الفصل السابع

الأغشية الرفيعة أو الرقائق أو الأفلام الرقيقة[١]

الأفلام الرقيقة عبارة عن طبقة رقيقة من مادة يتراوح سمكها بين جزء من النانومتر (أحادي الطبقة) الى عدة ميكرومتر – من أهم التطبيقات التي تستفيد من تكنولوجيا الرقائق الرفيعة` مواد الطلاء الضوئية وعناصر أشباه الموصلات الإلكترونية مثل المرآة المنزلية، عادة هى طلاء طبقة معدنية رقيقة على الجزء الخلفي من لوح من الزجاج على شكل واجهة لعكس الصور٠ يستخدم الطلاء بالفضة لإنتاج المرايا بغشاء رقيق جدا (أقل من ٥٠ نانومتر سمك) لإنتاج مرايا ذات إتجاهين٠ يزداد أداء آلية الطلاء الضوئي[٢] مثل الإنعكاس عندما يكون الطلاء بغشاء رقيق متكون من عدة طبقات ذات سمك ومعامل إنكسار متفاوت أو بجسيمات نانوية من مواد عازلة ذات التكوين النانو الهجين وبالمثل ، التكوين المتكرر لطبقات رقيقة من مواد مختلفة بالتناوب تشكل مجتمعة ما يسمى التكوين البلورى الأمثل الذي يستغل هذه الظاهرة للحبس الكمى[٣] بتقييد الظواهر الإلكترونية إلى بعدين أثنين٠ ويجري العمل على إنتاج الأغشية الرقيقة من مواد فيرومغناطيسية ومواد فيروكهربائية[٤] لإستخدامها كذاكرة للكمبيوتر٠ كما يجري تطبيقه على المستحضرات الصيدلانية، وأيضا تستخدم تكنولوجيا الأغشية الرقيقة لإنتاج بطاريات وخلايا شمسية رقيقة٠ تستخدم الأغشية

---

[١] أحد المراجع من موسوعة Wikipedia, the free encyclopedia من خلال شبكة الإنترنت

[٢] المصطلح (antireflective coatings or AR,) يعنى الإنعكاس والمشار له (AR) هو طلاء مضاد للإنعكاس الضوئي يستخدم على سطح العدسات وغيرها من العناصر البصرية

[٣] المصطلح (Quantum confinement) الحبس الكمى يمكن ملاحظتة عندما يكون قطر المادة هو نفس حجم الطول الموجي دي بروجلى (de Broglie) الدالة على موجه الإلكترون٠ عندما تكون خواص المواد الإلكترونية والضوئية تنحرف كثيرا عن تلك المواد فى كتلة المادة (bulk materials)

[٤] تستخدم الأفلام الرقيقة من المواد الفيرو مغناطيسية وفيروكهربائية فى ذاكرات الكومبيوتر

الرقيقة المصنعة من الخزف على نطاق واسع لصلابتها العالية نسبيا وقد لاقى هذا النوع من الطلاء بطبقات رقيقة الإهتمام لحماية سطوح المعدات وآلات القطع ضد التآكل والأكسدة٠

٧ – ١ الترسيب :

آلية لترسيب طبقة رقيقة على سطح تسمى الترسيب للأغشية الرقيقة – فهى تقنية لترسيب طبقة رقيقة من مادة على ركيزة أو على طبقة سبق ترسيبها٠ كلمة "رقيقة" هى مصطلح نسبي٠ تتحكم معظم تقنيات الترسيب في سمك الطبقة المراد ترسيبها فى حدود عشرات من النانومتر٠ يسمح الشعاع الجزيئي[٥] بترسيب طبقة واحدة من الذرات في كل مرة٠

تقنيات الترسيب مفيدة في صناعة البصريات (الطلاء العاكس والمضاد للإنعكاس، أو لزجاج التنظيف الذاتي)، الإلكترونيات (طبقات المواد الموصلة والعازلة ومواد أشباه الموصلات ونماذج الدوائر المتكاملة)، وأيضا تستخدم فى مجال التعبئة والتغليف (التغليف بشرائح الألومنيوم)[٦] ، وفي الفن المعاصر[٧] (انظر أعمال بيل لاري)٠ وتستخدم عمليات مماثلة في بعض الأحيان حيث لا يكون للسمك أهمية: فعلى سبيل المثال، فى طلاء المعادن بالطلاء الكهربائي، وترسيب طبقات من السليكون واليورانيوم المخصب بواسطة عملية شبيهة بترسيب الأبخرة الكيميائية[٨]٠ تندرج تقنيات الترسيب في فئتين عريضتين، إعتماداً

---

[٥] مصطلح الشعاع الجزيئى (Molecular beam epitaxy) يسمح بترسيب طبقة واحدة من الذرات في نفس الوقت

[٦] هذا الطلاء أرق بكثير مما يمكن أن يتم بشرائح معدنية في نطاق ٠.٥ ميكرومتر. هذا الطلاء لن يتلاشى أو يتغير اللون مع مرور الوقت. بينما مكونات بولى بروبلين (polypropylene) والبولي ايثلين تيرفاليت (polyethylene terephthalate) والمشار لها (PET) هى الأكثر الأفلام شيوعاً للطلاء المعدنى، وتستخدم أيضا مواد مثل نيلون (nylon) وبولى بروبالين الخام (cast polypropylene)

[٧] عناوين الفن لاري بيل (Larry Bell's art addresses) هى العلاقة بين فن الكائنات والبيئة المحيطة من خلال خصائص النحت ةالإنعكاس٠ (Bell's art) فن بيل كثيراً ما يرتبط مع الضوء والفضاء

[٨] المصطلح (CVD) ترسيب البخار الكيميائي (Chemical vapor deposition) هى معالجة كيميائية تستخدم لإنتاج مواد صلبة بجودة وأداء عالي

على ما إذا كانت هذه العملية في المقام الأول الكيميائية أو الفيزيائية ٠ تندرج تقنيات الترسيب في فئتين عريضتين، إعتماداً على ما إذا كانت هذه العملية في المقام الأول الكيميائية أو الفيزيائية٠

❖ الترسيب الكيماوى:

تخضع السوائل لتغيرات كيميائية على السطوح تاركةً طبقة صلبة٠ على سبيل المثال تشكيل السناج (الهباب) على السطوح الباردة عند وضعها داخل لهب ، مع قليل من الإعتبار للإتجاه فى تقنيات الترسيب الكيميائي تميل الأغشية الرقيقة لتكوين ترسيبات بغض النظر عن الإتجاهات ويصنف الترسيب الكيميائي كما يلى:

- يعتمد الطلاء على المواد السابق تسييلها غالبا فى محلول من الماء مع ملح المعدن المراد ترسيبة٠ كما أن بعض عمليات الطلاء تتم بمحاليل سابقة التجهيز (عادة للمعادن النبيلة)، وتعتبر تقنية الطلاء الكهربائى هى الآلية التجاريةً الأكثر إنتشارا إلا أنها لم تستخدم في معالجة وتجهيز مواد أشباه الموصلات لسنوات عديدة – كما إنتشرت آلية الطلاء الكهربائى مع زيادة إستخدام تقنيات الصقل والتلميع الميكانيكية والكيميائية٠
- الترسيب بالمحاليل الكيميائية أو الترسيب بالحمامات الكيميائية التى تستخدم السوائل المعدة سابقا وهى عادة محاليل المساحيق الفلزية الذائبة في مذيب عضوي[٩] ٠ وهى عملية غير مكلفة نسبيا لإنتاج طبقات رقيقة بسيطة وقادرة على إنتاج تكوينات المراحل البلورية الدقيقة٠ تسمى هذه التقنية أيضا بطريقة المحاليل الجلاتينية أو الهلامية[١٠]٠ يستخدم الطلاء أو الصب الحلزونى[١١] لسائل أو محلول هلامى سبق تكوينة عند سرعة

---

[٩] ترسيب المحاليل الكيميائية – Chemical solution deposition (CSD) أو حمام الترسيب الكيميائي – Chemical bath deposition (CBD) يستخدم سائلكموثشر مبدئى ، عادة محلول من مسحوق المواد الفلزية (organometallic) مذابة فى المذيبات العضوية

[١٠] تعرف بأسلوب المحلول الهلامى (sol–gel) المصطلح (sol) بمعنى محلول يميل تدريجيا نحو تشكيل شكل هلامى

[١١] تستخدم آلية الطلاء الدوار (Spin coating) أو الصب الدوار (spin casting) سائل أو محلول هلامى للترسيب على ركيزة ملساء وهو بعد ذلك ينتشر بسرعة طرد مركزى عالية على الركيزة

عالية لنشر المحلول على الشريحة المراد الترسيب عليها. يعتمد السمك النهائى للطبقة المرسبة على سرعة تكوين المحلول ولزوجة السائل الهلامى كما يمكن عمل ترسبات متكررة لزيادة سمك الطبقات المطلوبة. تستخدم المعالجة الحرارية غالباً لتكوين طبقات مرسبة بلورية من مواد غير متبلورة.

- تستخدم آلية الترسيب بالأبخرة الكيميائية فى المرحلة القبل الغازية ً**هاليد أو هيدريد العنصر المراد ترسيبه. كما تستخدم أبخرة المواد المعدنية العضوية**[١٢] **فى ترسيب طبقات من هذه المواد غالباً ما تستخدم ضغوط منخفضة جداً فى عمليات الترسيب.**
- تستخدم آلية الترسيب الأبخرة الكيميائية المحسنة بالبلازما[١٣] بخار مؤين أو البلازما السابق إعدادها. **تعتمد آلية** الترسيب الأبخرة الكيميائية المحسنة بالبلازما على مصادر كهرومغناطيسية (تيار كهربائى– الإثارة بالترددات الميكروووية) بدلا من التفاعلات الكيميائية لإنتاج البلازما.
- تستخدم آلية الترسيب طبقة ذرية[١٤] لغازات سبق إعدادها لتكوين طبقة واحدة رقيقة فى الوقت الواحد. **يتم تقسيم العملية إلى نصفى تفاعلين يتم تشغيلهم بالتسلسل وتكرارهم لكل طبقة، من أجل ضمان تشبع الطبقة الكلية قبل بداية الطبقة التالية. ولذلك، يتم وضع أحد مادتى التفاعل أولاً، وثم توضع مادة التفاعل الثانية، يحدث تفاعل كيميائي خلالها على الركيزة أو السطح لتشكيل التكوين المطلوب. وكنتيجة لتدرج الخطوات ، فإن هذه العملية أبطأ من آلية الترسيب الأبخرة الكيميائية لكن يمكن تشغيلها عند درجات حرارة منخفضة،**

---

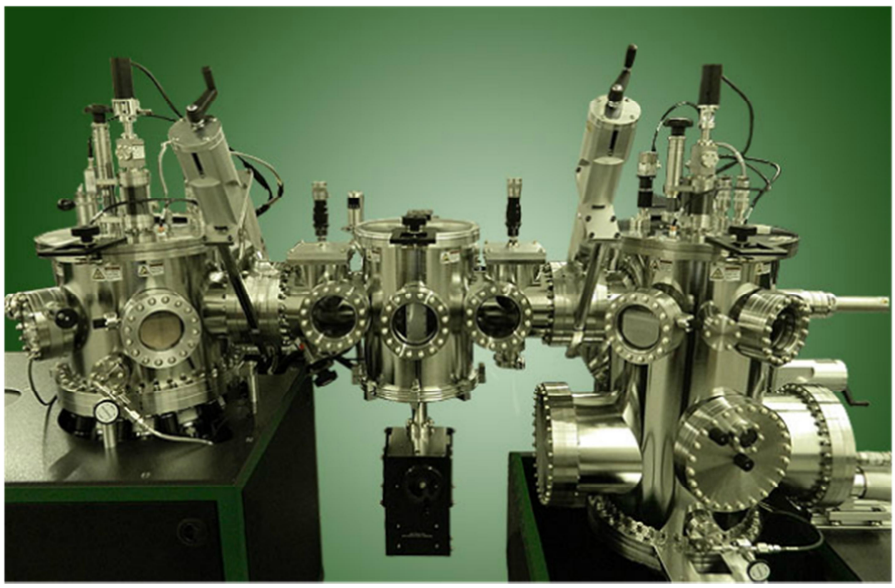
[١٢] **خواص ألية الترسيب الكيميائى لأبخرة المواد الفلزية(MOCVD) (organic deposition chemical vapor metal**

[١٣] **تستخدم ألية الترسيب الكيميائى للأبخرة المحسنة بالبلازما (PECVD) – Plasma enhanced CVD بخار متأين**

[١٤] **آلية ترسيب طبقة الذرية (ALD) Atomic layer deposition تستخدم غازات سابقة الإعداد لترسيب طبقة واحدة لفيلم رقيق مثالى فى المر الواحدة**

➢ **ما هو "التبخير الحراري"؟**

التبخر الحراري هو أحد أبسط التقنيات المادية لآليات ترسيب البخار (الترسيب الفيزيائي للبخار) ٠أساسا هو تسخين المواد في غرفة مفرغة حتى تكتسب الذرات السطحية طاقة كافية لترك السطح ٠ عند هذه النقطة تجتاز الذرات السطحية الغرفة المفرغة٠ عند طاقة حرارية أقل من إلكترون فولت واحد – يتم وضع الركيزة فوق المادة المراد تبخيرها (متوسط المسافات ٢٠٠ ملم إلى ١ متر)



الشكل(٧-١) ألية الترسيب بالتبخير الفزيائى من شركة أوريون

❖ **الترسيب المادى أو الفيزيائى:**

تستخدم آلية الترسيب المادي أو الفيزيائى الوسائل الميكانيكية أو الكهروميكانيكية أو الحرارية لإنتاج طبقة رقيقة من المواد الصلبة٠ نظم الترسيب التجارية تتطلب بيئة بخار ذو ضغط منخفض وتعمل تقنية الترسيب الفيزيائي للبخار[١٥] بوضع المواد المراد ترسيبها في بيئة نشطة، حيث تهرب جزيئات المواد من السطح٠ تواجه جزيئات المواد ببرودة السطح المطلوب الترسيب عليه والذي يستمد الطاقة من هذه الجسيمات عند وصولها، مما يسمح

[١٥] الترسيب الفيزيائى للأبخرة (**PVD**) physical vapor deposition

بتشكيل طبقة صلبة٠ ويعمل النظام بكامله في حجيرة مفرغة من الهواء ، حتى يسمح للجسيمات بالحركة بحرية قدر الإمكان٠ حيث أن الجزيئات تميل إلى إتباع مسار مستقيم، فإن الطبقات المرسبة بتقنية الترسيب الفيزيائي عادة يمكن توجيهها وتشمل :

- تقنية التبخير الحرارى

تستخدم سخان كهربائى لصهر المواد ورفع ضغط بخارها إلى النطاق المطلوب٠ ويتم هذا في حجيرة ذات تفريغ عالى من الهواء للسماح للبخار للوصول إلى الركيزة دون التفاعل معها أو التفاعل مع ذرات الغاز الحامل فى الغلاف المفرغ ٠ ويمكن ترسيب مواد ذات ضغط بخار عالى دون تلوث الطبقة المرسبة٠ يمثل تكوين الحزمة الجزيئية[١٦] شكل متطور من تقنية التبخير الحراري.

- التبخير بشعاع إلكترون[١٧]

هو آلية ترسيب فيزيائى للبخار حيث يتولد شعاع من الجسيمات ذات الطاقة العالية من فتيلة أو مدفع إلكترون موجه لجزء صغير من المادة بواسطة مجال كهربائى أو مغناطيسى ليصطدم بالمادة المراد تبخيرها (على سبيل المثال كريات من الذهب) وتبخيرها داخل حجيرة مفرغة٠ عندما يتم تسخين المادة عن طريق نقل الطاقة تكتسب ذرات السطح طاقة تكفي لترك السطح وتجتاز الحجيرة المفرغة وتترسب على ركيزة مثبتة أعلى المادة المراد تبخيرها عند طاقة حرارية أقل من إلكترون – فولت واحد وحيث أن الحرارة غير موحدة فإنه يمكن ترسيب مواد ذات ضغط بخار منخفض٠ ينحنى الشعاع عادة بزاوية ٢٧٠ درجة لضمان عدم

---

[١٦] آلية ترسيب الشعاع الجزيئي (**MBE**) **Molecular beam** epitaxy إحدى طرق لترسيب بلورات مفردة (single crystals)

[١٧] الترسيب الفيزيائى للبخار (**PVD**) يصف مجموعة متنوعة من أساليب الترسيب فى الفراغ التي يمكن أن تستخدم لإنتاج الأفلام الرقيقة٠ الترسيب الفيزيائى للبخار يستخدم عملية فيزيائية مثل التسخين أو التناثر (sputtering) لإنتاج بخار مواد، ومن ثم يتم ترسيبه على ركيزة أو سطح المراد تغطيته٠

تعرض فتيلة التسخين بالمدفع لمجال البخار الناتج٠ معدلات الترسيب النموذجية لشعاع إلكترون[١٨] تتراوح من ١ إلى ١٠ نانومتر في الثانية الواحدة وأن متوسط المسافة بين التارجت والركيزة من ٣٠٠ مم الى واحد متر٠

الشكل(٧-٢) منظومة التبخير بشعاع إلكترون

- تكوين الحزم الجزيئية[١٦]

يمكن توجيه تيارات شعاعية بطيئة من أحد العناصر الى الركيزة لذلك تترسب طبقة ذرية واحدة في الوقت الواحد كما يمكن عادة ترسيب المركبات مثل الجاليوم أرسنيد بطبقات متكررة لعنصرين أولا لعنصر واحد مثلا الجاليوم ثم ترسيب العنصر الثانى من مادة الخراصين وتكرار عمليات ترسيب الطبقات للسمك والتكوين المطلوب – تعتبر هذه التقنية كيميائية وأيضا فيزيائية٠ يمكن توليد شعاع المواد بواسطة تقنيات الوسائل الفيزيائية بإستخدام الأفران أو بتقنيات التفاعلات الكيميائية بمادة كيميائية٠

[١٨] الترسيب الفيزيائى للبخار بآلية شعاع الإلكترون (EBPVD) Electron Beam Physical Vapor Deposition هى أحد الأشكال للترسيب الفيزيائى للبخار حيث يتم قذف التارجت (أنود) المستهدف بوابل شعاع إلكترون

- **التناثر**[١٩]

يعتمد على البلازما غالبا من الغازات الخاملة مثل الأرجون أو النيتروجين أو الأكسجين لقصف مادة التارجت فتتناثر ذرات قليلة في كل مرة – يوضع التارجت عند درجة حرارة منخفضة نسبيا وحيث أن تقنية التناثر ليست مثل آليات التبخر الحرارى مما يجعلها أحد آليات الترسيب الأكثر مرونة٠ وتعتبر تقنية التناثر ذات أهمية بشكل خاص لترسيب مواد المركبات أو المواد المختلطة٠ حيث أن مكونات المركبات تميل إلى التبخر بنسب ومعدلات مختلفة٠ وتستخدم تقنية التناثر على نطاق واسع في التطبيقات البصرية كما تستخدم فى تصنيع جميع أنواع الإسطوانات المدمجة[٢٠] **للكومبيوتر وتعتبر تقنية التناثر أسلوب سريع مع توفير عناصر التحكم فى سمك الطبقة المرسبة٠**

- **تقنية الترسيب بأستخدام نبضات الليزر**[٢١]

هى عملية تبخير سطح المواد بتوجيه نبضات الليزر المركزة على سطح المادة المستهدفة والحصول على البلازما المكونة من جزيئات المادة ثم تحويلها إلى غاز قبل أن تصل إلى الركيزة٠

- **آلية الترسيب الكهروديناميكى (الترسيب بالرذاذ الكهربائى)**[٢٢]

تعتبر تقنية جديدة نسبيا لترسيب الأغشية أو الطبقات الرفيعة٠السائل المراد ترسيبه أما في شكل محلول من جسيمات نانو أو ببساطة محلول، وتتم التغذية من خلال فوهة شعرية صغيرة عادة ما تكون معدنية متصلة بجهد كهربائى عالي٠ الركيزة التي سيتم ترسيب الفيلم

---

[١٩] التناثر هو آلية حيث الجسيمات يتم إخراجها من مادة صلبة التى تمثل الهدف بسبب قصف الهدف بالجزيئات الغازات النشطة

[٢٠] الإسطوانات المدمجة (CD) و الإسطوانات الرقمية متعددة الاستخدامات digital versatile disc (DVD) و إسطوانات الفيديو الرقمية (digital video disc) و إسطوانات الأشعة الزرقاء (BD, BRD) Blu-ray or Blu-ray Disc جميعها تنسيق تخزين بيانات إسطوانات ضوئية رقمية

[٢١] نظم الترسيب بنبضات الليزر Pulsed Laser Deposition (PLD) عادة تستخدم نابض إثارة مركز لتبخير جزء صغير من المادة الصلبة المستهدفة في محيط مفرغ لترسيب طبقة رقيقة بنفس التركيب الكيميائي كمادة الهدف الأصلية.

[٢٢] الرذاذ الكهربائى (spray electro) هو جهاز يستخدم الكهرباء لنشر محلول حبيبات دقيقة ٠ يسمى هذا الأسلوب في بعض الأحيان طاقة كهربائية ديناميكية (dynamic hydro electro)

عليها متصلة كهربائيا بالأرض٠ من خلال تأثير المجال الكهربائي، يخرج السائل من الفوهة متخذا شكل بوقي (مخروط تايلور)[٢٣] ٠ يخرج من أعلى المخروط رذاذ دقيق يفتت المحلول إلى قطيرات دقيقة جدا ذات شحنات موجبة تحت تأثير العلاقة الرياضية (رايليغ)[٢٤] وفي نهاية المطاف يتم ترسيبها على الركيزة كطبقة رقيقة موحدة٠

الشكل(٧-٣) أنظمة الطلاء

- التبخير بالقوس الكهربائى :

تقنية الترسيب بالقوس الكاثودي[٢٥] وهو نوع من تقنيات الترسيب بشعاع أيون – يتم تفريغ حجيرة التشغيل من خلال جهد منخفض حيث يتم تكوين قوس كهربائي بجهد عالى فينتج عدد كبير من الإلكترونات بين الكاثود والركيزة٠ يتحرك القوس أعلى الكاثود لتبخير منتظم٠ تتميز تقنية القوس الكهربائى بكثافة طاقة عالية ناتجة من التأين (٣٠ – ١٠٠%) فتنتج منطقة بلازما من الأيونات المشحونة والجسيمات المحايدة والجزيئات الماكرو ويمكن تسريع الأيونات نحو الركيزة وقد تفقد الطاقة بالتصادم فى البلازما إذا ارتفع ضغط الغاز٠

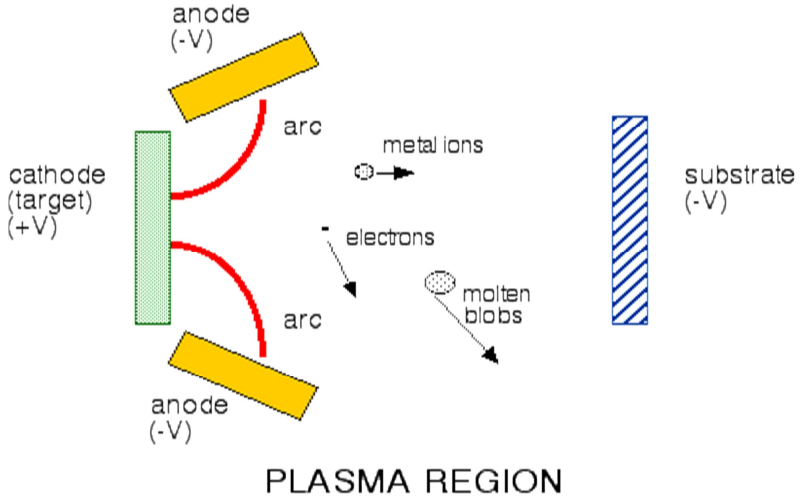
---

[٢٣] يكتسب الجسم السائل شكل بوقي يشار إليه بمخروط تايلور (Taylor cone) بزاوية ٤٩.٣ °.

[٢٤] التقدير الأعلى للشحنات فى النظم الكروية والإسطوانية يتم تحديدة بحدود رايليغ (Rayleigh limits)

[٢٥] ترسيب الطلاء الصلب بقوس – التبخر (PVD) أحد الحلول الكافية لزيادة عمر الأدوات والمكونات التي تستخدم في العديد من التطبيقات الصناعية المختلفة.

إذا نتج غاز تفاعلى أثناء عملية التبخر، ينتج تفكك وتأين وإثارة أثناء التفاعل مع الأيونات عالية الطاقة فى ١٠٠ إلكترون – فولت وسيتم ترسيب طبقة من المركبات الكيميائية ٠



الشكل(٧-٤) تقنية الترسيب بالقوس الكاثودي

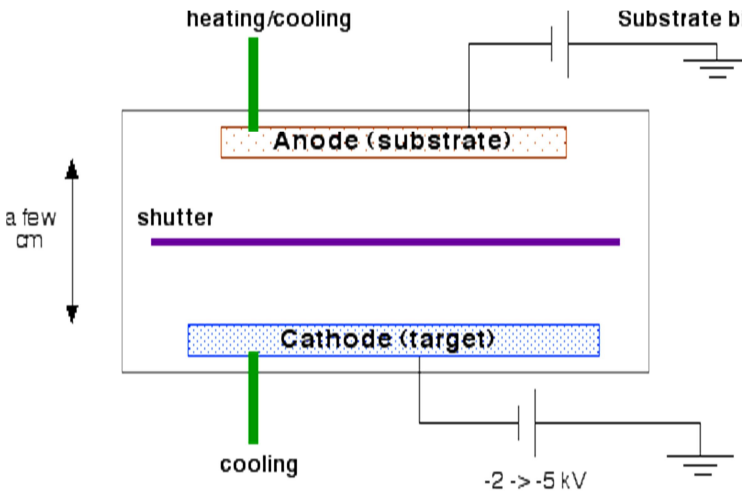
يتم تبريد الأنود لمنع ترسيب مادة الأنود مع تجنب الكريات المنصهره التى تصل إلى الركيزة بإنحناء الأيونات بإستخدام المجالات المغناطيسية٠ تتمثل المعملات المؤثرة لتقنية الترسيب بالقوس الكاثودي فى درجات حرارة تسخين وتبريد الركيزة – درجات التسخين من تصادمات الأيونات – ضبط درجات الحرارة عند الترسيب على الركيزة لتجميع أيونات أكثر – معدل الترسيب – التحكم فى تيار القوس – طاقة الجسيمات٠

٧ – ١ – ٣ الآليات الأساسية للترسيب بالتناثر

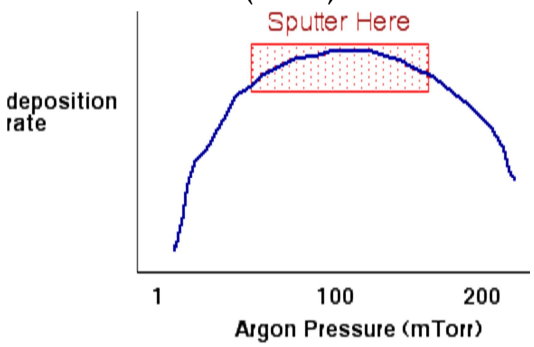
تتمثل معاملات آلية التناثر فى :

- ضغط االغاز الحامل الأرجون حوالي ١٠٠ ميلى تور كحل وسط بين العدد المتزايد من أيونات (الأرجون) وزيادة تشتت أيونات غاز الأرجون مع ذرات الأرجون المحايدة – إذا أمكن زيادة عدد الأيونات دون زيادة عدد الذرات المحايدة، يمكن التشغيل عند ضغط منخفض – القيم النموذجية جهد التناثر من -٢ الى -٥ كيلو فولت ومساهمتها فى تعظيم معدل التناثر ٠

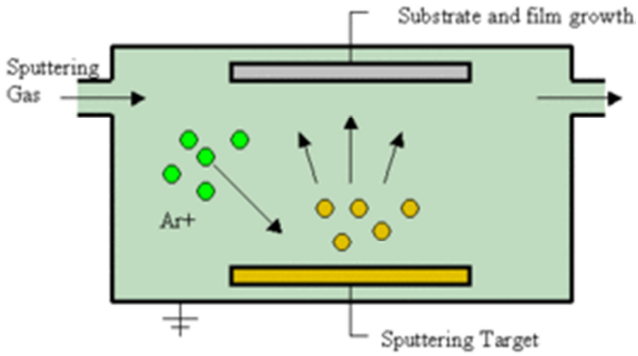
- الجهد الكهربائى لتغذية الركيزة – تقصف الركيزة بالإلكترونات والأيونات من التارجت والبلازما – يتناثر الفيلم عند الترسيب – ترسيب الذرات المحايدة بشكل مستقل – تغذية الركيزة بجهد سالب للتحكم فى تغيير خصائص الفيلم.
- يتم التحكم فى درجة حرارة الركيزة من خلال سخان – المادة المرسبة تتزايد مع زيادة جهد التناثر وتتناقص مع زيادة جهد التحيز على الركيزة.
- يتغير معدل الترسيب مع ضغط الغاز الحامل (الأرجون) ويتزايد عادة مع الجهد العالي. كما تتزايد طاقة الجسيمات مع زيادة جهد التناثر وتتناقص مع زيادة جهد التحيز على الركيزة كما تتناقص مع زيادة ضغط الغاز الحامل (الأرجون)



الشكل(٧-٥) تقنية التناثر



الشكل(٧-٦) معدل الترسيب مع ضغط الغاز الحامل



الشكل(٧-٧) تقنية تناثر

تستخدم تقنية التناثر لترسيب طبقات رقيقة من مادة على سطح الركيزة٠ تبدأ عملية التناثر بتوليد بلازما غازية ومن ثم تسريع الأيونات هذه البلازما على مادة الهدف (تارجت)٠ تتآكل مادة الهدف بقصف الأيونات عن طريق نقل الطاقة ويتم إخراجها في شكل جسيمات محايدة – أما على شكل الذرات الفردية ، أو مجموعات من الذرات أو الجزيئات٠ تنتقل الجسيمات المحايدة الخارجة من الهدف في خط مستقيم إلا إذا تلامست مع الجزيئات الأخرى أو مع سطح قريب٠ إذا تم وضع "ركيزة" مثل رقاقة سيلكون في مسار هذه الجسيمات سوف تترسب طبقة رقيقة من مادة التارجت عليها٠ على الرغم من أن آلية التناثر كما هو موضح أعلاه تبدو بديهية نسبيا، ولكن قد يكون الإلمام بالمصطلحات والمفاهيم التالية يعطي فهم أشمل لهذه العملية٠ توصف آلية التناثر أحياناً بأنها "الحالة الرابعة للمادة" (الثلاثة الأولى هى الحالة الصلبة والسائلة والغازية) والبلازما الغازية تمثل الحالة الرابعة وهى حالة ديناميكية حيث تتواجد ذرات الغاز المحايدة والأيونات والإلكترونات والفوتونات في حالة متوازنة تقريبا في وقت واحد٠ كمصدر للطاقة المطلوبة لآلية التناثر (على سبيل المثال الترددات اللاسلكية، التيار المباشر، أو بقدرات الميجا وات) وبالتالي الحفاظ على حالة البلازما بينما تفقد البلازما جزء من الطاقة إلى المناطق المحيطة بها ٠

الشكل(٧-٨) حاملات تثبيت الركيزة

يمكن إنشاء هذه الحالة الديناميكية بضخ غاز (مثل غاز الأرجون) إلى محيط سبق تفريغه والسماح بوصول الضغط إلى مستوى معين (على سبيل المثال ١و٠ تور) وإدخال قطب كهربائي فى حجيرة ضغط الغاز المنخفض بإستخدام مداخل تغذية للتفريغ٠ تتبع آلية الترسيب بالتناثر آليات الترسيب الفيزيائى للأبخرة بهدف ترسيب طبقات رقيقة بالتناثر٠ وهذا ينطوي على إخراج ذرات المواد من "الهدف" وإستقبالها على "ركيزة" مثل رقاقة سيلكون٠ الذرات المخرجة من الهدف ذات توزيع طاقة على نطاق واسع ، عادة ما يصل إلى عشرات إلكترون فولت عند درجات حرارة عالية٠ عادة يتم تأين جزء صغير من الجسيمات الخارجة من الهدف ما يقارب ١% التى تخرج في خطوط مستقيمة وتصطدم بقوة على الركيزة أو بجدران المحيط المفرغ مسببة للتناثر٠ تتصادم الأيونات مع ذرات الغاز عند ضغط عالي الذي يتصرف كوسيط نقل يتحرك بالإنتشار ويصل الى الركيزة أو جدار المحيط المفرغ ويتكثف بعد إجتياز مسافة عشوائية٠ ويمكن التحكم فى المنظومة من بدأ تصادم الأيونات ذات الطاقة العالية الى الحركة الحرارية للطاقة المنخفضة بتغيير ضغط الغاز٠ الغاز المستخدم فى آلية التناثر في كثير من الأحيان هو غاز خامل مثل الأرجون٠ وللحصول على قوة دفع فعالة يجب أن يكون الوزن الذرى للغاز المستخدم قريب من الوزن الذري لمادة الهدف٠ لترسيب العناصر الخفيفة يفضل إستخدام غاز النيون بينما يفضل إستخدام غاز الكربتون أو الزينون لترسيب العناصر الثقيلة٠ يمكن أيضا إستخدام الغازات التفاعلية لترسيب مواد المركبات٠ يمكن أن تتشكل ذرات مواد المركبات المتطايرة على سطح الهدف أو على الركيزة إستناداً إلى

معاملات آلية الترسيب٠ توفر العديد من المعاملات التي تتحكم في الترسيب بالتناثر تجعل من آلية التناثر عملية معقدة ولكن أيضا يمكن للخبراء بدرجة كبيرة السيطرة على نمو التكوين المجهرى للفيلم أو الطبقة المرسبة٠

- **إستخدامات التناثر : تستخدم آلية** التناثر على نطاق واسع فى تطبيقات عديدة منها:

- صناعة أشباه الموصلات لترسيب طبقات رقيقة من مواد مختلفة في تجهيز الدوائر المتكاملة وهى أسلوب مثالي لترسيب نقط التوصيلات المعدنية فى صناعة الترانزستورات الرقيقة بسبب درجات الحرارة المنخفضة على الركيزة المستخدمة٠
- فى التطبيقات البصرية[٢٦] وطلاء الزجاج بطبقات رقيقة لمنع الإنعكاس والطلاء منخفض الإبتعاثية[٢٧] على الزجاج المستخدم في نوافذ الزجاج المزدوج٠
- الطلاء متعدد الطبقات التي تحتوي على الفضة وأكاسيد المعادن مثل أكسيد الزنك أو أكسيد القصدير أو ثاني أكسيد التيتانيوم كما يستخدم فى الطلاء بالذهب٠
- طلاء أدوات القطع بإستخدام النيتريدات مثل نتريد التيتانيوم لزيادة صلابتها،
- لترسيب طبقة معدنية أثناء تصنيع الأقراص المضغوطة وأقراص الفيديو الرقمية ٠
- إحدى العمليات الرئيسية لتصنيع موجهات[٢٨] الموجات الضوئية وزيادة كفاءة الخلايا الشمسية والضوئية ٠كما يستخدم فى طلاء شرائح الفحص للميكروسكوب الإلكتروني.

---

[٢٦] الطلاء المضاد للانعكاس (AR) هو نوع من الطلاء الضوئي المستخدم على سطح العدسات والعناصر البصرية الأخرى للحد من الإنعكاس٠ يحسن كفاءة أنظمة التصوير النموذجية حيث يتم فقد ضوء أقل٠ .في الأنظمة المعقدة مثل تلسكوب، فإن الحد من إنعكاسات يحسن تباين الصورة بالقضاء على الضوء الشارد٠ .وهذا مهم بشكل خاص في علم الفلك

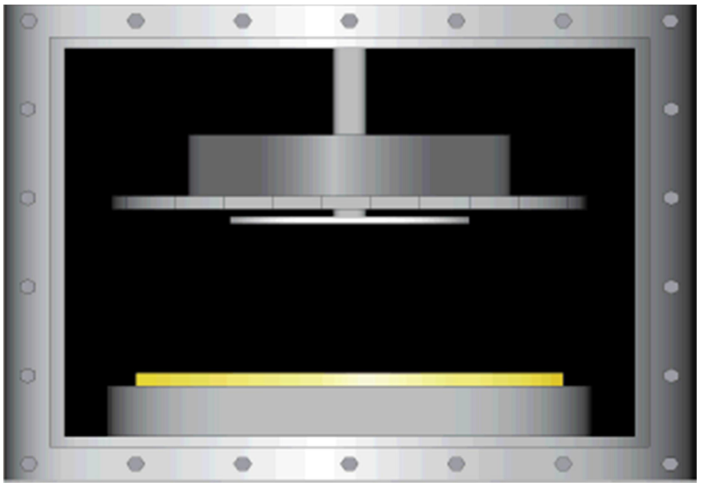
[٢٧] الابتعاثية (emissivity) السطحية لمادة هو فعاليتها في مجال الطاقة التي تنبعث منها مثل الإشعاع الحراري. الإشعاع الحراري هو الضوء، ولكن للأجسام القريبة درجة حرارة الغرفة هذا الضوء هو الأشعة تحت الحمراء وغير مرئيً للعين البشرية

[٢٨] الدليل الموجي هو بنية دليل الموجات، مثل الموجات الكهرومغناطيسية أو الموجات الصوتية

➢ أنواع الترسيب بآليات التناثر

- **التناثر بآلية الصمام الثنائي**

فى هذه الآلية – سيتم تسريع "الإلكترونات الحرة" فورا بعيداً عن القطب (الكاثود) المشحون سلبا٠ تقترب الإلكترونات المعجلة فى مسارها من نهج إلكترونات الغلاف الخارجي لذرات الغاز المحايد ، وتتصرف كأنها شحنة تدفع إلكترونات ذرات الغاز٠ مما يجعل ذرات الغاز كهربائياً غير متوازنة حيث أن الأيونات أكثر فولتية موجبة من الإلكترونات المشحونة سلبيا وبالتالي فإنه لم تعد ذرات الغاز محايدة ولكن مشحونة بأيونات موجبة (مثلاً ذرات أرجون$^{+}$)٠ عند هذه النقطة تتسارع الأيونات الموجبة في الكاثود المشحون سلبا وتصطدم بالسطح وتفجر المادة الغير مترابطة (وتعرف التناثر بالصمام الثنائي) وتتزايد الإلكترونات الحرة أكثر نتيجة لإنتقال الطاقة٠ تغذي الإلكترونات الحرة الإضافية تكوين الأيونات لإستمرار البلازما٠ الإلكترونات الحرة تجد طريقها مرة أخرى إلى الإلكترون الخارجي للأيونات مما يجعلها ذرات غاز محايد٠ نظراً لقوانين حفظ الطاقة، عند عودة هذه الإلكترونات إلى حالة التعادل، تكتسب ذرات الغاز المحايدة الطاقة مما يستوجب فقد كمية طاقة مساوية في شكل فوتون. وجود هذه الفوتونات هو السبب في توهج البلازما٠



الشكل(٧-٩) التناثر بآلية الصمام الثنائي

- **التناثر المباشر**

فى تكوين نظام التناثر المباشر تكون الركيزة مثبتة أو تتحرك مباشرة أمام وفي موازاة منبع المجنترون للتارجت٠ كقاعدة عامة ينبغي أن يكون القطر أو الطول حوالي ٢٠% إلى ٣٠% أكبر من قطر الركيزة لتحقيق إنتظام السطوح – (كما فى حالة منابع المجنترون المستطيلة) ٠ على سبيل المثال لو كان قطر أو طول الركيزة ١٠٠ مم فينبغى أن يكون قطر أو طول التارجت ١٥٠ مم للحصول على فيلم رقيق منتظم السطح بنسبة + / – ٥% ٠ على الرغم من أن هذا التكوين أقل مرونة بكثير وأكثر تكلفة من آلية الثناثر بآلية التنسيق المحورى المركز، فإنه مفيد في التطبيقات التي تتطلب معدلات ترسيب قصوى على سبيل المثال ترسيب سطوح معدنية على شرائح أشباه الموصلات التى تستخدم ركيزة كبيرة المساحة مثل شاشات اللوحات المسطحة[٢٩] وتطبيقات أخرى تتطلب ترسيب خطوط البصر[٣٠]

الشكل(٧–١٠) مثل شاشات اللوحات المسطحة

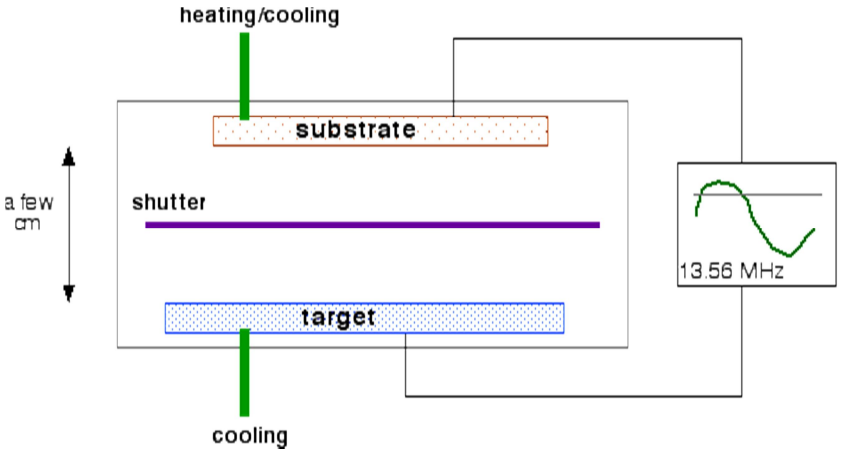
---

[٢٩] وبعد سنوات من النمو السريع، تتباطأ صناعة شاشات العرض المسطحة **flat–panel display (FPDs)** ٠ وهذا بسبب تباطؤ الاقتصاد في جميع أنحاء العالم

[٣٠] يتم توجيه هذا الاختراع إلى أسلوب لانطلاقة الأفلام الرقيقة من المعادن الممتدة أفقياً أو بقناع للحفر والإزالة على شكل حرف (T) ٠ على وجه الخصوص، الإمتداد الأفقى المحكوم يمكن التشكيل على قناع النقش بعد أن تمت عملية النقش والإزالة

إستخدام ألية التناثر المباشر للبحث والتطوير له ما يبرره في بعض الحالات ولكن كثيرا ما يتم إختياره حيث أن الباحثين لهم خبرة بهذه الآلية. مثل آلية التناثر بالصمام الثنائي حيث أنه نظام التناثر الأصلي. من المهم تقييم الإحتياجات الخاصة قبل الإختيار بين آليات الترسيب المباشر والثناثر بآلية التنسيق المحورى المركز.

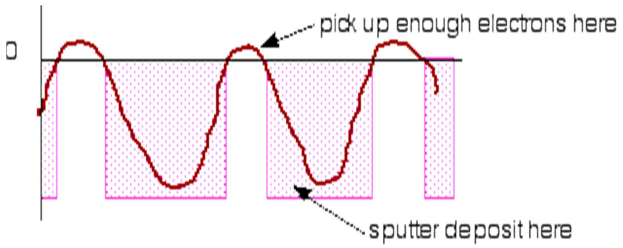
- تقنية الترسيب بترددات الراديو



الشكل(٧-١١) آلية الترسيب بترددات الراديو

تستخدم آلية الترسيب بترددات الراديو لتجنب تراكم الشحنات الموجبة على التارجت بإستخدم الجهد المتردد وتحتاج الى ١٠^{١٢} فولت وهى جيدة لترسيب المواد العازلة.

target	-	-	-	+	-	-	-	+	-
substrate + chamber	+	+	+	-	+	+	+	-	+

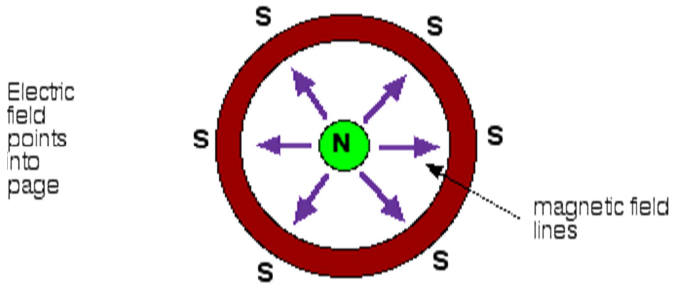


الشكل(٧-١٢) تجنب تراكم الشحنات الموجبة

يحدث الترسيب بالتناثر عندما يكون التارجت ذات شحنة سالبة – الركيزة والحجرة المفرغة تمثل قطب كهربائي عالى جداً ولذلك لا يحدث تناثر من الركيزة – الترددات المستخدمة أقل من حوالي ٥٠ كيلو هرتز– الإلكترونات والايونات في البلازما متحركة كلاهما يتبع التبديل بين الأنود والكاثود – أسهل للحفاظ على البلازما في ظل هذه الظروف يمكن أن تعمل على ضغط منخفض للغاز الحامل (الأرجون) – أقل فى تصادمات الغاز ٠

- التناثر بالمجنترون

تعانى تقنية "التناثر بالصمام الثنائي" من مشكلتين رئيسيتين وهما بطيء معدل الترسيب وسعة نطاق تصادمات الإلكترون على الركيزة مما يسبب ضررا فى التكوين البلورى لمادة الهدف نتيجة الحرارة العالية الناتجة من التصادم٠ تطوير آلية التناثر بالمجنترون أخذت فى الإعتبار المشكلتين في وقت واحد وذلك بإستخدام مغناطيس وراء الكاثود لإعتراض الإلكترونات الحرة فوق سطح الهدف مباشرة وتتجمع في حقل مغناطيسي بالفرب من الكاثود، وبالتالى فإن هذه الإلكترونات ليست حرة لقصف الركيزة إلا بقدر ضئيل حيث درجة حرارة الركيزة منخفضة٠



الشكل(٧-١٣) تقاطع المجالات الكهربائية والمغناطيسية من خلال وضع مغناطيس

في نفس الوقت فإن المسار الموجه الواسع النطاق والتوائة لهذه الإلكترونات عندما حوصرت في المجال المغناطيسي، عززت إحتمال تأين جزيء الغاز المحايد الأرجون٠ هذه الزيادة في الأيونات المتاحة إلى حد كبير تزيد معدل تآكل مادة الهدف المستهدف ترسيبها على الركيزة٠ يستخدم الترسيب بالتناثر بالمجنترون مع آليات التناثر المباشر أو بترددات

الراديو وهى ذات معدل تناثر مرتفع مع ضغط منخفض لغاز الأرجون (أقل من ٥و٠ ميلى تور) مما يقلل تصادمات الغاز٠ ومن النماذج الأكثر شيوعاً : تقاطع المجالات الكهربائية والمغناطيسية من خلال وضع مغناطيس (٢٠٠ جاوس) خلف التارجت٠

- **ماذا يعنى منبع التناثر بالمجنترون٠**

منبع التناثر بالمجنترون هو أداة لترسيب طبقة رقيقة من مواد ملحقة بالمحيط المفرغ عن طريق ماسك أو منافذ التغذية ويتم تبريده بالماء مع حامل الكاثود/الهدف المتضمن مصفوفة مغناطيسية معزولة٠ ويعمل العديد من تصميمات وتكوينات المغناطيس لمعالجة الإحتياجات الخاصة لآلية التناثر٠

الشكل(٧-١٤) حامل الكاثود/الهدف

- آلية التناثر بالمجنترون بدفعات عالية الطاقة[٣١]

تستخدم هذه الآلية لترسيب البخار الفزيائى التى تعتمد على آلية التناثر بالمجنترون وتستخدم كثافة طاقة عالية جدا تتراوح بالكيلو وات/ سم^{٢} فى نبضات قصيرة بأجزاء عشرية من الميكرو ثانية عند ترددات منخفضة (نسبة زمن التوصيل الى القطع أقل من ١٠%) ٠ السمات المميزة لهذه الآلية أنها ذات درجة عالية من التأين للمعدن المتناثر ومعدل مرتفع

---

[٣١] **التناثر بنبضات المجنترون عالية االطاقة (HPPMS) High Power Impulse Magnetron Sputtering هى آلية لترسيب الأفلام الرقيقة بالبخار الفيزيائية المستندة إلى الترسيب بالتناثر بالمجنترون ويستخدم كثافة طاقة عالية للغاية بالكيلو وات/سم^{٢} بنبضات قصيرة بعشرات الميكرو ثانية عند موجات قصيرة (low duty cycle) بنسبة تبديل زمنى أقل من ١٠% ٠ السمات المميزة لآلية التناثر بنبضات المجنترون عالية االطاقة أنها على درجة عالية من التأين للمعدن وذات نسبة عالية من تفكك الغاز الجزيئي الذي ينتج عن كثافة عالية من الأفلام المرسبة٠**

من تفكك الغاز الجزيئي الذي يؤدي إلى كثافة عالية للأفلام المرسبة٠ تتزايد درجة التأين والتفكك وفقا لذروة القدرة المطبقة على الكاثود٠ يتحدد الحد الأقصى للعملية بالإنتقال من مرحلة التوهج لمرحلة القوس الكهربائى٠ يتم تحديد ذروة القدرة ودورة العمل للحفاظ على قدرة الكاثود المتوسطة المشابهة لآلية التناثر التقليدية (١ – ١٠ وات /سم^{٢}) وتستخدم هذه الآلية فى تطبيقات مثل:

- **تعزيز المعالجة المسبقة للركيزة للإلتصاق قبل عملية ترسيب الطلاء (إزالة السطوح)**
- **ترسيب الأغشية الرقيقة بكثافة عالية مجهرية**

➢ **وحدات مصفوفات المغناطيس بمنبع التناثر بالمجنترون**

وحدات المغناطيس هى عبارة عن منبع خاص للتناثر بالمجنترون قامت به المؤسسة الدولية لنظم الأفلام الرقيقة[٣٢] فى عام ١٩٩١ للسماح للمستخدم النهائي لتحويل الحقل المغناطيسي للمنبع إلى مجموعة متنوعة من التكوينات٠

الشكل(٧–١٥) مصدر تناثر المجنترون

على سبيل المثال، يمكن تكوين كل منبع ليعمل في:

- **الوضع المتوازن لتقليل أيونات أو الإلكترونات التى تقصف الركيزة ٠**
- **الوضع الغير متوازن لإستخدام قصف الأيون المتزامن لتعزيز خصائص الفيلم**

---

[٣٢] **المؤسسة الدولية لنظم الأفلام الرقيقة (AJA) إشتملت على آليات التناثر بالمجنترون والتبخير بشعاع الإلكترون والتبخر الحراري ونظم طحن الأيون**

- **وضع المواد المغناطيسية للمساعدة فى تشبع المجال المغناطيسي والتغلب على تأثير السحب لمادة الهدف المغناطيسي وتسمح بترسيب مواد لأهداف ذات نفاذية عالية مثل الحديد.**

غالباً ما تستخدم مصادر تناثر المجنترون[٣٣] التى تستخدم االمجالات الكهربائية والمغناطيسية لحصر جسيمات البلازما[٣٤] المشحونة قريبة من سطح الهدف٠ في المجال المغناطيسي تتبع الإلكترونات مسارات حلزونية حول خطوط الحقل المغناطيسي التى تمر بكثير من المصادمات المؤينة مع جزيئات الغاز قرب سطح الهدف٠ وعندما تتفرغ مادة الهدف من شحناتها يظهر شكل تآكل على سطح الهدف٠ عادة ما يكون الغاز المستخدم غاز خامل مثل الأرجون٠ أيونات غاز الأرجون الإضافية التي نشأت نتيجة لهذه الصدمات تؤدى إلى زيادة معدل الترسيب وإستمرار البلازما عند ضغط أقل٠ الذرات المتناثرة متعادلة الشحنات وبالتالى لا تتأثر بالحقل المغناطيسى٠ يمكن تجنب تراكم الشحنات على الأهداف المعزولة بإستخدام آلية التناثر بالترددات اللاسلكية٠ حيث تتغير فولتية الأنود – الكاثود بمعدل مرتفع غالبا ٦٥و١٣ ميجا هرتز٠ تستخدم آلية التناثر بالترددات اللاسلكية لإنتاج طبقات أكاسيد المواد العازلة ولكن مع التكلفة الإضافية لمصدر الترددات اللاسلكية ومطابقة دوائر المعاوقة٠ تسبب الحقول المغنطيسية المتسربة من الأهداف المغناطيسية خلل فى عملية التناثر خاصة عند تصميم مدافع التناثر فى وجود المغناطيس الدائم المستخدم في التعويض٠

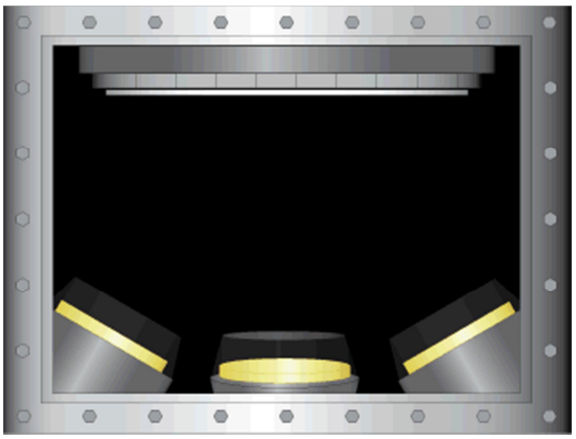
---

[٣٣] تجويف المجنترون (cavity magnetron) هو صمام مفرغ ذو طاقة عالية يولد موجات قصيرة تستخدم التفاعل تيار الإلكترونات مع المجال المغناطيسى بينما تتحرك في سلسلة من تجاويف معدنية مفتوحة والمشار لها تجويف المرنانات (cavity resonators)

[٣٤] البلازما هى الحالة الرابعة لأساسية للمواد الصلبة، السائلة، والغاز. ثم البلازما٠ خصائص البلازما لا تتشابه مع الحالات الثلاث الأخرى٠ يمكن إنشاء البلازما بتسخين غاز أو إخضاعه لحقل كهرومغناطيسي قوي يستخدم مع الليزر أو مولدات الموجات القصيرة٠ هذا يقلل أو يزيد من عدد الإلكترونات، وتنشأ الجسيمات المشحونة الموجبة أو السالبة التى تسمى الأيونات مصحوبه بتفكك الروابط الجزيئية،

- **الثناثر بآلية التنسيق المحورى المركز**

الثناثر بآلية التنسيق المحورى المركز هى بتجهيز منابع تناثر مجنترون متعددة مرتبة في نمط دائري محدد مستهدفة نقطة محورية مشتركة٠ عند وضع الركيزة قرب مركز التنسيق والذى يتحرك بشكل دائرى حول محوره ، فمن الممكن ترسيب طبقات موحدة ذات البلورة الواحدة وأيضا ترسيب سبائك متعددة الطبقات٠ ويعتبر الثناثر بآلية التنسيق المحورى أسلوب شائع للغاية للأسباب التالية:



الشكل(٧-١٦) آلية التنسيق المحورى المركز

- **يحقق ترسيب موحد إستثنائي على الركائز قطر كل منها يساوى مرتين قطر التارجت٠**
- **القدرة على السيطرة على نمو الطبقات المتعاقبة بدءاً بسمك أقل من طبقة أحادية الذرة إلى سمك يصل الى آلاف أنجستروم بسهولة٠**
- **يقلل زمن التأخير بين الطبقات المتلاحقة حيث أن الركيزة لا تحتاج إعادة وضعها فى مكانها مع كل طبقة يراد ترسيبها٠ فإن كل غطاء منبع ينفتح حوالي ثانية واحدة بعد إغلاق غطاء المنبع الآخر وبالتالي الحفاظ على سطح الفيلم المرسب على الركيزة "في البلازما"٠ هذه الآلية تحافظ على أوجه السطوح خالية من التلوث بالغاز المتبقي ٠**
- **الحرية الكاملة لنمو سبائك بسهولة من أي عدد من المواد بأي نسبة مع مراقبة دقيقة٠ هذه الآلية مثالية لتطبيقات الكيمياء التوافيقيه والإستفادة المثلى من التكوين المادى لمادة الأهداف لتطبيقات الإنتاج بالجملة٠**

- هذه الآلية محكمة وتثبت الركيزة في إتجاه محوري مما يسمح للمزيد من الحرية والتطور في تصميم حامل الركيزة وتبقى التكاليف الإجمالية قليلة٠
- معدل ترسيب منخفض للمواد فمن الممكن لزيادة المعدل تشغيل هدفين أو ثلاثة من المادة نفسها بالتناوب في نفس الوقت من مصدر تغذية طاقة واحد٠

٧ – ١ – ٢ آليات التناثر التفاعلى

فى آليات التناثر التفاعلى يتكون الفيلم المرسب بالتفاعلات الكيميائية بين مادة الهدف والغاز (أكسجين أو نيتروجين) ويمكن ضبط تدفق الغاز الذى يتم إدخاله الى أنبوبة التفريغ كما يمكن إضافة غاز الى الحجرة المفرغة أثناء الترسيب (بالتبخير أو التناثر) ٠ يتم تصنيع الأفلام من أكاسيد ونتريدات المواد بإستخدام التناثر التفاعلى٠ يمكن التحكم في تكوين الفيلم بتغير الضغوط النسبية للغازات الخاملة والتفاعلية٠ يعتبر التكوين البلورى للفيلم معياراً هاما لتحسين الخصائص الوظيفية مثل الإجهاد في نتريد السيلكون ومعامل الإنكسار لأكاسيد السيلكون٠ يحدث التفاعل الكيميائي على الركيزة والتارجت مع مراعاة إمكانية إضعاف التارجت إذا كانت التفاعلات الكيميائية أسرع من معدل التناثر٠

- **الترسيب بمساعدة الأيون[٣٥]**

فى آليات الترسيب بمساعدة الأيون تتعرض الركيزة الى شعاع أيون ثانى يعمل عند قدرات أقل من مدفع التناثر٠عادة يستخدم مصدر شعاع الأيون لكوفمان لإنتاج الشعاع الثانوى ذو فولتية منخفضة نسبيا (٥٠-٣٠٠ إلكترون- فولت)٠ تستخدم ألية الترسيب بمساعدة الأيون لترسيب الكربون فى الشكل التكوينى للماس[٣٦] على ركيزة٠ ذرات الكربون التى تم

---

[٣٥] في آلية الترسيب بمساعدة أيون (IAD) ion-assisted deposition تتعرض الركيزة لشعاع أيون ثانوي يعمل بطاقة أقل من مدفع التناثر٠ عادة ما تكون مصدر كوفمان (Kaufman) كالتى تستخدم فى مصدر شعاع الأيون (IBS)٠ آلية الترسيب بمساعدة أيون تستخدم لترسيب الكربون فى تكوين مماثل الى الماس على الركيزة٠

[٣٦] في علم المعادن، الماس غير قابلة للكسر وهو فى حالة إستقرار اللوتروبي الكربونى (allotrope stable meta a of carbon) ، حيث يتم ترتيب ذرات الكربون في تباين هيكل بلوري مكعب تتمحور حول الوجه (face-centered cubic) ويسمى شعرية الماس (diamond lattice)

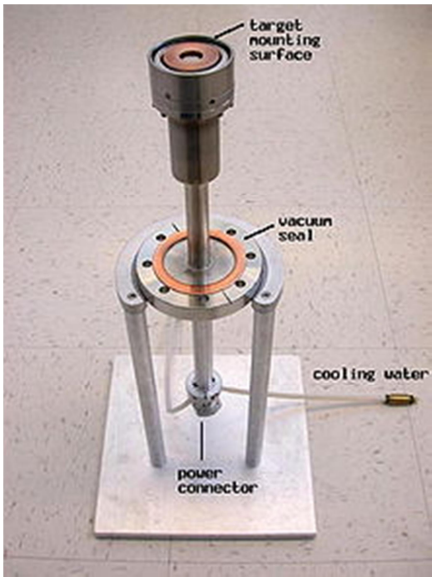
ترسيبها على الركيزة والتي تفشل في الترابط بشكل صحيح في الشكل التكوينى لبلورات الماس سوف تترابط بتأثير الشعاع الثانوى٠ أستخدمت مؤسسة ناسا هذه الآلية لترسيب طبقات من الماس على ألواح التوربينات فى الثمانينات٠ كما تستخدم هذه الآلية فى تطبيقات صناعية مهمة مثل إنشاء هرمي لثلاثي الكربون الغير متبلور لطلاء أسطح الأقراص الصلبة وطلاء المعدات الطبية بطبقة من نتريدات المعادن المستخدمة لزرعها فى الجسم البشرى لأغراض طبية٠ كما تستخدم تقنية الترسيب بمساعدة الأيون مع آليات التبخير أو التناثر (أو الترسيب الكيميائى) وتقود الى إعادة الترتيب الفزيائى للغيلم المرسب مع إمكانية تغيير خواص الفيلم للأحسن أو الأسوأ كما أن إضطراب النمو العمودي يتطلب حوالي ٢٠ إلكترون– فولت كطاقة مضافة لترسيب كل ذرة ٠

الشكل(٧–١٧) منظومة تناثر من مؤسسة أوريون

فى آلية التناثر بشعاع الأيون[٣٧] فإن الهدف خارج منبع إنبعاث الأيونات الذى يعمل بدون أي مجال مغناطيسي٠ في منبع إنبعاث الأيونات لكوفمان يتم توليد الأيونات بواسطة التصادم مع الإلكترونات المحجوزة بالمجال المغناطيسي كما هو الحال في أنبوبة مجنترون حيث تتسارع الأيونات تحت تأثير الحقل الكهربائي المنبثق عن شبكة نحو الهدف٠

---

[٣٧] مصدر أيون هو جهاز الذي يولد الأيونات الذرية والجزيئية



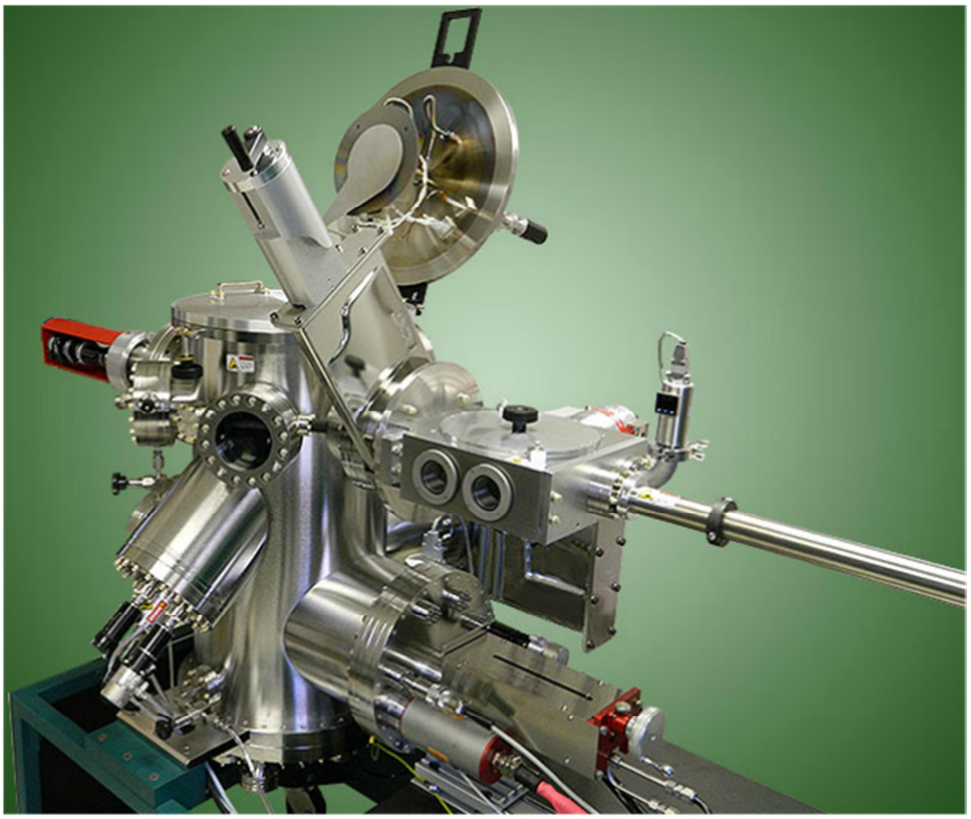
الشكل(٧-١٨) مسدس الرش ماجنترون يوضح آلية تركيب الهدف ، ومداخل التغذية التفريغ وموصل الطاقة وخطوط المياه. ويستخدم هذا التصميم الهدف على شكل قرص ٠

يتم إبطال مفعول الأيونات الخارجة من المنبع بالإلكترونات من منبع خارجى آخر٠ آلية التناثر بشعاع الأيون لها ميزة إمكانية التحكم فى طاقة الأيونات وتدفقها بشكل مستقل ٠ نظراً لتصادمات المجالات بالهدف الذى يتكون من الذرات المحايدة فإنة يمكن أن تتناثر الذرات سواء من أهداف من مواد عازلة أو موصلة ٠

آلية التناثر بشعاع الأيون لها تطبيقات فى تصنيع غشاء رقيق لمحركات الأقراص٠ يتم تدرج الضغط بين مصدر شعاع الأيون وحجرة العينة بواسطة وضع مدخل الغاز عند المنبع وإطلاق القذائف من خلال أنبوب فى داخل غرفة العينة٠ وهذا يوفر الغاز ويقلل من التلوث في تطبيقات التفريغ الفائق[٣٨]٠ والعيب الرئيسي فى آلية التناثر بشعاع الأيون الحاجة للكثير من أعمال الصيانة اللازمة للحفاظ على تشغيل مصدر شعاع الأيون٠

---

[٣٨] التفريغ الفائق هو نظام فراغ يتميز بضغوط أقل من ١٠$^{-٧}$ باسكال أو ١٠٠ نانو باسكال (١٠$^{-٩}$ ضغط جوى) ٠ يحتاج التفريغ الفائق (UHV) إستخدام مواد غير عادية للمعدات وتسخين النظام بأكمله الى أعلى من ١٠٠ درجة مئوية لعدة ساعات ") لإزالة المياه وبقايا الغازات الأخرى التي تمتص على أسطح الحجرة المفرغة٠



الشكل(٧-١٩) آلية التناثر بشعاع الأيون

- **التناثر بإستخدام هدف عالى**

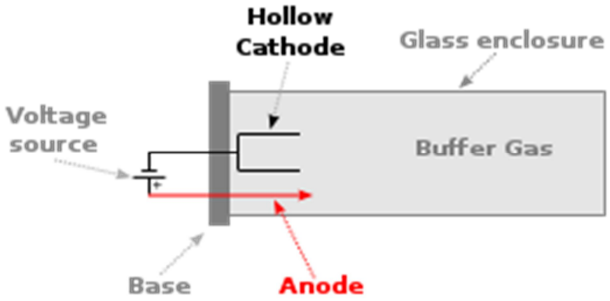
يمكن أن يحدث التناثر بالتوليد البعيد للبلازما عالية الكثافة وذلك بفتح غرفة جانبية إلى غرفة العملية الرئيسية التى تشتمل على الهدف والركيزة المراد الترسيب عليها حيث أن البلازما ستتولد عن بعد وليس من الهدف نفسه (كما هو الحال في آلية التناثر بالمجنترون التقليدية) فإن تيار الأيونات إلى الهدف لا يعتمد على الجهد الواقع على الهدف.

- **آلية التناثر بتدفق الغاز**

تستخدم آلية التناثر بتدفق الغاز وتشتمل على كاثود أجوف له نفس التأثير الذي تعمل به مصابيح الكاثود الجوفاء[٣٩].

---

[٣٩] مصباح الكاثود الأجوف (HCL) hollow-cathode lamp نوع من اللمبات المستخدمة في الفيزياء والكيمياء كمصدر لخط طيفي spectral line source على سبيل المثال مطياف الامتصاص الذري atomic absorption spectrometers و مولف الترددات لمصادر الضوء مثل أشعة الليزر.



الشكل(٦-٢٠) مصابيح الكاثود الجوفاء

فى هذه الآلية يستخدم غاز الأرجون من خلال فتحه في معدن يتعرض لقدرة كهربائية سلبية تحدث البلازما المعززة فى الكاثود المجوف٠ يؤدي ذلك الى تدفق عالي من الأيونات على السطوح المحيطة بها ولها تأثير كبير على آلية التناثر٠ إستناداً إلى الكاثود المجوف فإن الغاز المار فى عملية التناثر مرتبط بمعدلات الترسيب الكبيرة التى تصل إلى بعض الميكرومتر/دقيقة

➢ مقارنة بين تقنيتى التبخير والتناثر

التبخير	التناثر
ذات طاقة منخفضة	ذات طاقة عالية
• محيط تفريغ عالى • قليل من التصادمات • خطوط الترسيب مرئية • قليل من الغاز فى الفيلم	• محيط تفريغ منخفض – مسار بلازما • كثير التصادمات • خطوط الترسيب مرئية أقل • يشتمل الفيلم على غاز
حجم أكبر للجزيئات	حجم أصغر للجزيئات
ترتيب أقل للجزيئات	ترتيب كثير للجزيئات

.

.

٧ – ١ – ٣ الخلايا الشمسية بتكنولوجيا الأغشية أو الأفلام الرقيقة[٤٠]

الشكل(٧–٢٠) رقائق السليكون بتكنولوجيا الأغشية أو الأفلام الرقيقة يتم تثبيتها على الأسطح

الشكل(٧–٢١) خلايا شمسية من مواد[٤١] نحاس–إنديوم– جاليوم–سلينيد مرسبة على مساند بلاستيك مرنة ولوحات تلوريد صلبة مجهزة على بنية مدعمة

الشكل(٧–٢٢) خلايا شمسية ذات طبقة رقيقة من مواد لتجميع حرارة الشمس على أسطح المنازل

نماذج لخلايا شمسية من الجيل الثانى للطاقة الشمسية

---

[٤٠] المرجع المستخدم مصدرة موسوعة ويكيبيديا (Wikipedia, the free encyclopedia)

[٤١] هناك ثلاثة أنواع أساسية من الألواح الشمسية بآلية الأفلام الرقيقة في السوق اليوم: السليكون الغير متبلور (a–Si) كادميوم تيلوريد (CdTe) و سيلينيد نحاس إنديوم غاليوم (CIS/CIGS)

الخلايا الشمسية بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة من الجيل الثاني التي يتم تصنيعها بترسيب طبقة واحدة أو أكثر أو غشاء أو فيلم رقيق من المواد الكهربائية الضوئية على ركيزة مثل الزجاج أو البلاستيك أو المعدن٠ تستخدم فى تصنيع الخلايا الشمسية تجارياً فيلم أو غشاء رقيق بالعديد من التقنيات والعديد من المواد مثل الكادميوم تيلوريد – نحاس إنديوم غاليوم سيلينيد – السليكون غير متبلور٠ يتراوح سمك الفيلم من بضعة نانومتر الى عشرات الميكرومتر، إستخدم الجيل الأول من الخلايا الشمسية التقليدية رقائق السليكون المتبلور بسمك يصل إلى ٢٠٠ ميكرون مما ساهم فى مرونة الخلايا الشمسية لقلة وزنها، وتستخدم فى المبانى المتكاملة بالطاقة الشمسية ومواد الزجاج الضوئى شبه الشفاف على الشبابيك، تستخدم التطبيقات التجارية الأخرى الألواح الشمسية الرقيقة الجامدة (بين طبقتين من الزجاج) في بعض من أكبر محطات توليد الطاقة الشمسية في العالم٠

الأفلام الرقيقة دائماً أرخص ولكن أقل كفاءة من التكنولوجيا التقليدية من رقائق السليكون المتبلور٠ بيد أنها تحسنت كثيرا على مر السنين كما أن جودة وكفاءة الخلايا المصنعة من مواد كادميوم – تلوريد والخلايا المصنعة من مواد نحاس– إنديوم – جاليوم –سلينيد تتجاوز ٢١ في المائة متجاوزه كفاءة الخلايا المصنعة من السليكون المتعدد البلورات٠ إختبار الحياة المتسارع لوحدات الأفلام الرقيقة أظهرت تدهور أسرع إلى حد ما بالمقارنة مع الخلايا الكهروضوئية التقليدية، في حين أنه من المتوقع عموما أن يمتد عمر الخلايا الرقيقة الى ٢٠ سنة أو أكثر٠ وعلى الرغم من هذه التحسينات لم تصل مشاركة السوق فى صناعة الأغشية أو الأفلام الرقيقة إلى أكثر من ٢٠ في المائة في العقدين الماضيين، وقد إنخفضت في السنوات الأخيرة إلى حوالي ٩ في المائة للمنشآت الكهربائية الضوئية في جميع أنحاء العالم في عام ٢٠١٣ – تكنولوجيات الأغشية الرقيقة الأخرى ، التي لا تزال في مرحلة مبكرة من البحوث الجارية أو مع المحدودية التجارية، وغالباً ما تصنف من الجيل الثالث للخلايا

الضوئية وتشمل الخلايا الشمسية من مواد عضوية[٤٢] أو من البوليمر، فضلا عن الخلايا الشمسية المعروفة بإسم (خلايا نقاط الكم[٤٣]، وخلايا النحاس – الزنك–كبريتيد القصدير، وخلايا نانوكريستال[٤٤]، وخلايا الميكرومورف[٤٥] وخلايا لبيروفسكيت[٤٦].

- **تاريخ الخلايا الشمسية بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة :**

الأغشية أو الأفلام الرقيقة معروفة منذ أواخر السبعينات، عندما ظهرت الآلات الحاسبة الشمسية المستخدمة شريط صغير من السليكون الغير متبلور في السوق. والآن هى متاحة في وحدات كبيرة جداً تستخدم في مبانى المنشآت المتكاملة المتطورة وفى نظم السيارات بالطاقة الشمسية بدلا من الوقود. على الرغم من المتوقع أن تقدما كبيرا في سوق تكنولوجيا

---

[٤٢] الصيغة النوعية (dye–sensitized solar cell) للخلية الشمسية (DSSC, DSC or DYSC) منخفضة التكلفة تنتمى إلى مجموعة الخلايا الشمسية بآلية الأفلام الرقيقة. وهى تشكيل لأشباه الموصلات بنظام التصوير الكهروكيميائى.

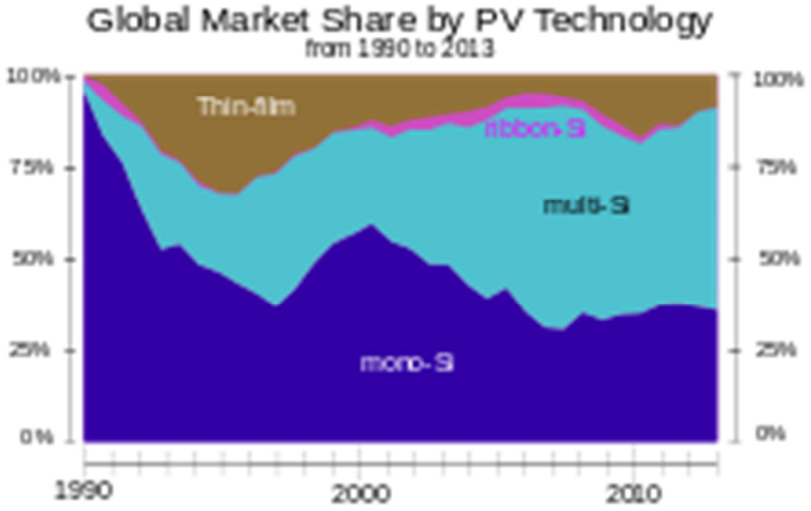
[٤٣] تصميم خلايا الكم الشمسية (quantum dot solar cell) التى تستخدم نقاط الكم كاستيعاب المواد الكهربائية الضوئية. . عبارة عن محاولات لاستبدال المواد مثل السيليكون ومركبات نحاس إنديوم جاليوم سيلينيد (CIGS) أو كادميوم تيلوريوم (CdTe) . نقاط الكم لها فجوة طاقية إنضباطية خلال نطاق واسع من مستويات الطاقة عن طريق تغيير حجم النقاط.

[٤٤] الخلايا الشمسية نانوالبلورات (Nanocrystal solar cells) استناداً إلى الركيزة مع طلاء من بلورات نانو. بلورات النانو من السيلكون – كادميوم تيلوريوم (CdTe) – السيليكون ومركبات نحاس إنديوم جاليوم سيلينيد (CIGS) وغالبا ما تكون الركيزة من السيلكون أو من مواد موصلةعضوية مختلفة. الخلايا الشمسية بآلية نقاط الكم هي البديل من هذا النهج ولكن الاستفادة من تأثير ميكانيكية الكم للحصول على مزيد من الأداء. الصيغة النوعية (dye–sensitized solar cell) للخلية الشمسية هي نهج آخر ذات الصلة، ولكن في حالة هيكة النانو فهى جزء من الركازة.

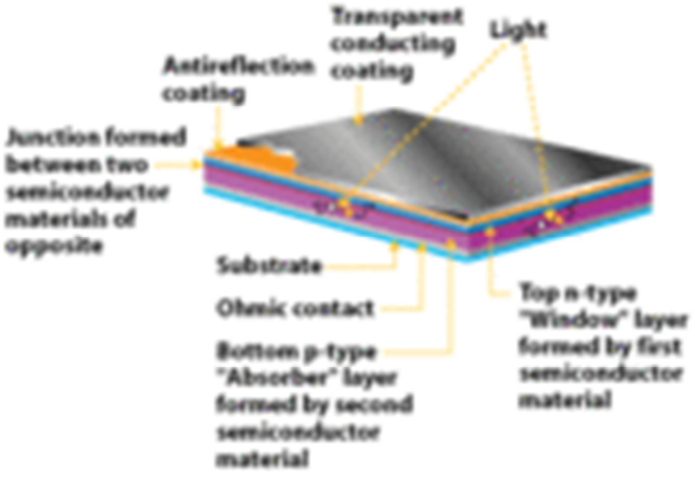
[٤٥] خلايا ميكرومورف (Micro morph) هى خلايا شمسية بآلية الأفلام الرقيقة على أساس تشكيل هندسى لوصلات متعددة (multijunction–architecture) لخليتين شمسيتين فوق بعضها البعض. وفي حين الخلية العلوية رقيقة من السليكون الغير متبلور تمتص الضوء الأزرق، الخلية السفلية من السليكون دقبق البلورات (microcrystalline) والأكثر سمكا تمتص الضوء الأحمر والقريب من الأشعة تحت الحمراء، ويمكن تسميتها الخلية المتراصة جنبا إلى جنب (tandem cell) لتغطية نطاق واسع من الطيف الشمسي(solar spectrum) .

[٤٦] الخلايا الشمسية المعروفة بإسم بيروفسكيتي (perovskite) هى نوع من الخلايا الشمسية الذى يشتمل على مركبات بتكوينات بيروفسكيتي وغالبا ما تكون من الرصاص عضوي وغير عضوي مختلط أو من المواد المستندة إلى هاليد القصدير(tin halide–based) ، كطبقة نشطة لتجميع الضوء

الأغشية الرقيقة يتجاوز تكنولوجيا السيليكون البللوري التقليدي على المدى الطويل إلا أن حصة السوق قد إنخفضت لعدة سنوات حتى الآن٠ بينما في عام ٢٠١٠ عندما كان هناك نقص في الوحدات الفلطو ضوئية التقليدية فقد كانت تكنولوجيا الأفلام الرقيقة تمثل ١٥ % من السوق الإجمالية وانخفضت الى ٨% في عام ٢٠١٤، ومن المتوقع أن تستقرعند ٧% فى عام ٢٠١٥ فصاعدا ومن المتوقع أن تفقد خلايا السليكون الغير متبلور نصف حصتها في السوق بنهاية العقد٠



الشكل(٧-٢٣) حصة السوق من تكنولوجيات الأغشية الرقيقة من حيث الإنتاج السنوي منذ عام ١٩٩٠



الشكل(٧-٢٤) مقطع عرضي لخلية شمسية بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة

إستخدمت تكنولوجيا الأفلام الرقيقة كمية أقل من المواد النشطة في الخلية. يتم ترسيب معظم طبقات المواد النشطة بين لوحين من الزجاج ونظراً لإستخدام وجه واحد من الزجاج فى ألواح السيلكون الشمسية. نجد أن الألواح الشمسية المصنعة بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة أثقل وزنا بمرتين بالمقارنة بألواح السيليكون البللوري، وعلى الرغم من الأثر البيئى المحدد من تحليل دورة الحياة للألواح الشمسية فإن غالبية لوحات الفيلم أقل كفاءة تحويل من ٢-٣ % بالمقارنة بلوحات السليكون المتبلور. تستخدم غالباً ثلاث تكنولوجيات للأغشية الرقيقة للتطبيقات في الهواء الطلق هى الخلايا المصنعة من الكادميوم تيلوريد ، والخلايا المصنعة من نحاس – إنديوم –غاليوم – سلينيد والخلايا المصنعة من السليكون الغير متبلور .

- الخلايا الشمسية الناشئة[٤٧] (الخارجة)

الشكل(٧-٢٥) خلية شمسية سليكون تجريبية القائمة على تطويرها في "مختبرات ساندیا الوطنية"

يصنف مختبر الطاقة المتجددة الوطنية[٤٨]عدد من تكنولوجيات الأغشية الرقيقة الضوئية الناشئة – معظمها لم تطبق تجارياً بعد وهي لا تزال في مرحلة البحث أو التطوير بإستخدام العديد من المواد العضوية، وكثيراً من المركبات المعدنية العضوية ، فضلا عن ركائز من

[٤٧] تعريف تكنولوجيا الجيل الثالث، وهى أقل وضوحاً، عادة ما تكون مخصصة لما يسمى بالتكنولوجيات الناشئة. وتوصف أحياناً بأنها أي تكنولوجيا قادرة على التغلب على حد شوكلي- قويصر(Shockley–Queisser limit) لكفاءة تحويل الطاقة حوالى ٧و٣٣ % لعنصرالوصلة الواحدة.

[٤٨] المختبر الوطني للطاقة المتجددة National Renewable Energy Laboratory (NREL)

المواد الغير العضوية. وعلى الرغم من حقيقة كفائتها الا أنها منخفضة الإستقرار للتطبيقات التجارية وهناك الكثير من البحوث التي إستثمرت في هذه التقنيات كما أنها تحقق الهدف المتمثل في إنتاج خلايا شمسية منخفضة التكلفة وعالية الكفاءة وتشمل الخلايا الضوئية الناشئة وغالباً ما تسمى الخلايا الضوئية للجيل الثالث:

- **خلية شمسية مصنعة من كبريتيد القصدير والنحاس والزنك ومشتقاتها [٤٩]**
- **خلية شمسية مصنعة من مواد عضوية**
- **خلية شمسية لبيروفسكيتى**
- **خلية شمسية من البوليمر**
- **الخلايا الشمسية ذات نقاط الكم**

حظيت الإنجازات في الأبحاث لخلايا بيروفسكيتي بإهتمام شعبى هائل ، حيث إرتفعت كفائتها البحثية مؤخرا لأكثر من ٢٠% كما أنها توفر مجموعة واسعة من التطبيقات منخفضة التكلفة. وبالإضافة إلى ذلك، تستخدم تكنولوجيا ناشئة أخرى يشار لها بمركزات الخلايا الشمسية[٥٠] بإستخدام خلايا عالية الكفاءة، ذات الوصلات المتعددة في منظومة من العدسات البصرية ونظام للتتبع.

- **زيادة كفاءة الخلايا الشمسية**

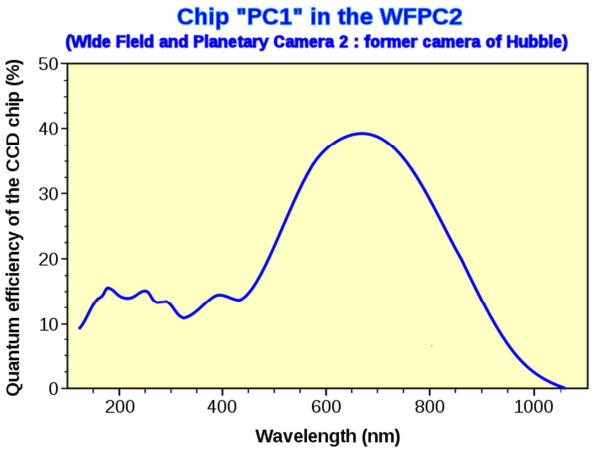
منذ اختراع الخلايا الشمسية من السيليكون الأولى في عام ١٩٥٤ أدت إلى تحسينات تدريجية في وحدات قادرة على تحويل ١٢ إلى ١٨% من أشعة الشمس إلى كهرباء. الخلايا المصنوعة من هذه المواد تميل إلى أن تكون أقل كفاءة من السليكون ولكنها أقل

---

[٤٩] **الخلايا الشمسية نحاس زنك قصدير كبريت (CZTS) والمشتقات نحاس زنك قصدير سيلينيوم (CZTSe) و نحاس زنك قصدير كبريت سيلينيوم (CZTSSe)**

[٥٠] **وحدات الطاقة الشمسية المركزة (CPV) هي تكنولوجيا ضوئية التي تولد الكهرباء من أشعة الشمس، تستخدم العدسات والمرايا المنحنية لتركيز أشعة الشمس على خلية شمسية متعددة الوصلات (MJ) , multi-junction صغيرة، ولكنها عالية الكفاءة. بالإضافة فغالبا تستخدم وحدات الطاقة الشمسية المركزة نظام تتبع شمسى (solar trackers) وفي بعض الأحيان نظام تبريد لزيادة كفاءتها**

تكلفة فى إنتاجها كما أن كفاءة الكم[٥١] أيضا أقل بسبب إنخفاض عدد ناقلات الشحنات لكل فوتون ينشأ٠



الشكل(٧-٢٦) رسم بياني يظهر تباين لكفاءة الكم مع الطول الموجي

أداء وإمكانات المواد لتصنيع الأغشية أو الأقلام الرقيقة مرتفعة، وتصل كفاءة الخلايا الى ١٢ – ٠ % ؛ كفاءة النموذج الأول من ٧ – ١٣%؛ ووصلت كفاءة الخلايا المنتجة الى في حدود ٩%٠ كانت كفاءة نموذج الخلايا الشمسية بالأغشية الرقيقة الأولى أفضل ٢٠.٤% بالمقارنة بكفاءة الخلايا الشمسية التقليدية٠ أعلن مختبر الطاقة المتجددة (نريل) أن التكاليف سوف تنخفض إلى ١٠٠ دولار للمتر المربع فى الإنتاج الكمى، ويمكن أن تتناقص في وقت لاحق الى أقل من ٥٠ دولار/م ٠٢

- **إستيعاب أشعة الشمس**

إستخدمت تقنيات متعددة لزيادة كمية الضوء الذي يدخل في الخلية وتقليل الكمية المفقودة التى تهرب دون الإمتصاص٠ الأسلوب الأكثر وضوحاً لتقليل الفقد إلى أدنى حد تغطية سطح الخلية، وتقليل المساحة التي تمنع الضوء من الوصول إلى الخلية٠ الإمتصاص

---

[٥١] مصطلح كفاءة الكم quantum efficiency (QE) ممكن أن يستخدم فوتونات ناشئة وتحويلها الى الكترونات incident photon to converted electron (IPCE) بعنصر ضوئى حساس أو قد تشيرالى تأثير (TMR effect) من وصلة نفق المغناطيسي (Magnetic Tunnel Junction)

الضعيف للطول الموجي الطويل يمكن أن يقترن بمادة السليكون ويخترق الفيلم عدة مرات لزيادة الإستيعاب٠ وقد وضعت أساليب متعددة لزيادة الإستيعاب بالحد من عدد الفوتونات المتولدة التى تنعكس بعيداً عن سطح الخلية٠ تغطية الخلية الشمسية بطلاء مضاد للإنعكاس إضافي يمكن أن يسبب تدخل مدمر داخل الخلية بتحوير معامل الإنكسار لمادة طلاء السطح٠ التدخل المدمر يلغي الموجه المنعكسة، مما تسبب في دخول كل الفوتونات المتولدة الى داخل الخلية٠ التركيب السطحي[٥٢] هو خيار آخر لزيادة الإستيعاب، ولكن بزيادة التكاليف٠ بتطبيق التلميع السطحى للمواد النشطة يمكن أن يتسبب الضوء المنعكس إلى التصادم على السطح مرة أخرى وبالتالي تقليل الانعكاس٠ التلميع السطحى العاكس الخلفي يمنع الضوء من الهروب عن طريق الجزء خلف الخلية بالإضافة إلى التقليل من فقد الإنعكاس، يمكن أن تكون المواد المستخدمة فى تصنيع الخلايا الشمسية الى حد ذاتها أحد الحلول لإمتصاص كل الفوتونات التي تصل٠ تقنيات المعالجة الحرارية يمكن أن تعزز جودة بلورات خلايا السليكون وبالتالي زيادة الكفاءة٠ يمكن أيضا عمل طبقات خلايا الأفلام الرقيقة لإنشاء خلية شمسية متعددة الوصلات[٥٣] يمكن تصميم الفجوة الطاقية لإستيعاب أفضل لمجموعات مختلفة من الأطوال الموجية، وبالتالى يمكنها إستيعاب نطاق أكبر من الضوء٠ ويمكن إحراز مزيد من التقدم من خلال الإعتبارات الهندسية لأبعاد الخلايا بإستخدام مصفوفات كبيرة ومتوازية من أسلاك من مواد متناهية الصغر تساعد فى إمتصاص حاملات الشحنات ذات طول إنتشار قصير على طول الأسلاك مع الحفاظ على طول الإتجاه الشعاعي وبالتالى فإن إضافة جسيمات نانوية بين الأسلاك تسمح بالتوصيل الكهربائى٠ الأشكال

---

[٥٢] التركيب السطحى، يمكن إستخدام تركيبة مع طلاء مضاد للإنعكاس أو بحد ذاته لتقليل الانعكاس٠ أي خشونة على سطح تقلل الإنعكاس بزيادة فرص الضوء المنعكس مرة أخرى على السطح، بدلاً من الخروج إلى الهواء المحيط٠

[٥٣] الخلايا الشمسية متعددة الوصلات (Multi–junction solar cells (MJ تتكون من وصلات شبه موصل ثنائية (ب –ن) تنتج تيار كهربائى إستجابة لأطوال موجية مختلفة من الضوء٠ إستخدام مواد شبه موصل متعددة تسمح بإمتصاص نطاق أوسع من الأطوال الموجية، وتتسبب فى تحسين إمتصاص لأشعة الشمس مما يزيد كفاءة الطاقة الكهربائية٠

الهندسية لهذه المصفوفات تشكل سطح محكم لإستيعاب مزيدا من الضوء. وبالنظر الى إحصائيات الإنتاج والتكاليف والسوق الكهروضوئية العالمية للتكنولوجيا عام ٢٠١٣ نجد:

خلايا شمسية مصنعة من سيلكون متعدد البلورات ٩و٥٤ %

خلايا شمسية مصنعة من سيلكون أحادى البلورات ٠و٣٦ %

خلايا شمسية مصنعة من مادتى كاديوم – تليريد ١و٥ %

مع التقدم في تكنولوجيا السيليكون البللوري[٥٤] التقليدية في السنوات الأخيرة وإنخفاض تكلفة مخزون الخلايا من بولورات السليكون[٥٥] ، والتي أعقبتها بعد فترة نقص حاد على المستوى العالمى مع زيادة الضغط على الشركات المصنعة لتكنولوجيات الأفلام الرقيقة من السليكون الغير متبلور التجارية، وخلايا تيلوريد الكادميوم، وخلايا نحاس إنديوم غاليوم ديسيلينيد مما أدى إلى إفلاس العديد من الشركات. إعتبارا من عام ٢٠١٣، واصل مصنعي الأغشية الرقيقة مواجهة منافسة الأسعار من شركات تنقية السيليكون الصينية والشركات المصنعة للألواح الشمسية من السليكون التقليدية. وبيعت بعض الشركات جنبا إلى جنب مع براءات الاختراع الخاصة بهم للشركات الصينية بأسعر أقل من التكلفة.

٧ – ١ – ٤ متطلبات السوق

في عام ٢٠١٣ بلغت تكنولوجيا الأفلام الرقيقة حوالي ٩ في المائة في جميع أنحاء العالم، بينما تعدت ٩١ % من السيليكون البللوري (الأحادى ومتعدد البلورات) مع ٥ % من السوق الإجمالية، تتحمل الخلايا الشمسية المصنعة من كادميوم تلوريد أكثر من نصف

---

[٥٤] السيلكون المتبلور (c–Si) مصطلح شامل للتكوين البلورى يشمل سيلكون متعدد البلورات (multi–Si) والسيلكون أحادى البلورات (mono–Si) وهما مادتى الشبه موصل المهيمنة المستخدمة فى تكنولوجيا الطاقة الشمسية لإنتاج الخلايا الشمسية، التي يتم تجميعها في لوحة شمسية وهى جزء من نظام الطاقة الشمسية لتوليد طاقة شمسية من أشعة الشمس

[٥٥] بلورات البولى (Polycrystalline) هى سيلكون متعدد البلورات بدرجة نقاوة عالية وهو أحد درجات السيلكون المستخدم كمادة خام بخلايا الطاقة الشمسية وصناعة الإلكترونيات

السوق لتكنولوجيا الأفلام الرقيقة ، تاركة نسبة ٢ % لتكنولوجيات الخلايا الشمسية المصنعة من السيلكون الغير متبلور والخلايا المصنعة من نحاس إنديوم غاليوم ديسيلينيد ٠

- بصريات الأغشية أو الأفلام الرقيقة

الشكل(٧-٢٧) تكوين المرشحات مزدوجة اللون[٥٦] باستخدام البصريات رقيقة

الشكل(٧-٢٨) التداخل فى الأفلام الرقيقة من أكسيد القصدير إنديوم[٥٧] لإزالة الجليد من على نافذة قمرة القيادة بطائرة إيرباص- سمك الفيلم غير موحد لإزالة الثلج/الصقيع الغير متكافئ

بصريات الأفلام الرقيقة فرع من البصريات يتعامل مع طبقات رقيقة جداً من مواد مختلفة٠ من أجل تصنيع البصريات يتكنولوجيا الأفلام الرقيقة ، يجب أن يكون سمك طبقات المواد بناء على الأطوال الموجية للضوء المرئي فى المواد (حوالي ٥٠٠ نانو متر)٠ يمكن

---

[٥٦] مرشح مزدوج اللون (**dichroic filter**)، ومرشح الأفلام الرقيقة أو مرشح التداخل (interference filter) هو مرشح اللون دقيقة جداً يستخدم لتمرير ضوء نطاق صغير من الألوان بشكل إنتقائي في حين يعكس الألوان الأخرى

[٥٧] أكسيد القصدير إنديوم (ITO) و تكوين ثلاثي من الأنديوم ، القصدير والأكسجين بنسب متفاوتة

أن يكون للطبقات على هذا المستوى خصائص إنعكاسية ملحوظة بسبب تداخل الموجات الضوئية وإختلاف معاملات الإنكسار بين الطبقات (الهواء والركيزة)٠

الشكل(٧-٢٩) تشكيل نمطاً من الضوء الملون بتداخل بين الضوء الأبيض المنعكس من على سطح الأرض من طبقة رقيقة من وقود الديزل على سطح الماء، وانعكاس وقود الديزل بالمياه.

هذه الآثار تغيير أسلوب الإنعكاس ونقل الضوء فى البصريات٠ تعرف هذه التأثيرات بتداخل الطبقات الرفيعة[٥٨] يمكن ملاحظتها في فقاعات الصابون والبقع النفطية٠ التكوينات الدورية الأكثر عمومية، لا تقتصر على الطبقات المستوية والمعروفة بإسم البلورات الضوئية[٥٩]٠ في الصناعة التحويلية، يمكن أن تحقق الأفلام الرقيقة من خلال ترسيب طبقة أو طبقات رقيقة من المواد على الركيزة (عادة من الزجاج)٠ وهذا الأكثر بإستخدام ألية التبخير الفيزيائى ، مثل التبخر أو الترسيب بالتناثر أو عملية كيميائية مثل الترسيب بالأبخرة الكيميائية ٠ تستخدم الأفلام الرقيقة لخلق طبقة طلاء ضوئية. وتشمل الأمثلة ألواح منخفضة

---

١٩ يحدث التداخل الأفلام الرقيقة عند نشوء موجات ضوء منعكسة بالحدود العليا والسفلي للفيلم الرقيق التى تتداخل مع بعضها البعض لتشكل موجه جديدة

٢٠ الكريستال الضوئي هو تكوين نانو ضوئية دوري (periodic optical nanostructure) الذى يؤثر على حركة الفوتونات بنفس الطريقة التكوين الأيوني الى تؤثر على الإلكترونات في المواد الصلبة. تحدث البلورات الضوئية في الطبيعة في شكل تلون الهيكلي (structural coloration) – وفي أشكال مختلفة

الإبتعاثية لزجاج المنازل والسيارات، وطلاء مضاد للإنعكاس على النظارات وعاكس المصابيح الأمامية في السيارات والمرشحات الضوئية عالية الدقة والمرايا.

- الأمثلة التطبيقية فى العالم فى مجال بصريات الأغشية أو الأفلام الرقيقة

يرجع تداخل الأغشية الرقيقة التي يمكن أن ترى على أجنحة الحشرات الى بصريات الأغشية. الأغشية الرقيقة شائعة في العالم الطبيعي. تنتج آثارها الألوان التى ترى في فقاعات الصابون والبقع النفطية، فضلا عن تلون الأجسام لبعض الحيوانات. أجنحة العديد من الحشرات بمثابة أفلام رقيقة بسبب سمك الأجنحة الرفيع جدا . تظهر بوضوح في أجنحة العديد من الذباب والدبابير– في الفراشات، بصريات الغشاء الرقيق مرئيةً عندما تكون الأجنحة نفسها غير مغطاه بتدرجات الجناح،

- العاكسات، مرشحات الحافة والهياكل الدورية

الهياكل الدورية هي اللبنات الأساسية لمرايا الليزر ومرشحات تمرير نطاق، ومرشحات الرفض[٦٠] ومرشحات الحافة [٦١].يوفر مفهوم هذا الهيكل نظرة ثاقبة لأداء مثل هذه الطبقات المتعددة. على سبيل المثال حزمة من الطبقات المتعددة كل طبقة بسمك مختلف، وربما معامل إنكسار مختلف. على الرغم من إمكانية الكمبيوتر الرقمية من حساب الإنعكاس للطبقات فمن الصعب فهم كيف تعمل دالة متعدد الطبقات بسبب العدد الهائل من المتغيرات. إذا، ومع ذلك، إذا كان الفيلم يحتوي على نوعين فقط من الطبقات أ ، ب مكتوبة على النحو التالى (أ ب)[١٠]، يمكن الحصول على فكرة جيدة لأداء الحزمة المكونة من ٢٠ طبقة والتى

---

[٦٠] في معالجة الإشارات، مرشح إيقاف النطاق (band-stop filter) أو مرشح رفض نطاق (band-rejection filter) هما مرشحات تقوم بتمرير معظم الترددات دون تغيير في نطاق معين إلى مستويات منخفضة جداً. وهى على العكس من مرشح تمرير النطاق (band-pass filter) . مرشح الشق (notch filter) هو مرشح إيقاف النطاق بفجوة إيقاف ضيقة (لو معامل كفاءة Q عالية)

[٦١] تستخدم مرشحات الحافة (Edge Filters) لعزل أجزاء من الطيف، في مجموعة متنوعة من التطبيقات الصناعية أو علوم الحياة، بما في ذلك الميكرسكوبات المجهرية أو لمبات الفلورسنت. يمكن استخدام "مرشحات حافة" ذات حافة تمرير قصيرة لإنشاء مرشحات تمرير متخصصة

يتم الحصول عليها عن طريق تحليل الخصائص الأساسية لكل من المادتين "أ ب" بدلا من تكراره ١٠ مرات. ميزة إضافية للتعامل مع حزمة الطبقات المتعددة تستخدم خوارزميات فعالة لحساب الإنعكاس مع تحسين الكفاءة الحاسوبية٠ كل طبقة لها سمك ربع الموجه الضوئية بدءاً من طبقة واحدة (أ) نحصل على الإنعكاس بحد أقصى ٣١% ٠ بإضافة زوج من مادتى (أ ب) إلى النموذج يزيد الإنعكاس كحد أقصى إلى ٦٣% – زيادة الحزمة بزوج (أ ب) آخر لإنتاج (أ ب أ ب أ) يعزز الإنعكاس لحد أقصى لنسبة ٨٥ %٠

- **مرشحات تمرير نطاق من المواد العازلة[٦٢]**

يمكن تصميم مرشحات تمرير النطاق بالعديد من الطرق المختلفة٠ المرشحات التى تغطى نطاق واسع من الأطوال الموجية يتم بناؤها بإستخدام الطول الموجي للمواد العازلة ٠ مرشح تمرير الأطوال الموجية القصيرة حيث تتداخل مناطق التمرير٠ في هذا النوع من التمرير من المهم عدم تواجد درجات إنعكاس أعلى من الأطوال الموجية الطويلة تقع ضمن منطقة التمرير قد يكون من الممكن القضاء عليها بإستخدام تقنيات أخرى

References

1. **Optically enhanced semi-transparent organic solar cells through hybrid metal / nano particle / dielectric nanostructure**
2. **"Major advance made in transparent electronics". Retrieved 2009-09-09.**
3. **Functional Polymer Films Eds. R. Advincula and W. Knoll – Wiley,**
4. ***"Morphology and photocatalytic activity of highly oriented mixed phase titanium dioxide thin films". Hanaor, D; Triani G.; Sorrell C.C.; (2011).***
5. ***Surface and Coatings Technology: 205 (12): 3658–664. 2011.01.007***
6. ***Frank, F. C.; van der Merwe, J. H. (1949).***
7. ***"One-Dimensional Dislocations. I. Static Theory". Proceedings of the Royal Society of London. Series A,***
8. ***Mathematical and Physical Sciences 198 (1053): 205–216***
9. ***Frank, F. C.;van der Merwe, J.H.(1949). "One-Dimensional Dislocations.***

[٦٢] كل المرشحات العازلة لتمرير نطاق (dielectric band pass filters) تتكون عادة من المرايا العازلة التى تصنع من طبقات سميكة ضوئية ربع الموجه (quarter-wave) وطبقات سميكة ذات تجويف نصف الموجه٠ يمكن أن تكون طبقات التجويف أيضا أكثر سمكا فى وجود سمك متعدد نصف الموجات الضوئية ٠ المرشحات بطبقة تجويف واحدة سيكون لها شكل مثلث والمرشحات مع تجويف متعدد الطبقات يمكن أن يكون لها شكل مربع