

Ljutovič, A. S.:

Nichtthermische Aktivierung von Kristallisationsvorgängen

Deutsche Auszugsübersetzung aus:

Ionenaktivierte Filmkristallisation. Taškent: FAN, 1982, S. 5 - 13.
(Akademie der Wissenschaften der Usbekischen SSR. U.-A.-Arifov-Elektronikinstitut)

Russisch:

Нетермическая активация кристаллизационных процессов.
Netermičeskaja aktivacija kristallizacionnyh processov

Ob sich Halbleiterschichten zur Verwendung in Bauelementen eignen, hängt ganz von der Qualität der Kristallstruktur, der Beweglichkeit der Ladungsträger und dem genau vorgegebenen Profil der Störstellenverteilung ab. Eine wesentliche Rolle bei der Erzeugung exakter Dotierprofile spielt die Senkung der Kristallisationstemperatur. Dabei verringert sich im Wachstumsprozeß die Störstellendiffusion aus dem Substrat in die Epitaxieschicht, infolge dessen bilden sich scharf abgegrenzte Stufenübergänge. Außerdem werden Verschiebungen der Übergänge (falls solche im Substrat schon vorhanden sind) ausgeschlossen, wenn ein neues Halbleitermaterial abgeschieden wird.

Experimente haben bewiesen, je höher die Energie der kondensierenden Atome ist, um so perfekter ist die Struktur, um so weniger Defekte gibt es und desto beweglicher sind die Ladungsträger in der Schicht [1, 2]. Theoretisch läßt sich das folgendermaßen erklären:

1. die Schichtoberfläche wird durch die kondensierenden Atome von den adsorbierten Verunreinigungen und der Oxidschicht gereinigt;
2. die Oberflächendiffusion der Atome erhöht sich;
3. die Aktivierungsenergie des Kristallisationsvorganges für die kondensierenden Atome verringert sich.

Durch äußere Einwirkungen läßt sich die Kristallisationstemperatur senken und die Energie der kondensierenden Atome erhöhen. Außerdem übt jede konkrete Art der Einwirkung noch ihren ganz spezifischen Einfluß auf den Kristallisationsvorgang aus. Alle äußeren Einwirkungsverfahren lassen sich in vier Gruppen einteilen: elektrische Felder; Ionenimplantation; optische Einwirkung und ionisierende Strahlung. Betrachten wir nun diese Verfahren, ihre Wirkung auf den Kristallisationsprozeß und den Wirkungsmechanismus.

§ 1. Der Einfluß elektrischer Felder auf den Kristallisationsvorgang

Der Einfluß eines elektrischen Feldes auf den Kristallisationsvorgang wurde erstmals bei der Kristallisation unterkühlter Salzschnmelzen beobachtet.

V. V. Kondoguri [3] beobachtete im Jahre 1926 in unterkühlter Salol- und Piperinschnmelze bei Einwirkung eines elektrischen Gleichfeldes, daß die Anzahl der Keime anstieg. Er stellte fest, daß die Zahl der neuen Kristallisationszentren annähernd direkt proportional zur elektrischen Feldstärke ist. Später wurde eine analoge Erscheinung bei übersättigten Salzlösungen festgestellt.

M. I. Kozlovskij [4] untersuchte die Wirkung eines elektrischen Gleichfeldes auf die Bildung neuer Kristallisationszentren in übersättigten Halogen- und Sulfitsalzlösungen und stellte fest, daß die Bildungsgeschwindigkeit pro Flächeneinheit des untersuchten Präparates bei der gegebenen Temperatur direkt proportional zur Übersättigung der Lösung und zum Quadrat der elektrischen Feldstärke und natürlich von der Kristallisationssubstanz abhängig ist.

I. Ch. Geller, B. T. Kolomic und andere [5, 6] untersuchten den Einfluß eines elektronischen Wechselfeldes mit unterschiedlicher Frequenz auf die Kristallisation von amorphem Selen, der darin besteht, daß sich die Kristallisationsgeschwindigkeit erhöht und der endliche spezifische Widerstand der kristallisierten Probe verringert. Ihrer Meinung nach lassen sich diese Erscheinungen durch das Zerreißen langer Molekülketten von amorphem Selen unter der Einwirkung des variablen elektrischen Feldes erklären, wodurch die darauffolgende Packung in ein hexagonales Gitter erleichtert wird.

Ja. Tarui [7] untersuchte das epitaktische Wachstum von Germanium- und Siliziumschichten aus der Gasphase unter Einwirkung eines konstanten elektrischen Feldes (± 1 kV), das senkrecht zum Substrat ausgerichtet ist. Dabei erhöhte sich die Wachstumsgeschwindigkeit (maximal auf das Doppelte), und der spezifische Widerstand der Epitaxieschichten verringerte sich unter Einwirkung des elektrischen Feldes deutlich (maximal auf ein Zwanzigstel). Tarui bestätigte ebenfalls, daß das elektrische Feld Einfluß auf die Störstellenverteilung im Wachstumsprozeß hat. Er hält alle beschriebenen Erscheinungen für Ergebnisse einer Lawinenionisation, die bei Vorhandensein eines elektrischen Feldes entsteht. Die Wirkung der auf diese Weise entstehenden positiven Ionen beeinflusst eine ganze Reihe von Erscheinungen: die Ionenverschiebung, den Halogenaustausch, den Verlauf der chemischen Reaktionen u. a.

Die Arbeit [8] behandelt Wachstumsbesonderheiten von Galliumarsenid in einem elektrischen Gleichfeld, das senkrecht zum Substrat ausgerichtet ist und nach der Sandwich-Methode erzeugt wird. Bei diesem Verfahren dienen Substrat und Quelle als Elektroden. Die Wirkung des elektrischen Feldes ist in diesem Fall temperaturabhängig. Bei einer Substrattemperatur von 660°C und Quelltemperatur von 750°C wurden, wenn kein elektrisches Feld vorhanden ist und das Substrat auf positivem Potential ($I \sim 3 \mu\text{A}$; $\Delta U \sim 300 \text{ V}$) gehalten wird, keine wesentlichen Veränderungen in der Oberflächenmorphologie der wachsenden Schicht festgestellt. Wurde das Substrat auf negativem Potential gehalten ($I = 2 \mu\text{A}$, $\Delta U = 300 \text{ V}$), so erhöhte sich die Konzentration der Wachstumspyramiden um mehr als eine Größenordnung (ihre Form veränderte sich nicht), d. h. die Keimdichte erhöhte sich. Diese Erscheinung wird folgendermaßen erklärt: bei niedrigen Temperaturen sind die elektrischen Effekte bestimmend, die mit der Orientierung und Polarisierung der Moleküle der Gasphase sowie mit der Polarisierung der Oberflächenatome des Gitters verbunden sind. Im Falle der Polarisierung der Oberflächenatome muß die Bildung der Valenzbindungen durch die adsorbierten Atome wegen der Wechselwirkung mit den ungesättigten Gitterbindungen schneller verlaufen, was einer Verringerung des Wanderungsweges der adsorbierten Atome entspricht. Auf diese Weise erhöht sich die Keimdichte.

Bei einer Temperatur des Substrats von 710°C und der Quelle von 800°C entstehen, wenn man das Substrat auf positivem Potential ($I = 8 \mu\text{A}$, $\Delta U = 200 \text{ V}$) hält, spitz zulaufende Wachstumspyramiden, ein negatives Potential führt zur Glättung der wachsenden Oberfläche. Diese Erscheinungen stehen damit im Zusammenhang, daß sich mit steigender Temperatur bei Beeinflussung durch ein elektrisches Feld die Polarisierungseffekte abschwächen. Die Stromdichte wird so umverteilt, daß sie an den Kanten maximal ist, besonders an den Spitzen der Wachstumspyramiden. Dabei kann die Joulesche Wärme, die in den Strommikrokanälen frei wird, zu einer Überhitzung der Spitzen der Wachstumspyramiden führen, wodurch sich das Wachstum verlangsamt.

Die Untersuchungen der Epitaxie von Galliumarsenid nach der Sandwich-Methode lassen die Schlußfolgerung [8] zu, daß ein elektrisches Feld mit negativem Potential auf dem Substrat seiner Wirkung nach äquivalent zu einer gewissen Senkung der Substrattemperatur ist.

Die Arbeiten von K. L. Čopra [9] sind der Untersuchung des Einflusses eines elektrischen Feldes auf das Wachstum von metallischen Einkristallschichten gewidmet. Er stellte Dünnschichten durch Verdampfen von Gold und Silber in einem Vakuum von $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$ her. Als Substrate verwendete er Steinsalz- und

Glimmerkristalle. K. L. Čopra stellte fest, daß das Anlegen eines elektrischen Feldes an die Schicht zu einer Verringerung der minimalen Temperatur führt, die für das epitaktische Wachstum von Metallschichten erforderlich ist. Mit wachsender Feldstärke verringert sich diese Temperatur langsam und nähert sich einem konstanten Wert an. Experimentellen Angaben zufolge beträgt die Epitaxietemperatur für Gold auf Glimmer ohne elektrisches Feld 350 °C, mit einem elektrischen Feld $U=100$ V/cm 250 °C, für Silber auf Glimmer 200 und 100 °C, für Gold auf Steinsalz 350 und 200 °C und für Silber auf Steinsalz dementsprechend 150 und 50 °C. In derselben Arbeit wird auch der Einfluß des elektrischen Feldes auf die Qualität der Kristallstruktur dünner Schichten gezeigt. Die Gesamtzahl der Defekte, die nach elektronenmikroskopischen Aufnahmen abgeschätzt wurde, hat eine Größenordnung von $\sim 10^9$ Linien/cm², das sind zirka zwei Größenordnungen weniger als bei einem Schichtwachstum ohne elektrisches Feld.

Čopra hat die Wirkung des elektrischen Feldes auf den Koaleszenzvorgang intensiv untersucht [10, 11] und stellte fest, daß das Anlegen eines elektrischen Feldes parallel zur Fläche der Metallschicht eine frühere Koaleszenz hervorruft und zur Bildung eines Netzwerkes führt, das aus einer Vielzahl von Kristallinseln mit streng paralleler Orientierung der Kristallflächen besteht. Die Erhöhung der Feldstärke des äußeren elektrischen Feldes bis zu einer bekannten Grenze stimuliert das epitaktische Schichtwachstum. Diese Grenze steht mit der Feldstärke in Zusammenhang, bei der eine Lichtbogenentladung beobachtet wird, die zu einer Verschlechterung der Schichtqualität führt. Außerdem hat sich erwiesen, daß das elektrische Feld nur bis zum Beginn und während der Koaleszenzzeit Einfluß auf das Schichtwachstum hat, d. h. bis zu dem Moment, wo eine geschlossene Schicht entsteht.

Der Einfluß des elektrischen Feldes besteht also in der Neuverteilung der elektrostatischen Ladungen auf den Keiminseln. Der Koaleszenzvorgang verstärkt sich sowohl aufgrund der Einwirkung der elektrischen Kräfte als auch infolge der Erhöhung der Oberflächendiffusionsgeschwindigkeit. Da die Koaleszenz früher beginnt, bilden sich im Film geeignet orientierte Kristalle, die ihrerseits als Keime für das weitere epitaktische Wachstum wirken.

Aus der Analyse der hier zitierten Arbeiten folgt, daß alle Fälle von Einwirkung eines elektrischen Feldes auf Kristallisationsvorgänge die Erhöhung der Kristallisationsgeschwindigkeit gemeinsam haben, die das Ergebnis der Entstehung neuer Kristallisationszentren oder auch einer intensiveren Keimentwicklung sein kann. Das Entstehen neuer Kristallisationszentren ist offensichtlich damit verbunden, daß in Anwesenheit eines elektrischen Feldes Oberflächenladungen entstehen, die laut [12] Zentren der Verringerung der Potentialbarriere für die Keimbildung auf eine Größenordnung von 10% sind.

Vielfältige Untersuchungen zum Einfluß des elektrischen Feldes auf das epitaktische Wachstum von Halbleitern wurden von Ju. D. Čistjakov und Ju. P. Rajnova [13] vorgenommen.

§ 2. Optische Einwirkung auf die Kristallisationsvorgänge

Schon seit langem wurde in der Wissenschaft die Frage nach dem Einfluß des Lichtes auf das Kristallwachstum gestellt. Die erste Mitteilung über den Einfluß der Lichtenergie auf den Kristallisationsvorgang bei Salzen wurde im Jahre 1722 von Petit gemacht. Im weiteren wurden viele Untersuchungen zur Wirkung des Lichtes auf die Geschwindigkeit des Kristallwachstums durchgeführt.

Im Jahre 1961 wurde festgestellt [14], daß sich Selen-Nadelkristalle, die in der Gasphase wachsen, unter Lichteinwirkung in isometrische Kristalle verwandeln und ihre Wachstumsgeschwindigkeit sich erhöht, wenn die Photonenenergie größer als 2,5 eV ist (Energie zur Spaltung der Selen-Selen-Bindungen). Infrarotstrahlen führen jedoch zu einer Wachstumsverzögerung.

Konzentrieren wir uns auf die Arbeiten zur optischen Einwirkung auf den Epitaxieprozeß.

In der Arbeit von K. Masai und anderen [15] wird die chemische Homoepitaxie von Silizium ($\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$) auf einer Oberfläche (111) bei Beleuchtung durch eine Hochdruckquecksilberlampe mit einer Leistung von 500 W untersucht. Die Strahlungsdichte auf der Substratoberfläche betrug $\sim 10 \text{ W/cm}^2$. Das Erhitzen des Substrats erfolgte durch zwei Verfahren: mit Hilfe eines Hochfrequenzinduktors und eines elektrischen Widerstandes. Bei Beleuchtung des Gases wurde keinerlei Einfluß auf den Wachstumsvorgang und die Eigenschaften der gewonnenen Schichten festgestellt. Wurde aber das Substrat beleuchtet, dann wuchsen die Kristalle unter niedrigeren Temperaturbedingungen als ohne Beleuchtung. So betrug die Epitaxietemperatur bei Erhitzen durch einen Hochfrequenzinduktor ohne Beleuchtung $777,7 \pm 2^\circ\text{C}$ und mit Beleuchtung des Substrats $735 \pm 2^\circ\text{C}$. Bei Beleuchtung des Substrats verringert sich auch die Aktivierungsenergie für das Kristallwachstum (für den Fall der Hochfrequenzerwärmung z. B. um 2,1 kcal/mol), und die Wachstumsgeschwindigkeit erhöht sich.

Betrachtet man die Kristallstruktur, so ist die mit Beleuchtung des Substrats gezüchtete Schichtstruktur perfekter. Das wird bei niedrigen Temperaturen besonders deutlich. Die Autoren [15] geben keine genaue Erklärung für die festgestellten Erscheinungen, sie weisen nur darauf hin, daß das Licht einen Teil der Energie in die Gesamtenergie der chemischen Reaktion einbringt, die während des Kristallwachstums abläuft. Sie unterstreichen aber die Notwendigkeit, die richtige Wellenlänge für das Licht auszuwählen, das das Substrat beleuchtet.

R. G. Frieser [16] untersuchte den Einfluß ultravioletter Strahlung auf die chemische (Si_2Cl_6 und H_2) Homoepitaxie von Silizium auf einer Oberfläche (111) mit der Absicht, die Epitaxietemperatur zu senken. Als Strahlungsquelle diente eine Lampe mit einer V-förmigen Quarzquecksilberbogenröhre mit einer Leistung von 100 W. Die Wellenlänge der UV-Strahlung betrug 3160 Å, was 92 kcal entspricht. Als Ausgangsmaterial diente Si_2Cl_4 .

Bei einer Epitaxietemperatur von 700-800°C wurden hochgradig orientierte Siliziumschichten gewonnen [Quellentemperatur: 10°C ($2,6 \cdot 10^2 \text{ Pa}$), Durchströmungsgeschwindigkeit H_2 : 1,5 l/min, UV-Bestrahlung des Substrats während des Abscheidungsvorgangs]. Die Abscheidungsrate betrug $1 \mu\text{m/h}$, d. h. sie war ungefähr doppelt so groß wie ohne Beleuchtung. Bei derselben Epitaxietemperatur und Bestrahlung des Substrats mit UV-Strahlen von 230 μm Wellenlänge wurden orientierte Schichten ohne jegliche polykristalline Spuren gewonnen (bei einer Temperatur von 700-800°C). Mit steigender Wellenlänge nahm

der Orientierungsgrad der Schichten ab, sie wurden aber zunehmend polykristallin.

Die Dissoziationsenergie von Si_2Cl_6 beträgt 85 kcal/mol, deshalb fördert die UV-Strahlung mit einer Energie von 92 kcal die Dissoziation der Si_2Cl_6 -Moleküle. Die Silizium-Silizium-Bindung läßt sich jedoch nicht so leicht aufspalten, wie es zu erwarten gewesen wäre, wenn man nur thermodynamische Betrachtungen anstellt. Allem Anschein nach bleibt sie erhalten und spielt beim orientierten Keimwachstum eine wesentliche Rolle. Die UV-Bestrahlung begünstigt auch die Keimbildung. Da die Energie der UV-Strahlen ungefähr der Austrittsarbeit des Siliziums entspricht (4,1 eV oder 95 kcal/mol), können die Lichtquanten Elektronen zur Oberfläche ziehen, die infolge dessen für alle sich nähernden Atome in jeder Beziehung zu einer Fläche wird, die durch den Kristall hindurchgeht. Anders gesagt, statistisch gesehen kann die Bestrahlung so wirken, daß jedes Oberflächenatom im Verlauf eines größeren Zeitabschnitts über eine freie Bindung verfügt. Deshalb müssen die sich nähernden Siliziumatome nicht erst nach einer günstigen Lage suchen, sie können gleich da bleiben, wo sie angelangt sind.

Kuight und andere [17] haben den Einfluß von Infrarotstrahlen auf das Wachstum dünner Metallschichten im Vakuum untersucht. Goldschichten wurden auf einer "Melinex"-Schicht gezüchtet, Kupferschichten auf einer "Kapton"-Schicht und Silberschichten auf Glas, d. h. die Substrate waren nicht orientierend. Als Beleuchtungsquelle diente eine 250 W-Wolfram-Infrarotlampe. Die Beleuchtung beeinflusste das Wachstum und die Eigenschaften der Goldschichten auf einer "Melinex"-Schicht, wenn folgende Bedingungen beachtet wurden: der Wellenlängenbereich für die Quelle sollte 0,6 bis 1,1 μm , die Beleuchtungsstärke 3000 bis 11000 lx, die Schichtdicke 250 bis 450 Å und die Verdunstungsgeschwindigkeit 0,1 bis 10 Å/s betragen.

Der Einfluß der Beleuchtung auf die Schichtstruktur (Abb. 1) besteht darin, daß beleuchtete Schichten mehr Unterbrechungen in der Struktur haben als unbeleuchtete und größere Wachstumsinseln mit breiteren Zwischenräumen aufweisen, unbeleuchtete werden dagegen bei geringerer Schichtdicke zu geschlossenen Schichten. Deshalb haben beleuchtete Schichten einen größeren Widerstand. In den Anfangsstadien des Wachstums bestehen die dünnen Metallschichten aus einer Reihe von winzigen Inseln und haben Absorptionsmaxima im sichtbaren und dem daran angrenzenden infraroten Spektralgebiet, die keinem der bekannten Elektronenübergänge entsprechen. Diese Peaks stehen mit der Inselstruktur in Zusammenhang und werden Plasmaabsorptionspeaks genannt. Die Autoren der Arbeit [17] haben bewiesen, daß die Beleuchtung auf das Metallschichtwachstum nur dann Einfluß hat, wenn sie im Bereich eines solchen Peaks liegt. Da die verwendeten Substrate eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben, wird die gesamte Wärmeenergie, die durch die Infrarotstrahlen zugeführt wird, von den Schichten aufgenommen. Infolge dessen kann sich die Schichttemperatur um einige Hundert Grad erhöhen.

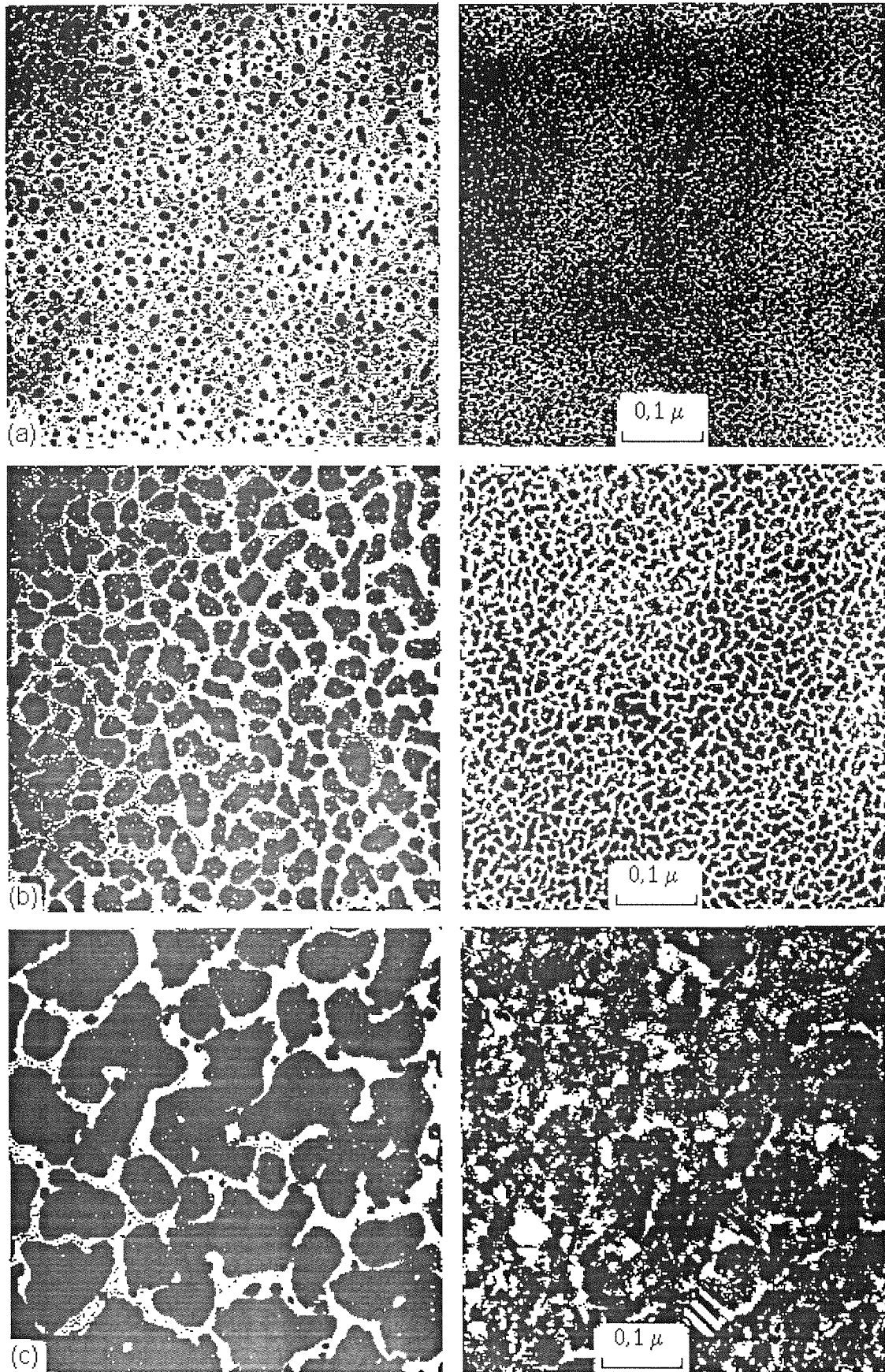


Abb. 1. Struktur von beleuchteten (links) und unbeleuchteten (rechts) Goldschichten, gezüchtet auf einer "Melinex"-Schicht im Vakuum bei Schichtdicken von a - 24 Å, b - 168 Å und c - 300 Å

Die Autoren [17] vermuten, daß zwei Koaleszenzmechanismen existieren, eine statische Koaleszenz, bei der die stationären Inseln unbeweglich bleiben und solange wachsen, bis sie einander berühren und eine dynamische Koaleszenz, bei der die beweglichen Inseln zusammenstoßen. Mit der Beleuchtung der Schichten erhöht sich auch die Temperatur der Inseln, und sie werden beweglich - es dominiert die dynamische Koaleszenz. Bei unbeleuchteten Schichten sind die Inseln unbeweglich - es dominiert die statische Koaleszenz. Deshalb erhöht sich bei beleuchteten Schichten folgerichtig die Koaleszenzgeschwindigkeit, was zu einer unsteteren Struktur mit größeren Inseln und größeren Zwischenräumen als bei unbeleuchteten Schichten führt. Anzumerken ist, daß die Autoren [17] nur infrarote Strahlen als Beleuchtung verwendeten, deshalb führte die Beleuchtung zur Schichterwärmung, während eine Zielstellung der äußeren Einwirkungen auf den Wachstumsvorgang die Senkung der Kristallisationstemperatur ist. Im gegebenen Fall wurden Metallschichten gezüchtet, die nicht dotiert werden müssen, um freie Träger zu gewinnen. Unterschiedliche Leitfähigkeit kann man erreichen, indem man auf die Schichtstruktur Einfluß nimmt, was die Autoren auch getan haben. Sie haben das Verfahren zur Erzeugung von Metallschichten mit leitenden und isolierenden Bereichen mit Hilfe von Beleuchtung patentieren lassen. Die beleuchteten Bereiche haben eine geringe und die unbeleuchteten eine hohe Leitfähigkeit.

§ 3. Ionenimplantation

Die Ionenimplantation ist ein neues Verfahren, deshalb gibt es wenige Arbeiten, die dieses Thema berühren.

G. V. Spivak und andere [18] untersuchten den Kondensationsprozeß von polymeren Schichten (Vakuümöl) und Metallschichten (Silber, Zink) auf Glas-, Sitall- und Steinsalzflächen, die mit Inertgasionen (Neon, Argon) mit Energien von ≤ 4 keV bestrahlt wurden. Wenn das Vakuum mit Hilfe von Ölpumpen erzeugt wird, bildet sich auf der mit Ionen bombardierten Fläche ein polymerer Ölfilm. Gleichzeitig mit der Polymerisation des Ölkondensats läuft auch die Ätzung des Kondensats unter Ioneneinwirkung ab. Bei genügend großen Ionenenergien ist die Ätzung stärker als die Polymerisation, und die Oberfläche wird gesäubert.

Der Inertgasionenstrahl stimuliert die Abscheidung von Metallschichten. So beginnt beispielsweise die Kondensation von Silberschichten auf einer Glasfläche bei für die thermische Abscheidung „unterkritischen“ Bedingungen. Elektronenmikroskopische Strukturuntersuchungen von auf einer Steinsalzoberfläche abgeschiedenen Metallschichten zeigen, daß die Schichten, die durch rein thermisches Aufdampfen in Verbindung mit Ionenbestrahlung bei gleichen übrigen Bedingungen erzeugt wurden, feinkörnig sind und eine große Körnerdichte haben, d. h. durch Ionenbestrahlung verbessert sich die Geschlossenheit der Schicht.

Aus der Sicht der Kondensationstheorie steht der Körnungsgrad der Schicht im Zusammenhang mit der kritischen Keimgröße und ist bei gleichen übrigen Bedingungen um so größer, je kleiner die Oberflächenenergie Substrat-Gas ist. Auf diese Weise steht die Verringerung der Körnergröße der Schicht im Zusammenhang mit der Erhöhung der Adsorptionsenergie der Substratoberfläche. Folglich kann die Substratbestrahlung mit einem Ionenstrom als momentane Bildung von zusätzlichen Kondensationszentren interpretiert werden.

Besonders interessant sind die Arbeiten zum epitaktischen Wachstum aus einem Ionenmolekularstrom. Der Ionenstrahl wirkt direkt auf die oberflächennahen Schichten ein; die durch den Strahl übertragene Energie breitet sich entlang der Kristallisationsfläche aus. Außerdem lassen sich Energie, Dichte und chemische Beschaffenheit des Ionenstrahls gut kontrollieren und sind steuerbar.

Im folgenden wird noch näher auf Fragen der Ionenaktivierten Filmkristallisation eingegangen.

Ausgehend von der Literaturanalyse und den Entwicklungstendenzen moderner Herstellungstechnologien von Halbleiterbauelementen sind Verfahren der aktivierten Niedertemperaturepitaxie aus Molekular- und Ionenmolekularströmen aussichtsreich für

- die Erweiterung der Dotierungsmöglichkeiten für Epitaxiesysteme und deren Optimierung in Hinsicht auf das Störstellenprofil;
- die Herstellung einer großen Anzahl aufeinanderfolgender superdünner Schichten;
- die Integration der aktivierten Niedertemperaturepitaxie durch Niedertemperaturverfahren, wie Ionenimplantation, flache Diffusion, Passivierung usw., bei der Bauelementherstellung;
- die Integration von Vakuumepitaxie und Abscheidung aus Ionenmolekularströmen durch Kontrollverfahren für die Zusammensetzung und Oberflächenstruktur in situ, die auf deren Wechselwirkung mit den Ionen- und Elektronenstrahlen basieren, wie sekundäre Ionen-Ionen-Massenspektroskopie (SIMS), Ionenstreuung, Auger-Spektroskopie u. a.;
- die Möglichkeit der Automatisierung des Verfahrens mit Hilfe äußerer und innerer elektrischer Signale.

LITERATUR

[1] Лубы, Ш.; Червенак, Я.; Шилдер, Я.: ФТТ. 1970, т. 12, вып. 5, с. 1297-1301.

Luby, Š.; Červenak, Ja.; Šilder, Ja.: Zavisimost' kristalličeskoj struktury i podvižnosti nositelej zarjada v tonkich plenkach Ge ot énergii kondensirujuščichsja atomov. In: Fizika tverdogo tela: Sbornik statej/ Akademija Nauk SSSR. Otdelenie Fiziko-matematičeskich nauk. Moskva, 12 (1970), Heft 5, S.1297 - 1301.

Engl.: Dependence of Chrystal Structure and Charge Carrier Mobility in Ge Thin Films on Condensing Atom Energy. In: Soviet Physics. Solid state. / Publ. by the American Institute of Physics, New York u. a., 12 (1970), S. 1021 - 1024.

[2] Петросян, В. И.; Дагман, Э. И.; Митковский, С. Е.: Труды симпозиума "Рост и легирование полупроводниковых кристаллов и пленок", ч. 1. Новосибирск, 1968.

Petrosjan, V. I.; Dagman, É. I.; Mitkovskij, S. E.: Vlijanie énergetičeskogo vozbuždenija atomov para na kristalličeskuju strukturu vyraščivaemych plenok. In: Processy rosta i struktura monokristalličeskich sloev poluprovodnikov: Trudy simpoziuma v 1966 g./ I. N. Aleksandrov, Novosibirsk: Nauka, Bd 1, 1968, S. 588-593. /Einfluß der energetischen Anregung der Dampfatome auf die Kristallstruktur der gewachsenen Schichten; russ./

[3] Кондогури, В. В.: ЖРФХО, серия физ., 1926, т. 58, с. 279 - 283.

Kondoguri, V. V.: Vlijanie élektričeskogo i magnitnogo polej na čislo zarodyšej. Žurnal Russkogo fiziko-chimičeskogo občestva pri Leningradskom universitete, čast' fizičeskaja, Leningrad, 1926, Bd 58, S. 279-283.

/Einfluß des elektrischen und magnetischen Feldes auf die Keimzahl; russ./

[4] Козловский, М. И.: К вопросу о влиянии электрического поля на зарождение центров кристаллизации. Кристаллография, 1962, т. 7, вып. 1, с. 157 - 159.

Kozlovskij, M. I.: K voprosu o vlijanii élektričeskogo polja na zaroždenie centrov kristallizacii. Kristallografija, Moskva, 7 (1962), Heft 1, S. 157 -159.

Engl.: The Question of the Influence of an Electric Field on the Nucleation of Crystallization Centers. In Soviet physics. Crystallography/ publ. by the American Institute of Physics. New York u. a., 1962, vol. 7, No. 1, S. 129 - 131.

[5] Геллер, И. Х.; Коломиец, Б. Т.; Попов, А. И.; Балахтарь, Г. М.: Неорганические материалы, 1972, т. 8, с. 1005.

Geller, I. Ch.; Kolomiec, B. T.; Popov, A. I.; Balachtar', G. M.: Vlijanie élektričeskogo polja na skorost' kristallizacii amorfnogo selena. In: Izvestija Akademii nauk SSSR, serija "Neorganičeskie materialy", Moskva: Nauka, 8 (1972), S. 1005-1007.

Engl.: Effect of an Electric Field on the Crystallization Rate of Amorphous Selenium. In: Inorganic Materials. 8 (1972), p. 879-881.

[6] Геллер, И. Х.; Коломиец, Б. Т.; Попов, А. И.: Изв. АН СССР, серия "Неорганические материалы", 1973, т. 9, № 1, с. 127-128.

Geller, I. Ch.; Kolomiec, B. T.; Popov, A. I.: Kristallizacija selena pod vozdejstviem élektričeskogo polja različnoj častoty. In: Izvestija Akademii nauk SSSR, Moskva: Nauka, 9 (1973), Heft 1, S. 127-128.

Engl.: Crystallization of Selenium under the Effect of Electric Fields of Various Frequencies. In: Inorganic Materials. New York, 9 (1973), p. 111.

[7] Таруи, Я.: Дэнки сикэнсё ихо, 1965, т. 29, № 1, с. 17-27.

Tarui, Ja.; Teshima, H.; Komiya, Y.: The Effects of Electric Field on Epitaxial Vapour Growth. In: Denki-shikensho-iho, Tokyo, 29 (1965), Nr 1, S. 17-27.

/japanisch/

- [8] Коробов, О. Е.; Маслов, В. Н.; Нечаев, В. В.: Материалы IV Всесоюзного совещания по росту кристаллов. Ереван, 1972, с. 161-163.
 Korobov, O. E.; Maslov, V. N.; Nečaev, V. V.: Nekotorye osobennosti épitaksial'nogo rosta arsenida gallija v postojannom élektričeskom pole. In: Vsesojuznaja konferencija po rostu kristallov. Materialy. Erevan, 1972, S. 161 - 163. /Einige Besonderheiten des epitaktischen Wachstums von Galliumarsenid in einem elektrischen Gleichfeld; russ./
- [9] Чопра, К. Л. В кн.: Рост кристаллов, т. 8. М., 1968, с. 141 - 145.
 Čopra, K. L.: Vlijanie élektričeskogo polja na rost monokristalličeskich plenok metalla. In: Rost kristallov, Moskva, 1968, Bd 8, S. 141 - 145.
 Engl.: Chopra, K. L.: Growth of Single-Crystal Metal Films under the Influence of an Applied Electric Field. In: Growth of Crystals./ Hrsg.: N. N. Sheftal'; Übers.: J. E. S. Bradley, New York-London: Consultants Bureau, 1969, vol. 8, S. 116-119.
- [10] Chopra, K. L.: Appl. Phys. Lett., 1965, vol. 7, p. 140.
 Chopra, K. L.: Growth of Thin Metal Films under Applied Electric Field. In: Applied Physics Letters. 1965, vol. 7, p. 140-142. /Engl./
- [11] Chopra, K. L.: J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, p. 2249.
 Chopra, K. L.: Influence of Electric Field on the Growth of Thin Metal Films. In: Journal of Applied Physics, 1966, vol. 37, p. 2249-2254. /Engl./
- [12] Чернов, А. А.; Трусов, А. И.: Кристаллография, Москва, 1969, т. 14, вып. 2, с. 218.
 Černov, A. A.; Trusov, A. I.: Élektrostaticieskie éffekty pri obrazovanii zarodyšej na poverchnosti. Kristallografija, Moskva, 1969, Bd. 14, Heft 2, S. 218-226.
 Engl.: Electrostatic Effects in the Formation of Nuclei (Seeds) at a Surface. In: Soviet Physics-Crystallography. 1969, vol. 14, no. 2, p. 172-178.
- [13] Чистяков, Ю. Д.; Райнова, Ю. П.: Физико-химические основы технологии микроэлектроники. М., 1979.
 Čistjakov, Ju. D.; Rajnova, Ju. P.: Fiziko-chimičeskie osnovy tehnologii mikroélektroniki. Moskva, 1979. /Physikalisch-chemische Grundlagen der Mikroelektronik-Technologie; russ./
- [14] Касаткин, А. П. "Кристаллография", 1966, т. 11, вып. 2, с. 328 - 330.
 Kasatkin, A. P.: O vlijanii sveta na rost kristallov NaBrO₃. In: Kristallografija, Moskva, 1966, Bd. 11, Heft 2, S. 328-330.
 Engl.: Influence of Light on the Growth of NaBrO₃ Crystals. In: Soviet Physics. Crystallography. 1966, vol. 11, n. 2, p. 295-296.
- [15] Масаи, К.: Экспресс-информация. "Электроника", 1969, № 13, с. 26 - 35.
 Kumagawa, M.; Suami, H.; Terasaki, T.; Nishisawa, J.: Épitaksial'nyj rost s primeneniem osveščeniya. In: Ékspress-informacija. Élektronika. Vsesojuznyj Institut naučnoj i tehničeskoj informacii. Moskva, 13 (1969), S. 26-35.
 Engl.: Epitaxial Growth with Light Irradiation. In: Japanese Journal of Applied Physics, Tokyo, 7 (1968), p. 26-35.

[16] Фрисер, Р. Г.: Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы. М., 1969, с. 81 - 86.

Frieser, R. G.: Nizkotemperaturnaja épitaksija kremnija. In: Ékspress-informacija. Prjamoe preobrazovanie teplovoj énergii v élektričeskuju i toplivye élementy. Moskva, 1969, S. 81 - 86.

Engl.: Low-Temperature Silicon Epitaxie. In: Journal of The Electrochemical Society, Pennington, New York, vol. 115, no. 4, p. 401-405.

[17] Knight, M. J.; Gha, K. N.: Thin Solid Films. 1968, vol. 2, Nr. 1 - 2, p. 131 - 139.

Knight, M. J.; Jha, K. N.: The Effect of Illumination on the Growth of Thin Films. In: Thin Solid Films, Lausanne: Elsevier Sequoia S.A., vol. 2, Nr. 1 - 2, p. 131 - 139. /Engl./

[18] Спивак, Г. В.; Дубинина, Е. М.; Гусева, М. Б.; Овсяницкий, А. С.; Бабаев, В. Г.; Бонги Л.; Абдурашитова, Д. Х.; Слуев, В. И.; Сазанович, Н. В.: Труды Второго Всесоюзного симпозиума по взаимодействию атомных частиц с твердым телом. Москва, 1972.

Spivak, G. V.; Dubinina, E. M.; Guseva, M. B.; Ovsjanickij, A. S.; Babaev, V. G.; Bongji, Li; Abdurašitova, D. Ch.; Sluev, V. I.; Sazanovič, N. V.: Issledovanie processov kondensacii veščestva na poverchnosti tverdogo tela, oblučаемого ionami inertnyh gazov s énergiej ≤ 4 keV. Im Sammelband: Trudy Vtorogo Vsesojuznogo simpoziuma po vzaimodejstviju atomnyh častic s tverdym telom. Moskva, 1972, S. 254-258. /Untersuchung der Kondensationsprozesse eines Stoffes an der Oberfläche eines festen Körpers, der mit Inertgasionen mit einer Energie von ≤ 4 keV bestrahlt wird; russ./

Stuttgart, den 07. Juni 1999

Übersetzt von:



Sören Ludwig



Ottmar Pertschi
(Diplomübersetzer)