

Fachpraktikum

Mikroelektronik und Sensorik

Versuch: Hochvakuumbedampfung



Versuchsanleitung Hochvakuumbedampfung

1. Versuchsziel

Der Praktikumsversuch "Hochvakuumbedampfung" dient dem Kennenlernen und Vertiefen der Kenntnisse über den Bedampfungsprozess als wichtigen technologischen Prozess in der Halbleitertechnologie. Ausgehend von den Grundlagen der Verdampfung, der Dampf-Gas-Wechselwirkung und Schichtabscheidung werden auch besonders praktische Gesichtspunkte wie das Kennenlernen von Verdampfertypen und Bedampfungsanlagen berücksichtigt.

Es sollen an einer Hochvakuumbedampfungsanlage

- erstens eine Metallschicht durch thermisches Verdampfen aus einem Tiegel/ von einer Wendel auf der Vorderseite des Siliziumwafers und
- zweitens eine Metallschicht durch Verdampfen mit einem Elektronenstrahlverdampfer auf der Rückseite des Siliziumsubstrat unter Berücksichtigung der Prozessparameter hergestellt werden.

Grundlagen der Simultan-Schichtdickenmessung durch Schwingquarze und Schichtdickenmessung durch Interferrometrie werden behandelt und praktisch angewendet.

2. Versuchsgrundlagen

2.1. Dampf- Gaswechselwirkung

Die Teilchen des verdampften Materials müssen den Weg zwischen Verdampferquelle und Target (Bedampfungsziel) im Vakuum zurücklegen und erfahren dabei Wechselwirkungen /Stöße mit Teilchen des Restgases in der Vakuumapparatur, mit anderen Dampfteilchen oder bei Elektronenstrahlverdampfern mit Elektronen. Um die Dampfteilchen von der Quelle zum Target möglichst ungehindert, d. h. ohne Stöße mit Restgasatomen passieren zu lassen, muss das Vakuum der Bedampfungsapparatur ausreichend gut sein. Nach dem Schwächungsgesetz gilt für den Anteil des Stromes von Dampfteilchen, der die Strecke x im Restgas ohne Stöße durchläuft:

$$N_0 = e^{-n\sigma x} \quad (1)$$

mit N_0 - Zahl aller strömenden Teilchen,
 σ - Wirkungsquerschnitt und
 n - Gasteilchendichte, berechenbar aus dem Restgasdruck.

Aus der kinetischen Gastheorie berechnet sich der Wirkungsquerschnitt bei Stößen zwischen Dampfteilchen mit dem Gas zu

$$\sigma_{DG} = \pi (r_D + r_G)^2 \quad (2)$$

mit r_D - Radius der Dampfteilchen und
 r_G - Radius der Gasteilchen.

Die mittlere freie Weglänge, d.h. die mittlere Wegstrecke zwischen zwei Stößen, beträgt

$$\lambda = 1 / n\sigma_{DG} \quad (3)$$

Die Wahrscheinlichkeit W , dass ein Dampfteilchen eine Strecke x der Länge λ ohne Stoß durchläuft, beträgt $1/e$, d.h. 36,8 %. Definieren wir die sogenannte Knudsenzahl k_n als Verhältnis der mittleren freien Weglänge λ zum Abstand Verdampferquelle - Target r , so ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, dass diese Strecke ohne Stoß durchlaufen wird

$$W = e^{-1/k_n} \quad (4)$$

Praktisch hängt die mittlere freie Weglänge λ weniger von der Art der Dampfteilchen als vom Druck selbst ab. Für Normaltemperatur und Luft beträgt das Produkt $\lambda \cdot p \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{mbar}$. Als Richtwert kann die mittlere freie Weglänge für Luft bei 10^{-2} Pa mit 50 cm angegeben werden. Bei einem Abstand von 10 cm zwischen Verdampferquelle und Target erreichen bei diesem Druck immerhin 80% der verdampften Teilchen ohne Stoß die zu bedampfende Oberfläche.

Die hier beschriebenen möglichst zu vermeidenden Stöße zwischen Dampf und Gas sind erwünscht im

Falle einer reaktiven Bedampfung, wenn das Verdampfungsgut mit den (extra ins Vakuum eingelassenen) Gasteilchen reagieren soll und Verbindungen abgeschieden werden sollen. In diesem Fall muss durch den Einlass des Prozessgases der Druck erhöht, die mittlere freie Weglänge λ verkleinert und so die Wahrscheinlichkeit für Stoßprozesse erhöht werden.

2.2 Kondensationsraten

Die Schichtreinheit wird wesentlich davon geprägt, wieviele Restgasteilchen beim Bedampfen in die Schicht mit eingebaut werden. Anders ausgedrückt muss die Kondensationsrate des Restgases auf der Substratoberfläche möglichst klein sein gegenüber der Kondensationsrate des Verdampfungsgutes um eine saubere Schicht zu erhalten. Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie läßt sich das Verhältnis der Stoßzahlen von Restgasteilchen und Dampfteilchen auf dem Substrat bestimmen:

$$v_G / v_D = 55.5 M_D p_G / (\zeta \alpha_k) \quad (5)$$

mit v_G - Flächenbezogene Stoßrate der Gasteilchen (Luft bei Raumtemperatur)

d. h. Stoßzahl der Luftteilchen, die je Zeiteinheit auf die Flächeneinheit auftreffen in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

1

v_D - Flächenbezogene Stoßrate der Dampfteilchen, d.h. Stoßzahl der Dampfteilchen, die je Zeiteinheit auf die Flächeneinheit auftreffen in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

M_D - Atom- oder Molekularmasse der Dampfteilchen in g/mol

p_G - Gasdruck im Rezipienten in Pa

ρ - Dichte des Verdampfungsgutes in g cm^{-3}

α_k - Wachstumsrate der Schicht in nm s^{-1}

Für das Aufdampfen von Aluminium ergibt sich bei 10^{-2} Pa Restgasdruck und einer Bedampfungsgeschwindigkeit von 10 nm s^{-1} ein Verhältnis der Stoßzahlen von Restgasteilchen zu Dampfteilchen auf dem Substrat v_G/v_D von 1. Für die Schichtreinheit ist jedoch nicht ausschließlich dieses Verhältnis der Stoßzahlen ausschlaggebend, sondern damit verbunden die Wahrscheinlichkeiten, mit der die auf das Substrat stoßenden Gasteilchen auch dort verbleiben. Diese Wahrscheinlichkeit hängt von der Reaktivität der Gasteilchen ab und ist für typische Restgase (Feuchte, Wasserstoff, Sauerstoff, Pumpentreibmittel)

recht groß. Eine Erhöhung der Schichtreinheit kann gemäß Gleichung (5) durch Verbesserung des Vakuums und /oder Erhöhung der Abscheiderate erzielt werden. Beide Wege werden in der Praxis beschränkt.

Es zeigt sich also, dass für den Bedampfungsprozess die Anforderungen an die Güte des Vakuums mehr aus dem Kondensationsmechanismus des Restgases und der damit verbundenen Verunreinigung der Schicht resultieren als aus den Streuprozessen der Dampfteilchen mit dem Restgas.

2.3 Verdampfen von Elementen

Das Verdampfungsgut wird zur Verdampfung im Vakuum stark erhitzt. Nach *Langmuir* beträgt die flächenbezogene Verdampfungsrate a_v :

$$a_v = \alpha_k \cdot 4.4 \cdot 10^{-4} p_s (M_D / T)^{1/2} \quad (6)$$

mit a_v - flächenbezogene Verdampfungsrate, d.h. je Zeit- und Flächeneinheit verdampfte Masse in $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

α_k - Verdampfkoeffizient ($\alpha = 1$ für ideale Verdampfung)

p_s - Sättigungsdampfdruck in Pa des Verdampfungsmaterials bei der Verdampfungstemperatur

T

T - absolute Temperatur des Verdampfungsgutes in K.

Der Wert für die flächenbezogene Verdampfungsrate reduziert sich um den Faktor τ (Transmissionskoeffizient) wenn Stoßprozesse über dem Verdampfer verdampfte Teilchen auf den Tiegel zurückstreuen können. Das geschieht erst bei Drücken oberhalb 10^{-1} Pa. Die Sättigungsdampfdrücke der Elemente in Abhängigkeit von der Temperatur müssen Tabellenwerten entnommen werden; sie hängen im exponentiell von der Temperatur ab.

Abb. 1 zeigt als Beispiel die Sättigungsdampfdrücke einiger Metalle und Halbleiter in Abhängigkeit von der Temperatur. Der für technische Bedampfungen notwendige Sättigungsdampfdruck bestimmt die Temperatur, die zur Verdampfung notwendig ist. Diese liegt z.B. bei Wolfram wesentlich höher als bei Aluminium. Die Punkte in **Abb. 1** markieren die Schmelzpunkte. Damit wird gezeigt, dass die notwendigen Dampfdrücke bei einigen Materialien erst weit über dem Schmelzpunkt erreicht werden (Verdampfung aus der flüssigen Phase), bei anderen schon bei Temperaturen um den Schmelzpunkt (Ver-

dampfung aus der festen Phase, Sublimation)

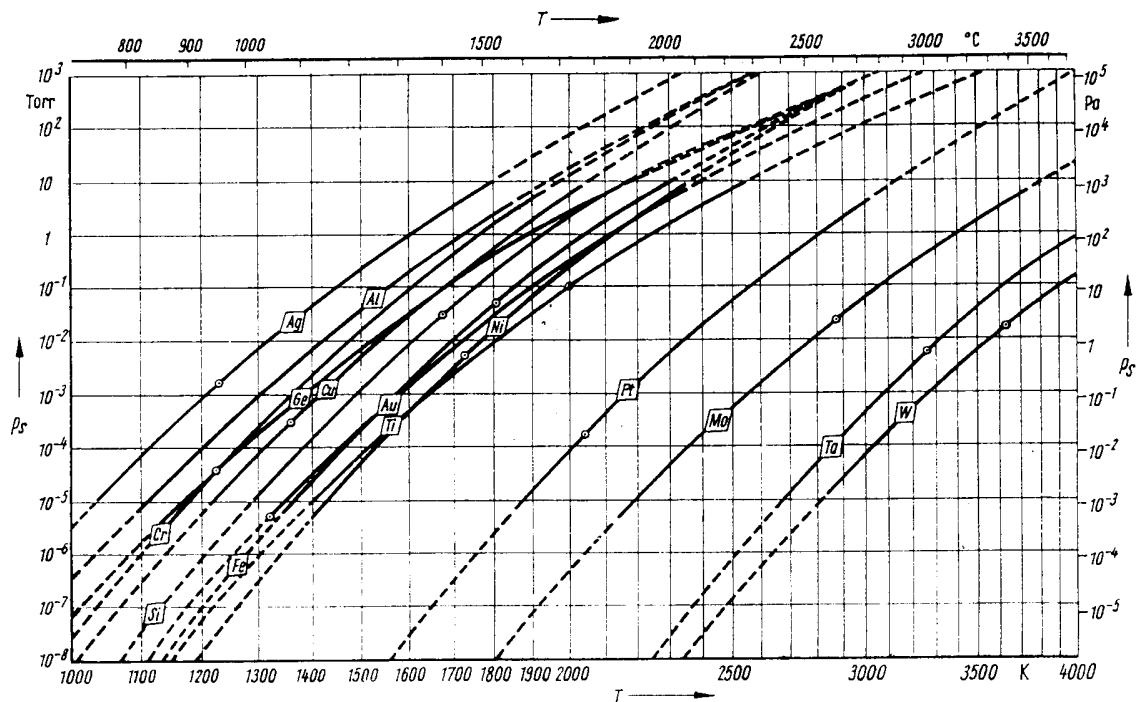


Abb. 1 Sättigungsdampfdrücke p_s einiger Elemente in Abhängigkeit von der Temperatur T (-o-markiert den Schmelzpunkt)

2.4 Dampfausbreitung

Die Ausbreitungscharakteristik des Dampfes im Vakuum hängt von der Geometrie der verdampfenden Quelle ab. Vereinfachend unterscheidet man Punktquellen, Kleinflächenquellen und Flächenquellen.

Punktquelle

Bei einer nahezu punktförmigen Verdampfungsquelle (z.B. Tropfen an einer Wendel) breitet sich der Dampfstrom Φ der verdampften Teilchen mit gleicher Dichte in alle Richtungen aus

$$\Phi_{(\alpha)} = \text{const.} \quad (7)$$

mit $\Phi(\alpha) = \alpha$ - Dampfstromdichte in eine Richtung mit dem Winkel α zur Senkrechten.

Die Intensität (Dichte) des Dampfteilchenstromes nimmt mit dem Quadrat des Abstandes von der Quelle ab. Da sich das zu bedampfende Substrat (wenn es sich um eine ebene Fläche handelt) nicht mit allen

Punkten im gleichen Abstand zur Quelle montieren lässt, ergibt sich damit zwangsläufig eine Schichtdickeninhomogenität gemäß **Abb. 2**. Zur Schichtdickeninhomogenität trägt auch der Fakt bei, dass die Flächenelemente des zu bedampfenden Substrats in unterschiedlichen Winkeln θ zur Ausbreitungsrichtung des Dampfstrahles stehen.

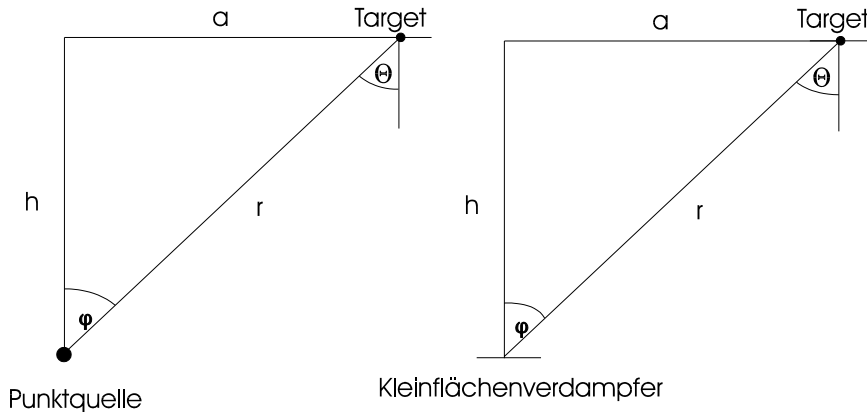


Abb. 2 Schematische Darstellung der Bedampfungsgeometrie für die Punktquelle und den Kleinflächenverdampfer

Bildet die Substratfläche mit der Strahlrichtung der Dampfteilchen den Winkel θ , so ergibt sich für $\alpha_k = 1$ (Gleichung(6)) eine Schichtdicke d in Abhängigkeit vom Winkel θ zu:

$$d = m / (4\pi p) \cdot \cos\theta / r^2 \quad (8)$$

mit m - verdampfte Masse, p - Massendichte, r - geometrisches Maß analog **Abb. 2**.

Setzt man $\varphi = \theta$ und drückt r durch h und a aus, so ergibt sich für die Schichtdicke d in Abhängigkeit vom Abstand a (siehe **Abb. 2**):

$$d = m / (4\pi p) \cdot h(h^2 + a^2)^{-3/2} \quad (9)$$

Um mehrere Substrate möglichst konstant mit hoher Aufwachsrate bedampfen zu können, empfiehlt es sich, sie konzentrisch um die Verdampferquelle anzuordnen. Der Abstand wird als Kompromiss zwischen Schichtdickenhomogenität und Aufdampfrate, die ihrerseits wieder verantwortlich für die Reinheit der Schicht ist, gewählt.

Kleinflächenverdampfer

Ein Kleinflächenverdampfer ist dadurch definiert, dass die Abmessungen der dampfabgebenden Fläche klein gegenüber dem Abstand zum Substrat ist. Da die Größe der dampfabgebenden Fläche jetzt aus unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich “gesehen” wird, ergibt sich in erster Näherung eine Richtungscharakteristik der Dampfausbreitung nach einer Kosinusverteilung:

(10)

mit $\Phi(\alpha)$ - Dampfstromdichte in eine Richtung mit dem Winkel zur Flächennormalen
der verdampfenden Fläche und
 Φ_0 - Dampfstromdichte in Normalenrichtung ($\alpha = 0$)

Die abgeschiedene Schichtdicke d bei einer Anordnung analog **Abb. 2** berechnet sich in Abhängigkeit vom Winkel φ zu :

$$d = m / (\pi p) \cdot \cos^2 \varphi / r^2 \quad (11)$$

mit den Größen analog Gleichung (9) und **Abb. 2**.

Drückt man r und φ durch h und a aus, so ergibt sich für die abgeschiedene Schichtdicke d :

$$d = m / (\pi p) \cdot h(h^2 + a^2)^2 \quad (12)$$

Aus verschiedenen Gründen weicht die reale Richtcharakteristik der Kleinflächenverdampfer von der normalen Kosinusverteilung (Gleichung (10)) ab. Man führt die Richtungscharakteristik einer korrigierten Kosinusverteilung mit

$$\Phi(\alpha) = \Phi_0 \cos^n \alpha \quad \text{mit } n=2 \dots 4 \quad (13)$$

ein. Bei dem Elektronenstrahlverdampfer dieses Praktikumsversuches hat der Korrektur-Exponent einen Wert von näherungsweise 3.5.

Flächenverdampfer

Ein Flächenverdampfer ist dadurch definiert, dass die Abmessungen der dampfabgebenden Fläche vergleichbar zur Größe des Abstandes zum Substrat ist. Praktisch wird eine solche Anordnung erreicht, indem man eine Vielzahl von Kleinflächenverdampfern nahe beieinander betreibt. Mathematisch lässt sich das Verhalten der Schichthomogenität und Aufwachsrate durch Addition der Beziehungen jedes Kleinflächenverdampfers beschreiben. Entscheidend für die Güte der Schicht ist die Art und Weise, wie die Geometrie der Verdampfer und Substrate arrangiert ist. Mit Flächenverdampfern erzielt man in industriellen Bedampfungsanlagen die beste Schichthomogenität. Zur weiteren Verbesserung der Schichthomogenität unter anderem, um den Anforderungen der Halbleitertechnologie zu genügen, läßt man während des Bedampfungs Vorganges die Substrate rotieren und sich um die Verdampferquellen drehen ("Planetenbewegung"), so dass geometrische Unterschiede, die zu Inhomogenitäten führen, weitestgehend ausgeschaltet werden.

2.5 Keimbildung, Schichtwachstum und -struktur

Keimbildung und Schichtwachstum beeinflussen direkt die Struktur und Eigenschaften der Aufdampfschicht. Man rechnet alle Prozesse, die bis zu einer geschlossenen Schicht minimaler Schichtdicke führen zur Keimbildung:

- Adsorption der Dampfteilchen,
- Vereinigung von adsorbierten Teilchen bzw. Zerfall von Teilchengruppen,
- Bildung stabiler Keime,
- Wachstum der Keime bis zur gegenseitigen Berührung und Bildung einer geschlossenen Schicht

Keimbildung und Schichtstruktur hängen unter anderem von der Aufdampftrate und der Oberflächenbeweglichkeit der adsorbierten Teilchen ab. Die Oberflächenbeweglichkeit hängt von der Bindungsenergie der Dampfteilchen an der Substratoberfläche ab. Sie lässt sich durch Heizung des Substrates beim Aufdampfen vergrößern.

- Geringe Oberflächenbeweglichkeit und hohe Aufdampftrate führen zu vielen kleinen Keimen und damit zu einer feinkristallinen Schicht.
- Hohe Oberflächenbeweglichkeit und kleine Aufdampftrate führen zu langsam wachsenden, großen Keimen und damit zu einer grobkristallinen Schicht.

Somit lassen sich über Prozessparameter auch in bestimmten Grenzen die Kristallinität und damit die Eigenschaften der Aufdampfschicht beeinflussen.

2.6 Verdampfertypen

2.6.1 Wendel- und Schiffchenverdampfer

Das Heizen des Verdampfungsgutes kann durch elektrischen Strom erfolgen. Das geschieht im einfachsten Fall direkt, indem ein Stab oder Draht des zu verdampfenden Materials von einem ausreichend hohen Strom durchflossen wird. Der notwendige Strom hängt von der Geometrie des Verdampfungsgutes, dessen spezifischem Leitwert und von der Wärmeabstrahlung des Verdampfungsgutes ab und lässt sich für die meisten Materialien aus Tabellenwerken entnehmen. Liegt die Verdampfungstemperatur jedoch über der Schmelztemperatur, was meistens der Fall ist, so muss das Material durch eine Wendel oder ein Schiffchen eines hochschmelzenden Metalls getragen werden. Bei dieser indirekten Heizung wird der Heizstrom durch die Wendel oder das Schiffchen z.B. aus W oder Mo geschickt und das Verdampfungsgut wird durch Wärmeleitung und -strahlung auf die zur Verdampfung nötige Temperatur gebracht. Entscheidend für die Auswahl des Trägermaterials sind:

- geringer Dampfdruck des Materials bei der Betriebstemperatur,
- geringe Gasabgabe,
- keine chemischen Reaktionen und Legierungen mit dem Verdampfungsgut bei der Betriebstemperatur,
- gute Benetzung durch das Verdampfungsgut.

Nachteil der Verdampfung durch Wendeln oder Schiffchen ist, dass diese immer heißer als das Verdampfungsgut selbst sind, vom Substrat genauso "gesehen" werden und damit eine Hauptverunreinigungsquelle beim Bedampfungsprozess sind. Wählt man den Heizstrom zu hoch, brennen Schiffchen und Wendel durch. Die Lebensdauer der Träger ist im allgemeinen nicht sehr hoch. Verdampft man Material mit sehr kleinem spezifischen elektrischen Widerstand bei vollem Schiffchen, so wählt der Heizstrom den Weg durch das Verdampfungsgut anstatt durch den Träger, mitunter reicht der Strom dann nicht mehr aus, um das Material auf die nötige Verdampfungstemperatur zu bringen.

2.6.2 Elektronenstrahlverdampfer

Der Nachteil der Wendel- und Tiegelverdampfer wird dahingehend umgangen, dass das Verdampfungsgut

durch einen Elektronenstrahl an der Oberfläche auf die notwendige Verdampfungstemperatur gebracht wird. Dazu befindet sich das Material meist in einem wassergekühlten Tiegel. So kann man unter anderem folgende Vorteile erzielen:

- das Verdampfungsgut ist die einzige heiße Fläche, die vom Substrat aus gesehen wird,
- der das Substrat tragende Tiegel ist kalt (wassergekühlt),
- die die Elektronen emittierende Katode ist zwar sehr heiß, kann jedoch optisch vom Target abgeschirmt sein,
- mit dem Elektronenstrahl lassen sich höhere Leistungen erzielen als durch stromdurchflossene Schiffchen- oder Wendelverdampfer.

Ein Elektronenstrahlverdampfer besteht aus einer Elektronenstrahlkanone und einem Tiegel. Bei den meisten Konstruktionen befinden sich beide in einer Baueinheit. Der Elektronenstrahlverdampfer wird im industriellen Maßstab meist durch eine Beschickungseinrichtung ergänzt. In einfachsten Anordnungen wird eine geheizte Kathode in die Nähe des Tiegels gebracht, die emittierenden Elektronen werden mit Hilfe einer hohen Beschleunigungsspannung auf die Tiegeloberfläche abgezogen. Um den Elektronenstrahl beim Auftreffen auf das Verdampfungsgut auf einen bestimmten Durchmesser zu bündeln, verwendet man eine auf Kathodenpotential befindliche Steuerelektrode.

Die auf das Verdampfungsgut übertragbare Leistung P_V errechnet sich aus dem Produkt aus Emissionsstrom der Kathode I_{EM} und Beschleunigungsspannung U_{HV} .

$$P_V = I_{EM} \cdot U_{HV} \cdot K_{BS} \quad (14)$$

Der Korrektorkoeffizient K_{BS} beschreibt die durch elastische Elektronenrückstreuung auf der Oberfläche des Verdampfungsgutes, durch Wärmeleitung und -strahlung auftretenden Energieverluste. Insbesondere bei schweren Metallen (Au, Pt, W) wird der Rückstreuverlust sehr groß und K_{BS} erreicht Werte unter 0.5. Die Beschleunigungsspannung für Elektronenstrahlverdampfer ist eine Hochspannung und beträgt meist wenige kV bis einige 10 kV.

Man unterscheidet elektrostatische und elektromagnetische Elektronenstrahlverdampfer. **Abb. 3** zeigt verschiedene Verdampferkonstruktionen.

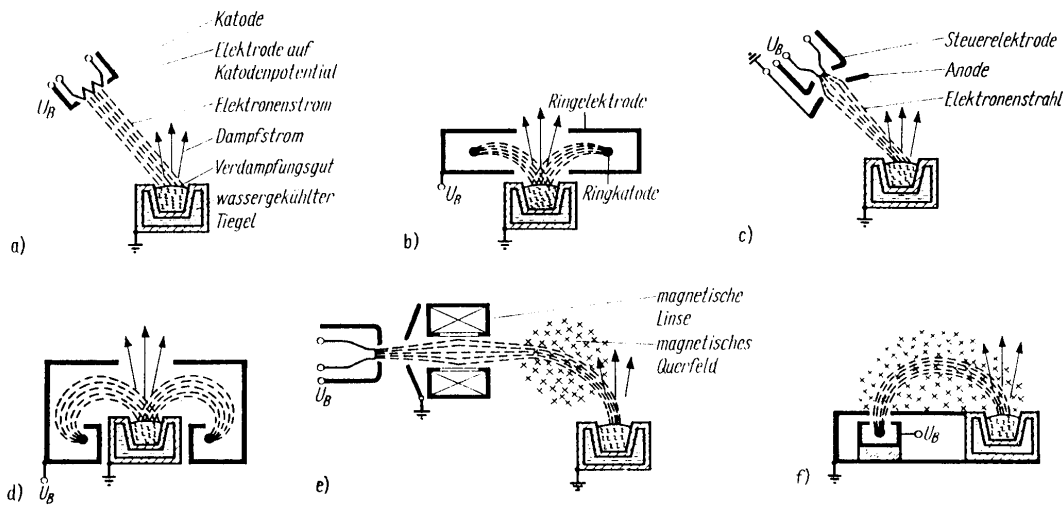


Abb. 3 Skizze verschiedener Elektronenstrahlverdampfertypen: (a) Verdampfer mit Linearkatode und elektrostatischer Fokussierung; (b) Verdampfer mit Ringkatode und elektrostatischer Fokussierung; (c) Verdampfer mit Axialkanone und elektrostatischer Fernfokussierung; (d) Verdampfer mit Ringkatode, elektrostatischer Fokussierung und Umlenkung; (e) Verdampfer mit Axialkanone, magnetischer Fokussierung und 90°-Umlenkung; (d) Verdampfer mit Transversekanone und magn. 180°-Umlenkung

Abb. 4 zeigt in einer Skizze den im Praktikumsversuch verwendeten Transverseverdampfer mit 270°-Ablenkung. Beim Transverseverdampfer mit magnetischer 270°-Ablenkung wird das Magnetfeld zur Ablenkung der Elektronen auf das Verdampfungsgut elektromagnetisch erzeugt. Der Strom durch die das Magnetfeld erzeugenden Spulen kann eingestellt werden. Damit hat man die Möglichkeit,

- den Auftreffpunkt der Elektronen auf dem Verdampfungsgut optimal einzustellen und während der Verdampfung zu korrigieren,
- durch Überlagerung eines kleinen Wechselstromes auf den Spulenstrom zur gleichmäßigen Erwärmung des Verdampfungsgutes zu “wobbeln”.

Die gleichmäßige Erwärmung des Verdampfungsgutes über eine Fläche ist wichtig um “Spratzen”, d. h. explosionsartiges Herausschleudern von flüssigen Tropfen des Verdampfungsgutes zu vermeiden.

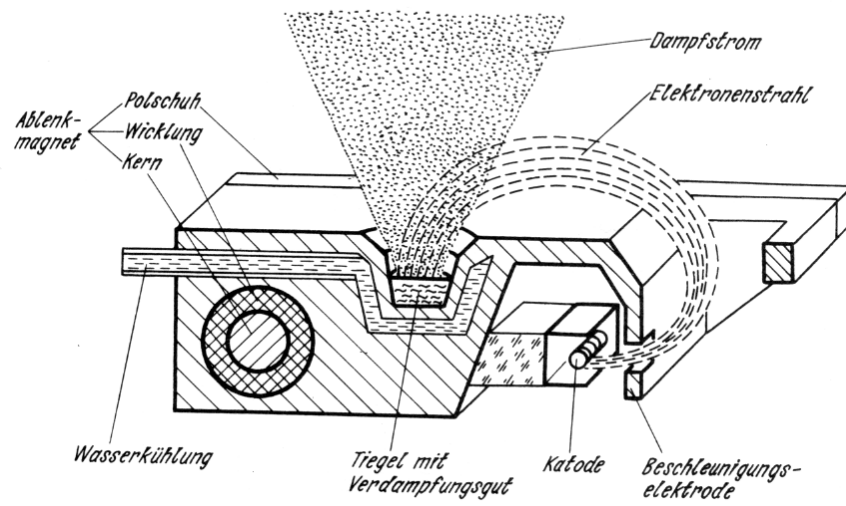


Abb.4 Transverseverdampfer mit 270°-Ablenkung

2.6.3 Mehrkomponentenverdampfer, reaktives Bedampfen

In der Praxis ist es oft wichtig, mehrere Komponenten (Verbindungen, Legierungen, Mehrlagensysteme) aufzudampfen. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Sollen mehrere feste Stoffe nacheinander verdampft werden, gibt es spezielle Elektronenstrahlverdampfer-Anordnungen mit mehreren Tiegeln, bei denen durch Drehen oder Verschieben der jeweils nötige Tiegel in die Auftreffposition des Elektronenstrahls gebracht wird.

Für das simultane Verdampfen von mehreren Komponenten verwendet man, wenn möglich, Mehrkomponentenquellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf Grund unterschiedlicher Dampfdruckkurven, Kondensationsraten usw. die Schichtzusammensetzung erheblich von der des Verdampfungsgutes abweichen kann (Entmischung). Mehrere Komponenten kann man natürlich auch aus mehreren Verdampfern simultan verdampfen. Beim "Springstrahlverfahren" wird durch Änderung der elektromagnetischen oder elektrostatischen Ablenkung der Elektronenstrahl abwechselnd auf zwei Tiegel geschossen; das Verhältnis der Verweilzeiten je Tiegel bestimmt die Zusammensetzung. Chemische Verbindungen wie Oxide, Nitride und auch Karbide werden meist durch reaktives Bedampfen hergestellt. Dazu wird der feste Reaktionspartner meist durch Elektronenstrahlverdampfung verdampft und in den Rezipienten der gasförmige Reaktionspartner durch ein Dosierventil eingelassen. Der Gasdruck beträgt im allgemeinen zwischen 10^{-2} und 10^{-1} Pa. Bei diesem Druck ist der Anteil der Volumenreaktionen der Dampfteilchen auf dem Weg zum Substrat vernachlässigbar gegen den der Oberflächenreaktionen bei der Kondensation des Dampfes. Als Gase werden für Oxide meist O_2 oder H_2O , für Nitride N_2 oder NH_3 , für Karbide C_2H_2 oder C_2H_4 gewählt oder ein Gemisch der genannten Gase mit inertem Edelgas. Die Schichtzusammensetzung läßt sich durch die Wahl der Prozessparameter (Verdampfungsrate, Gasdruck, Gaszusammensetzung, Abscheidetemperatur usw.) beeinflussen.

2.7 Schichtdicken- und Aufwachsrate messung durch Schwingquarz

Die Kontrolle der Schichtdicke der Aufdampfschicht und deren zeitliche Ableitung, die Aufwachsrate, können bei der Bedampfung simultan mit der Schwingquarzmethode durchgeführt werden. Dazu wird in den Rezipienten in die Nähe des Substrates ein in Resonanz schwingendes Schwingquarzplättchen gebracht und dessen Oberfläche auch dem Dampfstrahl ausgesetzt. Für die Frequenzverschiebung Δf des in der Resonanzfrequenz f_0 schwingenden Quarz-Plättchens der Masse m_0 beim Aufdampfen einer kleinen Schichtmasse Δm mit $\Delta m \ll m_0$ gilt:

$$\Delta f / f_0 = -2\Delta m / m_Q \quad (15)$$

Führt man für die Masse des Schwingquarzes $m_Q = \rho_Q d_Q A_Q$ und für die Masse der Aufdampfschicht $\Delta m = \rho_S d_S A_S$ mit ρ -Massendichte, d -Dicke und A -Fläche des Quarzes bzw. der Schicht ein, so ergibt sich die Frequenzverschiebung

$$\Delta f = -2f_0(\rho_S d_S A_S) / (\rho_Q d_Q A_Q) \quad (16)$$

oder für die abgeschiedene Schichtdicke

$$d_S = -(\Delta f \rho_Q d_Q A_Q) / (2f_0 \rho_S A_S) \quad (17)$$

bzw. nach Einführung der Schichtwägemempfindlichkeit C_F als Gerätekonstante

$$d_S = -\Delta f / (C_F \rho_S) \quad (18)$$

mit $C_F = (2 f_0 A_S) / (\rho_Q d_Q A_Q)$, wobei zu berücksichtigen ist, dass A_S kleiner als A_Q ist, da in der Praxis nicht die gesamte Quarzfläche bedampft wird, sondern nur ein Teil der Oberfläche durch eine Maske hindurch. Ein Schwingquarz kann mehrmals bedampft werden. Vor jeder neuen Bedampfung ist der Quarz auf die veränderte Resonanzfrequenz f_0 abzustimmen. Die Änderungen der Resonanzfrequenz sind klein gegenüber der Frequenz selbst. Um den Temperatureinfluss gering zu halten, wird der Schwingquarz meist wassergekühlt.

Da der Schwingquarz meist in einem anderen Winkel und in anderer Entfernung zum Target steht als das Substrat, muss die abgeschiedene Schichtdicke gegenüber der gemessenen korrigiert werden. Das gelingt entweder durch Abschätzung mit den Gleichungen gemäß Abschnitt 1.4 oder durch experimentelle Eichung. Zur experimentellen Eichung wird eine Schicht aufgedampft und mit einem anderen Verfahren nachträglich deren Dicke bestimmt. Der Quotient aus gemessener Dicke und der bei der Verdampfung am Schwingquarz-Schichtdickenmessgerät angezeigten Dicke ist der Korrekturfaktor.

Die Aufwachs- oder Bedampfungsrates ist die zeitliche Ableitung der Schichtdicke beim Bedampfungsprozess. Sie wird von kommerziellen Schwingquarzgeräten als wichtiger Prozessparameter mit angezeigt. Auf Grund der Anordnung des Schwingquarzes zum Target weist sie denselben Fehler wie die Schicht-

dicke auf und muss folglich auch mit dem Korrekturfaktor gewichtet werden.

2.8. Interferometrische Schichtdickenmessung

Unter dem Begriff Interferenzmikroskopie fasst man alle mikroskopischen Verfahren zusammen, bei denen unabhängig vom Objekt eine Aufspaltung des Strahlenganges in zwei oder mehr kohärente Anteile erfolgt, die auf ihrem Weg zur Bildebene unterschiedlich beeinflusst werden. In der Bildebene entstehen Interferenzstreifen, wenn die Gangunterschiede zwischen beiden Anteilen nicht zu groß sind und ihre zugeordnete Strahlrichtung einen kleinen Winkel miteinander bilden. Diese sehr geläufige interferenzmikroskopische Untersuchungsart wird als Streifenmethode bezeichnet. Bei einwandfreier Strahlenführung lassen sich die Interferenzstreifen durch Verringerung der Strahlneigung auseinander ziehen, bis das ganze Sehfeld gleichmäßig hell oder dunkel bzw. in gleicher Farbe erscheint. Ein Phasenobjekt wird dann dunkel auf hellem Grund oder umgekehrt abgebildet. Man spricht in diesem Fall vom Interferenzkontrast. Die Streifenmethode wird vorwiegend für Gangunterschiedsmessungen an großflächigen Objekten, die Interferenzkontrastmethode für Gangunterschiedsmessungen an kleinen Objekten benutzt. Beim Shearing-Verfahren werden in der Bildebene zwei kohärente Bilder des gleichen Objektes erzeugt, die seitlich gegeneinander versetzt (aufgespalten) sind. Man unterscheidet die differentielle Bildaufspaltung, bei der die Aufspaltung in der Größenordnung des Auflösungsvermögens des Mikroskops liegt und deshalb noch kein Doppelbild wahrgenommen wird. Das Verfahren wird zur Kontraststeigerung des Bildes genutzt.

Ist die Bildaufspaltung größer als das zu untersuchende Objekt, sprechen wir vom Shearing-Verfahren mit

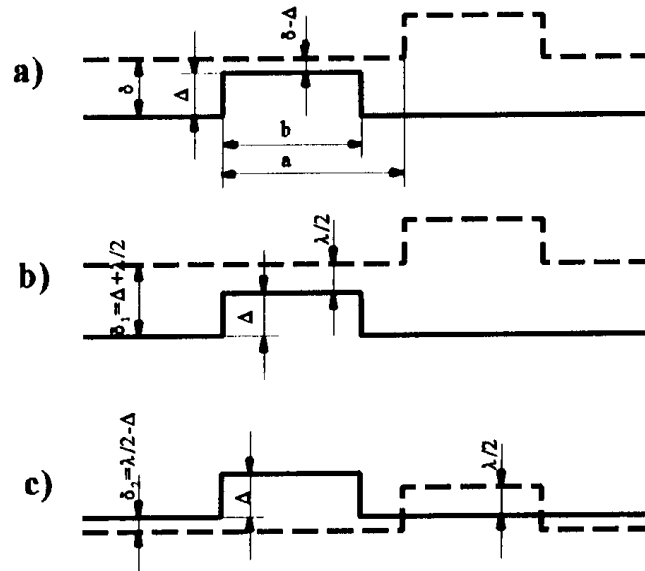


Abb. 5 Gangunterschiedsmessung beim Shearing-Verfahren: (a) totale Bildaufspaltung: **a** Größe der Bildaufspaltung, **b** Breite des Phasenobjektes; (b) Dunkelstellung des festen Bildes; (c) Dunkelstellung des verschobenen Bildes

totaler Bildaufspaltung. Dieses Verfahren kann sowohl in Verbindung mit der Streifenmethode als auch mit der Interferenzkontrastmethode angewendet werden.

Für Messzwecke wird vorwiegend das Shearing-Verfahren mit totaler Bildaufspaltung verwendet, bei dem die Größe der Bildaufspaltung **a** größer als die laterale Ausdehnung **b** des Objektes ist (**Abb. 5 a**). Mit Hilfe eines Phasenschiebers stellt man entsprechend **Abb. 5 b** und **5 c** zunächst das erste Bild und dann das zweite Bild auf größte Dunkelheit bzw. eine bestimmte Farbe ein.

Das heißt nach **Abb. 5 b** $\delta_1 = \Delta + \lambda / 2$ danach nach **Abb. 5 c** $\delta_2 = \lambda / 2 - \Delta$.

Die Differenz beträgt $\delta_1 - \delta_2 = 2\Delta$. Damit ergibt sich der Gangunterschied

$D = (d_1 - d_2) / 2 = 2d$. Der Phasenschieber ist im Allgemeinen mit einer Teilung versehen, die sich leicht eichen lässt (der Eichfaktor für das verwendete Mikroskop liegt am Praktikumsplatz aus). Beim Arbeiten mit weißem Licht kann man als Indikator statt der Dunkelstellung auch auf eine bestimmte empfindliche Farbe, z.B. den Übergang von Blau zu Rot (Purpur) einstellen. Das ist im Allgemeinen genauer möglich

als auf größte Dunkelheit. Häufig ist die Ansicht verbreitet, dass genaue Gangunterschiedsmessungen nur im monochromatischen Licht durchgeführt werden können. Die Praxis hat aber gezeigt, dass das nicht der Fall ist, wenn die Farbkorrektion des optischen Systems genügend gut ist. Für die Messungen wird im Folgenden das Interferenzmikroskop "Interphako" vom VEB "Carl-Zeiss" Jena benutzt. Bei der Interphako-Anordnung ist der Phasenschieber als schwacher, senkrecht zur optischen Achse verschiebbarer Glaskeil ausgeführt. Stellt man nacheinander im weißen Licht Objekt und Umgebung auf eine empfindliche Farbe ein, so lässt sich an der Skale des Drehknopfes die Stellung des Phasenschiebers ablesen und aus zwei Ablesungen den durch das Objekt hervorgerufenen Gangunterschied ermitteln.

Für die Genauigkeit der Messungen ist eine entsprechende Probenpräparation von großer Bedeutung. Voraussetzung ist eine scharfe, senkrechte Kante. Diese wird meist mit einem gut reflektierenden Metall, z.B. Gold oder Aluminium, bedampft. Dadurch erreicht man:

- Objekt und Umgebung sind gleich hell, dadurch wird ein hoher Kontrast der Interferenzstreifen erreicht,
- durchsichtige Schichten (z.B. SiO_2) auf undurchsichtiger Unterlage (z.B. Si) sind messbar,
- der materialabhängige Phasensprung am Objekt und der Unterlage ist gleich groß, dadurch wird der Messfehler wesentlich reduziert.

3 Aufgaben zur Vorbereitung

- 3.1. Warum muß die Bedampfung im Hochvakuum durchgeführt werden. Es gibt mehrere Gründe ! Welcher der Faktoren dominiert ?
- 3.2. Was sind mittlere freie Weglänge der Teilchen im Vakuum und Knudsenzahl ?
- 3.3. Woraus ergibt sich die elektrische Leistung, die dem Verdampfungsgut zur Verdampfung zugeführt werden muss ? Nennen Sie Einflussgrößen ?
- 3.4. Welche Schritte unternimmt man, um eine möglichst homogene Schichtdicke beim Bedampfen eines Si-Wafers zu erhalten ?
- 3.5. Wie muss der Bedampfungsprozess gesteuert werden, um feinkristalline Schichten zu erhalten? Wie erreicht man Schichten mit größeren Kristalliten ?

- 3.6. Erläutern Sie die Funktion eines Elektronenstrahl-Tanserseedampfers mit 270°- Ablenkung!
Wie berechnet sich die zugeführte elektrische Leistung ? Welche Parameter sind regelbar ?
- 3.7. Wie kann mit einem Quarz die Schichtdicke während der Bedampfung gemessen werden?
Erläutern Sie das Prinzip !
- 3.8. Unter welchen Bedingungen kann man mit einem Interferrometer die Schichtdicke einer Aufdampfschicht messen ?

4. Praktikumsaufgaben

4.1 Bedampfen aus dem Tiegel oder von der Wendel

Belüften Sie die Bedampfungsanlage B30 mit Wendelverdampfer !

Bringen Sie das Verdampfungsgut Aluminium so auf die Wendel auf, dass das Verdampfungsgut nicht herunterfallen kann!

Spannen Sie die zwei Si-Wafer mit der Vorderseite sichtbar auf den Targethalter! Bauen Sie den Targethalter so in die Bedampfungsanlage ein, dass die Dampfteilchen die Targetoberfläche möglichst senkrecht erreichen! (Beachten Sie, dass der Schwingquarz nicht im Bedampfungsschatten ist!)

Evakuieren Sie die Bedampfungsapparatur zunächst auf Vorvakuum ($5 \cdot 10^{-2}$ mbar) und dann auf Hochvakuum (Zielvakuum: $2 \cdot 10^{-5}$ mbar)! Während der Evakuierung ist die Targetheizung einzuschalten und mit 10A zu betreiben bis am Thermoelement 250°C zu messen sind. Schalten Sie vor der Bedampfung die Heizung wieder aus.

Bedampfen Sie das Target mit einer Schichtdicke von ca. 250 nm. Dazu ist während der Bedampfung die Schichtdicke am Schwingquarz zu verfolgen. Vor der Bedampfung ist dazu die Korrektur der wirklichen Schichtdicke durch Schwingquarzeichung zu berechnen.

Lassen Sie Target und Verdampfungseinrichtung solange abkühlen, bis maximal 50°C am Thermoelement

messbar sind; belüften Sie die Bedampfungsanlage und entnehmen Sie das bedampfte Substrat.

Die Bedampfungsanlage wird am Ende auf Vorvakuum evakuiert und in Absprache mit dem Versuchsverantwortlichen abgeschaltet.

4.2 Interferometrische Schichtdickenmessung

Skizzieren Sie die Schichtstruktur, der von Ihnen zur interferometrischen Schichtdickenmessung benutzten Probe!

Messen Sie die SiO₂-Schichtdicke an 3 verschiedenen Stellen auf dem Wafer mit jeweils 5 Messungen und bestimmen Sie den jeweiligen Mittelwert und die Standardabweichung!

Vergleichen Sie die Messergebnisse mit den Resultaten der ellipsometrischen Messungen nach der thermischen Oxydation. Diskutieren Sie das Ergebnis!

4.3 Rückseitenbedampfung mit dem Elektronenstrahlverdampfer

Belüften Sie die Bedampfungsanlage B30 mit Elektronenstrahlverdampfer!

Kontrollieren Sie, ob sich im Tiegel noch ausreichend Verdampfungsgut (Titan) befindet, im Bedarfsfall legen Sie nach!

Spannen Sie die zwei Si-Wafer mit der Rückseite sichtbar auf den Targethalter! Bauen Sie den Targethalter so in die Bedampfungsanlage ein, dass die Dampfteilchen die Targetoberfläche möglichst senkrecht erreichen! (Beachten Sie, daß der Schwingquarz nicht im Bedampfungsschatten ist!)

Evakuieren Sie die Bedampfungsapparatur zunächst auf Vorvakuum ($5 \cdot 10^{-2}$ mbar) und dann auf Hochvakuum (Zielvakuum: $3 \cdot 10^{-5}$ mbar) !

Bedampfen Sie das Target mit einer Schichtdicke von mindestens 200 nm. Dazu ist während der Bedamp-

fung die Schichtdicke am Schwingquarz zu verfolgen. Vor der Bedampfung ist dazu die Korrektur der wirklichen Schichtdicke durch Schwingquarzeichung zu berechnen.

Lassen Sie Target und Verdampfungseinrichtung 30 min abkühlen, belüften Sie die Bedampfungsanlage und entnehmen Sie das bedampfte Substrat.

Die Bedampfungsanlage wird am Ende auf Vorvakuum evakuiert und in Absprache mit dem Versuchsverantwortlichen abgeschaltet.

5 Literatur

- [1] Schiller, Heisig: Bedampfungstechnik - Verfahren, Einrichtungen, Anwendungen; Verlag Technik, Berlin 1975
- [2] Schiller, Heisig, Panzer: Elektronenstrahltechnologie; Verlag Technik, Berlin 1976

Erstellt von Dr. Ing. G. Ecke