



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل
كلية التربية للعلوم الصرفة
قسم الفيزياء



دراسة الخصائص التركيبية والبصرية لأغشية أوكسيد النحاس بطريقة التبخير الحراري

بحث مقدم إلى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة - جامعة بابل
كجزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في قسم الفيزياء

من قبل الطالب

محمد علي حسن عبد

بإشراف

م.م سيف حسن حميد

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا أَرْسَلْنَاكَ إِلَّا بِاللَّهِ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَلِيِّ الْعَظِيمِ

الإهداء...

إلى قُطبِ دائرةِ الوجود، وسرِّ اللهِ المودعِ في الوجدان... إلى صاحبِ العصرِ والزمان (عجل الله فرجه الشريف).

إلى مَنْ فاضَ جُودهَ على الأنام، وغداً باباً لِنيلِ المَرام، الساقِي الذي لم يَبخلْ بَعطائه حتى صارَ للظامئِنَ غَمام ... سيدي أبي الفضلِ العباس (عليه السلام).

إلى مَنْ استقرَّ في أعماقِ الروحِ خُلُوده، وإن توارى عن مَطالعِ العينِ وجوؤه ... إلى روحِ والدي السيد علي حسن الحسني (رحمه الله).

إلى القلبِ الذي يغمرنِي برأفته، والفكرِ الذي يمدني بعزمِهِ وإرادته، إلى اليدِ التي لم تترك كَفِّي منذُ نعومةِ أظفاري، إلى سرِّ توفيقِي، ورفيقةِ طريقِي ... أستاذةِ اللغةِ العربيةِ (والدتي).

إلى مَنْ بهِ اشتدَّ عَضدي، وفي خُطاهُ وجدتُ مَقصدي، إلى مَنْ اتَّبعتُ منذُ الصِّبَا أثرَهُ، فشقَّ لي الطريقَ ببراعته، وأزاحَ عني ثِقْلَ مشقَّتِهِ.. إلى أخي مدرسِ الرياضياتِ (الأستاذِ حسنِ علي الحسني).

إلى مَنْ غَمَرَنِي عَطْفُها، وأضفتَ على حياتي لُطفَها، إلى رفيقةِ الخطواتِ الأخيرة، أستاذةِ الرياضياتِ (أختي).

إلى كلِّ من مَنحني ودَّه.

أهدي ما خطَّه قلمي.

شكر وتقدير...

الحمدُ لله على حُسنِ توفيقه ودوامِ رعايته، وله الشكرُ أولاً وآخرأً على ما أنعم به من فضل.

شكراً إلى سيد الخلق رسول الله وآله الطيبين الطاهرين، لا سيّما أهل بيته الأئمة المعصومين (عليهم السلام)، الذين كانوا مشاعلَ للهداية ومناراتٍ للعلم والحق، فبنهجهم يُهتدى، وبسيرتهم يُستنار.

وأنتدّم بخالص الامتنان إلى عائلتي الكريمة، التي كانت بعد فضل الله الأساس في تكويني، فصاغت من طفولةٍ بسيطةٍ طموحاً، ومن سعيٍ متواضعٍ إنجازاً، حتى بلغتُ ما أنا عليه. كما عبّر عن شكري وتقديري لجميع زملائي وأساتذتي الذين رافقوني في مختلف مراحل دراستي، وتركوا بصماتهم في مسيرتي العلمية:

مدرسة مدينة العلم الابتدائية

متوسطة العرفان للبنين

إعدادية الهاشمية للبنين

ثانوية مستقبل الأجيال

كلية التربية للعلوم الصرفة – جامعة بابل

ولا يسعني في ختام هذه الرحلة إلا أن أنتدّم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى من كان مسك ختامها، والذي أفاض عليّ بعلمه وتوجيهه، فكان نعم المرشد والمعين؛ مشرف هذه الدراسة (م.م سيف حسن حميد)، سائلاً الله أن يديم عليه التوفيق والسداد.

المحتويات

رقم الصفحة	المحتوى	التسلسل
i	الآية القرآنية الكريمة	-
ii	الإهداء	-
iii	الشكر والتقدير	-
(الفصل الأول - مركب أكسيد النحاس)		
1	المقدمة	1-1
3	الدراسات السابقة	1-2
6	الهدف من البحث	1-3
(الفصل الثاني - الخصائص التركيبية والبصرية للأغشية الرقيقة)		
7	الخصائص التركيبية للأغشية الرقيقة	2-1
7	التركيب البلوري	2-1-1
8	1- المسافة البينية للمستويات البلورية وقانون براك	2-1-2
9	2- ثابت الشبكة	
10	3- معدل الحجم البلوري	
11	4- عامل التشكيل	
12	5- كثافة الانخلاعات وعدد الحبيبات	
13	الخصائص البصرية للأغشية الرقيقة	2-2
13	الامتصاصية والنفاذية والانعكاسية	2-2-1
15	1- معامل الامتصاص	2-2-2
15	2- معامل الخمود	
16	3- معامل الانكسار	
17	4- ثابت العزل	
17	5- فجوة الطاقة	

(الفصل الثالث - طرائق تحضير الأغشية الرقيقة)

18	الطرائق الفيزيائية لترسيب البخار	3-1
18	الخطوات الأساسية للطرائق الفيزيائية لترسيب البخار	3-1-1
19	أولاً: طريقة التبخير الحراري (التبخير بالمقاومة)	3-1-2
21	ثانياً: طريقة التبخير بالشعاع الإلكتروني	
22	أولاً: التريز التيار المستمر	3-1-3
23	ثانياً: التريز المغنطروني	
24	ثالثاً: التريز بالتردد الراديوي	
25	أولاً: الترسيب الكيميائي الحراري	3-2
26	ثانياً: الترسيب الكيميائي المعزز بالبلازما	

قائمة الأشكال

رقم الصفحة	الشكل	التسلسل
1	(a) التركيب البلوري لأوكسيد النحاس الأحادي	1-1
	(b) مسحوق أوكسيد النحاس الأحادي	
2	(a) التركيب البلوري لأوكسيد النحاس الثنائي	1-2
	(b) مسحوق أوكسيد النحاس الثنائي	
2	(a) أحجار الكوبريت الكريمة	1-3
	(b) حجر التينوريت	
7	الطيف الكهرومغناطيسي وموقع الأشعة السينية فيه	2-1
8	نموذج حيود الأشعة السينية	2-2
9	نموذج براك لحيود الأشعة السينية	2-3
10	(a) شبكة بلورية مكعبة	2-4
	(b) شبكة بلورية أحادية الميل	
19	مخطط تقنية الترسيب بالتبخير الحراري	3-1
21	مخطط تقنية الترسيب بالشعاع الإلكتروني	3-2
23	مخطط تقنية الترسيب بالترديد بالتيار المستمر	3-3
23	مخطط تقنية الترسيب بالترديد المغنطروني	3-4
24	مخطط تقنية الترسيب بالترديد بالترددات الراديوية	3-5
26	مخطط تقنية الترسيب الكيميائي الحراري	3-6

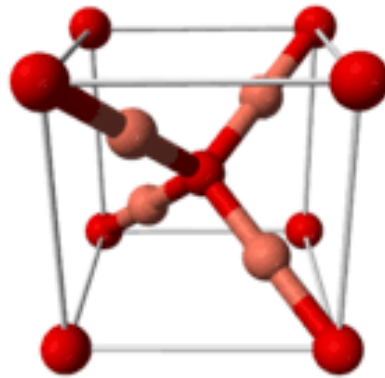
الفصل الأول

مركب أوكسيد النحاس

copper oxide compound

أوكسيد النحاس مركب غير عضوي يتكون من اتحاد عنصر النحاس مع عنصر الأوكسجين، وهو عبارة عن مادة شبه موصلة من النوع (P)، ويمتلك فجوة طاقة مباشرة، حيث يسمح أوكسيد النحاس بامتصاص طيفي شمسي جيد بسبب فجوة الطاقة المباشرة، ومن مميزات أشباه موصلات أوكسيد النحاس هي الامتصاص البصري العالي وعدم السمية وانخفاض تكلفة التصنيع [1]، ويوجد بشكل أساسي في صورتين هما :

1. أوكسيد النحاس الأحادي (أوكسيد النحاسون): وهو مركب كيميائي صيغته الكيميائية (Cu_2O) ، يمتاز بترتيب بلوري مكعب كما في الشكل (a-1.1)، ويعتبر من أوائل أشباه الموصلات التي تمت دراستها، و يكون كمسحوق أحمر أو بني محمر ناعم كما في الشكل (b-1.1)، ويستخدم على نطاق واسع في الصناعات ، وبسبب فجوة الطاقة التي تبلغ حوالي 2.1 إلى 2.6 إلكترون فولت فإنه يمتلك قدرة ممتازة على امتصاص الضوء المرئي، مما يجعل استخدامه مقبول في صناعة الخلايا الشمسية [2][3].



(a) التركيب البلوري لأوكسيد النحاس الأحادي (b) مسحوق أوكسيد النحاس الأحادي
الشكل (1-1)

كما يعد أوكسيد النحاس الأحادي بفضل خصائصه المقاومة للتآكل مثاليًا لطلاء قاع السفن البحرية، ويُستخدم لحماية سطح السفينة من التلف الناتج عن مياه البحر [4].

2. أوكسيد النحاس الثنائي (أوكسيد النحاسيك): مركب كيميائي صيغته الكيميائية CuO ، يمتاز بترتيب بلوري أحادي الميل كما في الشكل (a-2.1)، و يكون على هيئة مسحوق أسود ناعم كما في الشكل (b-2.1)، وبسبب فجوة النطاق التي تبلغ حوالي 1.2 إلى 1.7 إلكترون فولت، فإنه يمتلك قدرة ممتازة على امتصاص طيف واسع من أشعة الشمس، مما يجعله مادة واعدة جداً في تطوير الخلايا الكهروضوئية، ويستخدم على نطاق واسع في صناعة البطاريات [5].



(a) التركيب البلوري لأوكسيد النحاس الثنائي (b) مسحوق أوكسيد النحاس الثنائي
الشكل (1-2)

ويوجد أوكسيد النحاس في الطبيعة بنوعيه -الأحادي والثنائي- كمعادن جاهزة، مثل حجر الكوبريت (وهو الشكل المعدني لأوكسيد النحاس الأحادي ويتميز بلونه الأحمر، ويمكن تحويله الى الأسود بمزيد من الأكسدة) ويتضح حجر الكوبريت بالشكل (a-3.1) أو كحجر التينوريت (وهو الشكل المعدني لأوكسيد النحاس الثنائي ويمتاز بلونه الأسود القاتم أو الرمادي الفولاذي، وبريقه المعدني الباهت) والذي موضح بالشكل (b-3.1) [6].



(a) أحجار الكوبريت الكريمة (b) حجر التينوريت
الشكل (1-3)

وعلى الرغم من الأهمية الكبيرة لأوكسيد النحاس كمادة خام، إلا أن التوجه الحديث في تكنولوجيا النانو يركز على تحويل هذه المادة إلى هيئة أغشية رقيقة، والأغشية الرقيقة هي طبقة رقيقة من المادة يمكن أن يتراوح سمكها من أجزاء من النانومتر (وفي هذه الحالة يكون الغشاء أحادي الطبقة) إلى عدة ميكرومترات (غشاء متعدد الطبقات)، ومن التطبيقات الأساسية التي تستفيد من تصنيع الأغشية الرقيقة هي أجهزة أشباه الموصلات الإلكترونية كما في الخلايا الشمسية.

إن تحويل أوكسيد النحاس إلى أغشية رقيقة لا يسهل فقط دمجها في الأجهزة الإلكترونية الدقيقة، بل يسمح أيضاً بالتحكم الدقيق في خصائصها التركيبية مثل حجم الحبيبات [7]. وتعرف أي تقنية لترسيب طبقة رقيقة من مادة ما على ركيزة، أو على طبقات مشكلة مسبقاً، باسم ترسيب الأغشية الرقيقة [8].

2-1 الدراسات السابقة

1- بحثاً تجريبياً تخصصياً في فيزياء الحالة الصلبة والأغشية

درست الباحثة (هبة ممتاز علي ، جامعة بغداد كلية التربية للعلوم الصرفة - ابن الهيثم - 2016) تأثير السمك على خصائص الأغشية الرقيقة لأوكسيد النحاس المحضرة بتقنية التبخير الحراري.

في هذه الورقة، تم ترسيب أغشية رقيقة من أوكسيد النحاس (CuO) ذات سماكات مختلفة (250، 300، 350 و400) نانومتر على ركائز زجاجية بواسطة جهاز تبخير حراري فراغي. أُجريت عملية الأكسدة الحرارية لهذا الغشاء المُبخر في زجاج مُسخن عند درجة حرارة 300 درجة مئوية في الهواء لمدة ساعة واحدة. أظهرت دراسة حيود الأشعة السينية أن جميع العينات ذات طبيعة متعددة البلورات ببنية بلورية أحادية الميل، علاوة على ذلك، يمكن ملاحظة اتجاهات تبلور أوكسيد النحاس (35.54، 38.70) بوضوح من خلال تحليل حيود الأشعة السينية (XRD). كما تبين أن بلورات الأغشية الرقيقة تنمو مع زيادة سمكها، كما ازداد حجم الحبيبات في نطاق (14.65-19.39) نانومتر. دُرست الخصائص البصرية المتعلقة بأطياف الامتصاص والنفاذية للأغشية الرقيقة المُحضرة. وأظهرت أطياف قياس الأشعة فوق البنفسجية والمرئية أن شدة نفاذية الأشعة فوق

البنفسجية (UV) انخفضت مع زيادة السمك، وانخفضت فجوة نطاق الطاقة من (1.62 إلى 1.48) إلكترون فولت عند تغير السمك. من 250 إلى 400 نانومتر

2- بحث منشور في (مجلة الكوفة للفيزياء)

درس الباحث (عمار هادي ، الجامعة التكنولوجية - الكوفة ، 2014) الخواص التركيبية والبصرية لأوكسيد النحاس المحضر بطريقة الأكسدة الحرارية على الزجاج.

تم تحضير غشاء من أوكسيد النحاس ذا تراكيب نانوية بطريقة الأكسدة، حيث تم ترسيب معدن النحاس على قاعدة من زجاج الكوارتز بطريقة التبخير الحراري بالفراغ. سمك الغشاء كان حوالي 20 ميكرومتر. تمت الأكسدة الحرارية للغشاء بواسطة تسخين زجاج كوارتز في فرن أفقياً بدرجة حرارة 400°C في الهواء لمدة أربعة ساعات.

أظهرت النتائج معدل قياس حجم البلورة 27 نانومتر مع تحول كامل لغشاء النحاس إلى أوكسيد النحاس بقيمة ظهرت بزوايا 38.7° و 35.5°، وقد وجدت قيمة فجوة الطاقة 3.82 إلكترون-فولت.

3- ورقة بحثية ضمن سلسلة مؤتمرات مجلة (Journal of physics) التابع لدار النشر (IOP)

درس الباحث (Gevorkyan وآخرون ، الجامعة الروسية الأرمنية ، 2012) توصيف الأغشية الرقيقة من أوكسيد النحاس الثنائي (Cu_2O) المحضرة عن طريق تبخير مسحوق أوكسيد النحاس الثنائي (CuO).

إذ تمت دراسة تأثير سرعة ترسيب مسحوق CuO على الخصائص البنيوية والبصرية لأغشية Cu_2O . أظهرت فحوصات الأشعة السينية أنه عند سرعة ترسيب منخفضة، تتكون الأغشية من طور Cu_2O فقط دون أي طور بيني، ولها بنية حبيبية نانوية. يبلغ متوسط أبعاد الحبيبات حوالي 25-30 نانومتر، وأظهرت جميع هذه الحبيبات توجهاً بلورياً تفضيلاً (200). أظهرت الدراسات البصرية أن حافة الامتصاص للأغشية المحضرة ناتجة عن انتقال مباشر مسموح به. تبلغ قيمة فجوة النطاق البصري المحددة 2.05 إلكترون فولت، وهو ما يتوافق مع فجوة النطاق لـ Cu_2O الصلب.

4- بحث منشور في (مجلة أم سلمة للعلوم والتي سميت حديثاً بمجلة بغداد للعلوم)
درس الباحث (أنوار علي باقر وآخرون ، جامعة بغداد – كلية العلوم ، 2003) الخواص التركيبية
البصرية لأوكسيد النحاس المحضر بطريقة الأكسدة الحرارية على الزجاج.
تم في هذا البحث تحضير أغشية أوكسيد النحاس (CuO) بطريقة التبخير الحراري في الفراغ تحت
ضغط (10^{-5} mbar) على أرضيات زجاجية بدرجة حرارة (100°C) وبمعدل ترسيب
($6.66 \text{ A}^{\circ}/\text{s}$) وبأسماك مختلفة (500A° ، 1000A° ، 3000A°) ، وتم استخدام حيود الأشعة
السينية (XRD) لدراسة التركيب البلوري للأغشية المحضرة فوجد أنها ذات تركيب عشوائي. كما
استخدمت أطياف الامتصاصية والنفذية ضمن مدى الأطوال الموجية (300nm - 540nm) لدراسة
الخواص البصرية، فوجد زيادة في الامتصاصية ونقصان في النفذية بزيادة سمك الأغشية، كما
لوحظ تناقص قيم معامل الامتصاص وفجوة الطاقة البصرية بزيادة السمك.

1-3 الهدف من البحث

يهدف هذا البحث إلى دراسة الأغشية الرقيقة المحضّرة من أكسيد النحاس، مع التركيز على تأثير ظروف التحضير على خصائصها الفيزيائية. كما يهدف إلى توضيح دور طريقة التبخير الحراري في تكوين الأغشية، ومدى تأثيرها على تجانس السطح وجودة الترسيب.

ويتضمن الهدف أيضاً دراسة الخصائص التركيبية للأغشية باستخدام تقنيات مثل حيود الأشعة السينية، من أجل تحديد طبيعة التركيب البلوري وحجم الحبيبات، بالإضافة إلى دراسة الخصائص البصرية من خلال تحليل طيف الامتصاص وتحديد فجوة الطاقة.

كما يسعى البحث إلى فهم العلاقة بين ظروف التحضير والخصائص الناتجة، ومحاولة تحسين هذه الخصائص من خلال التحكم بالعوامل المؤثرة مثل درجة الحرارة وسماكة الغشاء. وفي النهاية، يهدف إلى الوصول إلى أغشية ذات مواصفات جيدة يمكن أن تكون مناسبة للاستخدام في بعض التطبيقات العلمية والتقنية.

الفصل الثاني

الخصائص التركيبية والبصرية للأغشية الرقيقة

Structural and optical properties of thin films

2-1 الخصائص التركيبية للأغشية الرقيقة

تعد دراسة الخصائص التركيبية الركيزة الأساسية في فهم سلوك الأغشية الرقيقة، حيث تتيح هذه الدراسة تحديد الهوية البلورية للمادة التي نحصل عليها من الترسيب، والكشف عن طبيعة الترتيب الذري.

2-1-1 التركيب البلوري (Crystal structure)

يمكن الحصول على معلومات مهمة عن التركيب البنائي للمادة عن طريق حيود الأشعة، فعند سقوط بعض أنواع الإشعاعات على المادة الصلبة، فإنها تنتشر بواسطة المستويات الذرية للمادة، وتحيد عن مسارها وتتداخل معاً، مكونة نموذج حيود يحمل في طياته معلومات عن التركيب البنائي للمادة، ولكي تكون الأشعة الساقطة مناسبة لدراسة التركيب البلوري، فلا بد أن يكون الطول الموجي للأشعة مساوياً تقريباً للمسافة بين الذرات، وحيث أن المسافة بين ذرات الأغشية تكون في حدود (10^{-8} cm) ، لذا يُعد استخدام الأشعة السينية هو الأمثل لدراسة التركيب البلوري للأغشية الرقيقة، استناداً إلى نموذج الحيود الذي تولده عند تفاعلها مع البناء الذري.

والأشعة السينية هي موجات كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية محددة، وتقع بين الأشعة فوق البنفسجية وأشعة غاما كما في الشكل (2-1)، إذ أن أطوالها الموجية تتراوح بين (10^{-7} cm) - (10^{-9} cm) لذلك يفضل استخدامها في معظم تجارب الحيود البلوري [9].



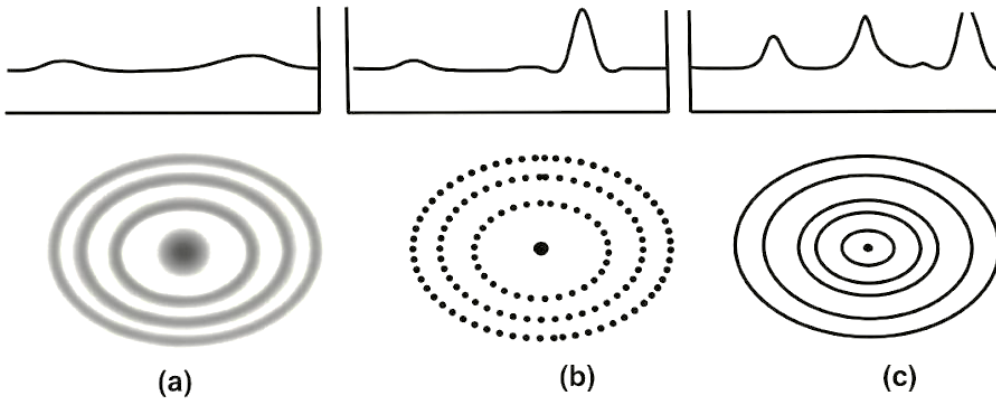
الشكل (2-1) الطيف الكهرومغناطيسي وموقع الأشعة السينية فيه

إنّ النموذج الناتج من حيود الأشعة السينية يحدد صفة التبلور أو العشوائية للمواد فإذا كان نموذج الحيود [10] :

❖ مكون من حلقات عريضة وضعيفة الإضاءة ومتحدة المركز فإن المواد عشوائية كما موضح في الشكل (a-2.2).

❖ مكون من سلسلة من النقاط المضيئة لا تتغير عند الدوران $(\frac{2\pi}{4})$ بسبب التماثل فإن المادة أحادية التبلور كما موضح في الشكل (b-2.2).

❖ مكون سلسلة من الحلقات متمركزة ذات إضاءة حادة وغير متداخلة فإنها متعددة التبلور كما في الشكل (c-2.2).

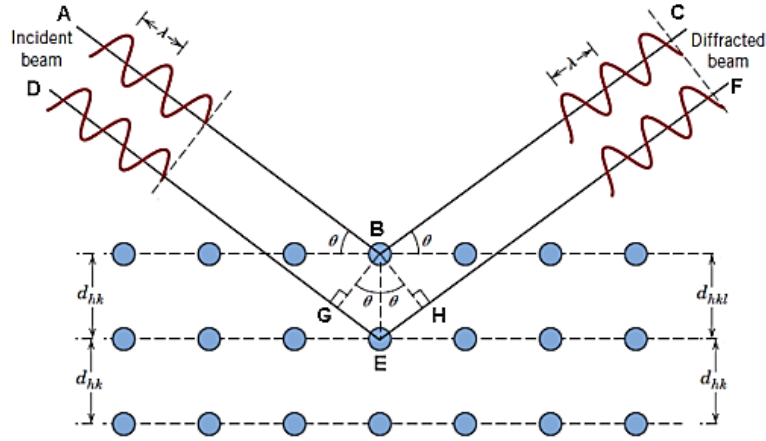


الشكل (2-2) نموذج حيود الأشعة السينية

2-1-2 المعلمات التركيبية (Structural parameters)

1-المسافة البينية للمستويات البلورية وقانون براك

المسافة البينية (d_{hkl}) للمستويات البلورية في الأغشية الرقيقة هي المسافة الفاصلة بين المستويات الذرية المتوازية المتتالية ، وتحدد أساساً باستخدام حيود الأشعة السينية وفق قانون براك، حيث تمكن العالم براك من استنتاج قانونه المبني على أساس أن فرق المسار للأشعة الساقطة والمنعكسة مساوٍ لطول موجة واحدة أو عدد كامل من الأطوال الموجية، ويوضح الشكل (3-2) نموذج براك لحيود الأشعة السينية.



الشكل (2-3) نموذج براك لحيود الأشعة السينية

وقانون براك يصف هذا الحيود بالمعادلة الآتية:

$$m\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$$

حيث إن:

m : عدد صحيح موجب ويمثل مرتبة الحيود (1,2,3,...).

λ : الطول الموجي ويقاس بوحدة (nm).

d_{hkl} : المسافة بين مستويين ذريين متعاقبين في التركيب البلوري ويقاس بوحدة (nm).

θ : زاوية براك.

إن الشرط الأساسي لحدوث انعكاس براك هو تحقيق المتباينة ($\lambda \leq 2d_{hkl}$)، ومن خلال المعادلة نلاحظ وجود متغيرين هما ($\lambda \setminus \theta$) يمكن التحكم بقيمتها للتوصل الى تحديد قيمة المسافة البينية للمستويات البلورية (d_{hkl}) وبذلك نتعرف على البنية البلورية فضلاً عن تحديد العيوب الموجودة في البنية البلورية [11].

2- ثابت الشبكة

هو المسافة الفيزيائية الفاصلة بين الذرات المكونة للشبكة البلورية في الاتجاهات الثلاثة، ويُعد المعلمة الأساسية التي تُحدد أبعاد وحدة الخلية (Unit Cell). ويُرمز لهذه الثوابت بالرموز (a,b,c) والزوايا المحصورة بينها (α, β, γ) [12].

يحسب ثابت الشبكة بالنسبة للأغشية ذات الترتيب البلوري المكعب والموضح بالشكل (a-4-2) بموجب العلاقة التالية :

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

حيث إن:

a : ثابت الشبكة في النظام المكعب ويقاس بوحدة النانومتر (nm) أو وحدة الانجستروم (\AA).

d_{hkl} : المسافة البينية بين المستويات البلورية المتوازية، وتستخرج من قانون براك.

(h, k, l) : معاملات ميلر وهي أرقام صحيحة تحدد اتجاه المستويات البلورية في الفراغ.

أما بالنسبة للأغشية ذات الترتيب البلوري أحادي الميل والموضح بالشكل (b-4-2) نستخدم العلاقة التالية:

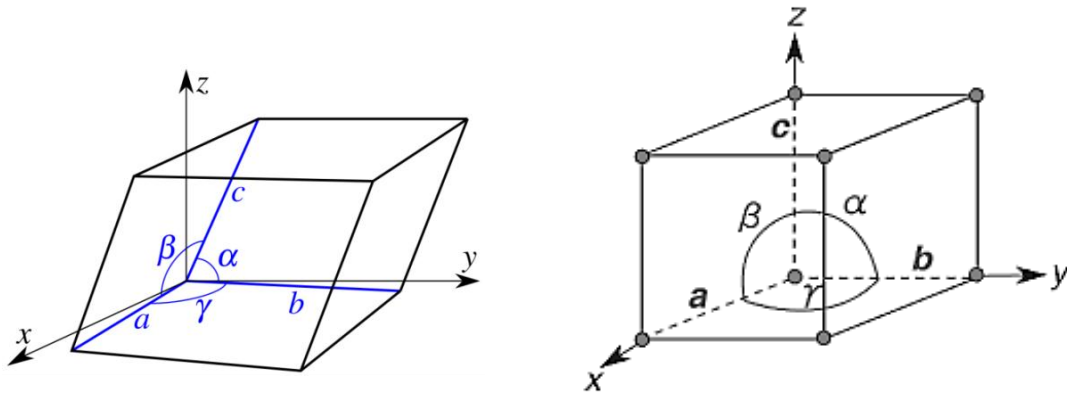
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2 \sin^2 \beta} - \frac{2hl \cos \beta}{ac \sin^2 \beta}$$

حيث إن:

(a, b, c) : ثوابت الشبكة للأبعاد الثلاثة لوحدة الخلية وتقاس بوحدة النانومتر (nm) أو وحدة الانجستروم

(\AA).

β : هي زاوية الميل بين المحاور البلورية (قيمتها في هذا النظام $\neq 90$).



(b) شبكة بلورية أحادية الميل

(a) شبكة بلورية مكعبة

الشكل (2-4)

3- معدل الحجم البلوري

يمكن حساب متوسط الحجم البلوري للأغشية الرقيقة باستخدام معادلة شيرر والتي تربط بين حجم الدقائق المكونة للغشاء وعرض القمة الناتجة عن حيود الأشعة السينية عند منتصف الارتفاع [13].

وتعطى معادلة شيرر بالصيغة التالية:

$$D_{av} = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta_B}$$

حيث إن:

D_{av} : متوسط الحجم البلوري ووحدة قياسه نانومتر (nm) أو أنجستروم (A°).

K : ثابت الشكل وهو قيمة ثابتة تعتمد على شكل الحبيبات وقيمه تتراوح حول 0.9.

λ : الطول الموجي للأشعة السينية المستخدمة في الفحص ويقاس بوحدة (nm).

β : عرض القمة عند منتصف الارتفاع ويقاس بالراديان.

θ_B : زاوية براك وهي نصف زاوية الحيود التي تظهر عندها القمة في مخطط حيود الأشعة السينية.

4- عامل التشكيل

يُعد عامل التشكيل مقياساً كيميائياً هاماً يُستخدم لوصف درجة التوجه البلوري للأغشية الرقيقة المحضرة. تكمن أهمية هذا المعامل في تحديد الاتجاه السائد لنمو البلورات، حيث يوضح ما إذا كانت حبيبات الغشاء تنمو بشكل عشوائي، أم أنها تفضل النمو في اتجاه مستويات بلورية (hkl) محددة، ويمكن إيجاد عامل التشكيل لكل مستوى من المستويات باستخدام العلاقة التالية:

$$TC_{(hkl)} = \frac{I_{(hkl)}/I_{O(hkl)}}{\frac{1}{M} \sum I_{(hkl)}/I_{O(hkl)}}$$

حيث إن:

$TC_{(hkl)}$: عامل التشكيل وليس له وحدة قياس.

$I_{(hkl)}$: الشدة المقاسة هي أقصى شدة للقمة الظاهرة في مخطط حيود الأشعة السينية ووحدة قياسه

(count).

$I_{O(hkl)}$: الشدة القياسية أو المرجعية هي الشدة القياسية لنفس المستوى البلوري ولكن لمادة المسحوق

العشوائية تماماً ووحدة قياسه (count).

M : عدد القمم (عدد المستويات البلورية) وهو كمية خالية من الوحدات.

بحيث أن نتيجة القانون إذا كانت [14]:

❖ $TC(hkl) = 1$ هذا يعني إن البلورات موزعة بشكل عشوائي و لا يوجد اتجاه مفضل للنمو (كما لو كانت بشكل مسحوق).

❖ $TC(hkl) > 1$ يعني إن هناك زيادة في عدد البلورات التي تنمو باتجاه المستوى (hkl) وهذا يشير إلى وجود نمو مفضل لهذا المستوى تحديداً.

❖ $TC(hkl) < 1$ يعني إن هناك انخفاضاً في عدد البلورات التي تنمو باتجاه المستوى (hkl) مقارنة بالعينة العشوائية.

5 - كثافة الانخلاعات وعدد الحبيبات

هي مجموع أطوال جميع الانخلاعات داخل حجم معين من المادة مقسوماً على ذلك الحجم، وتعطى كثافة الانخلاعات بالعلاقة التالية [15]:

$$\delta = \frac{1}{D_{av}^2}$$

حيث إن:

$$\delta: \text{كثافة الانخلاعات ووحدة قياسه } \frac{\text{lines}}{\text{nm}^2} \text{ أو } \frac{\text{lines}}{\text{A}^\circ 2}$$

$$D_{av}: \text{متوسط الحجم البلوري ووحدة قياسه نانومتر (nm) أو أنجستروم (A}^\circ\text{)}.$$

كما يمكن حساب عدد الحبيبات لوحدة المساحة من العلاقة التالية [16]:

$$No = \frac{t}{D_{av}^3}$$

حيث إن:

$$No: \text{عدد الحبيبات لوحدة المساحة ووحدة قياسها (grains/nm}^2\text{)}.$$

$$t: \text{سمك الغشاء ووحدة قياسه نانومتر (nm) أو أنجستروم (A}^\circ\text{)}.$$

$$D_{av}: \text{متوسط الحجم البلوري ووحدة قياسه نانومتر (nm) أو أنجستروم (A}^\circ\text{)}.$$

2-2 الخصائص البصرية للأغشية الرقيقة

لفهم الخصائص البصرية للأغشية الرقيقة، لابد من معرفة كيفية تفاعل الضوء مع الأغشية الرقيقة لأشبه الموصلات، فعند سقوط شعاع من ضوء أحادي اللون عمودياً على مقطع من سطح شبه موصل، فإن جزءاً من هذا الشعاع سينعكس وجزءاً آخر منه سينفذ ويمتص جزءاً منه في داخل البلورة، وذلك لأن طاقته كافية لإثارة الإلكترونات وتحويلها من مستويات الطاقة الواطئة المشغولة إلى مستويات الطاقة العالية غير المشغولة، ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة التالية [17]:

$$I = I_R + I_T + I_A$$

حيث إن:

I : الشدة الكلية وتقاس بوحدة (w/m^2) .

I_R : الشدة المنعكسة وتقاس بوحدة (w/m^2) .

I_T : الشدة النافذة وتقاس بوحدة (w/m^2) .

I_A : الشدة الممتصة وتقاس بوحدة (w/m^2) .

وبما أن هناك عدداً كبيراً من المستويات المشغولة بالإلكترونات في حزمة التكافؤ، وعدداً كبيراً أيضاً من المستويات الفارغة في حزمة التوصيل تفصلها عن بعضها الفجوة الممنوعة، فإن احتمالية الامتصاصية تكون كبيرة جداً عندما تكون طاقة فوتونات الضوء الساقط أكبر من طاقة الفجوة الممنوعة (E_g) لشبه الموصل [18].

2-2-1 الامتصاصية والنفاذية والانعكاسية (Absorbance, Transmittance, Reflectance)

بعد فهم آلية تفاعل الضوء مع الأغشية الرقيقة وما ينتج عنه من انعكاس وامتصاص ونفاذ، يصبح من الضروري الانتقال إلى الوصف الكمي لهذه الظواهر، وذلك من خلال دراسة الكميات البصرية المقاسة التي تعبر عن سلوك الضوء داخل الغشاء.

❖ **الامتصاصية (A):** هي النسبة بين شدة الإشعاع الممتص الذي يمتصه الغشاء (I_A) إلى الشدة

الأصلية للإشعاع الساقط عليه (I_0)، وتكون الامتصاصية كمية خالية من الوحدات لأنها حاصل

قسمة كميتين متماثلتين في النوع [19].

وتعطى الامتصاصية بالعلاقة التالية:

$$A = \frac{I_A}{I_o}$$

حيث إن:

A: الامتصاصية

I_A : شدة الإشعاع الممتص وتقاس بوحدة (W/m^2) .

I_o : شدة الإشعاع الساقط وتقاس بوحدة (W/m^2) .

❖ **النفاذية (T):** هي النسبة بين شدة الإشعاع النافذ عبر الغشاء (I_T) إلى الشدة الأصلية للإشعاع

الساقط عليه (I_o) ، وهي أيضاً كمية خالية من الوحدات، وتعطى بالعلاقة التالية [20]:

$$T = \frac{I_T}{I_o}$$

حيث إن:

T: النفاذية

I_T : شدة الإشعاع النافذ وتقاس بوحدة (W/m^2) .

❖ **الانعكاسية (R):** هي النسبة بين شدة الإشعاع المنعكس عن الغشاء باتجاه معين (I_R) إلى الشدة

الأصلية للإشعاع الساقط عليه (I_o) ، وكذلك هي كمية خالية من الوحدات، وتعطى بالعلاقة

التالية [21]:

$$R = \frac{I_R}{I_o}$$

حيث إن:

R: الانعكاسية

I_R : شدة الإشعاع الممتص وتقاس بوحدة (W/m^2) .

وترتبط الامتصاصية (A) والنفاذية (T) والانعكاسية (R) بالعلاقة التالية [22]:

$$A + R + T = 1$$

2-2-2 الثوابت البصرية (optical constant)

1 - معامل الامتصاص (α) :

يُعرف معامل الامتصاص (α) بأنه النقص الذي يحدث في شدة الضوء الساقط أثناء مروره داخل المادة لكل وحدة مسافة باتجاه انتشار الموجة، ويعتمد معامل الامتصاص على طاقة الفوتونات الساقطة وفجوة الطاقة، ووحدة قياسه هي مقلوب وحدة المسافة ويمكن إيجاده من العلاقة التالية [23]:

$$I = I_0 e^{-\alpha t}$$

حيث إن:

I : شدة الإشعاع النافذ من الغشاء وتقاس بوحدة (W/m^2) .

I_0 : شدة الإشعاع الساقط على الغشاء وتقاس بوحدة (W/m^2) .

α : معامل الامتصاص ووحدة قياسه (nm^{-1}) .

t : سمك الغشاء الرقيق ووحدة قياسه (nm) .

وبعد إعادة صياغة المعادلة أعلاه نحصل على معامل الامتصاص بالعلاقة التالية:

$$a = 2.303 \frac{A}{t}$$

حيث إن:

A : الامتصاصية وليس لها وحدات قياس.

2. معامل الخمود (K) :

هو مقياس لمقدار ما تمتصه إلكترونات المادة من حزمة الفوتونات الساقطة عليها، أي بمعنى أنه التوهين الحاصل للموجة الكهرومغناطيسية عند مرورها من خلال الغشاء الرقيق، كما أن معامل الخمود مقدار خالي من الوحدات، ويمثل الجزء التخيلي من معامل الانكسار المركب [24]:

ويرتبط معامل الخمود مباشرةً بمعامل الامتصاص بالعلاقة التالية:

$$k = \frac{a\lambda}{4\pi}$$

حيث إن:

K : معامل الخمود وليس له وحدات قياس.

a : معامل الامتصاص ووحدة قياسه (nm^{-1}) .

λ : الطول الموجي للضوء الساقط ووحدة قياسه (nm) .

3. معامل الانكسار

هو النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ إلى سرعته في الغشاء الرقيق، ويمثل الجزء الحقيقي من معامل الانكسار المركب، كما إنه مقدار خالي من الوحدات. ففي معظم الأغشية الرقيقة العازلة والأغشية الشفافة يمكن إهمال الجزء التخيلي (k) من معامل الإنكسار المركب، حيث نعتبر معامل الخمود ($k \approx 0$)، وبذلك يقتصر معامل الانكسار المركب على الجزء الحقيقي (n) والذي يعطى بالعلاقة التالية [25]:

$$n = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}$$

حيث إن:

n : معامل الانكسار الحقيقي وهو كمية خالية من الوحدات.

R : الانعكاسية.

فبذلك إن معامل الانكسار المركب والذي يتمثل جزؤه الحقيقي بمعامل الانكسار الحقيقي، وجزؤه التخيلي يتمثل بمعامل الخمود يعطى بالعلاقة التالية:

$$N = n - ik$$

4. ثابت العزل

هو مقياس لقابلية المادة على الاستقطاب والتأثر بالمجال الكهربائي، فعند سقوط موجة كهرومغناطيسية على المادة، فإن المجال الكهربائي المصاحب لها يؤثر على الشحنات المرتبطة داخل الذرات، مسبباً إزاحتها عن مواضع اتزانها، مما يؤدي إلى تكوّن ثنائيات قطبية كهربائية وظهور ظاهرة الاستقطاب.

وتعكس هذه العملية قدرة المادة على خزن الطاقة ويتمثل ذلك بالجزء الحقيقي من ثابت العزل المركب، في حين يتمثل الجزء التخيلي من ثابت العزل المركب بفقدان الطاقة نتيجة الامتصاص، ويعطى ثابت العزل النسبي المركب بالعلاقة التالية [26]:

$$\epsilon = \epsilon_r - i\epsilon_i$$

حيث إن:

ϵ : ثابت العزل المركب وليس له وحدة قياس

ϵ_r : الجزء الحقيقي من ثابت العزل، ويرتبط بقدرة المادة على خزن الطاقة الكهربائية وليس له وحدة قياس.

ϵ_i : الجزء التخيلي من ثابت العزل، ويرتبط بفقدان الطاقة (الامتصاص) داخل المادة، وليس له وحدة قياس.

ويرتبط ثابت العزل المركب بمعامل الانكسار المركب بالعلاقة التالية [27]:

$$\epsilon = N^2$$

5. فجوة الطاقة

تُعد فجوة الطاقة البصرية من الخصائص البصرية المهمة للمواد، إذ تمثل مقدار الطاقة اللازمة لانتقال الإلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل، وتعتمد قيمة فجوة الطاقة على طبيعة المادة وتركيبها، كما تتأثر بدرجة الحرارة حيث تقل بزيادة درجة الحرارة. وفي المواد الواقعية لا تكون فجوة الطاقة مثالية تمامًا، إذ قد تظهر داخلها مستويات طاقة ناتجة عن العيوب أو الشوائب، مما يؤثر ذلك في سلوك المادة وخواصها [28].

الفصل الثالث

تقنيات ترسيب الأغشية الرقيقة

Thin Film Deposition Techniques

تعد طريقة التحضير العامل الأساسي في تحديد خصائص الأغشية الرقيقة (التركيبية والبصرية). ونظراً لتعدد التطبيقات التكنولوجية، تطورت تقنيات ترسيب متنوعة يمكن تقسيمها بشكل رئيسي إلى قسمين رئيسيين:

• طرائق ترسيب البخار

• طرائق ترسيب المحلول

يركز هذا الفصل على النوع الأول وهو طرائق ترسيب البخار، وتنقسم طرائق الترسيب من البخار إلى [29]:

• الترسيب الفيزيائي للبخار (PVD)

• الترسيب الكيميائي للبخار (CVD)

3-1 الطرائق الفيزيائية لترسيب البخار

تصنف الطرائق الفيزيائية لترسيب البخار إلى مجموعتين أساسيتين هما:

• طرائق الترسيب بالتبخير

• طرائق الترسيب بالترديذ

3-1-1 الخطوات الأساسية للطرائق الفيزيائية لترسيب البخار

وتتكون طرائق الترسيب للبخار بشكل عام من ثلاث خطوات أساسية هي [29]:

1. تحويل المادة المراد ترسيبها إلى طور بخاري من خلال إمداد المادة بطاقة كافية لتحويلها إلى بخار.

2. انتقال الذرات من المادة (وهي في الحالة البخارية) خلال وسط مفرغ كلياً أو جزئياً من الهواء أي تحت ضغط منخفض لتصل إلى الركائز.

3. تكثف البخار على سطح الركيزة ليتشكل الغشاء الرقيق (Thin Film).

حيث تشترك معظم الطرائق الفيزيائية لترسيب البخار بهذه الخطوات العامة لكنها تختلف بشكل عام بكيفية تحويل المادة إلى الطور البخاري، حيث تتم عملية تحويل المادة إلى الحالة الغازية من خلال التسخين (حيث تكتسب الجزيئات طاقة كافية تتجاوز قوى الترابط السطحية للإفلات من السطح)، أو عن طريق انتقال كمية التحرك (كما في طرائق الترديد).

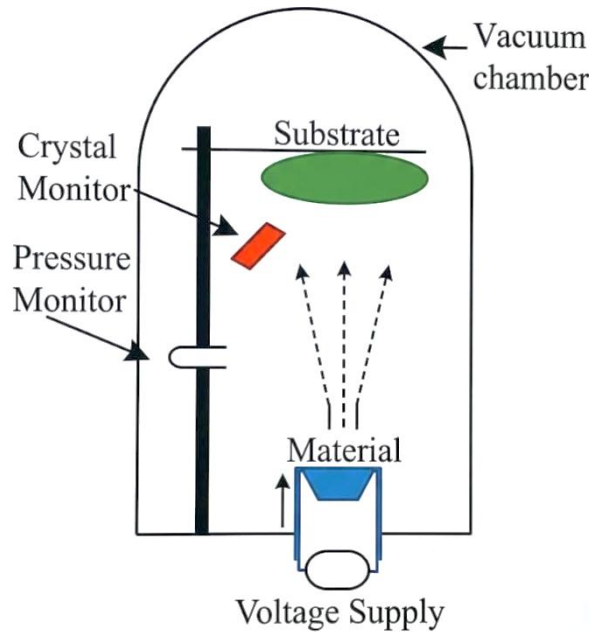
2-1-3 أنواع طرائق الترسيب بالتبخير

أولاً: طريقة التبخير الحراري (التبخير بالمقاومة)

في طريقة التبخير الحراري، يتم تبخير المادة المراد ترسيبها عن طريق تسخينها باستخدام عنصر تسخين كهربائي (مقاومة كهربائية).

عادةً يتم وضع المادة الصلبة المراد ترسيبها داخل وعاء مصنوع من معدن مقاوم للحرارة العالية (البوتقة) - والتي تكون على شكل حوض - ويربط الوعاء مع قطبين متصلين بمصدر للتيار الكهربائي، فعند تمرير التيار الكهربائي ترتفع درجة الحرارة تدريجياً حتى تصل المادة إلى درجة التبخر، فتتحول المادة إلى بخار وترسب على الركائز التي توضع عادة أعلى الوعاء مباشرة. كما يتم خفض الضغط في هذه المنظومة (الحجرة) إلى مستوى منخفض جداً لمنع الغازات الموجودة من التفاعل مع المادة المتبخرة أو مع الغشاء المتكون، حيث يتم خفض الضغط إلى حوالي 10^{-5} تور ويتم ذلك من خلال مضختين هما [30]:

- مضخة دوارية: والتي تُحدث انخفاض في الضغط يصل إلى 10^{-3} تور
- مضخة الزيت: والتي تزيد الانخفاض في الضغط حتى يصل إلى 10^{-5} تور.



الشكل (3-1): مخطط تقنية الترسيب بالتبخير الحراري

تمتاز طريقة التبخير الحراري بالميزات التالية [31]:

- البساطة والتكلفة المنخفضة: تتميز أنظمة التبخير الحراري ببساطة ميكانيكية ومتانة مقارنة بطرائق الترسيب الفيزيائي للبخر (PVD) الأخرى. ويترجم هذا مباشرة إلى انخفاض تكاليف المعدات الأولية وانخفاض الصيانة، مما يجعله خيارًا جذابًا لبيئات البحث والتطوير والإنتاج على حد سواء.
- معدل الترسيب العالي: حيث يمكن للعملية تحقيق معدلات ترسيب عالية جدًا، مما يسمح بالطلاء السريع للركائز. وتعد هذه السرعة ميزة كبيرة في أماكن التصنيع حيث يكون الإنتاج مقياسًا حاسمًا للأداء.
- تعدد استخدامات المواد: تتوافق الطريقة مع مجموعة واسعة من المواد، بما في ذلك المعادن (مثل الألمنيوم والفضة). وهي فعالة بشكل خاص للمواد العنصرية ذات نقطة الانصهار الموحدة والمنخفضة التي يمكن تبخيرها بسهولة من بوتقة أو قارب.

كما تتضمن هذه الطريقة مجموعة من العيوب [31]:

- الطريقة غير ملائمة للمواد ذات نقاط الانصهار العالية جدًا، مثل المعادن المقاومة للحرارة، فقد تذوب أو تتفاعل مادة التسخين (البوتقة) نفسها مع المادة المراد ترسيبها عند درجات حرارة قصوى.
- ينتج التبخير الحراري عادةً أغشية ذات أعلى مستويات الشوائب بين طرائق PVD. ويمكن أن ينشأ التلوث من مادة البوتقة المسخنة نفسها، والتي قد تتبخر مع مادة المصدر المطلوبة.
- غالبًا ما تكون الأغشية المترسبة بالتبخير الحراري أقل كثافة مقارنة بتلك التي يتم إنشاؤها عن طريق الرش.

نتيجة لما تقدم، تم اعتماد طريقة التبخير الحراري في هذه الدراسة لتحضير أغشية أكسيد النحاس، حيث تم أولاً ترسيب طبقة رقيقة من معدن النحاس (Cu) عالي النقاوة على الركائز، لتعقبها لاحقاً عملية الأكسدة الحرارية (Thermal Oxidation) تحت ظروف زمنية وحرارية محددة.

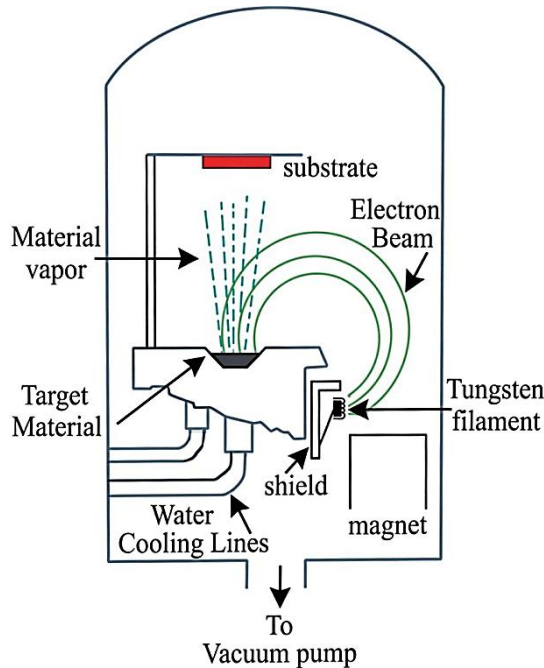
ثانياً: طريقة التبخير بالشعاع الإلكتروني (EB-PVD)

التبخير بشعاع الإلكترون (*EBE*) هو أحد أشكال الترسيب الفيزيائي للبخر، تبدأ عملية التبخير بفتيل التنغستن، حيث يتم تمرير تيار كهربائي عالٍ عبر هذا الفتيل، مما يتسبب في تسخينه بشكل كبير، هذه الحرارة الشديدة تتسبب في إطلاق الإلكترونات من الفتيل عن طريق الانبعاث الحراري.

بمجرد تحريرها، يتم تسريع الإلكترونات بواسطة مجال جهد عالٍ، يتراوح عادة بين 5 و 10 كيلو فولت، مما يمنحها طاقة حركية هائلة، يتم بعد ذلك استخدام مجال مغناطيسي لتركيز هذه الإلكترونات عالية السرعة بدقة في شعاع ضيق وقابل للتحكم، يتم توجيه شعاع الإلكترون المركز هذا على مادة المصدر، والتي يتم تثبيتها في بوتقة.

عند ضرب المادة، يتم تحويل الطاقة الحركية للإلكترونات على الفور إلى حرارة شديدة وموضعية، مما يؤدي إلى رفع درجة حرارة المادة إلى ما وراء نقطة غليانها، مما يخلق سحابة بخار، ينتقل البخار إلى الأعلى عبر الحجرة المفرغة، ويعد التفريغ أمرًا بالغ الأهمية، لأنه يضمن نقل جزيئات البخار في خط مستقيم دون الاصطدام بجزيئات الهواء أو التفاعل معها، عندما يصل البخار إلى الركيزة الأبرد الموضوعة فوق المصدر، فإنه يتكثف، مكونًا غشاءً رقيقًا وصلبًا.

نظرًا لأنه يتم تسخين مادة المصدر فقط، يتم التخلص عمليًا من التلوث من البوتقة. ينتج عن هذا أغشية ذات نقاء عالٍ بشكل استثنائي، وهو أمر بالغ الأهمية للتطبيقات البصرية والإلكترونية [32].



الشكل (3-2): مخطط تقنية الترسيب بالشعاع الإلكتروني

بالإضافة إلى ما سبق، توجد تقنيات أخرى لترسيب الأغشية الرقيقة بطريقة التبخير، ومن أبرزها: التبخير بالليزر، والتبخير الومضي، والتبخير بالقوس الكهربائي.

3-1-2 الترسيب بالترذيد (sputtering)

الترذيد هي تقنية ترسيب فيزيائي للبخر (PVD) تستخدم لترسيب طبقة رقيقة من المادة على سطح، يُعرف بالركيزة، حيث تُطلق أيونات عالية الطاقة على مادة تسمى الهدف، مما يؤدي إلى إزاحة الذرات من سطحها، ثم تنتقل هذه الذرات المزاحة وتغطي الركيزة، فيتشكل لدينا غشاء رقيق، والترذيد ليست تفاعلاً كيميائياً بل عملية فيزيائية بحته لنقل الزخم [33].

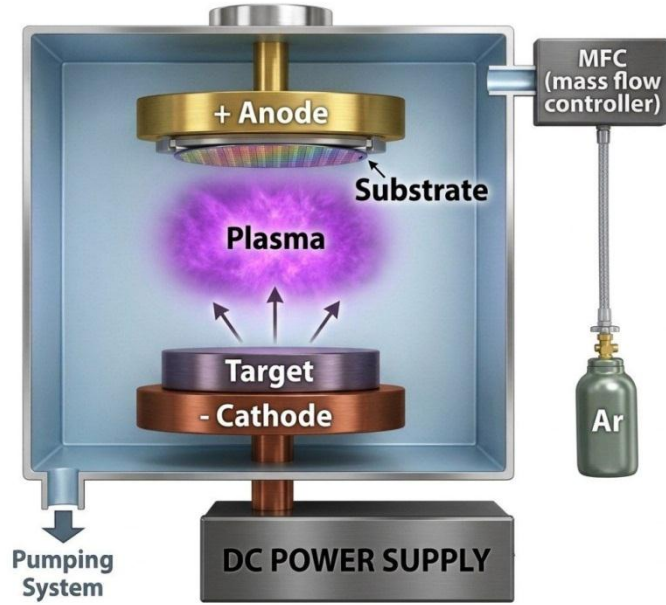
ويصنف الترسيب بالترذيد تبعاً لمصدر القدرة إلى :

أولاً: الترذيد بالتيار المستمر (Dc sputtering)

تبدأ العملية بأكملها بوضع الهدف والركيزة في غرفة. ثم يتم تفريغ هذه الغرفة إلى ضغط منخفض جداً، مما يخلق فراغاً. ثم بعد ذلك نبدأ بتوليد البلازما، حيث يتم إدخال كمية صغيرة ومتحكم بها بدقة من غاز خامل - وهو غالباً الأرجون (Ar) - إلى الغرفة.

ثم يتم تطبيق جهد كهربائي عالٍ من مصدر جهد مستمر (Dc)، حيث يربط الهدف مع القطب السالب فيعمل ككاثود بينما تكون الركيزة عند جهد أعلى، حيث يكون مسند الركيزة أو جدران الغرفة متصلة بالقطب الموجب أو مؤرضة ونتيجة للجهد الكهربائي العالي تتسارع الإلكترونات الحرة الموجودة في غرفة التفريغ وتصطدم بذرات غاز الأرجون مما يؤدي إلى تأينها، فينشأ خليطاً من أيونات الأرجون الموجبة (Ar^+) وإلكترونات سالبة حرة. يُعرف هذا الغاز المؤين النشط باسم البلازما.

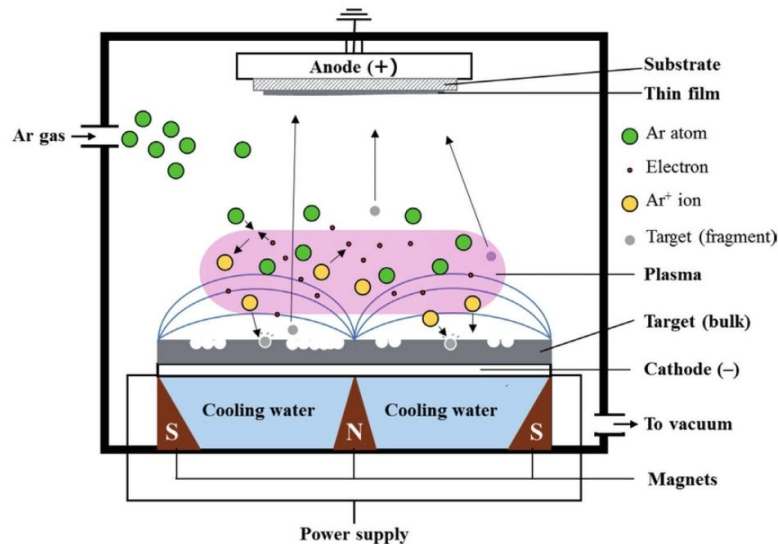
تتسارع أيونات الأرجون المشحونة إيجاباً من البلازما بقوة نحو الهدف (الكاثود)، تتصادم هذه الأيونات عالية السرعة مع سطح الهدف، وتنقل جزءاً من طاقتها الحركية وزخمها إلى ذرات الهدف. هذا التأثير قوي بما يكفي لإزاحة، أو "ترذيد"، ذرات من مادة الهدف، وتنتقل هذه الذرات من الهدف عبر الوسط منخفض الضغط وتهبط على سطح الركيزة، مع مرور الوقت، تتراكم هذه الذرات وتتكدس، وتتكون وتنمو لتشكل غشاءً رقيقاً. كما يؤدي اصطدام أيونات الأرجون بسطح الهدف إلى انبعاث إلكترونات ثانوية، تتسارع داخل المجال الكهربائي وتصطدم بذرات الغاز مسببة تأينها، مما يساهم في زيادة كثافة البلازما واستمرار عملية التفريغ [34].



الشكل (3-3): مخطط تقنية الترسيب بالترديز بالتيار المستمر

ثانياً: الترديز المغنطروني (Magnetron sputtering)

هو نفس طريقة الترديز بالتيار المستمر لكنه يختلف باستخدام مغناطيسات توضع خلف الهدف مما يؤدي إلى نشوء مجالاً مغناطيسياً أمام الهدف. يحصر هذا المجال الإلكترونات خفيفة الوزن، مما يجبرها على مسار حلزوني قريب من سطح الهدف بدلاً من السماح لها بالهروب. تتصادم هذه الإلكترونات المحاصرة مع عدد أكبر بكثير من ذرات الأرجون المتعادلة، مما يخلق زيادة في التأين. ينتج عن هذا بلازما كثيفة. يتم بعد ذلك تسريع أيونات الأرجون الموجبة الثقيلة بواسطة المجال الكهربائي وتصطدم بالهدف، مما يؤدي إلى إزاحة أو "قذف" ذرات مادة الهدف، تنتقل هذه الذرات المقذوفة عبر الفراغ وتترسب على الركيزة، مكونة غشاءً رقيقاً [35].



الشكل (3-4): مخطط تقنية الترسيب بالترديز المغنطروني

ثالثاً: التريز بالتردد الراديوي (RF sputtering)

في نظام التيار المستمر الذي مرّ ذكره سابقاً ، يتم تطبيق جهد سالب ثابت على الهدف. يعمل هذا بشكل مثالي مع الأهداف الموصلة مثل المعادن لأن المادة يمكنها بسهولة تبديد الشحنة الموجبة التي توفرها الأيونات القاصفة.

لكن إذا حاولنا استخدام مصدر تيار مستمر مع هدف عازل فإن العملية تفشل بسرعة. فعندما تصطدم أيونات الأرجون الموجبة بالسطح، تتراكم شحنتها. وتراكم الشحنات الموجبة على سطح الهدف يؤدي الى طرد أي أيونات أرجون موجبة واردة أخرى، مما يؤدي فعلياً إلى إيقاف عملية التريز.

وتحل هذه المشكلة باستخدام مصدر طاقة متناوب (وهو ما يعرف بالتريز بالتردد الراديوي)، حيث يتقلب المجال الكهربائي بسرعة بين السالب والموجب ملايين المرات في الثانية.

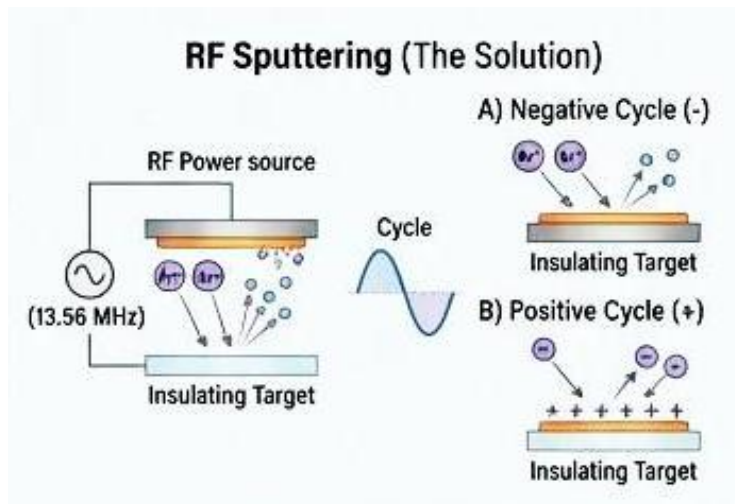
خلال نصف الدورة السالبة: يكون الهدف مشحوناً سالباً، مما يجذب أيونات الأرجون للقصف وتريز الذرات تماماً كما في نظام التيار المستمر.

خلال نصف الدورة الموجبة: يصبح الهدف موجباً لفترة وجيزة. فيجذب الإلكترونات شديدة الحركة، سالبة الشحنة، من البلازما. مما يؤدي إلى إزالة الشحنة الموجبة التي تراكمت خلال الدورة السابقة.

يضمن هذا الإجراء "التنظيف الذاتي"، أي أن سطح الهدف جاهز دائماً لدورة القصف التالية، مما يسمح بالتريز المستمرة والمستقرة لأي مادة عازلة.

ومن مساوئ هذه الطريقة أن عملية التريز تحدث بشكل أساسي خلال الجزء السالب من دورة التردد الراديوي. نظراً لأن الدورة تتضمن أيضاً مرحلة موجبة "غير مذبذبة"، فإن معدل الترسيب الإجمالي

للتريز بالتردد الراديوي يكون عموماً أقل من معدل التريز بالتيار المستمر لنفس المادة [36].



الشكل (3-5): مخطط تقنية الترسيب بالتريز بالترددات الراديوية

2-3 الطرائق الكيميائية لترسيب البخار

تُعدُّ طرائق الترسيب الكيميائي للبخار (CVD) من أهم التقنيات المستخدمة في تحضير الأغشية الرقيقة. وتعتمد هذه الطرائق على إدخال مواد أولية غازية إلى حجرة التفاعل، حيث تتعرض لظروف معينة من درجة الحرارة والضغط تؤدي إلى حدوث تفاعلات كيميائية على سطح الركيزة، مما ينتج عنه ترسيب طبقة صلبة متماسكة (غشاء رقيق)

أولاً: الترسيب الكيميائي الحراري (Thermal CVD)

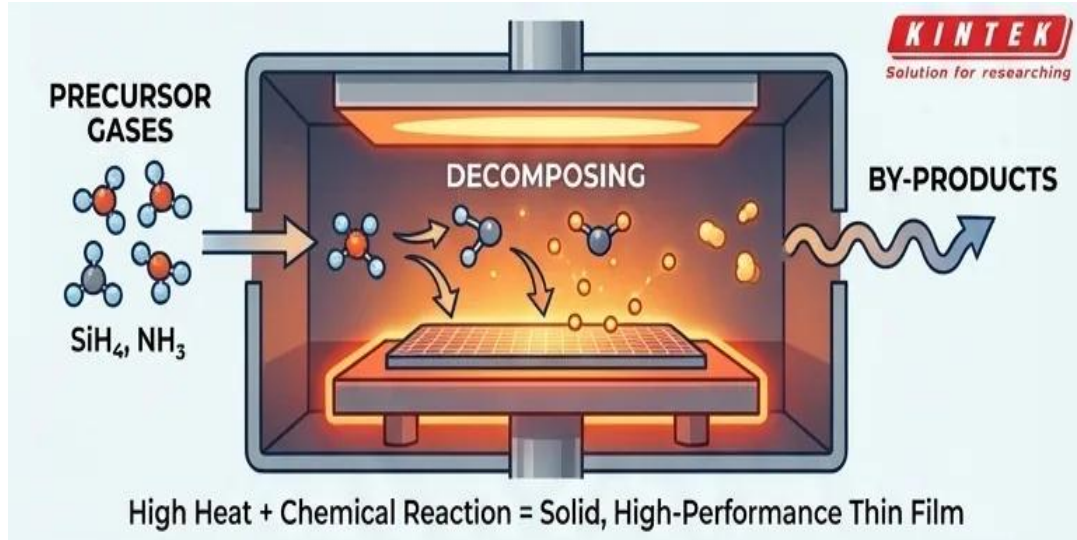
الترسيب الكيميائي الحراري للبخار (CVD) هو عملية ترسيب أغشية رقيقة، تستخدم درجات حرارة عالية لبدء تفاعلات كيميائية في الطور الغازي، مما يؤدي إلى إنشاء طبقة رقيقة على الركيزة.

يتم وضع الركيزة داخل غرفة التفاعل وتسخينها إلى درجة حرارة العملية المطلوبة أو يتم تسخين المفاعل بالكامل. توفر درجة الحرارة العالية الطاقة الحرارية اللازمة لكسر الروابط الكيميائية داخل جزيئات الغاز الأولية.

تبدأ العملية بإدخال الغازات الأولية التي تحمل العناصر المكونة للطبقة المرغوبة، حيث تنتقل هذه الغازات عبر الطبقة الحدودية (وهي طبقة غازية رقيقة وراكدة تعلو السطح) عن طريق الانتشار الجزيئي للوصول إلى سطح الركيزة الساخن، وبمجرد وصول جزيئات المادة الأولية إلى الركيزة، فإنها تمتص على السطح.

الحرارة الشديدة للركيزة تزود الجزيئات بطاقة كافية للتفاعل، وقد تشمل هذه التفاعلات التحلل الحراري أو التفاعل مع جزيئات أخرى ممتصة على سطح الركيزة، مما يؤدي إلى تكوين المادة الصلبة المرغوبة، فيبدأ الغشاء في النمو.

التفاعلات الكيميائية التي تشكل الغشاء الصلب تخلق أيضاً منتجات ثانوية قد تؤثر على جودة الغشاء. بعد اكتمال التفاعل، تنفصل النواتج الثانوية من سطح الركيزة، ثم تُنقل بعيداً عن السطح بواسطة تدفق الغاز [37].



الشكل (3-6): مخطط تقنية الترسيب الكيميائي الحراري

ثانياً: الترسيب الكيميائي المعزز بالبلازما (PECVD)

يعمل الترسيب الكيميائي الحراري (الترسيب التقليدي) عن طريق تسخين الركيزة إلى درجات حرارة عالية جداً (غالباً ما تزيد عن 600 درجة مئوية). ثم يتم إدخال الغازات الأولية، وتوفر الحرارة الشديدة الطاقة اللازمة لتكسيرها وتفاعلها، وترسيب طبقة صلبة على السطح الساخن. لكن الترسيب بهذه الطريقة يمنع استخدام الركائز التي قد تذوب، أو تتشوه، عند درجات الحرارة العالية. ويتم معالجة هذا القيد باستخدام طريقة الترسيب الكيميائي للبلازما المعزز بالبلازما (PECVD) وهي عملية ترسيب أغشية رقيقة تمتاز بأنها تعمل في درجات حرارة أقل مقارنة بالترسيب الحراري (thermal CVD).

توفر هذه الطريقة طاقة إضافية تساعد على حدوث التفاعل عند درجة حرارة أقل باستخدام البلازما، حيث يتم إنشاء البلازما بتطبيق مجال كهربائي متناوب عادة على غاز منخفض الضغط داخل غرفة التفاعل، ينشط هذا المجال الغاز، ويؤين الغاز ويكوّن الكاتيونات حرة وأيونات من ذراته تعرف هذه الحالة بالبلازما (وهي الحالة الرابعة للمادة).

في عملية PECVD، تتصادم الإلكترونات المعجلة بفعل المجال الكهربائي داخل البلازما مع جزيئات الغاز الأولية. فتنتقل هذه التصادمات طاقة كافية لكسر الروابط الكيميائية للجزيئات الأولية، مما يخلق الأنواع المتفاعلة اللازمة للترسيب، يحدث هذا بينما تظل الركيزة نفسها في درجة حرارة

قليلة مقارنة بالطريقة التقليدية، حيث تأتي طاقة التفاعل من البلازما، وليس من تسخين الركيزة. ثم تنتقل المكونات الكيميائية المتفاعلة إلى سطح الركيزة الأقل حرارة مقارنة بالترسيب الحراري. وهناك، تستقر وتترابط، لتبني تدريجياً طبقة رقيقة (غشاء رقيق) [38].

وهناك عدة طرق كيميائية أخرى لترسيب البخار منها:

- الترسيب الضوئي (Photo CVD)
- الترسيب بالليزر (Laser CVD)
- الترسيب بالبلازما عالية الكثافة (High density plasma CVD)

1. Ohring, M., Materials Science of Thin Films, Elsevier, 2001.
2. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A., Chemistry of the Elements, 2nd Edition, 1997.
3. Soonmin, H., "A Review on Copper Oxide Thin Films," International Journal of Recent Scientific Research, Vol. 7, No. 6, pp. 11914–11918, 2016.
4. Richardson, H. W., Handbook of Copper Compounds and Applications, CRC Press, 1997.
5. Physica Status Solidi (b), "Materials Towards Devices," 2012.
6. Conkling, J. A., & Mocella, C. J., Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory, CRC Press, 2010.
7. Pappas, S., "Facts About Copper," 2018.
8. Wager, J. F., Keszler, D. A., & Presley, R. E., Transparent Electronics, 2008.
9. Moustafa, Y., "X-ray Diffraction in Crystals," Mansoura University, 2015.
10. Altamirano, D. C., Torres, G., Castanedo, R., Jimenez, O., Marquez, J., & Jimenez, S., "Influence of Al Content on Optical Properties of ZnO Thin Films Obtained by Sol-Gel Technique," Superficies, Vol. 13, p. 66, 2001.
11. "Bragg's Law," ChemLibreTexts, Retrieved 2021.
12. Mondal, S., Kanta, K. P., & Mitra, P., "Preparation of Al-doped ZnO Thin Film by SILAR," Journal of Physical Sciences, Vol. 12, p. 221, 2008.

13. Caglar, M., Ilcan, S., & Caglar, Y., "Influence of Substrate Temperature on Structural and Electrical Properties of ZnO Films," Trakya University Journal of Science, Vol. 7, No. 2, p. 153, 2006.
14. Harris, G. B., "Quantitative Measurement of Preferred Orientation in Rolled Uranium Bars," Philosophical Magazine, Vol. 43, pp. 113–123, 1952.
15. Dhanam, M., Prabhu, R. R., & Manoj, P. K., "Investigations on Chemical Bath Deposited CdSe Thin Films," Materials Chemistry and Physics, Vol. 107, p. 289, 2008.
16. رياض كمال، حسين الحكيم، عادل خضير، أسس الهندسة الإلكترونية، بغداد: مطبعة وزارة التعليم العالي، 1980.
17. Streetman, B. G., & Banerjee, S., Solid State Electronic Devices, 2000.
18. Wolfe, C., Holonyak, N., & Stillman, G. B., Physical Properties of Semiconductors, Prentice Hall, 1989.
19. Omar, M. A., Elementary Solid State Physics: Principles and Applications, 1985.
20. Chopra, K. L., Thin Film Phenomena, McGraw-Hill, New York, 1969.
21. Saporal, B., & Herman, C., Physics of Semiconductors, Springer, 1995.
22. Callister, W. D., Fundamentals of Materials Science and Engineering, 2001.
23. Wagner, M., "Unitary Transformations in Solid State Physics," 1986.

24. Wasna'a, M. A., "Synthesis and Study of Structure and Optical Properties of CdO Thin Films by Electrochemical Deposition," *International Journal of Nanochemistry*, Vol. 2, pp. 1–9, 2016.
25. Lin, J., Zhang, Y., Ye, Z., Gu, X., Pan, X., & Yang, Y., "Nb-doped ZnO Transparent Conducting Films by Pulsed Laser Deposition," *Applied Surface Science*, Vol. 255, pp. 6460–6463, 2009.
26. Dresselhaus, M. S., *Optical Properties of Solids, Part II*, 1998.
27. Phillips, J. C., *Bonds and Bonds in Semiconductors*. 2018
28. Zanatta, A. R., "Revisiting the Optical Bandgap of Semiconductors," *Scientific Reports*, Vol. 9, Article 11225, 2019.
29. رسل بدري ، تكنولوجيا الأغشية الرقيقة وتطبيقاتها في الخلايا الشمسية، جامعة القادسية،
.2018
30. Mao, J., Wang, E., Wang, H., Ouyang, M., Chen, Y., & Hu, H., "Progress in Metal Corrosion Mechanism and Protective Coating Technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 185, 2023.
31. Mattox, D. M., *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, 2nd ed., 2010.
32. Mahan, J. E., *Physical Vapor Deposition of Thin Films*, Wiley, 2000.
33. Wasa, K., Kitabatake, M., & Adachi, H., *Thin Film Materials Technology: Sputtering of Compound Materials*, Springer, 2004.
34. Chapman, B., *Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching*, Wiley, 1980.
35. Swann, S., "Magnetron Sputtering," *Physics in Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 67–75, 1988.

36. Chapman, Brian, Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching, John Wiley & Sons, New York, 1980.
37. Pierson, H. O., Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD), 2nd ed., 1999.
38. Smith, D. L., Thin-Film Deposition: Principles and Practice, McGraw-Hill, 1995.