



## الجزء الثالث

### ترسيب الأكاسيد بواسطة الليزر النبضي

#### PULSED LASER DEPOSITION OF OXIDES

#### 1.3 مقدمة

استخدمت تقنية الانتزاع بالليزر (laser ablation)، كتقنية لمعالجة المواد لأول مرة في الستينات من القرن العشرين بعد اختراع ليزر الياقوت. ومع ذلك، طرق ترسيب الأفلام الرقيقة لم تجذب انتباه الباحثين حتى نهاية الثمانينات من القرن العشرين [2]، عندما استخدم لترسيب أفلام الموصلات الفائقة ذات درجة الحرارة العالية. ومنذ ذلك الوقت، تطورت تقنية الترسيب بالليزر النبضي (pulsed laser deposition) ((PLD)) بسرعة كبيرة وازدادت البحوث المتخصصة في هذا الموضوع بشكل مطرد.

مزايا تقنية الترسيب بالليزر النبضي هي بساطة التجارب. باستخدام ليزرات الأشعة فوق البنفسجية النبضية ذات الطاقة العالية وغرفة التفريغ، العديد من أفلام الأكسيد المتكافئة كيميائياً (stoichiometric) يمكن ان تنمو في وجود الأكسجين دون الحاجة إلى المزيد من المعالجات الإضافية.

هذا الجزء يركز على كتاب ترسيب الأفلام الرقيقة بواسطة الليزر النبضي لمؤلفه Hubler و Chrisey [3].

### 2.3 التسلسل الزمني لتطور تقنية الترسيب بالليزر النبضي

1916 – وضع العالم اينشتين فرضية عملية الانبعاث الاستحثاثي

1960 – بنى العالم ميمان أول ميزر (masar) ضوئي باستخدام ساق من الياقوت كوسط لليزر.

1962 – استخدم العالمين Breech و Cross ليزر الياقوت لتبخير وإثارة الذرات من سطح المادة الصلبة.

1965 – استخدم العالمين Smith و Turner ليزر الياقوت لترسيب الأفلام الرقيقة (هذا يعتبر البداية الأولى لتطور تقنية الترسيب بالليزر النبضي).

بدايات الثمانينات من القرن العشرين – تميز بتصنيع وتركيب أول ليزر للترسيب المتبلور. مجموعات بحثية قليلة (معظمهم من روسيا) وصلوا لنتائج رائعة في تصنيع أفلام رقيقة بتقنية الليزر.

1987 – استخدم الترسيب بالليزر النبضي بنجاح في الحصول على أفلام من مواد فائقة التوصيل ذات درجة حرارة عالية.

نهاية الثمانينات من القرن العشرين استقطبت تقنية الترسيب بالليزر النبضي العديد من المهتمين واستخدم في تصنيع الأفلام الرقيقة ذات الترتيب البلوري. كذلك ترسيب أفلام النيتريد وأكسيد السيراميك، وأفلام المعادن متعددة الطبقات والعديد من البلورات الفائقة (superlattices) بواسطة الترسيب بالليزر النبضي.

في التسعينات من القرن العشرين تطور سريع في تقنية الليزر مما جعل تقنية الترسيب بالليزر النبضي تقنية منافسة.

الليزرات التي تعمل بترددات عالية أكثر مما كان عليه ليزر الياقوت جعل نمو الفيلم ممكناً. ونتيجة لذلك، أصبح متوفر ليزر Q-switched لتوليد نبضات ضوئية قصيرة جداً. ولهذا السبب يمكن استخدام الترسيب بالليزر النبضي للحصول على تبخر متطابق لمادة الهدف وترسيب فيلم مماثل كيميائياً لمادة الهدف. تطورات أخرى أدت ليزرات الاكسيمر تعطي إشعاع في المدى فوق بنفسجي. ومن ذلك الحين وصاعداً أصبح الانتزاع بالليزر بدون اثر حراري لمادة الهدف يعمل بكفاءة عالية.

في بداية القرن الواحد والعشرون بدأ الاهتمام بالإنتاج والقضايا المتعلقة بقابلية إعادة الإنتاج، والمساحات الكبيرة، والمستويات المتعددة. قد يبدأ عصرًا جديدًا في مجال صناعة الأفلام الرقيقة.

### 3.3 مزايا وعيوب تقنية الترسيب بالليزر النبضي

خلال الترسيب بالليزر النبضي، هناك الكثير من عوامل الترسيب يمكن ان تتغير، ولها تأثير كبير على خواص الفيلم. العوامل المتعلقة بالليزر مثل شدة طاقة الليزر، والطول الموجي، وزمن النبضة، ومعدل النبضات يمكن ان تتغير. ظروف التحضير والتي تشمل المسافة بين مادة الهدف والأرضية، ودرجة حرارة الأرضية، ومكونات الغاز في داخل حجرة التفريغ وضغطه كلها يمكن ان تتغير، وكلها تؤثر على نمو الفيلم.

جوانب عدة في تقنية الترسيب بالليزر النبضي مفيدة. إنها تعمل على إنتاج تدفق من المادة في صورة محددة وباتجاه أمامي يمكنه ان يترسب باقل تلوث ممكن، بالمقارنة مع البلازما الغير محصورة في عملية الانتزاع المغناطيسي sputtering. بالإضافة إلى ذلك فان الترسيب بالليزر النبضي دقيق للغاية. يمكن من خلاله ترسيب على سبيل المثال فيلم من YBCO بسلك خلية واحدة أي بسلك 1.2 nm، توضح التجارب ان الخلية الوحيدة من YBCO موصلة فائقة التوصيل. في ترسيب المواد المركبة والمعقدة بطرق التبخير التقليدية، فان الكاثيونات تأتي من مصادر مختلفة. ولإنتاج الخليط الصحيح على الفيلم، فان معدل وصول كل صنف يجب ان يراقب ويتحكم به. وهذه عملية صعبة عندما يكون هناك كمية كبيرة من الغاز في الخلفية مستخدم خلال عملية الترسيب. في عملية الترسيب بالليزر النبضي لا يتطلب مثل هذه المراقبة والتحكم لان مكونات الفيلم تنسخ تماما مكونات مادة الهدف. في معظم التقنيات المعتمدة على الأشعة الأيونية، ضغط الغاز في حجرة التفريغ تفرض العديد من القيود على عوامل التشغيل. في تقنية التبخير بالشعاع الإلكتروني، فان ضغط الغاز في الخلفية لا يمكن ان يزداد عن  $10^{-4}$  mbar، وفي عملية الانتزاع المغناطيسي sputtering فان الضغط يحدد معدل انتزاع الذرات من سطح الهدف.

بالإضافة إلى ان الجزيئات المختلفة تتطلب ضغط مختلفة في الخلفية لتكون الطور الصحيح. على سبيل المثال أفلام  $ZrO_2$  يمكن ان تتكون في الفراغ، ولكن  $SrTiO_3$  تتطلب ضغط أكسجين بمقدار  $5 \times 10^{-2}$  mbar. في عملية الترسيب بالليزر النبضي فان ضغط غاز الخلفية لا يؤثر على مرور أو امتصاص أشعة الليزر، ونفس النظام يمكن ان يستخدم لتكوين أفلام رقيقة تتكون من عدة مواد بتغير بسيط في ضغط غاز الخلفية. على سبيل المثال، أنظمة الترسيب بالليزر النبضي تكيفت مع أنظمة الترسيب التي تعمل في ضغط غاز خلفية بمقدار يساوي 1 mbar ومع أنظمة الترسيب البلوري بالشعاع الجزيئي (molecular beam epitaxy) التي يجب ان يكون فيها الضغط منخفضا  $10^{-10}$  mbar.

عمل طبقات متعددة يمكن ان ينجز بسهولة بواسطة الترسيب بالليزر النبضي لان المواد المختلفة يمكن ان توضع تحت شعاع الليزر. هذا يتم بصفة عامة بتحكم الكمبيوتر في حامل المواد المستخدمة.

تقنية الترسيب بالليزر النبضي جيدة لترسيب أفلام نقية. في معظم العمليات، يحتوي الفيلم على شوائب. على سبيل المثال التبخير الحراري والتبخير بالشعاع الإلكتروني يستخدم وعاء كمصدر للمادة، ودرجة حرارة مرتفعة لتبخير المواد وهذا قد يؤدي إلى تبخر مادة الوعاء أيضا، وبالتالي تدخل شوائب وملوثات في عملية الترسيب. في عملية الترسيب ببخار المعادن الكيميائية العضوية ( metal organic chemical vapor deposition (MOCVD))، تنقل الجزيئات العضوية الطيارة الكاتيونات المطلوبة من المصدر إلى الفيلم، وبقايا الجزيئات العضوية يمكن ان تترسب أيضا في الفيلم.

هناك بعض المعوقات في طبيعة عملية الترسيب بالليزر النبضي. من المشاكل الأساسية هو الرذاذ أو الجسيمات المترسبة على الفيلم. وهناك سببين أساسيين لتكون هذه الجسيمات خلال التبخير بالليزر هي انفصال الشوائب السطحية لمادة الهدف تحت الصدمة الحرارية وانتشار رذاذ المواد السائلة الناتجة على التسخين الفائق للطبقات تحت سطحية. تم تطوير بعض الطرق لتقليل الرذاذ. من هذه الطرق استخدام فلتر ميكانيكي للجسيمات يحتوي على محدد للسرعات يعمل كفلتر مرور السرعات العالية للتخلص من الجسيمات البطيئة. والطريقة الثانية تستخدم أهداف ذات كثافة عالية وسطح ناعم – واحد من التحسينات الفعالة هو صقل سطح مادة الهدف كل مرة يستخدم فيها. الطريقة الثالثة هي استخدام ليزر نبضي بكثافة طاقة منخفضة نسبيا أو يعمل بمعدل ترسيب قليل.

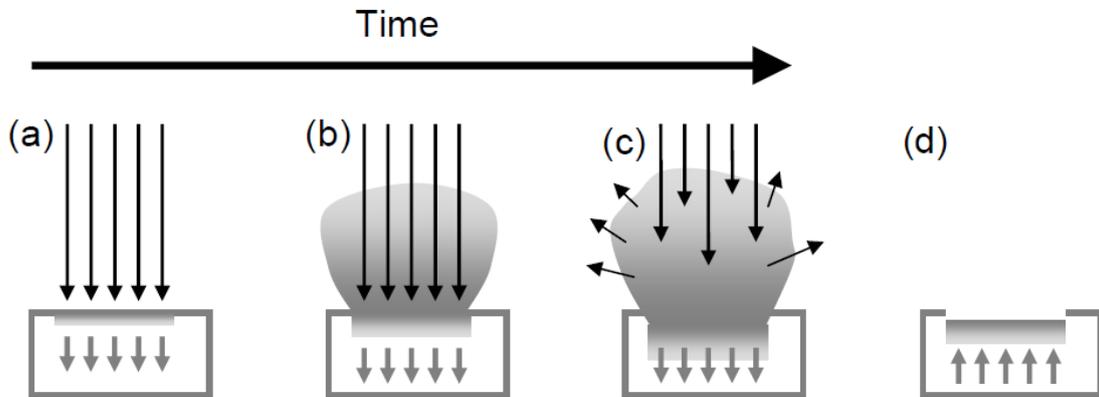
مشكلة أخرى هي عدم الانتظام على مساحة كبيرة من المواد المتبخرة من سطح الهدف، بسبب التوزيع الزاوي الضيق لمواد المتبخرة من السطح. ولكن هذه المشكلة يمكن ان تحل من خلال مسح المواد المتبخرة على الأرضية من خلال الاعتماد على الدوران والتحرك لتغطية مساحة كبيرة. باستخدام أجهزة ليزر الاكسيمر المتوفرة حاليا، يمكن الوصول إلى معدل ترسيب يصل لأكثر من  $1 \text{ micron-cm}^2/\text{s}$ ، وهذا مقدار مهم للتصنيع التجاري. بعض أنظمة الترسيب بالليزر النبضي يمكن ان ترسب فيلم رقيق على شريحة قطرها 8 in. علاوة على ذلك، الحاجة إلى تحسين الإلكترونيات المعتمدة على أكسيد المعدن أو أفلام رقيقة متعددة المكونات يجب ان تتسارع لتطوير أنظمة ترسيب ليزر نبضي تعمل على مقياس تجاري.

### 4.3 الآلية عمل الترسيب بالليزر النبضي

هذا الجزء يقدم بعض المفاهيم الأساسية للجوانب الكيميائية والفيزيائية للانتزاع بواسطة الليزر النبضي والترسيب، من وجهة نظر مادة الهدف والمادة المنبعثة من الهدف والفيلم.

عملية الانتزاع بالليزر النبضي هي عملية معقدة. على مستوى ظاهري، الانتزاع يمكن ان ينظر له على انه عملية غليان سريعة للمادة داخل حجم التفاعل بالقرب من سطح مادة الهدف. عند تفحص العملية بشكل اعمق فان التعقيد المخفي يصبح ظاهرا، وهذا موضح في الشكل 3.1.

اذا سلطت أشعة ليزر قوية على مادة صلبة أو سائلة فان جزء من المادة على السطح سوف يتبخر وينتزع بعيدا عن العينة. هذا البخار هو عبارة عن مجموعة من الذرات والجزيئات والأيونات والإلكترونات، بنفس النسبة وطاقة الحركة التي تعتمد على عوامل الليزر (الشدة والطول الموجي واتساع النبضة) وبعض الشيء على مادة الهدف. اذا وصل هذا البخار لسطح اخر فانه يتكثف على السطح. نبضات ليزر متكررة وتكرار تكثف البخار الناتج على السطح سوف يكون مادة رقيقة على السطح تعرف باسم فيلم رقيق (thin film).



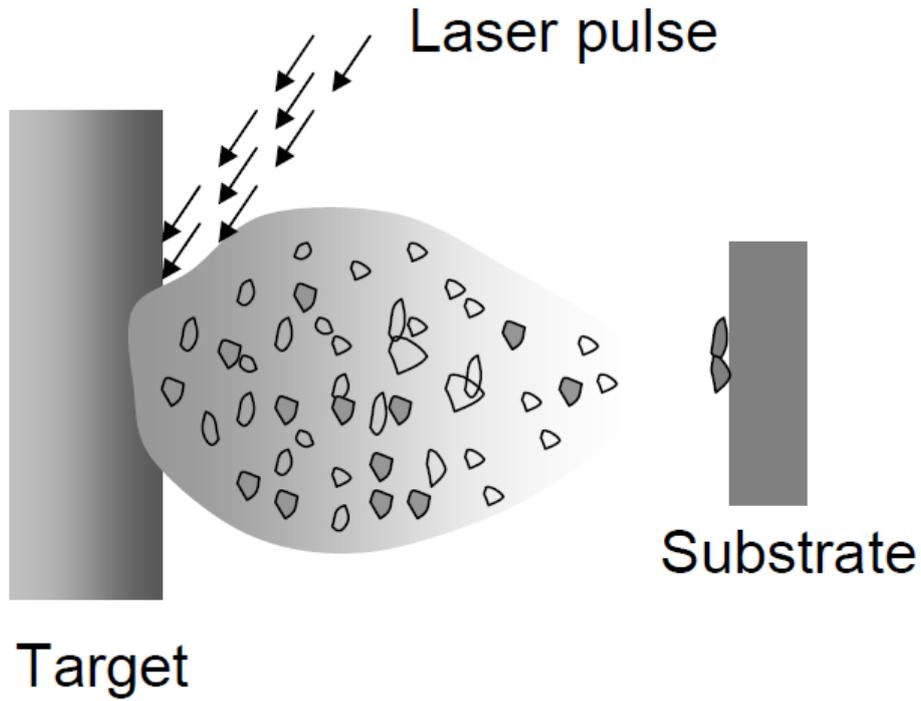
**الشكل 1.3.** مخطط يوضح العناصر الأساسية لعملية الانتزاع بالليزر النبضي. (a) الامتصاص الابتدائي لأشعة الليزر (الموضحة بالأسهم الطويلة)، الذوبان والتبخر يبدأ (المنطقة المظلمة تشير إلى مادة مذابة، الأسهم القصيرة تشير إلى حركة الفاصل بين الصلب والسائل). (b) الجزء المذاب ينتشر في المادة الصلبة، ويستمر التبخر ويصبح تفاعل الليزر مع البخار المتصاعد مهم. (c) امتصاص أشعة الليزر الساقطة بواسطة بخار المواد المتصاعدة وتتكون البلازما. (d) تتراجع المادة المذابة ويؤدي هذا إلى إعادة تحول المادة من الحالة السائلة إلى الصلبة.

نمو وجودة الأفلام الناتجة سوف تعتمد بصفة عامة على عدد من العوامل الأساسية، بما فيها اختيار أرضية الترسيب، ودرجة حرارة الأرضية،  $T_s$ ، والطاقات الحركية النسبية والمطلقة و/أو معدل وصول المكونات المختلفة داخل بخار المادة. والأخير يمكن ان يؤثر على خيار الطول الموجي لليزر، من خلال الفترة الزمنية لنبضة الليزر، والطاقة والشدة، ووجود أي غاز في الخلفية، واي تنشيط للبلازما الثانوية في الفجوة بين الهدف والأرضية 4,5.

عملية الترسيب بالليزر النبضي مقسمة إلى الخطوات التالية وموضحة في الشكل 2.3:

1. تفاعل الليزر مع مادة الهدف
2. تمدد بخار المادة
3. ترسيب الفيلم

كل خطوة تعتمد على المادة وكذلك على عوامل التجربة مثل الطول الموجي لليزر وشدة الليزر واتساع النبضة ونوع غاز الخلفية وضغطه، ونوع مادة الأرضية ودرجة حرارتها، والشكل الهندسي للترسيب. الليزر المستخدم دراسات الترسيب بالليزر النبضي شمل مدى الأطوال الموجية من الأشعة تحت الحمراء مثل ليزر  $CO_2$  والذي طوله الموجي  $10.6 \mu m$ ، وحتى ليزر القريب من الأشعة تحت الحمراء والمرئية مثل ليزر Nd-YAG، بتردده الأساسي والتوافقي الثاني عند طول موجي  $1064 \text{ nm}$  و  $532 \text{ nm}$  على التوالي، وحتى الأشعة فوق البنفسجية. الكثير من الأعمال في مجال الترسيب بالليزر النبضي يستخدم ليزر الاكسيمر، والذي يعمل في مدى الطيف فوق البنفسجي عند أطوال موجية مختلفة مثل  $308 \text{ nm}$  لليزر XeCl،  $248 \text{ nm}$  لليزر KrF، و  $193 \text{ nm}$  لليزر ArF، و  $157 \text{ nm}$  لليزر  $F_2$ . بعض العوامل الأساسية للترسيب بالليزر النبضي موضحة في الجدول 1.3.



الشكل 2.3 مخطط يوضح عملية الترسيب بالليزر النبضي.

الجدول 1.3 العوامل الأساسية للترسيب بالليزر النبضي

Parameter	Typical values
Materials examples	YBCO, BiSrCaCuO, BaTiO <sub>3</sub> , ZnO, TiO <sub>2</sub> ,...
Laser wavelength	193, 248, 266, 308, 355 nm, etc.
Laser pulse width	6 – 50 ns
Laser repetition rate	1 – 10 Hz
Laser fluence	0.5 – 5 J/cm <sup>2</sup>
Vacuum pressure	... – 10 <sup>-1</sup> mbar
Background gas	O <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , Ar, etc.
Background gas pressure	1 – 300 mtorr
Substrate	MgO, SrTiO <sub>3</sub> , Si, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , glass, etc.
Substrate temperature	25 – 800 °C

المقاييس الزمنية المتضمنة في هذه الخطوات الثلاثة صعبة جدا. تفاعلات الليزر مع الهدف تحدث في خلال نانو ثانية، في حين ان تمدد الأبخرة في وجود غاز الخلفية يأخذ وقت في حدود الملي ثانية. بالاعتماد على الظروف العملية فان عملية نمو الفيلم بعد نبضة الليزر يمكن ان تستمر في النمو حتى نبضة الليزر التالية تحدث بعد ملي ثانية.

### 1.4.3 تفاعل الليزر مع مادة الهدف

سنبدأ بالاهتمام ببعض الآليات التي من الممكن ان تساهم في فقد المواد من الهدف بعد تعريضها للإشعاع بالفوتونات النبضية (الليزر النبضي). طبقا لـ Kelly و Miotello [6]، فان هذه تقسم إلى عمليات أساسية وعمليات ثانوية. ويقترح أقسام فرعية تشمل انتزاع حراري وإلكتروني وميكروسكوبي، وأهميتها تعتمد على طبيعة مادة الهدف والطول الموجي لليزر المستخدم في الإثارة وزمن النبضة، ولكن الفرق بينهما في الأغلب واضح.

دليل مباشر للانتزاع الإلكتروني بانه يساهم في حالة المعادن والمواد الصلبة الأخرى هي بصفة عامة صعبة التمييز، ولكن بعض الأمثلة تشمل ملاحظة الذرات بتوزيع سرعات غير حرارية تظهر في الترسيب بالليزر النبضي من جسيمات معدنية ذات حجم نانوي [7] ومن الأفلام المعدنية الرقيقة (كلا الملاحظتين تساهما في تفاعلات البلازمون والسطح) وحتى في هدف من مادة الجرافيت [9].

معظم الاعتبارات الميكانيكية التفصيلية لإثارة الهدف والانتزاع تتضمن بداية الكترونية. افترض ان تفاعل المادة مع نبضة ليزر قصيرة جدا هي عملية إثارة سريعة لتوزيع الإلكترونات، بتزاوج الكترون-الكترون كافي يؤدي إلى ارتفاع فوري في درجة حرارة الإلكترون، ويتبعه تسخين الشبكة البلورية بمعدل يعتمد على قوة التزاوج الفوتون-الإلكترون والتبخر النهائي لمادة الهدف الساخنة. المساهمات الإلكترونية سوف تكون اكثر وضوحا عندما يستخدم نبضات قصيرة جدا أي أجزاء من البيكو ثانية، ويمكن ان تعبر عن نفسها بشكل غير متوقع لإنتاج أيونات كثيرة و/أو تنتشر حراريا بسرعات عالية داخل أبخرة البلازما المتمددة.

المساهمات الحرارية سوف تكون هي المسيطرة عند استخدام ليزر بنبضات أطول زمينا على سبيل المثال نبضات في حدود النانو ثانية، بفترة زمنية كافية لتسمح للفوتون بالازدواج مع كلا من الأنماط

الإلكترونية والاهتزازية لمادة الهدف. مثل هذه المساهمات الحرارية سوف تكون المفضلة في حالات حيث يكون الهدف ذو انعكاسية منخفضة، وعند الطول الموجي لليزر يكون معامل الامتصاص كبيرا وهذا يضمن ان يكون عمق الاختراق صغيرا، وعند معامل انتشار حراري منخفض ونقطة غليان منخفضة نسبيا،  $T_b$ ، لان  $T_b$  سوف تزيد عن درجة حرارة ذوبان الهدف،  $T_m$ ، دليل على تراكم شبه موجة على سطح الهدف بعد تعريضه للإشعاع، وذوبان موضعي واضح، غالبا ما يعتبر دليلا أكيد على وجود مساهمة حرارية في إنتاجية الانتزاع بالليزر (ablation).

عملية خروج المادة وكمية الفيض الخارج يمكن ان يتغير بشكل كبير عندما تزداد الطاقة لتستحث غليان متفجر لمادة الهدف. هذه العملية تعرف في بعض الأحيان بطور الانفجار، [10] تحدث عند درجات حرارة تصل للنقطة الحرجة،  $T_c$ . ينظر لهذه العملية على انها استرخاء الانفجار للذوبان الحادث بفعل الليزر على الخليط الموجود من قطرات السائل والبخار. مثل هذا الخروج الهيدروديناميكي للجسيمات التي تشبه القطرات هي واحدة من الشروحات المتعلقة بالانتزاع الميكروسكوبي ( *macroscopic sputtering*). التقشر (Exfoliation) الذي بواسطته تنفصل القشور الميكروسكوبية من مادة الهدف كنتيجة للصدمة الحرارية المتكررة، وهذا يعتبر مثالا اخر. هذا النوع من الانتزاع يحدث عندما يستخدم مواد هدف ذات معاملات تمدد حراري عالي ونقطة ذوبان عالية جدا بحيث ان الاهتزازات الحرارية الناتجة عن نبضات الليزر المتكررة لا تزيد عن  $T_m$ . طرد الجسيمات الميكروسكوبية قد يحدث في حالة الهدف المسامي، حيث التسخين الناتج على الليزر يسبب تمدد سريع لأي جيوب غازية محصورة اسف السطح وبالتالي طرد سطح المادة بقوة.

بالمقارنة مع الصدمات بأيونات، تنتقل كمية الحركة من الفوتونات الساقطة بطاقة اقل من طرد الذرة من سطح الهدف. ولكن الإشعاع بالليزر النبضي يمكن ان يؤدي إلى عدد من التصادمات الغير مباشرة أو الثانوية. كل جسيم منتزع سوف يمتلك بعض السرعة  $v_x > 0$ ، حيث ان  $v_x$  هي السرعة العمودية على سطح الهدف. اذا كانت كثافة المادة المنتزعة منخفضة جدا، فان هذه الجسيمات سوف تتعرض تمدد بدون تصادمات وتتمدد بعيدا عن حجم التفاعل بتوزيع سرعة يميز عملية الانتزاع الأساسية بالليزر، على سبيل المثال توزيع ماكسويل في حالة عملية الانتزاع الحراري. بوضوح هذه النبضة من المادة المنزوعة تستمر بالتمدد ولكن التصادمات في المراحل الأولية من التمدد تحدث في طبقة Knudsen، وتكون كافية لكي تصل سرعات الجسيمات إلى الاتزان. مجموعة سرعات الجسيمات تأخذ صيغة توزيع ماكسويل المزاحة:

$$P(v_x) \approx v_x^3 \exp\left[-\frac{m(v_x - u)^2}{2kT}\right] \quad (3-1)$$

حيث  $m$  هي كتلة الجسيم. وبتعبير آخر فان توزيع الحزمة الأمامية على امتداد  $x$  بتدفق سرعة موجبة،  $u$ ، ولكن سرعات الجسيمات المفردة قد يمتد على كل المدى  $-\infty < v_x < +\infty$ .

بعض أجزاء المادة المنتزعة تعرض لاستطارة خلفية باتجاه سطح الهدف، عند اصطدامها مع السطح، فان هذه الجسيمات يمكن ان تحدث انتزاع ثانوي، تنعكس (بشكل مرن أو غير مرن) أو تتكثف مرة أخرى. مثل هذا الانتزاع الثانوي يؤثر على مساحة أكبر بكثير من نقطة الانتزاع من السطح بفعل نبضة الليزر، ويكون لها نتائج مهمة في حالة الهدف من مواد مختلفة. على سبيل المثال النسب الكيميائية (stoichiometry) لسطح الهدف سوف تختلف عن باقي جسم الهدف اذا كان واحد أو أكثر من تصادمات السطح له كفاءة تعتمد على المركب. هذه النسبة الكيميائية المعدلة سوف تنعكس على أبخرة المادة (plume) المتولدة في عملية الانتزاع بالليزر وبالتالي على مكونات الفيلم المرسب. مثل هذا الشرح والتوضيح يفسر ملاحظة الأفلام المرسبة بالليزر النبضي من هدف مركب من عدة مواد في الفراغ يكون غني باقل مركب (على سبيل المثال Zn في حالة أفلام ZnO).

بالفحص الدقيق لعينات الهدف بعد تعرضه للانتزاع بالليزر عادة ما يكشف عن مصفوفة من الخشونة ذات الشكل المخروطي. هذا المخروط يلاحظ بكثرة في الأهداف التي تعرضت للصدم بالأيونات، وقد تم شرحه بدلالة احتماليات الاعتماد على موضع التآكل مثل ما يحدث في حالة الهدف الصلب الغير متجانس، مع وجود شوائب مقاومة للانتزاع والتي تبقى على اطراف المخروط. بالتناظر، بعض الباحثون فسروا تكون الشكل المخروطي الذي لاحظوه في الانتزاع بالليزر النبضي يجب ان يكون له نفس المنشأ، وهذا يعطي دليل على الجسيمات الثانوية الناتجة على الهدف المتعرض لعملية الانتزاع. ووجهة نظر أخرى أكثر عمومية هو ان الأشكال المخروطية تظهر من الانتزاع المفضل لكل مساحات السطح ولكن تلك التي محجوبة بجسيمات غير متجانسة مقاومة للتبخر [11]. الغير متجانس قد يحدث بشكل طبيعي أو باستحثاث الليزر. انه مهم حيث ان العديد من امثله الليزر المستحثة لتكون المخروط شملت مركبات على سبيل المثال MgB<sub>2</sub> أو YBCO وليس في الهدف من عنصر واحد. تعرض المواد المركبة لإشعاع الليزر يمكن ان يحدث تغيرات موضعية على السطح، بسبب الانتزاع المفضل أو إعادة الترسيب الاختياري لمكون محدد، و/أو طبيعة السطح، على سبيل المثال تكون إعادة التصلب أو الخشونة البلورية، او بواسطة إعادة ترسيب بقايا الجسيمات، والتي تعمل على انها نوى مقاومة للانتزاع وتبقى لتصبح اطراف

المخاريط. ترتيب المخاريط وملاحظة محورها الطويل بحيث انها متوازية مع اتجاه انتشار نبضة الليزر، كلاهما متفق مع وجهة النظر تلك.

العديد من تجارب الانتزاع بالليزر أجريت في وجود غاز خلفية عند ضغط منخفض ولم تتم العملية في الفراغ. بوضوح، الكيمياء الجديدة أصبحت ممكنة لتوفر غاز خلفية مناسب ولكن من وجهة نظر الهدف، فان التأثيرات الأساسية لغاز الخلفية هو لتحديد تمدد أبخرة المواد المنتزعة من السطح (plume)، وكثافة غاز اعلى في المراحل الأولية لتمدد أبخرة الانتزاع، وزيادة الاحتمالية لمواد معينة بإعادة الترسيب على سطح الهدف.

### 2.4.3 تمدد أبخرة البلازما Plume expansion

نحاول في هذا الجزء تشخيص تكون وانتشار أبخرة البلازما ودراسة خواصها في تجارب الترسيب بالليزر النبضي، كما كشفت عنها دراسات النمذجة النظرية والرياضية. بينما تتمدد أبخرة البلازما في الفراغ أو في وجود غاز في الخلفية، سوف نقوم بالتعامل مع سلوكها العملي بشكل منفصل.

يتطلب تشخيص أبخرة الترسيب بالليزر النبضي فهم مزايا وعيوب تقنيات كثيرة. بالرغم من التجارب التشخيصية العديدة المصممة لدراسة أبخرة البلازما الناتجة عن الترسيب بالليزر النبضي، عدد من الأسئلة الأساسية لازالت بحاجة إلى حل، بما فيها ما يلي:

\* دور الية الطرد الغير حراري (الإلكتروني) والحراري (التبخري) في كمية المادة المنتزعة اللازمة لنمو الفيلم.

\* مدى امتصاص الليزر بواسطة المواد المنتزعة الابتدائية.

\* تأثير الحفر (etching) ببلازما الليزر على مادة الهدف.

\* آلية التمدد المسؤولة عن طاقة الحركة العالية للمواد المنتزعة: التنافس بين نماذج التمدد الاديباتيكي وتسارع شحنة الفراغ.

\* الجزء المتأين لأبخرة البلازما ومدى المسافات التي يمكن التحكم بها بطريقة الكترومغناطيسية.

\* دور المجموعة والجسيمات في الانتقال الكتلي إلى أرضية الترسيب.

\* حركة التصادمات داخل أبخرة البلازما في نظام عديم التصادم.

\* دور التشتت والانحراف والتدفق المائع بسبب غازات الخلفية على إبطاء والتوازن الحراري لأبخرة البلازما.

\* العوامل الأساسية، أي طاقة الحركة ومعدل الترسيب الخ، التي تحدد افضل مسافة لنمو الفيلم ولمواد مختلفة.

دور الكيمياء داخل غاز الخلفية.

\* دور مورفولوجي سطح الهدف وحالة المواد المنتزعة.

### تمدد أبخرة البلازما في الفراغ *Plume expansion in vacuum*

خلال فترة زمنية قدرها 30 ns لنبضة الليزر المستخدم في الترسيب بالليزر النبضي في الفراغ، تتشكل فقاعة من البلازما الساخنة على مسافة قدرها 50  $\mu\text{m}$  من سطح مادة الهدف [21]. حالما تتكون البلازما، تتفاعل جسيمات البلازما وتميل لـ "فقد ذاكرة" لأليات الانتزاع الأساسية [6]. وعليه فان تمدد البلازما يمكن ان يتصف بخصائص محددة، أي اليات انتزاع ثانوية [12] والتي لحد ما لا تعتمد على الأليات الأساسية.

خواص التمدد موضحة أدناه:

### (i) تكون طبقة كندسن *Knudsen layer formation*

بداية، تكون كثافة الجسيمات المنتزعة عالية، في المدى من  $10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ، والجسيمات المنتزعة بالقرب من سطح تمتلك توزيع سرعة متباينة، كل متجهات السرعة تتجه بعيدا عن سطح الهدف. ولكن يتحول توزيع السرعة المتباين إلى توزيع متجانس بالتصادمات بين الجسيمات المنتزعة. هذا يحدث خلال المسارات الحرة القليلة من السطح، والذي يعرف باسم طبقة كندسن *Knudsen layer*. في هذه الطبقة تمتص طاقة الليزر بواسطة البلازما.

## (ii) درجات حرارة عالية *High temperatures*

تقاس درجات حرارة البلازما بطيف الانبعاث الضوئي خلال مرحلة التمدد الابتدائية وقدرت بـ 10000 K تقريبا، وهي اكبر بكثير من نقاط غليان معظم المواد ( $\leq 3000$  K) [12].

## (iii) أبخرة بلازما ذات توجه أمامي *Forward-directed plume*

بعد ان تنتهي نبضة الليزر، تؤدي تصادمات الجسيمات الداخلية إلى تمدد غير منتظم لأبخرة البلازما، وتكون بأقصى قيمة لها في الاتجاه الأمامي، أي عموديا على سطح الهدف. في النموذج المقدم بواسطة Narayan و Singh [13]، حيث قاموا بنمذجة كمائع باستخدام معادلة ديناميكا الغاز متبوعة بتمدد اديباتيكي، وقد وجد انه خلال سقوط نبضة الليزر، يستمر تمدد البلازما عند ثبوت درجة الحرارة في الجزء الداخلي لجسيمات المتبخرة من الهدف. افترض ان البلازما لها تدرج اسي للكثافة، والسرعات للجسيمات العديدة تتغير خطيا من مركز البلازما. التسارع وسرعات التمدد في هذا النظام تعتمد على السرعة الابتدائية للبلازما. ونتيجة لذلك تكون سرعات البلازما اكبر ما يمكن في اتجاه عمودي على سطح الهدف، حيث البعاد البلازما الابتدائية 10 ميكرومتر فقط. نتائج مشابهة ظهرت من نموذج Anisimov *et al* [14,15].

## (iv) سرعات تمدد عالية *High expansion velocities*

عند ظروف الترسيب بالليزر النبضي في الفراغ، تكون سرعات الجسيمات عند الحافة الخارجية لأبخرة البلازما في حدود 104 m/s. للذرة المنتزعة أو الأيون بكتلة تساوي 100 amu، وهذه تكافئ طاقة حركة تساوي تقريبا 50-200 eV. بصفة عامة سرعات الأيون اعلى من الجسيمات الطبيعية.

## (v) أبخرة بلازما معقدة *Complex plume*

مكونات أبخرة البلازما معقدة، بالأخص عندما يكون الهدف مكونا من مواد مختلفة، ويمكن ان يتغير أثناء التمدد. في الملي مترات القليلة الأولية من تمدد أبخرة البلازما، الانبعاث من الذرات والأيونات والأيونات المتعددة الشحنات والجزيئات الممكنة لوحظت مع بعض بانبعثات بريمشتراهلينج (*Bremsstrahlung*)

في البلازما. بعد الملي مترات الأولية من التمدد، انبعثت بريمشتراهلينج والانبعثات من الأيونات متعددة الشحنات لم تعد تظهر في أبخرة البلازما بعد التمدد الأولي [12]. الجسيمات الغير باعثة (أي الذرات والأيونات في الحالة الأرضية) تمتلك توزيع سرعات أوسع من الجسيمات المنبعثة عند شروط الترسيب بالليزر النبضي. وجود المواد المتعادلة السريعة في أبخرة البلازما يمكن ان يشرح من خلال إعادة الارتباط للأيونات السريعة مع الإلكترونات و/أو تبادل الشحنات الرنينية مع الأيونات والجسيمات المتعادلة. الإلكترونات اكثر قابلية للحركة من الأيونات الجسيمات المتعادلة، ولكنها مقيدة من الهروب من البلازما الكثيفة من خلال مجال الشحنة – الفراغ وتزداد بالحركة التجميعية عندما تبتعد عن الأيونات [12].

### تمدد أبخرة البلازما في وجود غاز في الخلفية

#### Plume expansion in a background atmosphere

الغاز المحيط أثناء عملية الترسيب بالليزر النبضي تشتت وتقلل أبخرة البلازما وتوازنها حراريا، وتغير عوامل نمو الفيلم الأساسية مثل التوزيع المكاني ومعدل الترسيب، وتوزيع طاقة الحركة للجسيمات المترسبة. بالإضافة إلى ان جسيمات أبخرة البلازما يمكن ان تتفاعل كيميائيا مع جزيئات الغاز.

بصفة عامة الغاز المحيط أثناء عملية الترسيب يؤدي إلى التأثيرات التالية:

#### (i) زيادة الإضاءة Increased fluorescence

زيادة في الإضاءة من كل الجسيمات نتيجة للتصادمات في الجزء الأمامي المتمدد والتصادمات في أبخرة البلازما الداخلية بالمقارنة مع التمدد في الفراغ [12].

## (ii) زيادة حدة حدود أبخرة البلازما، دلالة على الصدمة الأمامية

### ii) Sharpening of the plume boundary, indicative of a shock front

أثناء انتشار أبخرة البلازما في غاز الخلفية فإنه يبدو كما لو أنه يدفع الغاز للأمام وتظهر حدود أبخرة البلازما عند الجهة الأمامية. هذا التحديد يشير إلى تكون الصدمة الأمامية.

### (iii) تقليل سرعة أبخرة البلازما Slowing of the plume

بعد بضعة ملي ثانية من التمدد وفي وجود ضغط غاز مرتفع في الخلفية، تقل سرعة أبخرة البلازما بالنسبة إلى سرعتها في الفراغ وتندمج مع المواد المتحركة بسرعات أقل [12].

سرعة الجسيمات المنبعثة تكون أبكر ما يمكن في غاز خلفية من الهيليوم وتكون أقل ما يمكن في وجود غاز الأرجون. هذا يعود إلى درجة الحرية الكبير لكل وحدة كتلة للهيليوم بالمقارنة مع أي غاز آخر وبالتالي حجم التصادمات في جو الهيليوم أقل بالمقارنة مع أي غاز آخر. الجسيمات المنبعثة تغطي مسافات كبيرة في جو غاز الهيليوم ثم يتبعها الهواء والأكسجين والأرجون. قام العالمين Misra و Thareja [16] بدراسة الانتزاع من هدف من مادة الألومنيوم بواسطة التصوير السريع ووجد أن سرعة الجسيمات تكون عظمى في غاز الهيليوم  $-7.29 \times 10^4$  m/s، ثم الهواء  $-6.84 \times 10^4$  m/s والأكسجين  $-6.75 \times 10^4$  m/s والأرجون  $-6.21 \times 10^4$  m/s عند ضغط 10 mbar لطاقة ليزر بمقدار 100 mJ.

### (iv) انفصال أبخرة البلازما Plume splitting

في وجود غاز خلفية عند ضغط متوسط (في حدود  $10^{-3}$  mbar) تبدأ تميل أبخرة البلازما إلى الانفصال إلى مركبات سريعة (بدون تصادمات) ومركبة بطيئة (متشتتة).

### (v) التغيرات في التوزيع الزاوي Changes in angular distribution

في وجود غاز محيط فإن التوزيع الزاوي لأبخرة البلازما الحديثة الولادة يحدث لها اضطراب نتيجة لتصادمات جسيمات أبخرة البلازما مع غاز الخلفية. هذه التصادمات تشتت جسيمات أبخرة البلازما من

مساراتها الأصلية وتعمل على اتساع توزيعها الزاوي. تأثير الاتساع الناتج عن التصادمات يصبح ظاهرا عندما يصبح متوسط المسار الحر لجسيم في الغاز اقل من المسافة بين الهدف وأرضية الترسيب،  $h$ . متوسط المسار الحر للجسيم،  $\Lambda$ ، حوالي  $(\sqrt{2}n\sigma)^{-1}$ ، حيث  $n$  الكثافة العددية للغاز (تناسب طرديا مع الضغط) و  $\sigma$  هي مساحة مقطع التصادم. لمسافة بين الهدف وأرضية الترسيب في حدود السنتمتر [17] فان التغيرات في التوزيع الزاوي يصبح كبيرا عندما تكون  $h/\Lambda$  حوالي 10.

### (vi) التوازن الحراري لأبخرة البلازما Plume thermalisation

حيث ان المسافة القياسية بين الهدف وأرضية الترسيب في تقنية الترسيب بالليزر النبضي في حدود بضعة سنتمترات وفي وجود ضغط غاز عالي أي  $10^{-1}$  mbar تقريباً، فان جسيمات أبخرة البلازما تصل لحالة الاتزان الحراري.

### (vii) التفاعلات الكيميائية Chemical reactions

التشتت التفاعلي يؤدي إلى تكون الجزيئات والمجموعات في أبخرة البلازما [12].

### 3.4.3 نمو الفيلم Film growth

عمليات نمو الفيلم، أي ترسيب المواد المنتزعة من الهدف على أرضية الترسيب، يمكن وصفها من خلال التسلسل التالي: وصول الجسيمات يجب ان يتكثف على سطح أرضية الترسيب، بعدها يتم انتشار الجسيمات على مسافة ما قبل ان تتفاعل مع بعضها البعض ومع السطح وتبدأ في تكوين النوى. الطريقة التي تتحول فيها الجسيمات إلى نوى يمكن ان تحدد التركيب والمورفولوجي للفيلم المتكون. تحت بعض الظروف، مثل درجة حرارة عالية لأرضية الترسيب، يحدث تفاعلات انتشارية داخل الفيلم مع أرضية الترسيب، اسفل سطح الفيلم يمكن ان تحدث تعديل لتركيب الفيلم وخواصه.

في الجزء التالي سنقوم بوصف مختصر لبعض أنماط نمو الفيلم النموذجية وسنناقش بعض خصائص الترسيب بالليزر النبضي، بالأخص سنركز على بعض التراكيب المختلفة. الأجزاء الفرعية التالية معتمدة على المرجعين [18,19].

### أنماط النمو القياسية Typical growth modes

باعتبار النظرية العامة لتكون النوى ونمو الفيلم، هناك ثلاثة أنماط تقليدية لتكون النوى والنمو:

1. نمو جزر ثلاثية الأبعاد – نمو Volmer-Weber

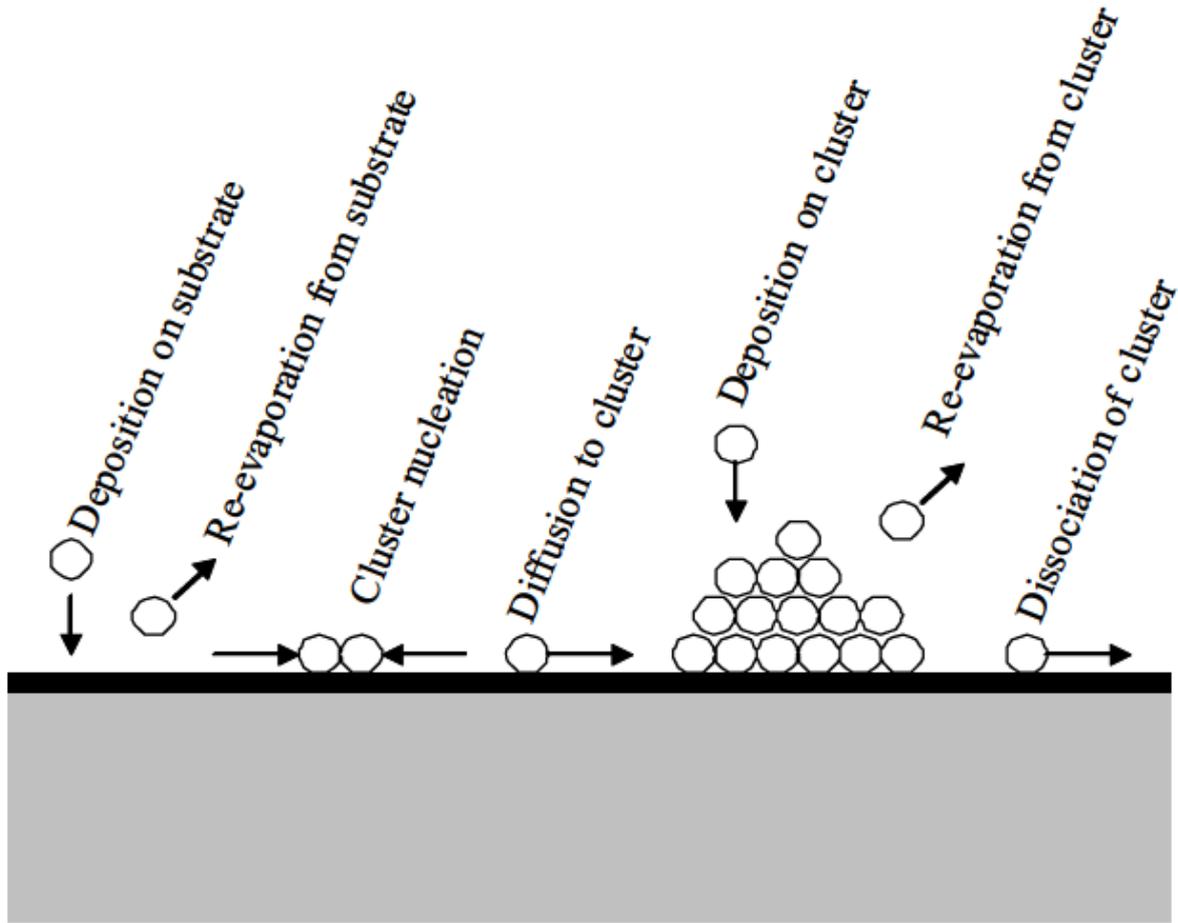
2. نمو طبقة أحادية ثنائية الأبعاد.

3. نمو طبقات أحادية ثنائية الأبعاد يتبعها تكون نوى ونمو جزر ثلاثية الأبعاد – نمو Stranski-Krastinov

يعتمد تحديد أي نمط من الأنماط الثلاثة لنمو الفيلم على (a) الديناميكا الحرارية التي تربط طاقات سطح الفيلم والأرضية، و (b) طاقة الحد الفاصل بين الفيلم والأرضية.

### (i) Volmer-Weber للنوى والنمو Volmer-Weber Nucleation and Growth

يوضح الشكل 3.3 الفرق بين العمليات المتضمنة في تكون نوى مجموعات الجسيمات على السطح بواسطة ترسيب بخار الذرات. تصل ذرات الفيلم بمعدل يعتمد على عوامل الترسيب إما على سطح أرضية جديد أو على مجموعات مترسبة من ذرات الفيلم. ذرات الفيلم هذه يمكن بعد ذلك ان تنتشر على سطح الأرضية، لتواجه ذرة فيلم متحركة لتكون مجموعات متحركة أو ساكنة، تلتصق مع مجموعات ذرات الفيلم السابقة، لتتبخر مرة أخرى عن سطح الأرضية أو تكون مجموعة، أو تنفصل عن مجموعة وتبقى على سطح الأرضية.



الشكل 3.3 مخطط بياني للعمليات الذرية للمجموعات ثلاثية الأبعاد لذرات الفيلم المرسب على سطح أرضية الترسيب.

التحكم في التوازن بين عمليات النمو والانحلال لمجموعة معينة يتم من خلال الطاقة الحرة الكلية للمجموعة،  $\Delta G$  ، بالنسبة لتجمع مجموعة من الذرات المفردة. لنمو ثلاثي الأبعاد لمجموعة من الذرات  $\Delta G$  ستكون قيمة عظمى،  $\Delta G^*$ ، عند الحجم الحرج للمجموعة وهذا يعني ان أحجام المجموعة اعلى من الحجم الحرج ستكون مستقرة.

التقريب الأولي لمعدل تكون النوى معطى كحاصل ضرب:

$$[\text{معدل وصول الذرات للحجم الحرج للنوى}] \times [\text{تركيز النوى الحرجة}]$$

الحد الأول يتناسب مع تركيز الذرات المتحركة على السطح ومع معامل الانتشار السطحي. الحد الثاني يتناقص بشدة مع  $\Delta G^*$ . كقاعدة، الزيادة في معدل تكون نوى المجموعات هو عملية مفضلة في نمو

Volmer-Weber. عمليا، هذا يمكن الوصول له من خلال زيادة معدل الترسيب أو من خلال تقليل درجة حرارة أرضية الترسيب، والتي تعطي نقصان في  $\Delta G^*$ . إمكانية أخرى لنقصان الطاقة الحرة السطحية/الحد الفاصل (وبالتالي نقصان  $\Delta G^*$ )، على سبيل المثال من خلال إحداث تفاعلات مع غاز الخلفية.

## (ii) Frank - van der Merwe لتكون النوى والنمو

### ii) Frank - van der Merwe Nucleation and Growth

نمو طبقة كاملة يتضمن تكون نوى جزر ونموها بسمك طبقة واحدة والنمو بشكل كامل وملتحم قبل ان تتكون المجموعات على الطبقة الثانية للفيلم. في هذه الحالة لا يوجد هنا حاجز طاقة حر لعملية تكون النوى، أي ان لا يوجد  $\Delta G^*$ . اذا اختلفت مادة الأرضية عن مادة الفيلم، سوف تتكون طبقة واحدة بواسطة الترابط القوي بين الفيلم والأرضية، بطاقة سطح فيلم منخفضة وطاقة عالية لسطح أرضية الترسيب.

## (iii) Stranski-Krastinov لتكون النوى والنمو

### iii) Stranski-Krastinov Nucleation and Growth

نمو طبقة كاملة يمكن ان يتغير إلى نمو جزر ثلاثية الأبعاد بعد 1 إلى 5 طبقات نتيجة للتغير في حالة الطاقة مع الطبقات المتعاقبة. هذه قد يكون زيادة في الإجهاد مع زيادة سمك الطبقة نتيجة لعدم التوافق بين فراغات الشبكة البلورية.

## خصائص نمو الفيلم بالترسيب بالليزر النبضي Characteristics of PLD growth

مخطط للأحداث الممكنة لعملية تكون النوى خلال دورة الترسيب بالليزر النبضي هي على النحو التالي (افتراض فيض عالي لبخار لحظي) [18]:

\* نبضة بخرا تتسبب في تكون النوى من مجموعات فرعية حرجة صغيرة بكثافة عالية، أي مجموعات اصغر بكثير من تلك المستقرة لمعدل ترسيب لحظي منخفض. من المتوقع ان المجموعات الحرجة الفرعية غير مستقرة بمجرد ان تضمحل نبضة البخار بعد 1 ms تقريبا.

\* تميل المجموعات الحرجة الفرعية لان تتحلل لمجموعات جسيمات متحركة.

\* المجموعات المتحركة سوف تكون نوى لمجموعات جديدة على حجم مختلف خلال فترة عدم وصول بخرا – تقريبا 100 ms (عند ليزر يعمل بمعدل 10 Hz).

\* تتسبب نبضة الليزر التالية في بدأ نفس التسلسل مع بعض الذرات المتحركة تضاف إلى المجموعات المتكونة من النبضة الأولى.

اذا كانت الثوابت الزمنية للعملية الذرية،  $T_{ap}$ ، (أي الثوابت الزمنية لكل من الانتشار والتجمع والتحلل) اقل بكثير من فترة دورة الليزر النبضي،  $T_{cycle}$ ، فان نبضة البخار الواصل لن تؤثر على نتائج الفيلم النهائي بشكل كبير. ولكن اذا كانت  $T_{cycle} \approx T_{ap}$ ، فان تكون الفيلم قد يختلف. اذا تمت عملية الترسيب بالليزر النبضي في وجود غاز محيط على سبيل المثال الأوكسجين فان الغاز المحيط سوف يتسبب في تكون فيلم بنفس النسب الكيميائية كترسيب أكسيد. وعلاوة على ذلك وكما ذكر سابقا، فان وجود غاز الخلفية قد يغير طاقات سطح الأرضية والفيلم، وربما نمط نمو الفيلم. ولكن من الصعب التنبؤ بتأثير محدد لأنه يعتمد على معامل الالتصاق، ومعدلات التفاعل وعوامل أخرى.

طبقا لـ [19] Metev، فان عاملي الديناميكا الحرارية المسؤولين عن نمو الفيلم في الترسيب بالليزر النبضي هما درجة حرارة أرضية الترسيب  $T_s$ ، والتشبع الفائق  $m$  حيث ان الأخير يتناسب مع  $T_s \times \ln(Ra/Re)$ . هنا  $Re$  هي معدل الترسيب الحقيقي و  $Re$  معدل ترسيب الاتزان عند درجة حرارة  $T_s$ .

زيادة درجة حرارة أرضية الترسيب سوف تزيد معدل الانتشار السطحي للجسيمات المتكثفة. في الشروط القياسية للترسيب بالليزر النبضي، فان معدل الترسيب الحقيقي يمكن ان يتغير بشكل يمكن التحكم به من خلال الشروط العملية على نطاق واسع من  $10^{14} \sim Ra$  إلى  $10^{22} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

من العوامل المهمة الأخرى التي تؤثر على نمو الفيلم هي الفيض والطاقة ودرجة التأين ونوع الجسيمات المتكثفة.

بالتأكيد الخواص الكيميائية والفيزيائية لأرضية الترسيب مهمة جدا لنمو الفيلم أيضا. على سبيل المثال أفلام YBCO تنمو على أرضيات بلورية مثل  $\text{MgO} \langle 100 \rangle$  و  $\text{SrTiO}_3$  و  $\text{LaAlO}_3$  [18].

## تطور البنية التركيبية Structure development

تطور البنية التركيبية للفيلم المترسب مع مقدار الحركة حرارية التي تحدث أثناء ترسيب الفيلم وكذلك مقدار الطاقة الإضافية التي وصلت للسطح كما تم الإشارة له من قبل.

العوامل المهمة هي نسبة درجة حرارة الأرضية  $T_s$  بالنسبة لنقطة ذوبان الفيلم  $T_m$  (بالكلفن)، والمسافة بين مواقع التكتيف،  $a$ ، بالمقارنة مع طول الانتشار،  $\Delta D$ ، للجسيمات المترسبة. تم تحديد أربعة مناطق للبنية التركيبية في عملية طور البخار [20].

المنطقة 1: عندما  $T_s/T_m$  منخفضة جدا بحيث ان الانتشار السطحي مهم ( $\Delta D < a$ )، قد يحتوي الفيلم على أعمدة بقطر يصل لحوالي 10 nm منفصلة بفراغات تصل لبضعة نانومتر. هذه الأعمدة ذات بلورة ضعيفة وقد تكون امورفاس. في الأفلام السميكة يمكن ان تغطي بمصفوفة من المخاريط بفراغات اكبر بينها، وتنتهي بقبة عند السطح.

المنطقة T: هذه المنطقة عادة ما تكون مصاحبة لعمليات تعزيز الطاقة مثل ما في الترسيب بالليزر النبضي. عندما  $\Delta D < a$ ، فان الفيلم قد يحتوي على عيوب في صورة أعمدة مثل تلك في المنطقة 1، ولكن بدون فراغات ولا قبة.

المنطقة 2: عندما  $T_s/T_m > 0.3$  تقريبا بحيث ان الانتشار السطحي يصبح مؤثرا، فان الفيلم قد يحتوي على أعمدة تمتلك حدود حبيبية ضيقة بينها. الأعمدة البلورية تمتلك عيوب اقل من المنطقة 1 والمنطقة T وعادة ما تظهر على السطح. هذا التركيب قد تحدث في الأفلام الامورفس (الغير بلورية)، حيث الحدود مستوية ناتجة من روابط اقل من المستويات في التركيب البلوري المنفصل.

المنطقة 3: لـ  $T_s/T_m > 0.5$ ، معالجة حرارية للفيلم أثناء الترسيب، حيث ان الفيلم في بعض الحالات يحتوي على أشكال بلورية منتظمة. البنية التركيبية للفيلم تكون في العادة مصحوبة بأسطح ناعمة. على كل حال الحدود الحبيبية قد تكون أخاديد.

بصفة عامة افضل درجة حرارة لنمو أفلام رقيقة بجودة عالية هي عندما تكون  $0.3 < T_s/T_m < 0.5$  حيث يكون هناك انتشار سطحي كافي يسمح لذرات السطح بان تقلل من طاقتها السطحية وتصل لمواقع مستقرة حراريا [20].

### تكون الجسيمات الدقيقة Formation of particulates

واحدة من اهم المشاكل التي تواجه تقنية الترسيب بالليزر النبضي هي وجود الجسيمات الدقيقة على سطح الفيلم. منشأ هذه الجسيمات من قطرات السائل التي انتزعت من الهدف أثناء التشعيع، ومن النواتج المنتزعة التي أزيلت بشكل ميكانيكي من الهدف تحت تأثير طاقة الليزر الحرارية والصدمة الميكانيكية، أو من تكثف المجموعات من أصناف البخار الناتجة عن التشعيع الفائق [21]. لوحظ أول نوع من الجسيمات الدقيقة عند كثافة طاقة اعلى من  $10^7 \text{ W/cm}^2$ ، وهذا النوع من الجسيمات لوحظ في وجود غاز الخلفية أثناء عملية ترسيب الفيلم [21]. أحجام الجسيمات الدقيقة في حدود الميكرون وأجزاء الميكرون، ولكن الجسيمات الدقيقة المتكونة من حالة البخار تكون في حدود النانومتر. بصفة عامة كثافة وحجم الجسيمات الدقيقة على سطح الفيلم المترسب تميل للزيادة مع زيادة طاقة الليزر وزيادة الطول الموجي لليزر المستخدم [21]. ولكن عوامل أخرى مثل حجم بقعة الليزر وضغط الغاز المحيط هي عوامل مهمة أيضا.



### 5.3 الخلاصة Summary

تقنية الترسيب بالليزر النبضي تقنية ترسيب للأفلام بسيطة نسبيا. ولكن عملية الترسيب في الحقيقة معقدة ولكي نرسب أفلام بجودة عالية، فإنه يتطلب ضبط عوامل الترسيب والتحكم بها بشكل مناسب. عوامل الترسيب مثل معدل الترسيب وطاقة حركة الجسيمات المنتزعة وقابلية حركة الجسيمات يمكن التحكم بها من خلال العوامل التجريبية مثل طاقة الليزر وضغط غاز الخلفية ودرجة حرارة أرضية الترسيب. أفضل عوامل الترسيب في تقنية نمو الأفلام بالترسيب بالليزر النبضي هي تقنية فعالة خصوصا عند ترسيب أكاسيد المواد المتعددة المركبات. في الحقيقة في هذا المجال تعد هذه التقنية تقنية منافسة لتقنيات الترسيب الأخرى.

تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

3-11-2011

[www.trgma.com](http://www.trgma.com)