

Ljutovič, A. S.:

Energiespektrum beschleunigter Ionen, die die Wachstumsoberfläche bombardieren und ihr Einfluß auf das Epitaxie-Wachstum

Deutsche Auszugsübersetzung aus:

Ionno-aktivirovannaja kristallizacija plenok. Taškent: FAN, 1982, S. 92-97.
(Akademie der Wissenschaften der Uzbekischen SSR. U. A. Arifov-Elektronik-Institut)

Russisch:

Энергетический спектр ускоренных ионов, бомбардирующих поверхность роста, и их влияние на эпитаксиальный рост

Énergetičeskij spektr uskorenych ionov, bombardirujuščich poverchnost' rosta, i ich vlijanie na épitaksial'nyj rost

Die Untersuchung der Wachstumsbedingungen epitaktischer Schichten unter äußeren Einwirkungen führt zum tieferen Verständnis der Natur der Oberflächenkristallisation, der Keimbildungsprozesse und der orientierten Kristallisation.

Eine notwendige Bedingung für die Entwicklung einer allgemeinen Theorie zur orientierten Kristallisation an der Wachstumsoberfläche ist die Beschaffung eindeutiger Informationen über die energetischen Aspekte der Oberflächenerscheinungen bei der Schichtkristallisation (Adsorptionsenergie, Oberflächendiffusion, Gesamtbindungsenergie in einer Atomgruppe, freie Energie des Systems). Eine gute Perspektive haben in dieser Hinsicht Abscheidungsverfahren mit direkter Anregung der verschiedenen Wechselwirkungsmechanismen zwischen den adsorbierten Atomen und der Wachstumsoberfläche; Verfahren mit orientierender Wirkung der Mutterkathode auf die Keime und Verfahren zur Stimulation der Keimbildungszentren. Als Verfahren der äußeren energetischen Einwirkung auf die Kristallisation kommen in Frage: Bestrahlung mit ionisierender Strahlung, Licht, geladenen Teilchen (Ionen oder Elektronen); konstante elektrische und magnetische Felder, elektrische, magnetische und elektromagnetische Hochfrequenzfelder; die Schaffung besonderer Reinheitsbedingungen für die Oberflächenkristallisation im Höchstvakuum.

Am effektivsten ist die Einwirkung mittels Ionenstrahl. Für das volle Verständnis der physikalischen Stimulationsprozesse der Niedertemperaturepitaxie ist es jedoch notwendig, die Wirkung von Ionen verschiedener Energien mit unterschiedlicher Dichte unter Berücksichtigung der kristallographischen Struktur der gewonnenen Schichten zu untersuchen.

Die von uns verwendete Versuchsanlage (siehe Abb. 27) war eine metallische Vakuumkammer (aus nicht rostendem Stahl) mit einem Volumen von 20 l. Die Kammerwände wurden mit fließendem Wasser gekühlt (Temperatur 18-20°C), wenn erforderlich, wurden sie mit heißem Wasser auf 50-70°C erwärmt. Die Elektro-zuleitungen in die Kammer hatten eine Glasisolation. Die Beschickungsöffnungen und die übrigen lösbaren Verbindungen wurden mit besonders wärmebeständigem Vakuumgummi abgedichtet. Das System für die Vakuumerzeugung bestand aus einer Vorvakuumpumpe für die Vorevakuierung (für ein Vakuum von 2,6 Pa), einer Öldiffusionspumpe (für ein Vakuum von $6,5 \cdot 10^{-2}$ - $6,5 \cdot 10^{-4}$ Pa in der Arbeitskammer) und einem gesonderten Vakuumsystem mit dem Massenspektrometerkopf [für ein Vakuum von $(1,3-2,6) \times 10^{-4}$ Pa]. Zum Auffangen der Öldämpfe in der Vakuumleitung wurden Stickstofffänger eingesetzt. Im Vakuumsystem gab es Absperrventile für jede Kammer. Die Analyse des Partialdrucks und der Meßdynamik der Gaszusammensetzung erfolgte mit Hilfe eines Laufzeitmassenspektrometers vom Typ MSCh-ZA.

Als Dampfquelle diente ein Siliziumstab mit einem Durchmesser von 20-25 mm, der mit HF-Strom bis zum Schmelzen des Kopfendes erhitzt wurde. Der HF-Strom wurde in der Quelle mit Hilfe eines Induktors induziert. Durch die Oberflächenspannungskräfte wurde die Schmelze festgehalten. Die Funktion des Diodensystems Anode-Kathode bestand in der Erzeugung eines Elektronenstroms in Querrichtung zum sublimierten Dampf, der Erregung durch Ionenstoß und der Ionisation des Siliziumdampfes. Bei dem Substrat handelte es sich um einen Siliziumwafer mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Dicke von 200 µm, die Abscheidungsfläche des Substrats hatte die kristallographische Orientierung (111). Für den Durchgang des analysierten Ionenstrahls wurde im Substrat eine rechteckige Öffnung mit den Maßen 6x3 mm² geschaffen. Die Graphitunterlage, die gleichzeitig auch zum Heizen des Substrats diente, hatte die gleiche Öffnung. Vor der Abscheidung erfolgte eine Bearbeitung der Substratoberfläche entsprechend der Standardtechnologie.

Zur Analyse der Dichte und energetischen Zusammensetzung des Ionenstrahls wurde ein zylindrischer 127°-Kondensator von Juzo-Rožanskij verwendet, der innere Durchmesser betrug 4 mm, die Wandstärke 30 mm. Die Wahl der Kondensatormaße wurde durch die optimale Auflösung und die Bedingungen der Versuchskammer diktiert.

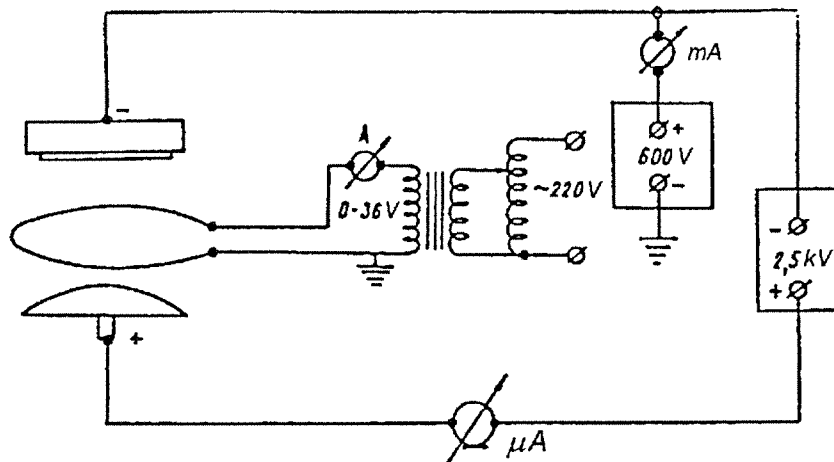


Abb. 37. Elektrische Schaltung für den Epitaxieprozeß aus einem Ionenmolekularstrom.

Der analysierte Strahl hatte einen rechteckigen Querschnitt, erzeugt von der Eingangsöffnung des Kondensators, mit den Maßen $1 \times 4 \text{ mm}^2$. Als Ionenkollektor diente ein Faraday-Zylinder. Der Schaltplan für die Energiespeisung des gesamten Systems ist in Abb. 37 dargestellt. Der Analysator und alle inneren und äußeren elektrischen Verbindungen besaßen eine geerdete Abschirmung zum Schutz vor dem Einfluß von Fremdströmen. Die gesamte elektrische Schaltung wurde von zwei Standardquellen der Marke UIP-1 gespeist. Die analysierten Ionenströme wurden mit Hilfe eines elektrischen Gleichstromverstärkers vom Typ U-1-2 gemessen, der eine gute Übereinstimmung des Analysatorausgangswiderstandes mit dem Eingangswiderstand des Galvanometers sicherte, infolge dessen hat sich die Verzerrung des untersuchten Signals bedeutend verringert.

Die anfängliche Evakuierung der Kammer und des Massenspektrometerkopfes wurde bis zu einem Vakuum von $(2,6-3,9) \times 10^{-4} \text{ Pa}$ durchgeführt, bei Erwärmung der Kammerwände auf 50°C und der Wandung des Massenspektrometerkopfes auf 350°C . Nach 30minütiger Volumenentgasung wurde das Erhitzen der Wände eingestellt und die Kühlung eingeschaltet. In der nächsten Etappe der Entgasung wurden Quelle, Substrat, Kathode, Anode und Ionenanalysatorsystem auf $300-500^\circ\text{C}$ erwärmt. Der Druck in der Arbeitskammer war während der Experimente doppelt bis dreifach so hoch wie der im Massenspektrometer, da die entsprechenden Volumina differentiell evakuiert wurden und weil es in der Arbeitskammer Teile gab, die stärker erhitzt wurden (die Quelle auf 1430°C , das Substrat auf 600°C , die Kathode auf 1400°C). Der am geschmolzenen Kopfende der Quelle sublimierte Siliziumdampf wurde durch Ionenstoß in einem querverrichteten Elektronenstrom angeregt und ionisiert. Dieser Elektronenstrom wurde durch ein elektrisches Feld von 300 V zwischen Kathode und Anode erzeugt. Die positiven Ionen wurden durch ein Feld zwischen Anode und Substrat beschleunigt. Dabei wurde die Größe des angelegten Feldes stufenweise (diskret) geändert - in $600, 800$

und 1000 V. Der untersuchte Ionenstrahl ging durch die Öffnungen in Substrat, Unterlage und Eingangsöffnung hindurch und fiel in den Analysator ein.

Auf dem Kollektor betrug der Wert für den analysierten Ionenstrom 10^{-8} A, was einer Dichte des Gesamtionenstromes auf dem Substrat von $2,5 \cdot 10^{-7}$ A/cm² entspricht, bei einer Querschnittsfläche des analysierten Strahles im zylindrischen Kondensator von 4 mm².

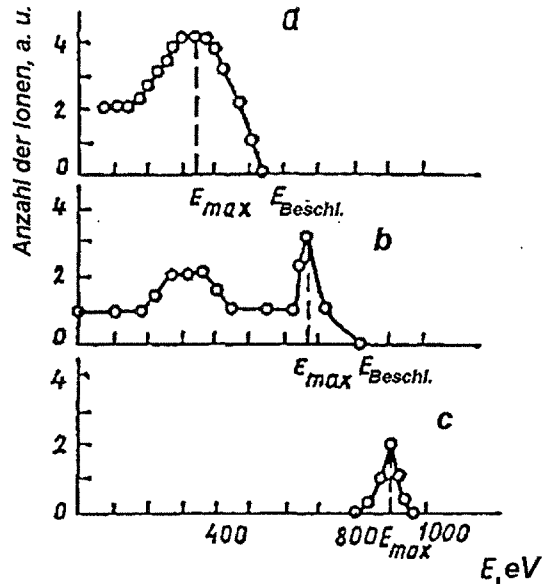


Abb. 38. Verteilung des Ionenenergiespektrums in Abhängigkeit vom Beschleunigungsfeld:
 a - 600 V; b - 800 V; c - 1000 V.
 ($E_{\text{Beschl.}}$ ist die nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung maximal mögliche Energie der Ionen, A. d. Ü.)

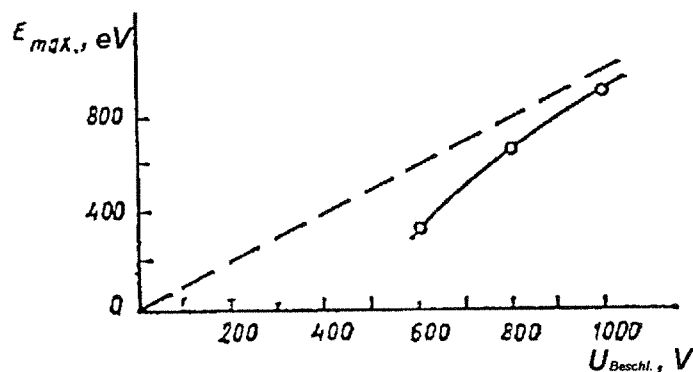


Abb. 39. Abhängigkeit der Ionenenergie von der Beschleunigungsspannung.

Auf den Abbildungen 38 und 39 sind für verschiedene Beschleunigungspotentiale die Kurven für die Verteilung der Siliziumionen nach den Energien dargestellt. Mit steigendem Beschleunigungspotential nähert sich der Peak des Ionen dichtemaximums seiner Größe nach der angelegten Spannung an. Die Kurve für die Ionenverteilung nach den Energien hat bei einem Beschleunigungspotential von 600 V im Vergleich zu den übrigen ein breiteres Maximum. Für 800 V hat das Ionenpektrum zwei Maxima: ein breites im Bereich von 300-400 eV und ein schmales im Bereich von 600 eV. Mit wachsendem Feld verringert sich die Dichte der Ionenströme in relativen Einheiten, und für ein Beschleunigungspotential von 1000 V

befindet sich das Maximum im Bereich von 900 eV. Dieser Peak ist der kleinste, weil sich mit steigendem Beschleunigungspotential die Äquipotentialflächen des elektrischen Feldes so verschieben, daß der Hauptanteil der Ionen durch eine Feldspannung geht, die sich dem Wert des angelegten Potentials annähert. Dabei verringert sich infolge der Defokussierung des ionisierenden Strahls der Anteil an Ionen mit geringeren Energien und die Gesamtzahl der Ionen. Durch zusätzliche Energiestimulation ließ sich die Wachstumstemperatur für die Siliziumepitaxie von 1200 auf 600°C senken.

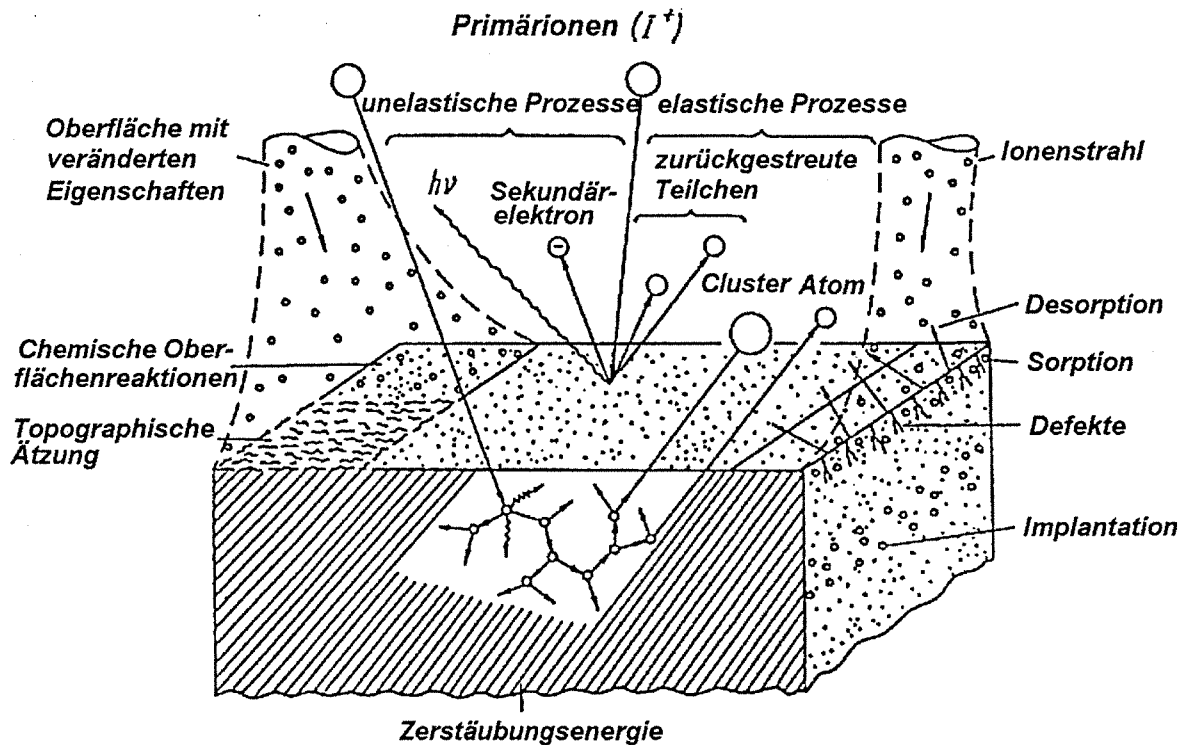


Abb. 40. Elementare Wechselwirkungsprozesse zwischen den Ionen und dem festen Körper.

Auf der Grundlage der ermittelten Ergebnisse läßt sich schlußfolgern, daß ein Anwachsen des Ionenbeschleunigungsfeldes zur Verringerung der Dichte des Gesamtionenstromes und gleichzeitig zum Ansteigen der Ionenenergie führt. Es ist festgestellt worden [84, 104, 105], daß sich bei der Kristallisation in einem Feldbereich von 0-3 kV mit wachsender Feldspannung von 1 auf 2,5 kV die Kristallstruktur verbessert, bei 600 V ist kein epitaktisches Wachstum zu beobachten. Folglich können im betrachteten Prozeß die Erhöhung der Ionenenergie und gleichzeitige Verringerung ihrer Dichte im untersuchten Wertebereich als Bedingung für die Optimierung des Wachstums strukturell perfekter Schichten wirken.

Es ist bekannt, daß die Verringerung der Kristallisationstemperatur bei energetischer Stimulation der epitaktischen Prozesse durch Beschuß mit beschleunigten Ionen nur in einem bestimmten Intervall des Beschleunigungspotentials möglich ist, nämlich von 1000-2500 V; dabei verbessert sich mit wachsendem Feld die Schichtstruktur. Der Ionenbeschuß bei solchen Energien führt jedoch zu einer starken Zerstörung des Festkörpers durch Kathodenätzung. Für Silizium tritt die Kathodenätzung bei Potentialen von 400 V in Erscheinung. Deshalb war nicht klar, warum sich in unseren Versuchen bei einem Potential von 1000 V eine einkristalline

Schichtstruktur herausbildete und sich mit steigender Ionenenergie schrittweise verbesserte. Anhand der ermittelten Werte ließ sich feststellen, daß die Ionenenergie mit wachsendem Beschleunigungsfeld steigt und die Ionendichte sich verringert.

Folglich wird die Kristallisation auf der Oberfläche durch die Steigerung der Energie der beschießenden Ionen und die Verringerung der Ionenstromdichte optimiert.

Beim Ionenbeschuß der Oberfläche eines festen Körpers wird die Energie der Primärionen für die Energieübertragung auf die Atome der Auffangelektrode durch aufeinanderfolgende elastische und unelastische Stöße, für die Kathodenzerstäubung und elektromagnetische Strahlung verbraucht (Abb. 40). Zwei Erscheinungen sind für die Oberflächenkristallisation am wichtigsten: die Energieübertragung auf die Oberfläche des festen Körpers und die Kathodenzerstäubung. Die Energieübertragung auf die Oberfläche ist eine notwendige Bedingung der Niedertemperaturkristallisation, und die Kathodenätzung ist ein Selektivitätsfaktor des gegebenen Prozesses. Dabei wird das gezielte Herausschlagen von Adatomen aus Defektpositionen zu einem wichtigen Ordnungsmechanismus für die Schichtstruktur. Durch Auswahl der passenden Parameter für den Ionenstrahl (Energie und Dichte) kann man die Bedingungen und die Intensität der Kathodenätzung optimieren und dabei die für die Schichtkristallisation optimale Energieübertragung beibehalten.

Literatur

[84] Лютович, А. С.; Клименко, К. Ф.: В кн.: Синтез и рост совершенных кристаллов и пленок полупроводников. Новосибирск, 1981, с. 62-66.

Ljutovič, A. S.; Klimenko, K. F.: Nizkotemperaturnaja épitaksija kremnija iz ionno-molekuljarnych pučkov v vakuume. In: Sintez i rost soveršennyh kristallov i plenok poluprovodnikov. Novosibirsk, 1981, S. 62-66.

/Niedertemperaturepitaxie von Silizium aus Ionenmolekularstrahlen im Vakuum; russ./

[104] Aleksandrov, L. N.; Lutovitch, A. S.; Belorusets, E. D.: The Mechanism of Silicon Epitaxial Layer Growth from Ion-Molecular Beams. In: Physica status solidi, (A) Applied Research, Berlin: Akademie-Verlag, vol. 54 (1979), p. 463-469. /Engl./

[105] Ljutovič, A. S.: Ion-molecular Epitaxy. In: Abstr. of International Conference. Low Energy Ion Beams-2. London, 1980, p. 45. /Engl/

Stuttgart, den 08. 03. 1999

Übersetzt von:



Sören Ludwig



Ottmar Pertschi
(Diplomübersetzer)