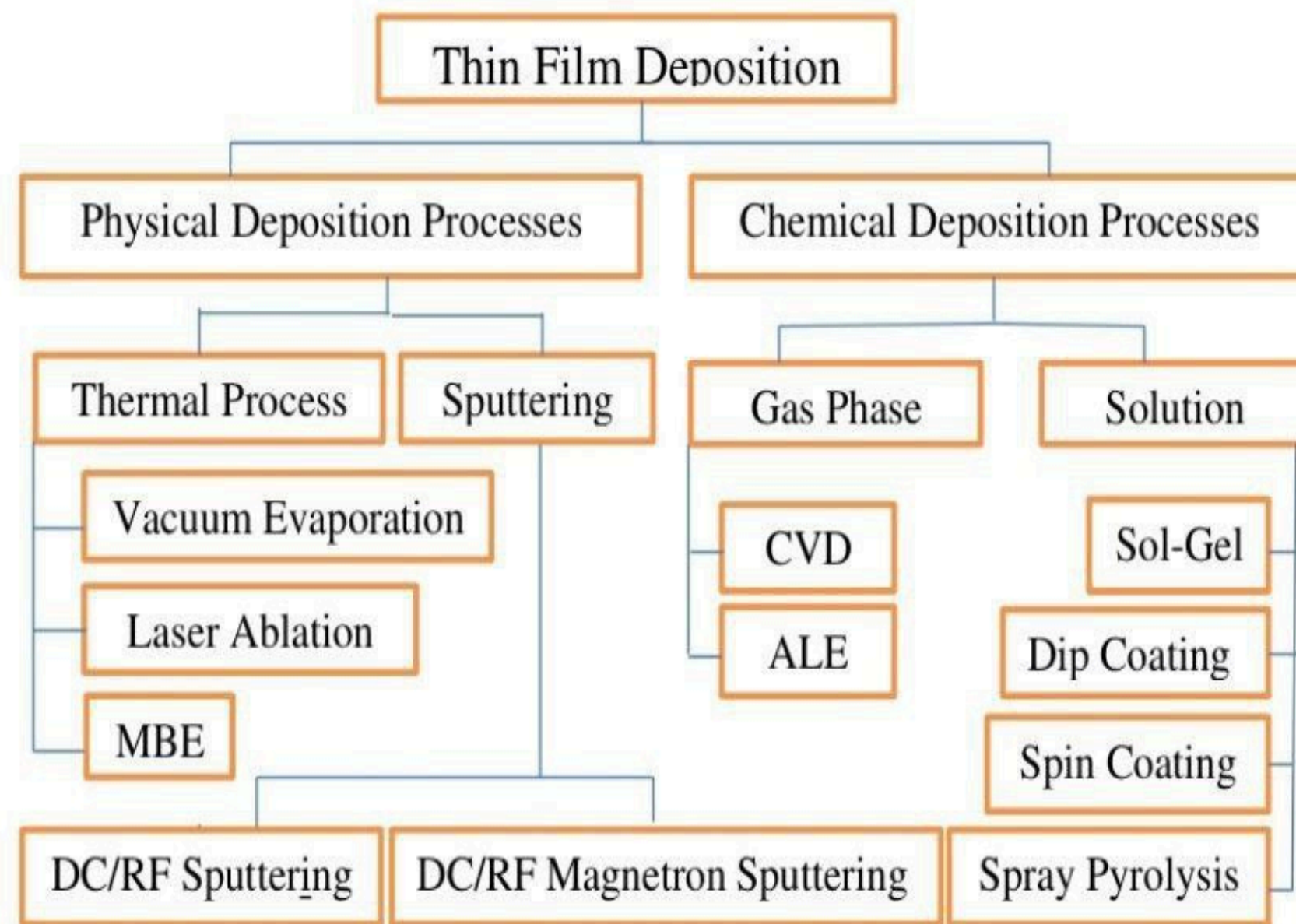
الفصل الثاني

2.1. المقدمة

يستعرض هذا الفصل المبادئ الأساسية لعملية الترسيب بالليزر، مع التركيز بشكل خاص على تفاعل الليزر مع الهدف، ومعاملات العملية الرئيسية، والآليات المتضمنة في ترسيب الأغشية الرقيقة. يمتلك ثاني أكسيد التيتانيوم مجموعة من الخواص الفيزيائية والكيميائية المميزة التي تجعله ذا قيمة عالية في العديد من التطبيقات التكنولوجية. وتستخدم الأغشية الرقيقة متعددة البلورات على نطاق واسع في تصنيع المقاومات الكهربائية، في حين تُعدّ أغشية ثاني أكسيد التيتانيوم الرقيقة الموصلة راسخة الاستخدام كأقطاب شفافة. إضافةً إلى ذلك، تُستعمل أغشية ثاني أكسيد التيتانيوم كعناصر تسخين شفافة، وفي تصنيع الترانزستورات، وكطلاءات شفافة مضادة للكهرباء الساكنة، فضلاً عن استخدامها في مختلف مكونات الأجهزة الكهربائية التي تتطلب شفافية بصرية، كما ورد في المرجع (1).

برزت تقنية الترسيب بالليزر النبضي في السنوات الأخيرة بوصفها إحدى التقنيات الواعدة لتصنيع المواد ذات البنى النانوية، بما في ذلك أشباه الموصلات. وباعتبارها طريقة معالجة ذات جدار بارد (Cold-Wall Processing)، فإن تقنية PLD تثير فقط المناطق المعرضة مباشرةً لتشعيع الليزر على الهدف، مما يحافظ على بيئة ترسيب نظيفة نسبياً. وتعدّ هذه الخاصية عاملاً مهماً يجعل التقنية ملائمة بصورة خاصة لنمو البنى النانوية ذات النقاوة الكيميائية العالية والتركيب الستوكيومترى المضبوط بدقة (1).

إضافةً إلى ذلك، توفر تقنية PLD عدداً من المزايا المهمة، من بينها توليد أنواع مستأصلة عالية الطاقة، الأمر الذي يسمح بنمو أغشية عالية الجودة عند درجات حرارة ركيضة منخفضة نسبياً. كما تتميز هذه التقنية ببساطة الإعداد التجريبي وانخفاض تكلفته، وإمكانية التشغيل تحت ضغوط مرتفعة نسبياً للغاز المحيط، فضلاً عن قابليتها للترسيب المتعاقب من أهداف متعددة مع الحفاظ على التبخر المتكافئ للمواد متعددة المكونات. وتجعل هذه الخصائص مجتمعةً من تقنية PLD وسيلةً مناسبة بشكل خاص لترسيب الأغشية الرقيقة للأكاسيد والبنى النانوية لأشباه الموصلات (2).



شكل (2-1): تصنيف طرق تحضير الأغشية الرقيقة إلى طرق فيزيائية وكيميائية

2.2. طرق تحضير الأغشية الرقيقة (Thin Film Deposition Methods)

تنقسم طرق تحضير الأغشية الرقيقة بصورة عامة إلى قسمين رئيسيين:

أولاً: طرق الترسيب الفيزيائية (Physical Deposition Processes)

وتنقسم هذه الطرق إلى نوعين أساسيين:

1- العمليات الحرارية (Thermal Processes)

وتشمل الطرق الآتية:

- التبخير الفراغي (Vacuum Evaporation)
- الترسيب بالليزر (Laser Ablation)
- الترسيب بالحزمة الجزيئية (Molecular Beam Epitaxy - MBE)

2- الترسيب بالترذيد (Sputtering Processes)

وينقسم بدوره إلى:

- الترذيد بالتيار المستمر أو المتردد (DC/RF Sputtering)
- الترذيد المغناطيسي بالتيار المستمر أو المتردد (DC/RF Magnetron Sputtering)

ثانياً: طرق الترسيب الكيميائية (Chemical Deposition Processes)

وتنقسم إلى نوعين رئيسيين:

1- الترسيب من الطور الغازي (Gas Phase Deposition)

ويتضمن:

- الترسيب الكيميائي بالبخر (Chemical Vapor Deposition - CVD)
- الترسيب بالطبقات الذرية (Atomic Layer Epitaxy - ALE)

2- الترسيب من المحلول (Solution-Based Deposition)

ويشمل الطرق الآتية:

- طريقة السول-جل (Sol-Gel Method)
- الطلاء بالغمر (Dip Coating)
- الطلاء بالدوران (Spin Coating)
- التحلل الحراري بالرش (Spray Pyrolysis)

2.3. الترسيب بالليزر النبضي (Pulsed Laser Deposition - PLD)

يُعدّ الترسيب بالليزر النبضي (PLD) إحدى تقنيات الترسيب الفيزيائي للبخر، ويُستخدم على نطاق واسع في إنتاج الأغشية الرقيقة عالية الجودة للمعادن وأشباه الموصلات والأكاسيد المعقدة. في هذه التقنية، تُركّز نبضات ليزر قصيرة وعالية الطاقة على هدفٍ صلبٍ موضوع داخل حجرة تفريغ (أو حجرة ذات جو مُتحكّم به)، مما يُنتج سحابة بلازمية عالية الطاقة تتكوّن

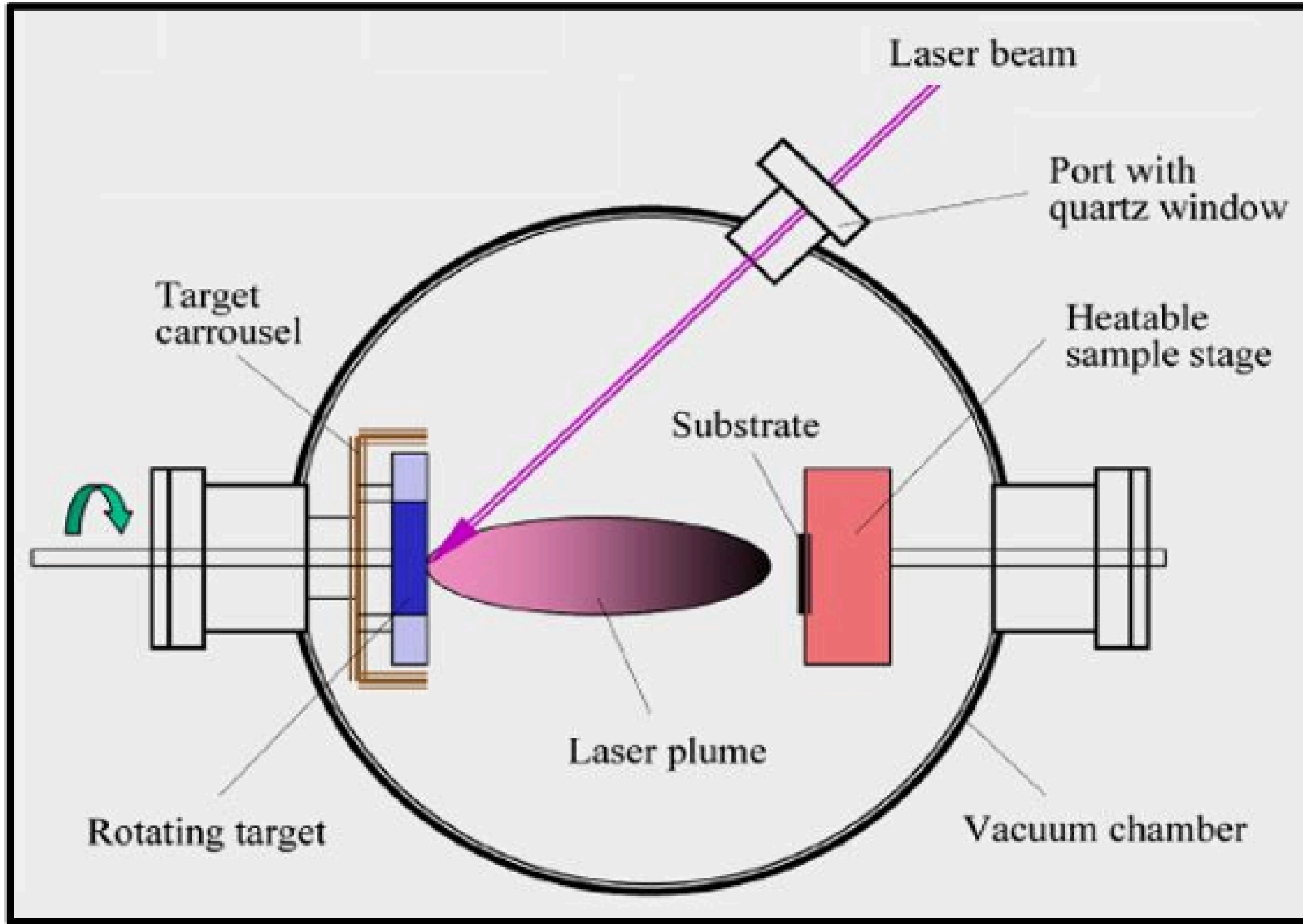
من ذرات وجزيئات وتجمعات (Clusters) وأيونات. وتتمدد هذه الأنواع المستأصلة باتجاه ركيزة موضوعة مقابل الهدف، حيث تتكاثف عليها مُشكِّلةً غشاءً رقيقاً.

ومن أبرز مزايا تقنية PLD قدرتها على تحقيق انتقال شبه متكافئ في التركيب الكيميائي من الهدف إلى الغشاء، وهو أمر بالغ الأهمية عند ترسيب المواد متعددة المكونات، مثل الأكاسيد المعدنية. وتتأثر خصائص الغشاء المترسب بما في ذلك السمك، والبنية البلورية، والمورفولوجيا السطحية، والخواص الكهربائية والبصرية بشكل كبير بظروف الترسيب. وتشمل العوامل الرئيسة المؤثرة: طول موجة الليزر، مدة النبضة، معدل التكرار، كثافة طاقة الليزر (Fluence)، درجة حرارة الركيزة، المسافة بين الهدف والركيزة، ضغط الحجر، ونوع الغاز الخلفي (2).

2.4. آليات الترسيب بالليزر

في نظام الترسيب بالليزر النبضي (PLD) النموذجي، يُؤد شعاع الليزر خارج حجرة الترسيب. وتوضع مكونات بصرية مثل العدسات والمرايا والفتحات قبل منفذ الحجر لتوجيه شعاع الليزر وتشكيله وتركيزه. وداخل الحجر، يُوجه شعاع الليزر إلى سطح مادة الهدف. ولضمان تآكل منتظم لسطح الهدف، يمكن تدوير الهدف و/أو تحريكه خطياً مع بقاء شعاع الليزر ثابتاً، أو يمكن مسح شعاع الليزر عبر سطح الهدف (2).

يُعد الترسيب بالليزر النبضي تقنيةً لنمو الأغشية الرقيقة، حيث تُقدف المادة المستأصلة من الهدف على هيئة جسيمات عالية الطاقة تنتقل باتجاه الركيزة وتتكاثف عليها. وتجرى عملية الترسيب عادةً تحت ظروف التفريغ لتقليل تشتت الأنواع المستأصلة. ويُوضَّح التمثيل التخطيطي لنظام PLD في الشكل (2-1). وتُمكن الكثافة العالية للطاقة المستخدمة في هذه التقنية من استئصال معظم فئات المواد تقريباً. ومن خلال التحكم الدقيق في معاملات الترسيب، يمكن إنتاج أغشية رقيقة عالية الجودة بشكل موثوق وخلال أزمان معالجة قصيرة نسبياً مقارنةً بتقنيات النمو الأخرى، مثل الترسيب بالحزمة الجزيئية (MBE) وتقنية الرش (Sputtering)..



شكل (2-2): التمثيل التخطيطي لنظام PLD

ومن المزايا الإضافية لتقنية PLD قدرتها على تحقيق انتقال ستوكيومتري دقيق من الهدف إلى الغشاء المترسب. ومن هذا المنطلق، تُعدّ ليزرات Nd:YAG المضاعفة التردد (Frequency-doubled) (والمثلثة التردد) Frequency-tripled) فعالة أيضاً في هذه العملية. وتعتمد كفاءة إزالة المادة أثناء التشعيع بالليزر اعتماداً كبيراً على درجة الاقتران بين شعاع الليزر ومادة الهدف. وعادةً ما تتراوح كثافة طاقة الليزر (Fluence) المستخدمة في الترسيب بين 1 و10 جول/سم²، مع مدد نبضات تتراوح بين 5 و50 نانوثانية، وذلك بحسب نوع مادة الهدف. وتكون هذه القيم أعلى عموماً من عتبة تكوّن البلازما لمعظم المواد. ويمكن تصنيف عملية الترسيب بالليزر، على نحو عام، إلى ثلاثة أنظمة فيزيائية رئيسية (3).

يمكن تقسيم عملية الترسيب بالليزر إلى ثلاث مراحل فيزيائية رئيسية:

1. تبخر مادة الهدف.
2. تفاعل السحابة المتبخرة مع شعاع الليزر الساقط، مما يؤدي إلى تسخين السحابة وتكون البلازما.
3. تمدد السحابة المستأصلة داخل الفراغ أو ضمن جو محيط مُتحكّم به.

يمكن ضبط درجة حرارة الركيزة بدءاً من درجة حرارة الغرفة وحتى نحو 900 °م باستخدام متحكّم حراري آلي قادر على برمجة عدة منحنيات للتسخين والتبريد، إضافةً إلى فترات تثبيت حراري بمعدلات يحددها المستخدم. ويتم تحقيق اقتران حراري فعّال بين السخان والركيزة من خلال وضع كمية مناسبة من معجون الفضة الموصل على السطح الخلفي للركيزة (3).

وعلى الرغم من أن تقنية الترسيب بالليزر النبضي تُعدّ بسيطة من حيث المبدأ، فإن التحكم الدقيق في ديناميكيات نمو الأغشية الرقيقة يظلّ أمراً معقّداً، وذلك بسبب العدد الكبير من العوامل المتداخلة التي تؤثر في كلٍّ من عملية الترسيب وخصائص الغشاء الناتج. وتشمل هذه العوامل ما يأتي:

- معاملات الليزر، مثل طول موجة التشغيل، وكثافة طاقة الليزر (Fluence)، ومدة النبضة، ومعدل التكرار.
- خصائص الركيزة، بما في ذلك نوع المادة، والاتجاه البلوري، ودرجة الحرارة.
- التركيب البنيوي والكيميائي لمادة الهدف.
- ضغط الحجرة والتركيب الكيميائي للغاز الخلفي (الوسيط).
- الهندسة التجريبية، بما في ذلك زاوية سقوط الليزر، وزاوية تمدد السحابة البلازمية، والمسافة بين الهدف والركيزة

ومن خلال تحقيق تحكّم دقيق في هذه المعاملات لنظام ترسيب معيّن، يمكن الاستفادة الكاملة من مزايا تقنية PLD. وعملياً، يتم عادةً تحسين بعض المعاملات—مثل إعدادات الليزر

والهندسة التجريبية—وتثبيتها، في حين تُغيّر متغيرات أخرى بصورة منهجية، مثل درجة حرارة الركيزة وضغط الحجره وتركيب الغاز الخلفي، لدراسة تأثيرها في نمو الأغشية الرقيقة وخصائصها

2.5. تفاعل الليزر مع الهدف

من الناحية المثالية، ينبغي أن تمتلك السحابة البلازمية المتولدة أثناء عملية الترسيب بالليزر نفس التركيب الستوكيومتري لمادة الهدف، وذلك من أجل إنتاج أغشية رقيقة ذات تركيب كيميائي مطابق للمطلوب. فعلى سبيل المثال، إذا جرى تسخين سطح الهدف ببطء—كما في حالة امتصاص الإشعاع الصادر من ليزر مستمر الموجة (CW)—فإن جزءاً كبيراً من الطاقة الساقطة يُنقل بالتوصيل الحراري إلى داخل جسم الهدف. وفي ظل هذه الظروف، يحدث الانصهار والتبخّر السطحيان أساساً عبر آليات حرارية. وبما أن مكونات الهدف تختلف عادةً في درجات الانصهار وضغوط البخار، فإنها تتبخّر بمعدلات مختلفة، مما يؤدي إلى تغيير تركيب المادة المتبخرة مع الزمن وانحرافه عن تركيب الهدف الأصلي. وتُعرف هذه الظاهرة باسم التبخّر غير المتكافئ (Incongruent Evaporation)، والتي تؤدي إلى ترسيب أغشية ذات تركيب ستوكيومتري يختلف بصورة ملحوظة عن تركيب مادة الهدف (4).

ولتحقيق التبخّر المتكافئ (Congruent Evaporation)، يجب إيصال طاقة الليزر إلى سطح الهدف بسرعة كبيرة، بما يقلل انتقال الحرارة إلى المناطق التحت-سطحية. ويضمن ذلك أن يحدث انصهار وتبخّر مكونات الهدف بصورة شبه متزامنة. وتتطلب هذه الشروط كثافات طاقة ليزرية عالية، يمكن تحقيقها بكفاءة باستخدام ليزرات نبضية أو ليزرات ذات تبديل نوعي (Q-switched) تُركّز على بقعة صغيرة من سطح الهدف. وإذا كانت كثافة الطاقة الساقطة أقل من عتبة الترسيب للمادة، فلن يحدث أي إزالة للمادة، على الرغم من إمكانية حدوث انفصال أو تركيز لبعض العناصر على السطح (4).

وبصورة عامة، يبدأ تفاعل الليزر مع المادة الصلبة بامتصاص الفوتونات من قبل إلكترونات النظام الذري. وتؤدي الطاقة الممتصة إلى إثارة الإلكترونات إلى مستويات طاقة أعلى،

مما يسبب ارتفاعاً سريعاً في درجة الحرارة خلال فترة زمنية قصيرة للغاية. وبعد ذلك، تنتقل الطاقة من منظومة الإلكترونات المثارة إلى الشبكة البلورية عبر اقتران الإلكترون-فونون، وهو ما يؤدي إلى زيادة إضافية في تسخين المادة (4).

عند وصول نبضة ليزر مُركّزة إلى سطح الهدف، يؤدي امتصاص الفوتونات إلى ارتفاع حاد في درجة حرارة السطح. ويعتمد معدل التسخين—وبالتالي درجة الحرارة العظمى المتحققة—على عدة عوامل، أهمها الحجم الفعّال للمادة التي تتعرض للتسخين. ويتحدد هذا الحجم ليس فقط بدرجة تركيز الليزر، بل أيضاً بعمق الاختراق البصري للمادة. فكلما كان عمق الاختراق صغيراً، جرى امتصاص طاقة الليزر ضمن طبقة سطحية رقيقة، مما يولد درجات حرارة موضعية أعلى. لذلك تُفضل أطوال الموجات التي تكون عندها مادة الهدف شبه معتمة. وبوجه عام، يقل عمق الامتصاص البصري مع نقصان طول الموجة إضافةً إلى ذلك، يتأثر معدل التسخين بالموصلية الحرارية لمادة الهدف، وكذلك بطاقة نبضة الليزر ومدتها (5).

ويمكن تلخيص تسلسل العمليات الفيزيائية التي تحدث عند تشعيع الهدف بنبضة ليزر على النحو الآتي:

1. تؤدي الحافة الأمامية لنبضة الليزر إلى انصهار سريع لسطح الهدف.
2. تتقدّم جبهة الانصهار إلى داخل الهدف، بينما تبدأ المادة المنصهرة بالتبخّر.
3. تتشكّل بلازما كثيفة فوق السطح، تبقى غير شفافة لإشعاع الليزر الساقط وتتعرض لارتفاع سريع في درجة الحرارة.
4. تتمدّد السحابة البلازمية بسرعة وتزداد شفافيتها مع انخفاض كثافتها، في حين تبرد المادة المنصهرة المتبقية على سطح الهدف وتعود إلى الحالة الصلبة.

2.6. الليزر المستخدم في تقنية PLD

كما دُكر سابقاً، فإن مصدر الطاقة المسؤول عن توليد السحابة البلازمية في تقنية الترسيب بالليزر النبضي (PLD)، والمتمثل بالليزر، يُعدّ مستقلاً عن حجرة الترسيب وتكوين الركيزة. وتوفّر هذه الاستقلالية مرونةً كبيرة،

ولا سيما في نمو الأغشية الرقيقة متعددة الطبقات والمعقدة، حيث يمكن تحقيق ذلك ضمن نظام ترسيب واحد من خلال تعريض أهداف مختلفة بصورة متعاقبة.

وللحصول على نمو عالي الجودة للأغشية الرقيقة، يقع نطاق أطوال الموجات الليزرية الفعالة عادةً بين نحو 200 و550 نانومتر. وبالنسبة لمعظم المواد، يزداد معامل الامتصاص البصري مع تناقص طول موجة الليزر، مما يؤدي إلى امتصاص سطحي قوي في نطاق الأشعة فوق البنفسجية (UV). ويؤدي هذا الامتصاص المعزز في المجال فوق البنفسجي إلى خفض عتبة كثافة طاقة الليزر اللازمة لحدوث الترسيب. ومع ذلك، فإن عدد الأنظمة الليزرية التجارية القادرة على توفير كثافات طاقة عالية على مساحات حزم كبيرة نسبياً ضمن نطاق الأشعة فوق البنفسجية والمرئية يبقى محدوداً (5).

في ليزرات العقيق الألمنيومي الإيتريومي المشوب بالنيوديميوم (Nd:YAG)، تعمل أيونات Nd³⁺ بوصفها ذرات شوائب ضمن وسط YAG، وتُضخ بصرياً إلى مستويات طاقة أعلى باستخدام مصابيح الوميض. وغالباً ما تُحقق طاقات خرج عالية من خلال استخدام قضيبين من Nd:YAG يعملان بترتيب المذبذب-المضخم. كما يتيح استخدام تقنية التبديل النوعي (Q-switching) توليد نبضات ليزر نانوية الزمن ذات طاقات ذروية عالية جداً. وعند هذه المستويات من الطاقة، يقتصر معدل التكرار الأقصى الممكن عادةً على بضعة عشرات من الهرتز، وهو مع ذلك كافٍ لعمليات PLD التي تستخدم ليزرات Nd:YAG.

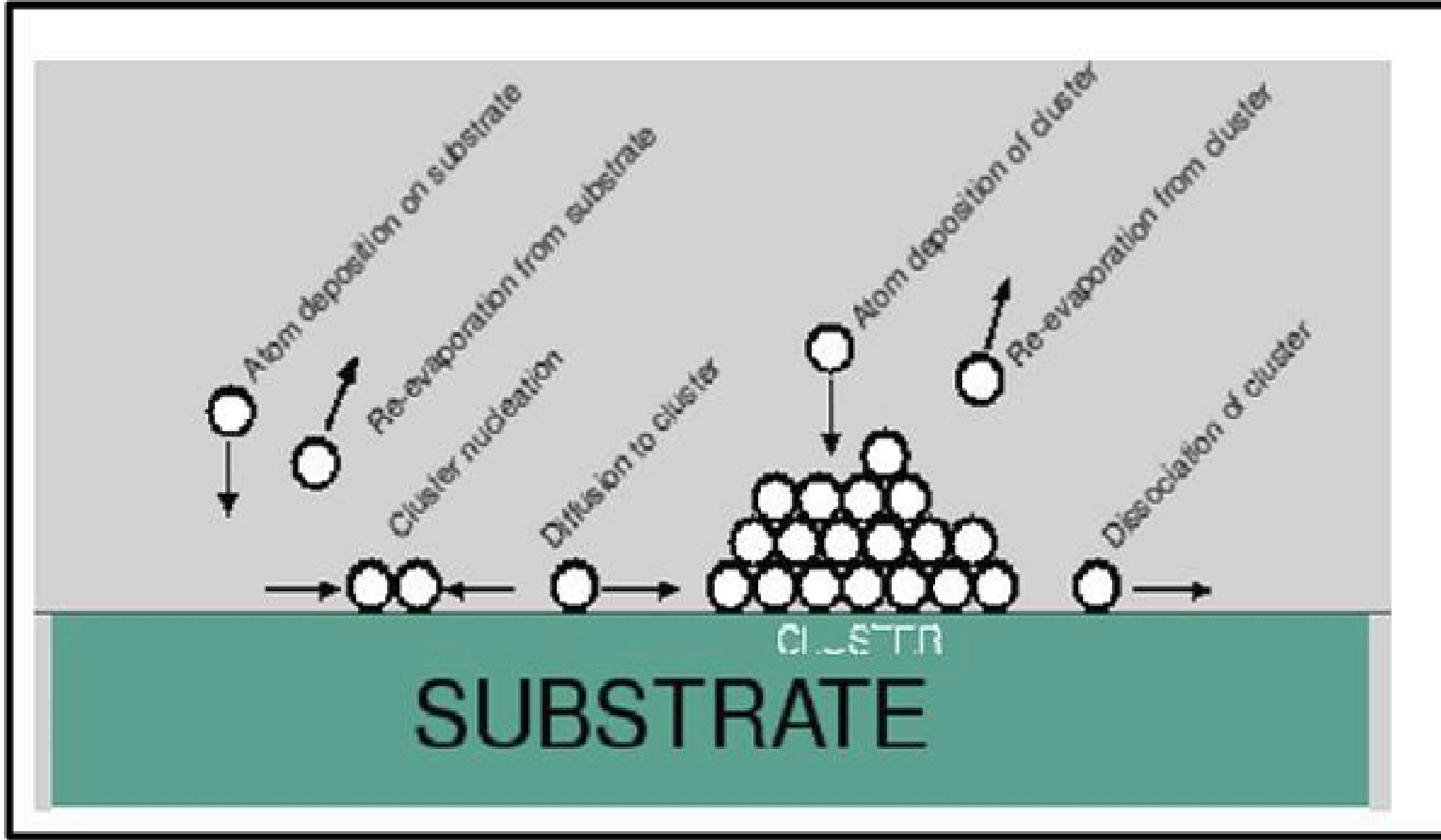
يبلغ الطول الموجي الأساسي لإشعاع ليزرات Nd:YAG نحو 1064 نانومتر، وهو يقع خارج النطاق الأمثل لترسيب معظم المواد بتقنية PLD. غير أن هذا الإشعاع يمكن مضاعفة تردده إلى 532 نانومتر باستخدام بلورات لاخطية مناسبة، مع انخفاض في طاقة الخرج يقارب 50% مقارنةً بالطول الموجي الأساسي. ويمكن الحصول على إشعاع ليزري في نطاق الأشعة فوق البنفسجية إماً بمزج خرج 532 نانومتر مع الإشعاع الأساسي 1064 نانومتر لإنتاج طول موجي قدره 355 نانومتر، بكفاءة تقارب 20%، أو بمضاعفة تردد خرج 532 نانومتر لإنتاج إشعاع بطول موجي 266 نانومتر، بكفاءة تبلغ نحو 15% نسبةً إلى الإشعاع الأساسي.

وقد أسهم التصميم المدمج والامتین لليزرات Nd:YAG في انتشار استخدامها على نطاق واسع في أنظمة PLD الحديثة. ومؤخرًا، جرى توظيف ليزرات النبضات فائقة القصر، بما في ذلك ليزرات البيكوثانية والفييم وثانية، لاستكشاف آفاق جديدة وإمكانيات متقدمة في أبحاث الترسيب بالليزر النبضي(6).

2.7. آلية نمو الأغشية النانوية

في الوصف النظري لعمليات نمو الأغشية الرقيقة أثناء الترسيب بالليزر النبضي، تُميز عادةً ثلاثة أنماط تقليدية للنمو، هي: النمو ثلاثي الأبعاد على هيئة جزر، والنمو ثنائي الأبعاد طبقةً بعد طبقة، وتكون طبقات أحادية كاملة يتبعها نمو جزر ثلاثية الأبعاد. ويتحدد نمط النمو السائد بصورة أساسية من خلال اعتبارات ترموديناميكية تتعلق بطاقات السطح والواجهة لكل من الغشاء المترسب والركيزة (6).

يشمل النمو ثلاثي الأبعاد على هيئة جزر، المعروف أيضًا بنمط تنوية ونمو فولمر-فيبر (Volmer-Weber)، سلسلةً من العمليات على المقياس الذري تحدث بعد وصول الأنواع المستأصلة إلى سطح الركيزة. ويوضح الشكل (2-2) بصورة تخطيطية الآليات المحتملة للتفاعلات الذرية الداخلة في هذه العملية. ويحكم التوازن بين نمو التجمعات الذرية وانحلالها بالطاقة الحرة الكلية للتجمعات الذرية المفردة. ومن خلال خفض درجة حرارة الركيزة أو زيادة معدل الترسيب، تصبح الطاقة الحرة المرتبطة بتنوية ونمو التجمعات أكثر سلبية، مما يؤدي إلى زيادة معدل التنوية. غير أن درجات الحرارة المنخفضة جدًا قد تعيق تشكّل البنية البلورية المتوازنة، وتزيد من احتمال تكون أطوار شبه مستقرة أو غير متبلورة



شكل (2-3): تخطيطية الآليات المحتملة للتفاعلات الذرية الداخلة

واعتماداً على حجم وشكل النوى، وعلى القيم النسبية لطاقات الواجهة بين التجمّع والركيزة والبخار، قد يصبح من المفضل من حيث الطاقة أن ينمو الغشاء على هيئة طبقات أحادية كاملة بدلاً من جزر ثلاثية الأبعاد. ويُعرف هذا النمط من النمو باسم نمط تنوية ونمو فرانك-فان دير ميرفه (Frank-van der Merwe)، ويكون أكثر احتمالاً في الظروف التي تكون فيها طاقة سطح الغشاء منخفضة وطاقة سطح الركيزة مرتفعة. وعلى الرغم من أن العمليات الذرية الأساسية في هذا النمط تشبه إلى حدٍ كبير تلك الموجودة في نمط فولمر-فيبر، فإن الجزر المتكوّنة في نمط فرانك-فان دير ميرفه تكون محدودة بسُمك طبقة أحادية واحدة. وكما هو الحال في نمط النمو الجزري، يمكن التحكم في معدل التنوية من خلال ضبط درجة حرارة الركيزة ومعدل الترسيب (6).

أما آلية النمو الثالثة فتُعرف باسم نمط تنوية ونمو سترانسكي-كراستانوف (Stranski-Krastanov). وفي هذه الحالة، يبدأ نمو الغشاء بتشكّل طبقات أحادية كاملة، إلا أن الترسيب اللاحق—بعد نحو طبقة واحدة إلى خمس طبقات أحادية—يتم عبر تكون جزر ثلاثية الأبعاد.

وغالبًا ما يُعزى هذا الانتقال إلى تراكم الإجهاد الشبكي، الذي يكون أكبر في الطبقات المترسبة مقارنةً بسطح الركيزة العارية

وفي العرض السابق، جرى افتراض حدوث التنوية بصورة متجانسة في مواقع عشوائية على سطح الركيزة. إلا أن أسطح الركائز في الواقع نادرًا ما تكون مثالية؛ إذ توفّر العيوب والانخلاعات وعدم انتظام السطح مواقع تنوية مفضّلة من حيث الطاقة، مما يؤدي إلى تنوية غير متجانسة. وبناءً على ذلك، تلعب عملية تحضير الركيزة دورًا حاسمًا في تحديد كثافة التنوية والمعدل الكلي لتنوية الغشاء المترسب (7).

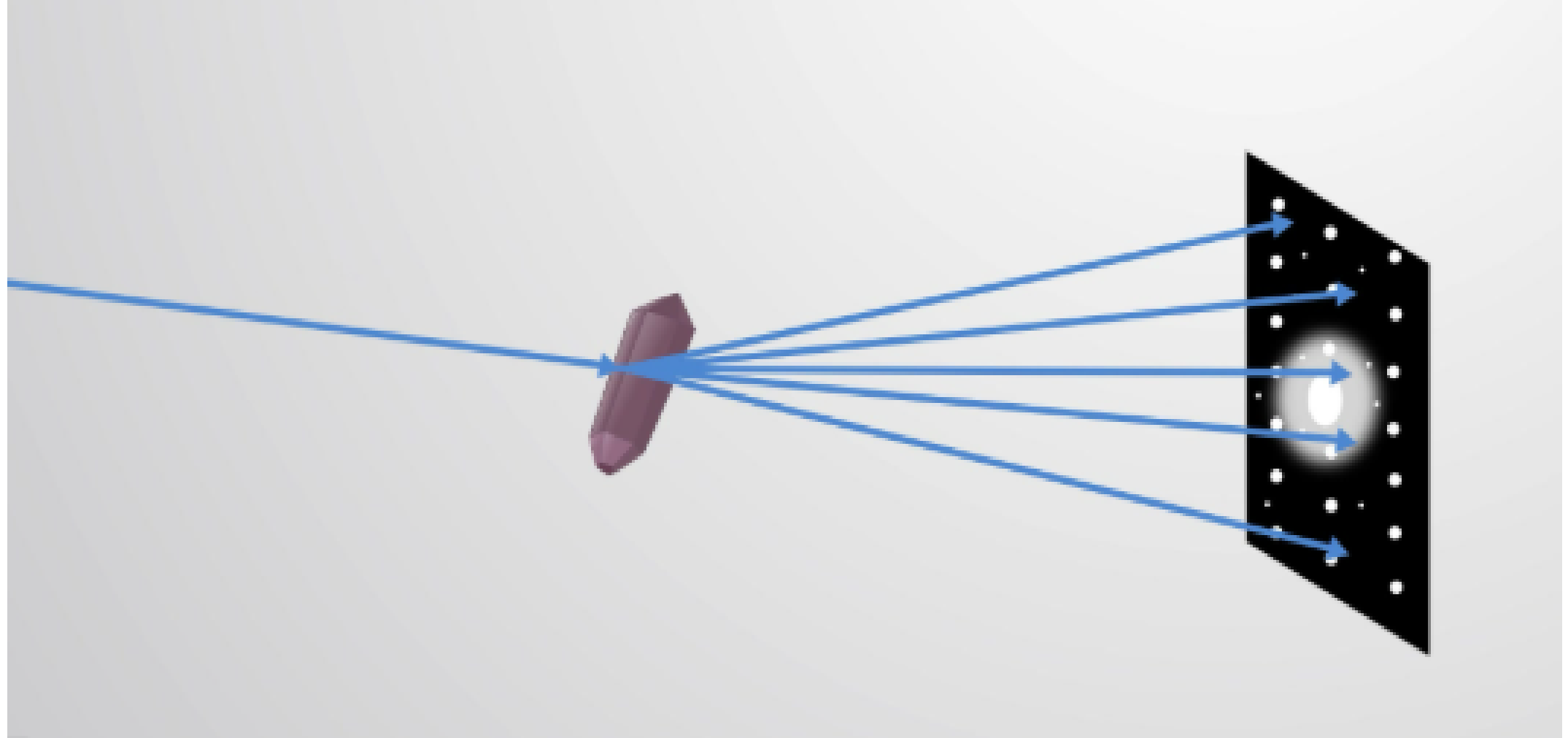
الفصل الثالث
دراسة الخواص
التركيبية
والبصرية للمواد

الفصل الثالث

3.1. دراسة الخواص التركيبية للأغشية الرقيقة

تعد دراسة الخواص التركيبية للأغشية الرقيقة من الجوانب الأساسية في مجال علوم المواد، لما لها من دور محوري في تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه الأغشية. إذ إن التركيب البلوري للمادة، وطبيعة الأطوار المتكونة، وحجم الحبيبات البلورية، ودرجة التبلور، جميعها عوامل تؤثر بشكل مباشر في الأداء الوظيفي للأغشية الرقيقة في التطبيقات الإلكترونية والبصرية والحساسة. وتستخدم تقنيات تحليل متقدمة، مثل حيود الأشعة السينية (XRD) والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والمجهر الإلكتروني النافذ (TEM)، لدراسة هذه الخواص بدقة عالية. ومن خلال هذه التقنيات يمكن تحديد التركيب البلوري للأغشية، مثل المسافات بين المستويات البلورية، ووجود الإجهادات الداخلية، واتجاهية النمو البلوري. كما تساعد دراسة الخواص التركيبية في تقييم جودة عملية الترسيب المستخدمة، وفهم تأثير ظروف التحضير مثل درجة الحرارة، ونوع الركيزة، ومعدل الترسيب على البنية المجهرية للأغشية. وعليه، فإن التحليل التركيبي يمثل خطوة ضرورية لتطوير وتحسين خواص الأغشية الرقيقة بما ينسجم مع متطلبات التطبيقات التكنولوجية الحديثة(2).

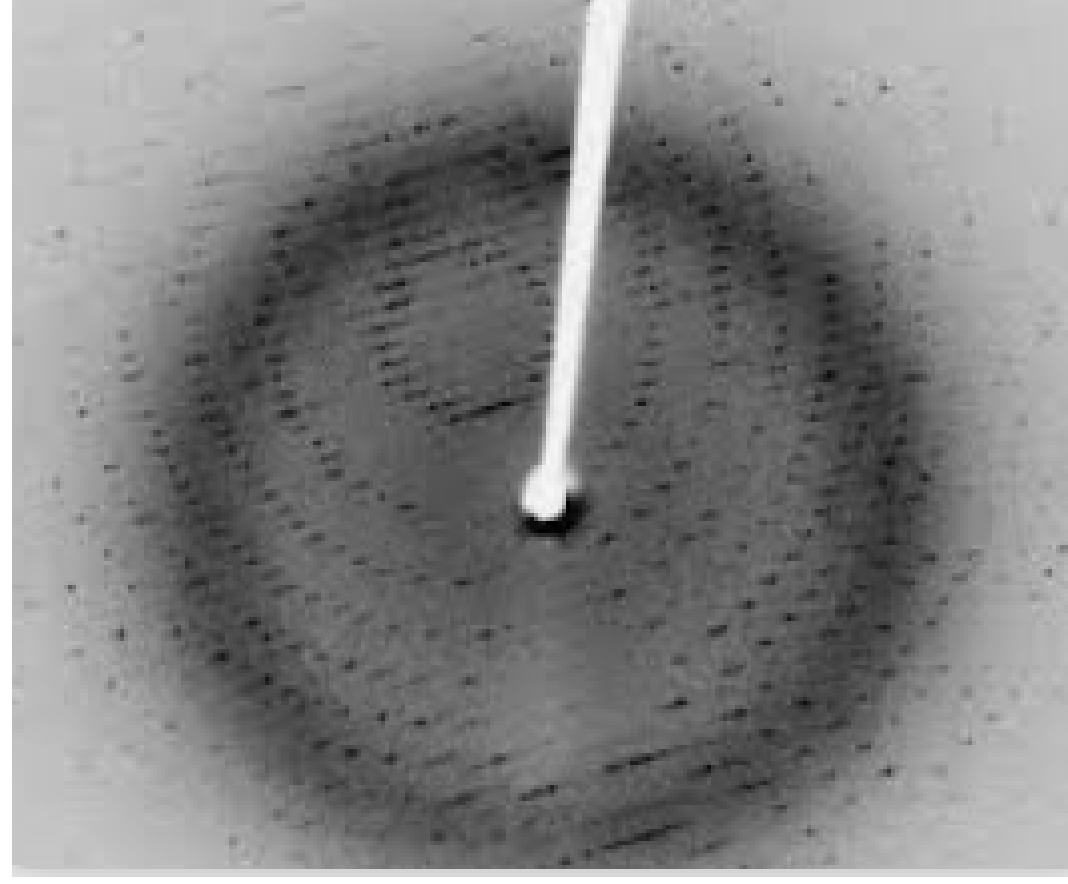
تعد الخواص التركيبية أداة أساسية ومهمة لدراسة البنية البلورية للأغشية الرقيقة وتحليل خصائصها الفيزيائية والكيميائية. إذ إن فهم التركيب البلوري للمادة يساهم في تفسير العديد من سلوكياتها الوظيفية مثل الخواص الكهربائية والبصرية والميكانيكية. وتستخدم تقنية حيود الأشعة السينية (X-ray Diffraction - XRD) بوصفها إحدى أهم التقنيات التحليلية لدراسة هذه الخواص، حيث تمكّن من تحديد نوعية الطور البلوري، وحجم البلورات، ودرجة التبلور، إضافة إلى الكشف عن وجود أي إجهادات داخلية أو تشوهات بنيوية في الأغشية الرقيقة. وبناءً على ذلك، تُعد دراسة الخواص التركيبية خطوة جوهرية لفهم طبيعة المواد المصنعة وتحسين أدائها في التطبيقات المختلفة كما موضح في شكل (3-1)(18).



شكل (1-3): تقنية حيود الأشعة السينية

3.2.1. حيود الأشعة السينية (X-Ray Diffraction)

تعد تقنية حيود الأشعة السينية إحدى أهم التقنيات المستخدمة في دراسة الخواص التركيبية للأغشية الرقيقة، إذ يمكن من خلالها تحديد الاتجاهية المفضلة للنمو البلوري للأغشية المترسبة. ومن خلال تحليل مخططات الحيود (Diffraction Patterns) يمكن حساب متوسط حجم الحبيبات البلورية، وكذلك تحديد ما إذا كانت الأغشية المترسبة تعاني من إجهادات داخلية أم لا (شكل 2-3). وتتأثر هذه المعاملات البنيوية بالعديد من العوامل مثل تقنية الترسيب المستخدمة، وعملية التشويب (Doping)، ونوع الركيزة، بالإضافة إلى ظروف التحضير المختلفة. وتعد تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) من أكثر الطرق شيوعاً وموثوقية لدراسة التركيب البلوري لكل من المواد الكتلية (Bulk Materials) والأغشية الرقيقة (19).



شكل (2-3): حيود الأشعة السينية

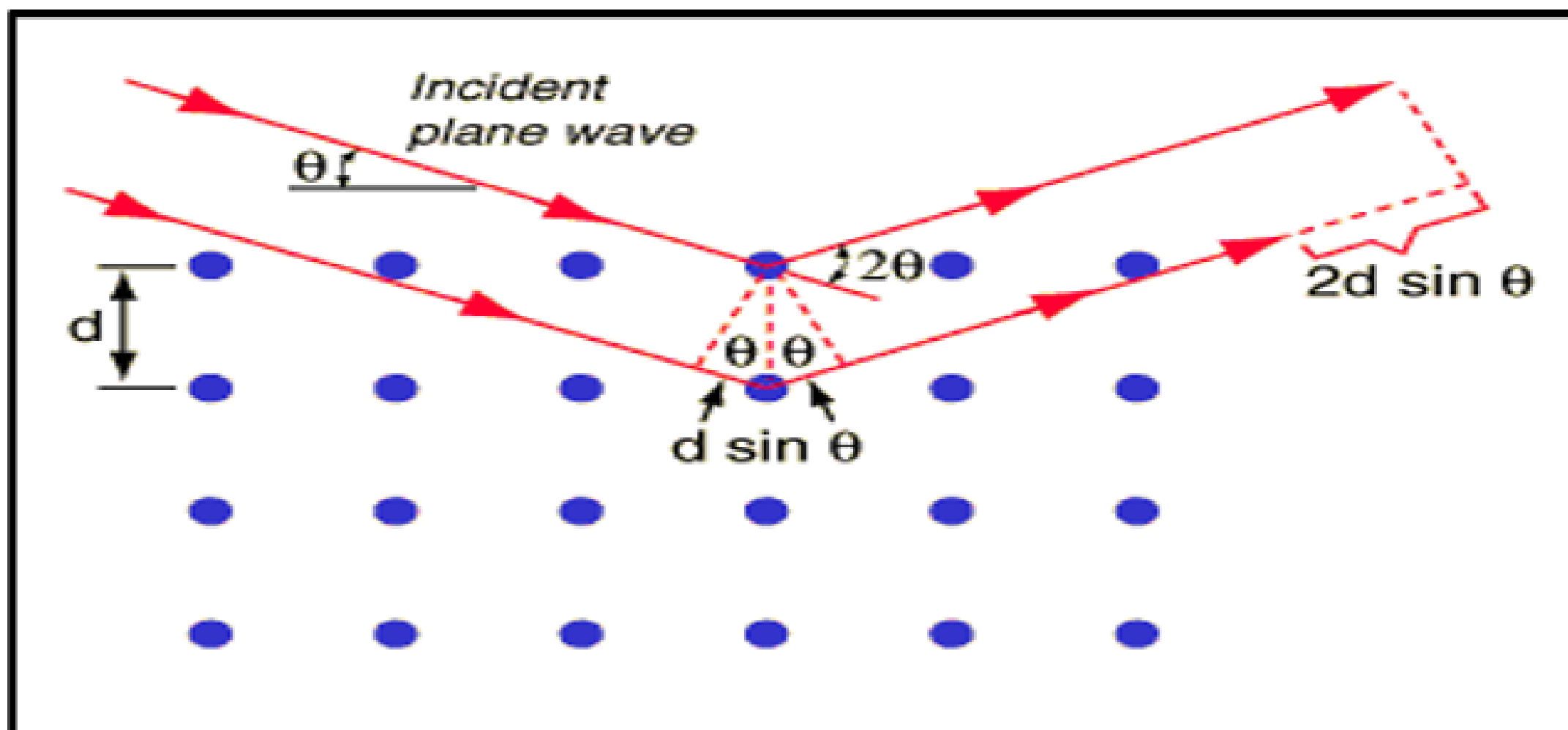
حيث إن تحليل أنماط الحيود الناتجة يتيح الحصول على معلومات حول درجة التبلور، والأطوار البلورية المتكونة، والمسافات البينية بين المستويات البلورية للمادة المدروسة. ويعتمد تفسير هذه النتائج على قانون براغ (Bragg's Law) الذي يُعبّر عنه بالصيغة الآتية شكل (2-3):

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

حيث إن:

- n عدد صحيح موجب يمثل رتبة الحيود
- λ الطول الموجي للأشعة السينية المستخدمة،
- المسافة بين المستويات البلورية المتوازية. d .

ويوضح الشكل (2-3) مبدأ حيود براغ، والذي يبين الشروط اللازمة لحدوث الحيود عندما تتحقق العلاقة الرياضية الخاصة بقانون براغ (10).



شكل (3-3): مبدأ حيود براغ

تستخدم تقنية حيود الأشعة السينية عادةً لحساب مجموعة من المعاملات البنيوية المهمة التي تسهم في فهم وتفسير الخواص التركيبية للأغشية الرقيقة المترسبة. ومن أهم هذه المعاملات ما يلي:

1. العرض الكامل عند نصف القمة

2. العرض التكاملي

3. متوسط حجم الحبيبات البلورية

إن تحليل حيود الأشعة السينية لا يقتصر فقط على تحديد الأطوار البلورية، بل يمتد ليشمل تقييم جودة الأغشية الرقيقة ومدى تجانسها البنيوي. ومن خلال دراسة معاملات مثل حجم الحبيبات والإجهادات الداخلية يمكن تحسين ظروف الترسيب وتطوير خصائص الأغشية بما يتناسب مع متطلبات التطبيقات العملية المختلفة، مثل الخلايا الشمسية، والمجسات، والدوائر الإلكترونية الدقيقة. لذلك تُعد تقنية XRD أداة أساسية لا غنى عنها في توصيف المواد وتطوير تقنيات تحضير الأغشية الرقيقة (11).

3.2.2 . مجهر القوة الذرية (AFM - Atomic Force Microscopy)

يوضح الشكل أعلاه المبدأ الأساسي لعمل مجهر القوة الذرية (AFM)، حيث يعتمد الجهاز على مسح سطح العينة بواسطة مجس دقيق جداً مثبت في نهاية رافعة مرنة (Cantilever). ويتم تسجيل التغيرات الدقيقة في ارتفاع السطح من خلال انحراف شعاع ليزر منعكس من الرافعة إلى كاشف ضوئي حساس، مما يتيح الحصول على صورة طبوغرافية ثلاثية الأبعاد لسطح العينة بدقة تصل إلى المستوى النانوي.

ومع التوجه المتزايد نحو تطوير مواد وأجهزة أصغر حجماً وأكثر كفاءة، أصبح من الضروري استخدام تقنيات توصيف متقدمة قادرة على توفير قياسات عالية الدقة والموثوقية. ويُعد مجهر القوة الذرية من أكثر الأدوات شيوعاً في توصيف الأسطح، نظراً لقدرته على تحليل الخصائص السطحية للمواد دون الحاجة إلى تجهيزات معقدة أو ظروف تشغيل خاصة مثل الفراغ العالي (12).

تُستخدم تقنية AFM على نطاق واسع في العديد من المجالات العلمية والصناعية، بما في ذلك الصناعات الإلكترونية، والكيميائية، والبيولوجية، وصناعة المواد المتقدمة. كما تُعد أداة فعالة لدراسة طبوغرافية الأغشية الرقيقة والسميكة، وأشباه الموصلات، والسيراميك، والمعادن، إضافة إلى توصيف المواد البوليمرية والمواد الحيوية. ومن خلال هذه التقنية يمكن قياس العديد من المعاملات المهمة مثل خشونة السطح (Surface Roughness)، وتوزيع الحبيبات، وارتفاعاتها، إضافة إلى دراسة الخواص الميكانيكية المجهرية للمواد.

وتكمن الأهمية الكبرى لتقنية AFM في قدرتها على تحليل تأثير ظروف التحضير المختلفة - مثل تقنية الترسيب، ودرجة الحرارة، ونوع الركيزة، وزمن الترسيب - على الخصائص السطحية للأغشية الرقيقة. كما تسمح هذه التقنية بتحديد معاملات خشونة السطحية مثل الجذر التربيعي المتوسط (RMS Roughness) والمتوسط الحسابي للخشونة (Ra)، وهي معاملات ذات تأثير مباشر في الخواص البصرية والكهربائية للأغشية.

ولذلك تُعد تقنية AFM أداة مكتملة وضرورية لنتائج حيود الأشعة السينية (XRD) وغيرها من تقنيات التوصيف البنيوي، بهدف الحصول على توصيف شامل ودقيق لخصائص المواد المترسبة(13).

3.3 الخواص البصرية لأشباه الموصلات

يُعد فهم الخواص البصرية لأشباه الموصلات من الأمور الأساسية والضرورية في العديد من التطبيقات العملية، ولا سيما في مجال الأجهزة البصرية والإلكترونية الضوئية (Optoelectronic Devices). إذ إن دراسة التفاعل بين الإشعاع الكهرومغناطيسي والمواد شبه الموصلة تمثل أساساً لتطوير العديد من التقنيات الحديثة مثل الخلايا الشمسية، والكواشف الضوئية، والصمامات الثنائية الباعثة للضوء(14)(شكل 4-3).



شكل (4-3): الأجهزة البصرية والإلكترونية الضوئية

3.3.1 الامتصاص البصري وحافة الامتصاص

يُعد الامتصاص الأساسي (Fundamental Absorption) من أهم آليات الامتصاص في أشباه الموصلات، حيث ينطوي على انتقال الإلكترونات من حزمة التكافؤ (Valence Band - V.B) إلى حزمة التوصيل (Conduction Band - C.B). ويظهر هذا الامتصاص على شكل زيادة حادة في قيمة معامل الامتصاص عند طاقات معينة، ويمكن الاستفادة منه في تحديد فجوة الطاقة (Energy Gap) للمادة شبه الموصلة.

عندما تمتص المادة شبه الموصلة فوتوناً من الحزمة الضوئية الساقطة، فإن عملية الامتصاص تعتمد بشكل أساسي على طاقة الفوتون الساقط ($h\nu$)، حيث إن:

- h : هو ثابت بلانك،
- ν : هو تردد الفوتون الساقط.

ويرتبط الامتصاص بالانتقالات الإلكترونية بين حزمتي التكافؤ والتوصيل داخل المادة، وتبدأ هذه العملية عند ما يُعرف بحافة الامتصاص (Absorption Edge)، والتي تمثل أقل فرق طاقة ممكن (E_g) بين أعلى مستوى في حزمة التكافؤ وأدنى مستوى في حزمة التوصيل (15)

وعندما تكون طاقة الفوتون الساقط ($h\nu$) مساوية أو أكبر من فجوة الطاقة (E_g)، يصبح بإمكان الفوتون أن يتفاعل مع إلكترون في حزمة التكافؤ، فيرفعه إلى حزمة التوصيل، مما يؤدي إلى تكوين زوج من الإلكترون والفجوة (Electron-Hole Pair). ويُعرف الطول الموجي الأعظم للفوتون الساقط القادر على إحداث هذا الانتقال بالمعادلة الآتية:

$$\lambda_c (\mu\text{m}) = hc / E_g = 1.24 / E_g (\text{eV}) \quad \text{(3-2) } \dots\dots\dots$$

كما تتناقص شدة الفيض الضوئي بشكل أسي مع المسافة داخل المادة شبه الموصلة وفق العلاقة:

$$I = I_0 \exp(-\alpha t) \dots \dots \dots (3-3)$$

حيث إن:

- I_0 شدة الفوتونات الساقطة،
- I شدة الفوتونات النافذة،
- α معامل الامتصاص،
- t سمك المادة.

ويُعرّف معامل الامتصاص بأنه عدد الفوتونات الممتصة نسبياً لكل وحدة طول داخل المادة شبه الموصلة.

1- آليات الامتصاص البصري

إن امتصاص الإشعاع الذي يؤدي إلى انتقالات إلكترونية بين حزمتي التكافؤ والتوصيل يحدث من خلال آليتين أساسيتين هما:

1. الانتقالات المباشرة (Direct Transitions)

2. الانتقالات غير المباشرة (Indirect Transitions)

A- الانتقالات المباشرة (Direct Transitions)

تحدث الانتقالات المباشرة عادةً بين حالتين لهما نفس متجه الموجة،

وفي هذا النوع من الانتقالات يكون التغير في متجه الموجة مساوياً للصفر ($\Delta K = 0$), حيث ينتقل الإلكترون مباشرة من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل دون الحاجة إلى تفاعل مع الفونونات. ويُعبّر عن هذا النوع من الانتقالات بالعلاقة التجريبية الآتية:

$$\alpha h\nu \approx [h\nu - E_g^{\text{opt}}]^{(1/2)} \dots\dots\dots(3-4)$$

وتُعرف هذه الحالة بالانتقالات المباشرة المسموحة (Allowed Direct Transitions).

أما إذا حدث الانتقال بين حالتين لهما نفس متجه الموجة ولكن بقيمة غير صفرية، فإن هذا النوع يُعرف بالانتقالات المباشرة الممنوعة (Direct Forbidden Transitions)، ويُعبّر عنها بالعلاقة التجريبية التالية:

$$\alpha h\nu \approx [h\nu - E_g^{\text{opt}}]^{(3/2)} \dots\dots\dots(3-5)$$

تُعد دراسة الامتصاص البصري وحافة الامتصاص من الأدوات المهمة في تحديد فجوة الطاقة الضوئية للمواد شبه الموصلة، حيث يمكن من خلال تحليل منحنيات الامتصاص البصري واستخدام علاقات توك (Tauc Relations) تحديد نوع فجوة الطاقة فيما إذا كانت مباشرة أم غير مباشرة. وتكتسب هذه الدراسة أهمية خاصة في المواد النانوية والأغشية الرقيقة مثل ثاني أكسيد التيتانيوم، إذ إن حجم الحبيبات البلورية ودرجة التبلور والعيوب البنيوية يمكن أن تؤثر بشكل كبير على موضع حافة الامتصاص وقيمة فجوة الطاقة، مما ينعكس مباشرة على كفاءة المادة في التطبيقات البصرية والإلكترونية الضوئية (18).

B- الانتقالات غير المباشرة (Indirect Transitions)

في حالة الانتقالات غير المباشرة يوجد فرق كبير في كمية الحركة بين النقطتين اللتين يحدث بينهما الانتقال في حزمتي التكافؤ والتوصيل. ويعني ذلك أن أدنى مستوى في حزمة التوصيل لا يقع عند نفس قيمة متجه الموجة (K) الخاصة بأعلى مستوى في حزمة التكافؤ.

وبسبب هذا الاختلاف في كمية الحركة، لا يمكن أن يحدث الانتقال الإلكتروني بشكل مباشر، بل يتطلب الأمر مشاركة فونون (Phonon) من أجل تحقيق قانون حفظ كمية الحركة (17)

وبناءً على ذلك يمكن التعبير عن شرط الانتقال غير المباشر بالعلاقة الآتية:

$$h\nu = E_g \pm E_p \dots\dots\dots(3-6)$$

حيث إن:

• E_p تمثل طاقة الفونون الممتص أو المنبعث خلال عملية الانتقال.

C-الانتقالات غير المباشرة المسموحة

في هذا النوع من الانتقالات، يحدث الانتقال الإلكتروني من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل، كما هو موضح في الشكل (2-4C). ويُعبّر عن العلاقة التجريبية الخاصة بهذا النوع من الانتقالات بالصيغة الآتية:

$$\alpha h\nu \approx (h\nu - E_g^{opt})^2 \dots\dots\dots(7-3)$$

ويُستخدم هذا التعبير عادةً في تحليل أطياف الامتصاص البصري لتحديد فجوة الطاقة غير المباشرة للمواد شبه الموصلة.

D-الانتقالات غير المباشرة الممنوعة

أما في حالة الانتقالات غير المباشرة الممنوعة، فإن الانتقال الإلكتروني يحدث من أي نقطة في حزمة التكافؤ إلى نقطة أخرى غير قاع حزمة التوصيل، كما هو موضح في الشكل (2-4d). ويُعبّر عن هذا النوع من الانتقالات بالعلاقة الآتية:

$$\alpha h\nu \approx (h\nu - E_g^{opt})^3 \dots\dots\dots(8-3)$$

ويتميز هذا النوع من الانتقالات بأن احتمالية حدوثه أقل مقارنة بالانتقالات المسموحة، كما أن مساهمته في الامتصاص البصري تكون أضعف نسبياً.

تُعد دراسة الانتقالات غير المباشرة ذات أهمية كبيرة في توصيف المواد شبه الموصلة، خصوصاً في المواد التي تمتلك فجوة طاقة غير مباشرة مثل السليكون والجرمانيوم. ومن خلال تحليل أطياف الامتصاص البصري وتطبيق العلاقات الرياضية الخاصة بالانتقالات غير المباشرة، يمكن تحديد قيمة فجوة الطاقة بدقة عالية، وكذلك التمييز بين نوعي الفجوة (مباشرة أو غير مباشرة). كما أن تأثير الفونونات في هذه العملية يجعل درجة الحرارة عاملاً مؤثراً في خصائص الامتصاص البصري، وهو ما ينبغي أخذه في الاعتبار عند دراسة الخواص البصرية للأغشية الرقيقة مثل ثاني أكسيد التيتانيوم.

3.3.2 الثوابت البصرية (Optical Constants)

تُعد الثوابت البصرية من أهم المعاملات الفيزيائية للمادة، نظراً لأنها تصف السلوك البصري لها وتحدد طبيعة تفاعلها مع الإشعاع الكهرومغناطيسي. ويُعتبر معامل الامتصاص البصري للمادة دالة قوية تعتمد بشكل أساسي على طاقة الفوتون الساقط وفجوة الطاقة (Band Gap Energy)، حيث يمثل معامل الامتصاص مقدار التوهين الذي تتعرض له طاقة الفوتونات الساقطة داخل المادة لكل وحدة سمك، ويُعزى هذا التوهين بشكل رئيسي إلى عمليات الامتصاص المختلفة التي تحدث داخل المادة (18).

وتشمل الثوابت البصرية * الأساسية كلاً من:

- معامل الانكسار n
- معامل الخمود أو الإخماد k
- الجزء الحقيقي ϵ_r (والجزء التخيلي ϵ_i) من ثابت العزل الكهربائي البصري.

- معامل الانكسار المركب

يُعرف معامل الانكسار المركب (Complex Refractive Index) بالعلاقة الآتية:

$$n_c = n - ik \dots\dots\dots(9-3)$$

ويرتبط معامل الانكسار المركب بسرعة انتشار الضوء داخل المادة (v) وسرعة الضوء في الفراغ (c) من خلال العلاقة:

$$v = c / n_c \dots\dots\dots(10-3)$$

- معامل الخمود (k - Extinction Coefficient)

يمثل معامل الخمود مقدار التوهين الذي تتعرض له الموجة الكهرومغناطيسية أثناء انتشارها داخل المادة، ويُعد الجزء التخيلي من معامل الانكسار. ويرتبط معامل الخمود بمعامل الامتصاص وفق العلاقة الآتية:

$$k_o = (\alpha \lambda) / (4\pi) \dots\dots\dots(11-3)$$

حيث إن:

- k : معامل الخمود،
- λ : الطول الموجي للإشعاع الساقط،
- a : معامل الامتصاص.

ويُعطى معامل الامتصاص بالعلاقة:

$$\alpha = 2.303 A / t \dots\dots\dots(12-3)$$

حيث إن:

- A: الامتصاصية، والتي تُعرّف بأنها النسبة بين شدة الضوء الممتص داخل المادة (A) وشدة الضوء الساقط عليها (I₀)
- t: سمك العينة.

- ثابت العزل الكهربائي البصري

يمكن حساب الجزأين الحقيقي والتخيلي من ثابت العزل الكهربائي البصري باستخدام المعادلات الآتية:

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 \dots\dots\dots(13-3)$$

$$\epsilon_i = 2 n k \dots\dots\dots(14-3)$$

حيث يمثل:

- ϵ_r : الجزء الحقيقي من ثابت العزل، والذي يرتبط بقدرة المادة على تخزين الطاقة الكهربائية.
- ϵ_i : الجزء التخيلي من ثابت العزل، والذي يعبر عن مقدار الفقد في الطاقة داخل المادة.

تُعد دراسة الثوابت البصرية ذات أهمية كبيرة في توصيف المواد شبه الموصلة والأغشية الرقيقة، إذ تُستخدم هذه المعاملات في تحليل السلوك البصري للمادة وتحديد مدى ملاءمتها للتطبيقات الإلكترونية والبصرية المختلفة. كما تساعد معرفة معامل الانكسار ومعامل الخمود وثابت العزل في تصميم الأجهزة البصرية مثل المرشحات الضوئية، والخلايا الشمسية، والكواشف الضوئية، حيث تؤثر هذه المعاملات بشكل مباشر في كفاءة امتصاص الضوء ونقله داخل المادة

.علاوة على ذلك، فإن تحديد الثوابت البصرية يتيح فهم تأثير العوامل المختلفة مثل سمك الغشاء، ونوع الركيزة، وظروف الترسيب، ودرجة التشويب على الخواص البصرية للمادة. ومن خلال تحليل أطراف النفاذية والانعكاسية والامتصاص، يمكن استخلاص هذه الثوابت بدقة عالية، مما يوفر توصيفاً شاملاً للسلوك البصري للأغشية الرقيقة ويُسهم في تحسين أدائها الوظيفي في التطبيقات التكنولوجية المتقدمة(19).

الفصل الرابع

المناقشة

والأستنتاجات

الفصل الرابع

1-4- المناقشة والأستنتاجات

تشير النتائج إلى أن ظروف التحضير باستخدام تقنية Pulsed Laser Deposition لها تأثير واضح في الخصائص التركيبية والسطحية والبصرية للأغشية الرقيقة. فقد أوضح تحليل X-Ray Diffraction تحسن درجة التبلور وتغير حجم البلورات تبعاً لمعاملات الترسيب، بينما أظهر Atomic Force Microscopy اختلافاً في مورفولوجيا السطح وخشونته. كما بينت النتائج أن انتظام البنية البلورية وتقليل العيوب البنيوية يسهمان في تحسين الخصائص البصرية مثل معامل الامتصاص وفجوة الطاقة. ويؤكد ذلك وجود علاقة وثيقة بين ظروف التحضير والبنية المجهرية للغشاء وخصائصه الفيزيائية. وبناءً على ذلك يمكن تحسين أداء الأغشية الرقيقة عبر التحكم الدقيق في معاملات التحضير.

2-4- الأستنتاجات

1- أثبتت النتائج أن تقنية Pulsed Laser Deposition تعد من التقنيات المتقدمة والفعالة في تحضير الأغشية الرقيقة، لما تتميز به من قدرة عالية على التحكم الدقيق في معاملات الترسيب وبالتالي التحكم في الخصائص البنيوية والسطحية للأغشية.

2- أظهرت النتائج أن معاملات الترسيب مثل طاقة الليزر، وعدد النبضات، وزمن الترسيب، إضافة إلى ضغط الحجرة ونوع الغاز المستخدم، تلعب دوراً أساسياً في تحديد البنية البلورية وخصائص الأغشية المتكونة.

3- بينت تحاليل X-Ray Diffraction أن الأغشية المحضرة تمتلك بنية بلورية واضحة، مع إمكانية تحديد الأطوار البلورية واتجاهات النمو البلوري بدقة، مما يعكس جودة التحضير باستخدام تقنية PLD.

4- أظهر تحليل عرض القمم البلورية (FWHM) وجود علاقة عكسية بين عرض القمة وحجم البلورات، حيث يؤدي انخفاض قيمة FWHM إلى زيادة حجم البلورات وتحسن درجة التبلور داخل الغشاء.

5- أوضحت نتائج Atomic Force Microscopy أن مورفولوجيا سطح الأغشية تتأثر بوضوح بظروف الترسيب، حيث تم تحديد توزيع الحبيبات وأحجامها إضافة إلى قياس خشونة السطحية بدقة عالية.

6- تبين أن تقليل خشونة السطحية وتحسين انتظام توزيع الحبيبات يسهمان في تحسين الخصائص الفيزيائية والبصرية للأغشية الرقيقة.

7- أظهرت الدراسات البصرية أن معامل الامتصاص وطبيعة الامتصاص الضوئي للأغشية يعتمدان بصورة مباشرة على البنية البلورية وسمك الغشاء وانتظامه البنيوي.

8- بينت النتائج أن فجوة الطاقة البصرية (Eg) تتأثر بدرجة التبلور وحجم البلورات، حيث يؤدي تحسين البنية البلورية وتقليل العيوب إلى تغير واضح في قيمة فجوة الطاقة.

9- يؤدي تقليل العيوب البنيوية ومراكز إعادة اتحاد حوامل الشحنة إلى تحسين كفاءة النقل الإلكتروني داخل الأغشية، مما ينعكس إيجاباً على الأداء الوظيفي للمادة.

10- أظهر التكامل بين تقنيات التحليل التركيبي والسطحي والبصري فهماً شاملاً للعلاقة بين ظروف التحضير والخصائص الفيزيائية للأغشية الرقيقة.

11- تشير النتائج إلى إمكانية توظيف الأغشية المحضرة في العديد من التطبيقات التكنولوجية المتقدمة مثل الخلايا الشمسية، والطبقات الشفافة الموصلة، والأجهزة البصرية والإلكترونية.

12- يؤكد هذا العمل أن التحكم الدقيق في معاملات الترسيب باستخدام تقنية PLD مع استخدام تقنيات التشخيص المختلفة يمثل أساساً مهماً لتطوير مواد رقيقة ذات خصائص محسنة تلبى متطلبات التطبيقات الحديثة في مجالات الطاقة والإلكترونيات والبصريات.

المصادر العربية والأجنبية

- (1) سمير، محمود. دراسة الخواص التركيبية والبصرية لجسيمات النحاس النانوية المحضرة بطريقة الاستئصال بالليزر النبضي في السائل ودراسة تأثيرها على كفاءة الخلايا الشمسية. قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الموصل، نينوى، العراق.
- (2) غانم عبد سمير. دراسة الخواص التركيبية والبصرية لجسيمات النحاس النانوية المحضرة بطريقة الاستئصال بالليزر النبضي في السائل ودراسة تأثيرها على كفاءة الخلايا الشمسية. قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الموصل، نينوى، العراق.
- (3) M. Causa, R. Dovesi, C. Pisani, C. Roetti, Surface Science, Vol. 175, No. 551, (1986).
- (4) M. Kohler and W. Fritzsche, "Nanotechnology an Introduction to Nano structuring Techniques", 2nd ed., Completely Revised, (2007).
- (5) P. Gubin, "Magnetic Nanoparticles", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 3rd ed., ISBN: 978-3-527-40790-3, (2009).
- (6) A. T. Bell, "The Impact of Nanoscience on Heterogeneous Catalysis", Sci., Vol. 299, No. 5613, pp.1688-1691, (2003).
- (7) K. A. Shenoy, "Effects of Multi-Wall Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Polymeric Nanocomposites", M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering and the faculty of the Graduate School of Wichita State University, (2008).
- (8) S. O. Pillal, "Solid state physics", Revised and Enlarged Edition New age international (P) Limited, Publishers, (1997).
- (9) B. O'Regan and M. Grätzel, "A low-cost, high efficiency solar cell based on dye- sensitized colloidal TiO₂ films Nature", Vol. 353, pp.737 740, (1991).
- (10) J. Furer, "Growth of Single-Wall Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition for Electrical Devices", Ph.D Thesis, Basel University, (2006).

- M. Causa, R. Dovesi, C. Pisani, C. Roetti, Surface Science, Vol. 175, (11)
No. 551, (1986).
- M. Kohler and W. Fritzsche, "Nanotechnology an Introduction to (12)
Nano structuring Techniques", 2nd ed., Completely Revised, (2007).
- P. Gubin, "Magnetic Nanoparticles", WILEY-VCH Verlag GmbH & (13)
Co. KGaA, Weinheim, 3rd ed., ISBN: 978-3-527-40790-3, (2009).
- A. T. Bell, "The Impact of Nanoscience on Heterogeneous (14)
Catalysis", Sci., Vol. 299, No. 5613, pp.1688-1691, (2003).
- K. A. Shenoy, "Effects of Multi-Wall Carbon Nanotubes on the (15)
Mechanical Properties of Polymeric Nanocomposites", M.Sc. Thesis,
Department of Mechanical Engineering and the faculty of the Graduate
School of Wichita State University, (2008).
- S. O. Pillal, "Solid state physics", Revised and Enlarged Edition New (16)
age international (P) Limited, Publishers, (1997).
- D. A. Bonnell, B. Huey and D. Carroll, " In-situ measurement of (17)
electric fields at individual grain boundaries in TiO₂", Solid State Ionics,
Vol.75, p. 35, (1995).
- G. Bums, "Soild State Physics", Academic Press .Inc. Harcourt (18)
Brace, Jovanovach, New York, (1985). [78] Saud Bin Humaid Alalehyana,
"solid state physics", Umm Al Qura University, (2009).
- H. Meixner, J. Gerblinger, U. Lampe and M. Fleischer, "Thin film gas (19)
sensors based on semiconducting metal oxides", Sensors and Actuators
B, 23, p.100, (1995).