

Ljutovič, A. S.:

Wirkung der Ionen auf das Kristallwachstum. Charakteristik der Abscheidungskennwerte

Deutsche Auszugsübersetzung aus:

Ionno-aktivirovannaja kristallizacija plenok. Taškent: FAN, 1982, S. 61-64.
(Akademie der Wissenschaften der Uzbekischen SSR. U. A. Arifov-Elektronik-Institut)

Russisch:

Действие ионов на растущий кристалл. Характеристики параметров процесса осаждения

Dejstvie ionov na rastuščij kristall. Charakteristiki parametrov processa osaždenija

Die Ionen übertragen Energie, Impuls und Ladung auf das Substrat und die Abscheidungsschicht und haben somit Einfluß auf die Elementarprozesse, die an der Substratoberfläche ablaufen (Keimbildung und -wachstum) und auch auf die Schichtzusammensetzung. Auf der Substratoberfläche beeinflusst das Ionenbombardement die chemische Reinheit, die Defektdichte und die Ladungsverteilung, was wiederum eine lokale Temperaturerhöhung begünstigt. Außerdem kann es infolge der Zerstäubungs- und Diffusionseffekte zur Bildung von Grenzschichten kommen, d. h. Schichten, die aus Substrat- und Schichtmaterial bestehen. Während der Bildung und des Wachstums der Keime beeinflussen die Ionen den kritischen Druck, die Anzahl und Mobilität der Keime, die Koaleszenz oder Epitaxie und im weiteren Verlauf des Schichtwachstums auch die Schichtstruktur und -morphologie; die Desorption der Beimischungsteilchen steigt an, und die wiederholte Zerstäubung wird aktiviert. Die Ionen beeinflussen auch die Schichtzusammensetzung, besonders bei der Abscheidung von Dotierungen oder während der Reaktionsprozesse.

Das Eindringen von Ionen beim Beschichten kompliziert den Kondensationsvorgang. Für eine gezielte Änderung der Kondensationsbedingungen während der Ionenabscheidung müssen die passenden Prozeßparameter geschaffen werden. Dies setzt genaue Kenntnisse des Typs, der Geschwindigkeit und der Energie aller an der Kondensation teilnehmenden Teilchen und außerdem des Charakters der Teilchenwechselwirkung voraus. Die allgemeine Charakteristik des Ionenabscheidungsprozesses kann sich auf die Einschätzung des Energieaktivierungsgrades gründen. Die Energieaktivierung, die mit der Ionenwirkung in Zusammenhang steht, läßt sich durch den Energiekoeffizienten bestimmen, der durch das Verhältnis der kinetischen Energie aller Teilchen während der Kondensation mit Ioneneinwirkung ($E_i + E_n$) zur kinetischen Energie ohne Ioneneinwirkung (E_n) ausgedrückt wird:

$$\varepsilon = \frac{E_i + E_n}{E_n} = 1 + \frac{n_i e_i}{n_n e_n},$$

wobei n_i/n_n - das Verhältnis zwischen Ionengeschwindigkeit und Abscheidungsgeschwindigkeit darstellt und e_i/e_n das Verhältnis der Energie des Ionenflusses zur Energie des Teilchenstroms ohne Ioneneinwirkung. Die Energieaktivierung ist vom Verhältnis der genannten Geschwindigkeiten und vom Verhältnis der Ionenteilchenenergie zum kondensierenden Dampf oder zum zerstäubten Material abhängig.

Bei Betrachtung der energetischen Aktivierung der Wachstumsoberfläche müssen nicht nur die Ionen berücksichtigt werden, sondern auch hochenergetische neutrale Teilchen, die durch Ladungsaustausch der genannten Ionen entstehen und eine wesentliche Rolle in den Abscheidungsprozessen spielen, besonders bei der Ionenelektroplattierung und der Zerstäubung mit Vorspannung bei hohen Gasdrücken.

Außer der durch neutrale Teilchen und Ionen zugeführten kinetischen Energie, wird während der Abscheidung zusätzliche Energie durch Kondensationserwärmung der Teilchen, Radiation und den auf die Substratoberfläche gerichteten Elektronenfluß zur Verfügung gestellt. Die relative Wirkung der von den Ionen hervorgerufenen Energieaktivierung verstärkt sich in diesen Systemen, während sich die thermische Überbelastung des Substrats verringert.

Die meisten Effekte des Ionenbombardements während der Kondensation sind unabhängig von der mittleren Teilchenenergie, stehen aber mit bestimmten Energiebereichen einzelner Teilchen in Verbindung. Im Falle von ein und derselben mittleren Teilchenenergie gibt es große Unterschiede in der Energieverteilung bei der Ionenelektroplattierung und Vorspannungszerstäubung. Wenn an der Ionenelektroplattierung Ionen mit einer Energie von 1-2 keV beteiligt sind, können sich zwischen dem Substrat und den Schichten Grenzsichten bilden (z. B. infolge der Zerstäubung und Neuzerstäubung), was die Adhäsion verbessert.

Bei der Zerstäubung mit Vorspannung können Ionen mit einer Energie von 10-40 eV eine Desorption der Beimischungsatome hervorrufen und eine kompaktere Schicht bilden, während die erforderliche Adhäsion bei hoher Energie der zerstäubten Teilchen erreicht werden kann. Die Ionenenergie ist bei der Ionenabscheidung ein sehr wichtiger Parameter, weil sie den Wirkungstyp des Ions bestimmt. Abb. 21 zeigt die Verbindung zwischen der Ionenwirkung und einem bestimmten Energiebereich.

Während der Kondensation gibt es für die möglichen Ionenwirkungen eine Obergrenze. Im Falle einer erhöhten Energieaktivierung wächst die thermische Belastung für Schicht und Substrat. Der maximale Energieübertragungskoeffizient wird durch die erforderliche Kondensationstemperatur bestimmt. Es gibt jedoch noch eine andere Grenze, die bei der wiederholten Zerstäubung entsteht - eine Begrenzung, die mit wachsender Geschwindigkeit und Ionenenergie immer deutlicher wird; im Ergebnis verringert sich die Kondensationsgeschwindigkeit. Bei einigen Abscheidungsbedingungen können die mit dem Ionenbombardement verbundenen Struktur- oder Ladungseffekte die Ionenwirkung einschränken.

Ein wichtiger Parameter des Plattierungsprozesses ist der zeitliche Ablauf der Ströme auf das Substrat fallender Ionenteilchen. In einigen Fällen ist bei Steigerung der Adhäsion zur Keimerzeugung die Ionenwirkung nur zu Beginn des Plattierungsprozesses oder nur direkt vor der Kondensation notwendig.

Ionenplattierung ist ein allgemeiner Terminus, der eine Abscheidung charakterisiert, bei der ein Gemisch verdampfter neutraler Teilchen und energetischer Ionen zu den Substraten geleitet wird. Entsprechend den Angaben in [75], wird ein Teil des thermisch verdampften Materials durch Gasentladung ionisiert, die bei niedrigem Inertgasdruck zwischen den Substraten und der Zwischenelektrode aufrechterhalten wird. Wenn man dem Substrat ein negatives BIAS-Potential bis zu einigen Kiloelektronenvolt zuführt, werden die Ionen beschleunigt, und das daraus resultierende Bombardement der Substratoberfläche oder Schichtwachstum mit Hilfe von Energieteilchen sorgen für eine deutliche Verbesserung der Schichtadhäsion und der Homogenität der Abscheidung. Diese Effekte werden durch zusätzliche kinetische Energie verursacht, die den Substraten zugeführt wird.

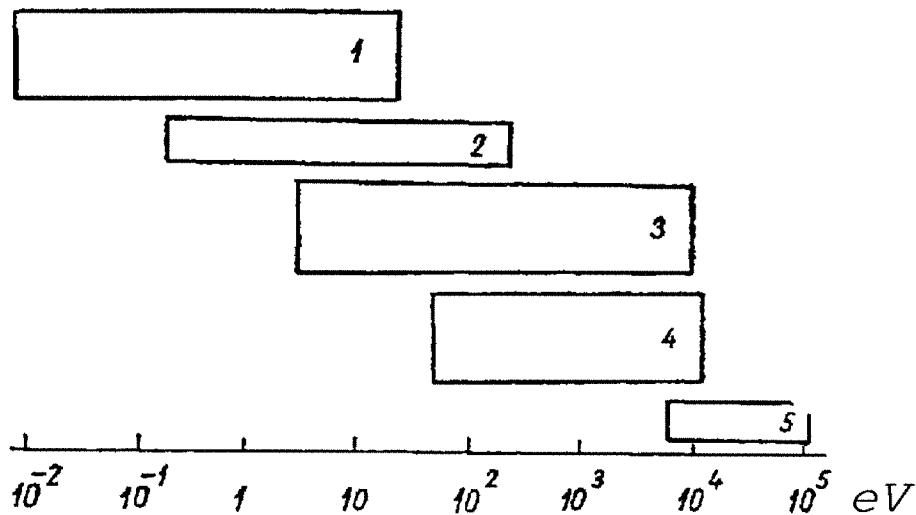


Abb. 21. Wirkung von Ionen mit unterschiedlichen Energien:

- 1 - thermische Aktivierung der Kondensation, verstärkte Wanderung; 2 - Desorption der Störstellenatome; 3 - Bildung von Aktivierungszentren aus geladenen Defekten und Strukturdefekten; 4 - Zerstäubung von Störstellenatomen, sekundäre Zerstäubung; 5 - Eindringen.

Für die Energie führen wir folgendes Verhältnis ein:

$$\varepsilon = \frac{W_i + W_e}{W_e} \approx 8 \cdot 10^3 T_e^{-1} U n_i / n_e ,$$

wobei W_i und W_e für die allgemeine kinetische Energie jeweils von den Ionen bzw. von den verdampften neutralen Teilchen stehen; T_e ist die Verdampfungstemperatur, K; U das Beschleunigungspotential; n_i und n_e die Anzahl der Ionen bzw. der neutralen thermischen Teilchen.

Unter herkömmlichen Bedingungen hat dieses Verhältnis eine Größenordnung von $10^2 - 10^3$, so daß die kinetische Energie, die den Substraten zugeführt wird, wesentlich größer ist als die Verdampfungs- oder Zerstäubungsenergie, dabei muß jedoch die zunehmende Strahlenschädigung berücksichtigt werden. Der Mechanismus der Ionenplattierung ist bisher noch nicht ausreichend untersucht worden. Es gibt keine experimentellen Zahlenangaben und keine Prozeßtheorie. Effekte wie die Reinigung durch Zerstäubung, Entfernung schwach gebundener Schichtteilchen, Aktivierung der Oberflächen- und Volumendiffusion, Implantation in die Oberflächenatomschichten oder die chemische Aktivierung wurden bei der Erklärung des gut erforschten Einflusses des Ionenbombardements auf die Schichteigenschaften berücksichtigt. All diese Prozesse spielen eine Rolle, aber ihr relativer Anteil kann sich wegen der Material- und Abscheidungsparameter stark verändern. Bei einem Restgasdruck in der Größenordnung von 1 Pa geht der größte Teil der überschüssigen Ionenenergie bei Zusammenstößen auf die neutralen Teilchen über [76].

Durch Erzeugen eines Teilchenstromes von den Targets, die einer intensiven Plasmaentladung ausgesetzt sind, lassen sich die Abscheidungsraten bei der Ionenplattierung wesentlich erhöhen. Die Realisierung erfolgt durch Entnahme von

Plasmastrahlen aus der Hohlkatode oder in ringförmigen Entladungen einer flachen Magnetronquelle. Magnetronen erlauben die Durchführung von Abscheidungen mit hohen Raten.

Bei Anwendung des Molekularstrahlverfahrens oder der Zerstäubung durch Ionenstrahlen entspricht die Teilchenenergie der Verdampfungstemperatur (0,2 eV bei 2000 K), und die mittlere Energie 5-10 eV kann nicht verändert werden. Da die Arbeit an der Ionenplattierung den Einfluß der kinetischen Energie auf die Schichteigenschaften voraussetzt, war es interessant, die Kondensation der Teilchen auf dem Substrat in Abhängigkeit von ihrer Energie unter Vakuumbedingungen zu untersuchen.

In diesen Versuchen werden die Ionen des Schichtmaterials durch passende Quellen generiert, und der Strahl wird auf das Substrat gerichtet, wo die Teilchen kondensieren. Die für die Neutralisation der Ionen benötigten Elektronen werden automatisch aus der Umgebung geliefert oder können von heißen Drähten emittiert werden. Unter diesen Bedingungen wird es möglich, die Schichtbildung unter Verwendung reiner und fast monoenergetischer Teilchenstrahlen genau zu untersuchen, besonders dann, wenn ein bestimmter Ionenstrahl gebildet und unter Berücksichtigung des Verhältnisses e/m und der Ionenenergie im elektrischen oder magnetischen Feld herausgefiltert werden kann.

Besonders interessant sind:

1. der Bereich zwischen 15 und 150 eV, in dem es keine Strahlungsschäden gibt und die Aktivierungsenergie, die der wachsenden Schicht zugeführt wird, höher ist als bei der Epitaxie aus dem Molekularstrahl oder bei der Zerstäubung der Ionenstrahlen;
2. der Bereich zwischen 150 eV und einigen Kiloelektronenvolt, in dem sich neue Schichtphasen bilden können, die äquivalent zur Hochdrucksynthese sind (hier muß die beträchtliche Strahlenschädigung berücksichtigt werden).

Literatur

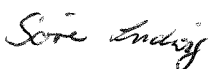
[75] Mattox, D. N. A. V. S. Thin Film Division Report, 1973. Mattox, D. M.: Fundamentals of Ion Plating. In: Journal of Vacuum Science and Technology. 10 (1973), p. 47-52. /Engl./


[76] Teer, D. G. J. Phys., 1976, vol. 9, p. 187.

Teer, D. G.: The Energies of Ions and Neutrals in Ion Plating. In: Journal of Physics D: Applied Physics, London, 9 (1976), p. L187-L189. /Engl./

Stuttgart, den 17. Juni 1999

Übersetzt von:


(Sören Ludwig)


Ottmar Pertschi
(Diplomübersetzer)