

Technologie der Silicium-Halbleiterbauelemente

TeSi- Formelsammlung

Diese Formelsammlung wurde von Thomas Tschaftary begonnen,
dem wir alle zu großem Dank verpflichtet sind.

Fortgeführt und erweitert wurde sie von Martin Fischer,
Hüseyin Daglioglu und Oliver Schubert

Diese Formelsammlung soll noch möglichst vielen bei der Vorbereitung und Bearbeitung der Prüfung helfen und deswegen sei hiermit dazu aufgerufen weiterhin Fehler zu beseitigen, neue Themen zu integrieren oder das Layout zu verbessern. Um eine möglichst hohe Kompatibilität zu erhalten sollte das Dokument in einem Format mit moderaten Hard- und Softwareanforderungen bleiben. Also nix neuestes Office, sondern vorerst Word 6.

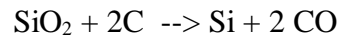
Raum Erlangen im Jahre 1998

2. Kristallzucht

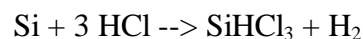
2.1. Einkristalinität

2.2. Herstellung von höchstem Silizium

- Das Ausgangsmaterial Quarz (SiO_2) wird im Bogenofen bei 1500 -2000 °C mithilfe von Kohlenstoff (Holz, Kohle, Koks) zu **metallurgischen Silizium** mit einer Reinheit von 98 % reduziert:

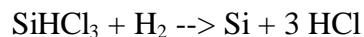


- Trichlorsilan-Prozeß** (Reinigung zum SG-Silizium):
Pulverisiertes MG-Silizium wird im Wirbelschichtreaktor bei 350 °C mit HCl in Trichlorsilan (SiHCl_3) umgewandelt:



Außer SiHCl_3 entstehen auch noch andere Silizium-Chlorverbindungen. Einige Verunreinigungen bilden flüchtige Chloride. (→ keine elektr. Verunreinigungen) Das Gemisch wird fraktioniert und destilliert.

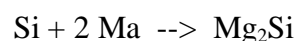
Trichlorsilan wird mit Wasserstoff in einem Abscheidereaktor bei 1100 °C an beheizten Siliziumstäben (Seele) pyrolytisch zu Poly-Silizium zersetzt (Bild 2.6, 8):



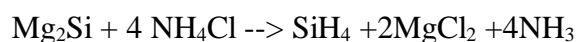
Bei der Pyrolyse entsteht als Nebenprodukt zur Weiterverwendung Siliziumtetrachlorid SiCl_4 ($\text{SiHCl}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{SiCl}_4 + \text{H}_2$)

Vorteile	Nachteile
Bildung von SiHCl_3 bei niedrigen Temperaturen (350 °C) SiHCl_3 ist bei RT flüssig → gute Handhabung, Reinigung Zersetzung schneller und bei niedrigeren Temperaturen als SiCl_4	Hoher Energieverbrauch nur 30 % wird in SG-Si umgewandelt der Rest in SiCl_4 Verunreinigung durch Korrosionsprodukte

- Silan Prozeß**
Pulverförmiges MG-Silizium reagiert in Wasserstoffatmosphäre bei 500 C mit Magnesium zu Magnesiumsilicid:



Magnesiumsilicid reagiert mit Ammoniumchlorid (NH_4Cl) in fl- Ammoniak unter 0 C unter Bildung von Silan:



Die pyrolytische Zersetzung von Silan findet an widerstandsbeheizten Polystäben bei 700 - 800 C statt.

Vorteile	Nachteile
Höhere Reinheit (Borverunreinigungen reagieren mit NH_3) niedrige Abscheidetemperatur	Herstellung von Silan teuer Prozeßtechn. Probleme bei der Zersetzung (entzündbar)

- **Granulare Abscheidung von Polysilizium**

Im Wirbelschichtreaktor werden einem Silan/Wasserstoffgemisch winzige Siliziumkeime beigegeben. Es scheiden sich Siliziumpartikel (100 - 1500 μm) ab.

Vorteile	Nachteile
Gute Beschickung eines Czochralski- Tiegels Hohe Effizienz der Abscheidung durch große Oberfläche der Keime	Keine Stäbe für das Float-Zone-Verfahren Silan ist relativ teuer

2.3. Einkristallherstellung

2.3.1. Czochralski -Verfahren

- **Verfahren:**

SG-Silizium wird unter Inertgas oder Vakuum im widerstandsbeheizten Quarztiegel mit Graphithalter aufgeschmolzen. Ein Keim der Kristallorientierung vorgibt wird eingetaucht und nach oben gezogen. Über Verhältnis Zieh- zu Wachstumsgeschwindigkeit und Temperatur der Schmelze kann der Kristalldurchmesser bestimmt werden. Der Tiegel dreht sich und wird nachgeführt. (Bild 2.6, 12)

Automatisierung des Ziehvorgangs: Kristalldurchmesser(Meniskus) muß kontrolliert werden
Meßmethoden: optisches Pyrometer, Röntgenstrahlen, Wiegen des Kristalls

- Die **Züchtung** erfolgt in folgenden Schritten:

Anschmelzen des Keims

Ziehen eines Dünnhalses (Versetzungen durch das Anschmelzen laufen an die Oberfläche)

Verbreiterung auf den gewünschten Durchmesser

Züchten des zylindrischen Kristallkörpers

Abschmelzen des Kristallendes

- **Elektrisch inaktive Verunreinigungen:**

Sauerstoff:

-- Stammt aus der Tiegelwand; ein Teil verdampft, ein Teil wird ins Kristall eingebaut;

-- Durch Ausdiffusion bei hoher Temperatur entsteht an der Scheibenoberfläche eine denuded zone (sauerstofffreies Gebiet)

-- Sauerstoffpräzipitate gettern Verunreinigungen

-- Sauerstoffpräzipitate härten die Scheiben durch Behinderung der Versetzungswanderungen

Kohlenstoff:

-- Stammt aus dem Graphit-Tiegelhalter, es bildet sich CO und CO₂

-- Kann zu Kristalldefekten führen ⇒ evtl. Funktionsstörungen des BEL

Argon:

-- verändert die elektr. Eigenschaften nicht direkt, kann aber Präzipitate von Leerstellen, Zwischengitteratome verursachen ⇒ mech. + el. Störungen

- **Elektrisch aktive Verunreinigungen:**

-- Atome die als Donatoren oder Akzeptoren wirken (As, Sb, P, B, Ga, Al) verändern die Leitfähigkeit der Grundmaterials

-- Atome die Zustände in der Mitte des verbotenen Bandes (Au, Fe, Cu) wirken als Generations- und Rekombinationszentren (-> Life-time-killers). Abhilfe : Gettern

- **Die Magnetfeld- Czochralski- Methode:**

instationäre Konvektion führt zu Dotierstoffinhomogenitäten. („Nicht rotationsbedingte Striations“) Ein Magnetfeld kann instat. Konvektion unterdrücken, so daß sich ein gleichmäßige erzwungene Konvektion durch Kristall- und Tiegelrotation ergibt, die durch Variation der Drehgeschwindigkeit reguliert werden kann. „Rotationsbedingte Striations“ können nicht beeinflusst werden.

2.3.2. Float-Zone -Verfahren (tiegefreies Zonenziehen)

- Verfahren:
partielles Aufschmelzen des SG-Stabes durch HF-Heizung; Die Oberflächenspannung verhindert Wegfließen; Ziehen eines Dünnhalses wg. Versetzungen; Keim gibt Kristallgitter + Orientierung vor; Keim ist unter Kristall
Vorteil: wesentlich höhere Reinheiten gegenüber Czochralski

2.4. Dotierung von Siliziumkristallen

2.4.1. Dotierung von Czochralski -Kristallen

- Die Dotierstoffe werden nicht im gleichen Verhältnis in den Kristall eingebaut, wie sie in der Schmelze vorhanden sind. Im Gleichgewicht werden sie gemäß dem *Segregationskoeffizienten* (außer bei Sauerstoff kleiner 1) eingebaut (Tab. 2.2. 17):

$$k = \frac{c_k}{c_s}$$

c_k : Konzentration im Kristall
 c_s : Konzentration in der Schmelze

- **Die axiale Dotierstoffverteilung**

Mit fortschreitendem Kristallwachstum reichern sich die Dotierstoffe in der Schmelze an, dadurch werden auch mehr Dotierstoffe in den Kristall eingebaut:

$$\frac{c}{c_0} = k(1 - g)^{k-1}$$

c : Dotierstoffkonzentration im Kristall an der Erstarrungsgrenze, nachdem der Anteil g der Schmelze erstarrt ist
 c_0 : Anfangskonzentration in der Schmelze

Aufgrund der Ziehgeschwindigkeit v weicht der effektive Segregationskoeffizient k_{eff} erheblich vom Gleichgewichtskoeffizient k ab. An der Phasengrenze bildet sich eine Diffusionsschicht, in der sich nicht eingebaute Dotieratome sammeln und erst durch Diffusion abtransportiert werden müssen. --> höherer Wert von k_{eff}

$$k_{\text{eff}} = \frac{k}{k + (1 - k)e^{-\frac{vd}{D}}}$$

v : Ziehgeschwindigkeit
 d : Dicke der Diffusionsschicht
 D : Diffusionskoeffizient

- **Die radiale Dotierstoffverteilung**

Bei Dotierstoffen mit hohem Dampfdruck spielt der Druck in der Ziehapparatur eine große Rolle. Bei sehr niedrigen Drücken verdampfen Dotieratome aus den äußeren Kristallbereichen. Die Kristall wächst in bevorzugte Richtungen schneller. --> verstärkter Dotierstoffeinbau im Kern, Facettenbildung (bei $\langle 111 \rangle$)
 Striations sind mikroskopische radiale Dotierstoffinhomogenitäten. Sichtbarmachung durch Anätzen oder Röntgenstrahlen
 rotationsbedingte Striations entstehen durch Asymmetrien der thermischen Achse zur Rotationsachse

2.4.2. Dotierung von Float-Zone -Kristallen

Das Dotiergas wird in die Schmelzzone geblasen, keine Probleme, höhere Homogenität (z.B.: B_2H_6 , PH_3)

2.4.3. Neutronendotierung

- undotiertes Silizium wird im Kernreaktor mit Neutronen beschossen. Soentsteht eine Phosphor n-Dotierung. Die auftretenden Strahlenschäden müssen durch Tempern (700 C) in Inertgas ausgeheilt werden.

Vorteile	Nachteile
hohe Homogenität der Dotierstoffverteilung	nur bei FZ-Material sinnvoll (höhere Reinheit) nur Phosphordotierung für niederohmiges Material lange Bestrahlungszeiten --> sehr teuer Strahlenschäden

2.5. Scheibenherstellung

--> Bild 2.12 22

--> Bild 2.13 23

--> Bild 2.14 24

--> Bild 2.15 24

--> Bild 2.16 25

3. Oxidation

3.1. Prozeßführung der thermischen Oxidation

- *trockene Oxidation:*

hochreiner Sauerstoff wird durch den Oxidationsofen geblasen

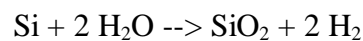
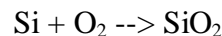
- *feuchte Oxidation:*

Wasserdampf wird in einem temperaturstabilisierten Glasgefäß hergestellt, durch das Sauerstoff, Stickstoff, oder Argon geleitet wird. --> der Wasserdampfpartialdruck läßt sich einstellen.

Oder

Wasserdampf durch Verbrennung von Sauerstoff und Wasserstoff am Gaseinlaß des Rohres

- Bei 700 bis 1250 C ergeben sich die Reaktionen:



3.2. Oxidationskinetik nach Deal und Grove

$$x_0^2 + Ax_0 = B(t + \tau)$$

$$x_0 = x_i \text{ bei } t = 0$$

$$\text{oder } t = \frac{x_0^2 - x_i^2}{B} + \frac{x_0 - x_i}{B/A}$$

τ : Zeitverschiebung für ein anfängliches Oxid der Dicke x_i

trockene Oxidation: $x_i = 20\text{nm}$

feuchte Oxidation: $x_i = 0$

$$\tau = \frac{x_i^2 + Ax_i}{B}$$

$$x_0 = \frac{A}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{(t + \tau)4B}{A^2}} - 1 \right]$$

- parabolisches Oxidwachstum:

$$x_0 = \sqrt{Bt} \quad \text{für} \quad t \gg \frac{A^2}{4B} \quad \text{diffusionsbegrenzt}$$

-> große Zeiten

- lineares Oxidwachstum:

$$x_0 = \left(\frac{B}{A}\right)(t + \tau) \quad \text{für} \quad t + \tau \ll \frac{A^2}{4B} \quad \text{reaktionsbegrenzt}$$

-> kleine Zeiten

- differentielle Form:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{2x_0 + A}$$

- graphische Bestimmung der Ratenkonstanten

$$x_0 = B \left(\frac{t + \tau}{x_0} \right) - A \quad \text{--> Bild 3.3. --> Steigung } B, \text{ senkrechte Achse } A$$

3.3. Verschiedene Abhängigkeiten

- **Temperatur und Orientierungsabhängigkeit:**

an der SiO₂-Si Grenzschicht gilt für $h \gg k_s$:

$$B/A = \frac{C^* k_s}{N_{ox}}$$

parabolische Konstante B: temperaturabhängig, nicht orientierungsabhängig

lineare Ratenkonstante B/A: temperaturabhängig, orientierungsabhängig

(111 schneller als 100 Si, B/A(111): B/A(100) = 1,68 : 1)

$$B = B_0 \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

$$B/A = \left(\frac{B}{A}\right)_0 \exp\left(-\frac{E_{B/A}}{kT}\right)$$

Werte: Tabelle 3.1. 35

- **Druckabhängigkeit:**

feuchte Oxidation: proportional zum Druck $\rightarrow B = B_0 p \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$

$$B/A = \left(\frac{B}{A}\right)_0 p \exp\left(-\frac{E_{B/A}}{kT}\right)$$

trockene Oxidation:

parabolische Ratenkonstante B: lineare Abhängigkeit:

$$B = B_0 p \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right)$$

lineare Ratenkonstante B/A: sublineare Abhängigkeit: $A = \frac{B}{(B/A)} = \dots$

$$B/A = \left(\frac{B}{A}\right)_0 p^n \exp\left(-\frac{E_{B/A}}{kT}\right)$$

n: Gl. 3.2 37

$\rightarrow p > 1 \text{ atm} \rightarrow n=0,7$

$\rightarrow p > 1 \text{ atm} \rightarrow n < 1$

- **Dotierungsabhängigkeit:**

Hohe Fremdatomkonzentrationen (besonders n-dotierende Elemente) verursachen eine Erhöhung der Oxidationsrate bis um den Faktor 10 \rightarrow Wiederfinden von dotierten Gebieten nach ganzflächigem Abätzen anhand der Oxidfarbe.

3.4. Dünne Oxide (<50nm)

Bei trockener Oxidation ist die Aufwachsrate am Anfang wesentlich größer als nach dem linear-parabolischen Gesetz (wegen Sauerstoffdiffusion). Das Deal-Grove-Gesetz wird durch verschiedene Terme ergänzt:

- Modell von Masoud

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{2x_0 + A} + C \exp\left(-\frac{x_0}{L}\right)$$

C: temperaturabh. Fitparameter

L: charakter. Länge, 70-80 Å

keine physikalische Begründung

- Modell von Ellis

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{2x_0 + \underbrace{A/(1 + K \exp(-x_0/L))}_{A'}}; \quad A' = \frac{A}{1 + K \exp(-x_0/L)}$$

$$K = 65,388 - 0,1047 \cdot T + 4,2552 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

$$L = \frac{1}{1115,907 - 1,7397 \cdot T + 6,876 \cdot 10^{-4} \cdot T^2} \mu m$$

- Modell von Han und Helms:

Es wird angenommen, daß 2 Mechanismen für die Oxidation verantwortlich sind: (zusätzliches Wachstum an der Oxidoberfläche: 1. Term)

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{B_1}{2x_0} + \frac{B_2}{2x_0 + A_2}$$

$$B_1 = B_{1,0} \exp\left(-\frac{E_{B1}}{kT}\right)$$

Werte: Tabelle 3.3 39

$$B_2 = B_{2,0} \exp\left(-\frac{E_{B2}}{kT}\right)$$

$$\frac{B_2}{A_2} = \frac{B_{2,0}}{A_{2,0}} \exp\left(-\frac{E_{B2/A2}}{kT}\right)$$

3.5. Oxidverunreinigungen

Die elektrischen Eigenschaften des Oxids werden durch 3 Gruppen von Verunreinigungen beeinflusst:

- Im Oxid bewegliche und ionisierte Metallionen) der Alkaligruppe (Li, Na, K) führen zu Instabilitäten und Drifteffekten bei MOS-Transistoren

Die Natriumionen dominieren wegen der hohen Konzentrationen. Verschiedene Quellen:
vor der Oxidation vorhandene Verunreinigungen (an Substratoberfläche)

der Oxidationsprozeß einschließlich Hochtemperaturtemperung

der Oxidation folgende Prozeßschritte: Metallisierung, Temperungen...
(Verunreinigungen diffundieren ein)

- Metalle die im Silizium löslich sind und einen hohen Diffusionskoeff. haben (Cu, Au, Fe)
Sie bilden Zustände in der Mitte der verbotenen Bandes, wirken dadurch als Generations-/Rekombinationszentren und vermindern die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger ---> life-time-killer Abhilfe: Gettern
- Metalle die an der Si-Oberfläche Silicide bilden (Ni) Hierdurch entstehen Schwachstellen, die die elektr. Durchbruchspannung des Oxids verringern.

Weitere Verunreinigungen:

- Atome die als Donatoren oder Akzeptoren wirken (As, Sb, P, B, Ga, Al) verändern die Leitfähigkeit des Materials
- Atome die als Ionen ins Oxid eingebaut werden (Na, Li, K ,Cs) verändern die Einsatzspannung von MOS -Transistoren

---->>>> **Abhilfe gegen diese Verunreinigungen:**

Verwendung von reinen Gasen

reines Quarz

Scheibenreinigung

Chloroxidation

Gettern, niedrige Prozeßtemperaturen, höhere Ox-raten

3.6. Chloroxidation

Die Zugabe von molekularem Chlor (Cl_2) (geht am besten) oder anderen Chlorverbindungen hat eine Reihe von Vorteilen:

- Erhöhung der Oxidationsrate (erhöht B)
 Sie wird verursacht durch:
 - erhöhte Diffusion von O_2 und H_2O -Molekülen im Oxid
 - erhöhte Reaktionsrate an der SiO_2 -Grenzschicht
 - Wirkung der H_2O -Dampfes der während der Oxidation gebildet wird (mehr als ein Oxidationsmittel)
- Der Anteil der beweglichen Na-Ionen im Oxid läßt sich reduzieren (nur bei trockener Oxidation über 1050 C)
- Reduzierung fester Oxidladungen und Grenzflächenladungen
- Durchbruchspannung wird größer und ihre Streubreite nimmt ab, da weniger Defekte im Oxid entstehen. (Zu hohe Chlorkonzentrationen drehen den Effekt um!!!! Bild 3.16 44)
- Die Minoritätsträgerlebensdauer wird höher (Bildung flüchtiger Metallchloride)
- Die Ausbildung von OSF (oxidationsinduzierte Stapelfehler) kann vollständig unterdrückt werden

Sonstiges:

- unvollständig ablaufenden Reaktionen
- Ratenkonstanten als Funktion der Chlorkonzentrationen siehe Bild 3.15 43

3.7. Defekte

Der *Bildungsprozeß von Defekten* hängt von folgenden Parametern ab:

- Verunreinigungen des Kristalls (Metall-, Sauerstoff, C-konzentrationen)
- Dotierung
- Gitterperfektion
- Oberflächenorientierung
- Rückseitenstruktur des Wafers
- Dauer, Temperatur und Prozeßatmosphäre jedes Prozeßschritts
- Reinheit von Oberflächen (Gase, Reinraum...)
- Prozeßablauf

Verschiedene Kristalldefekte: (S.45)

- interstitielles Fremdatom/ Siliziumatom
- substitutionelles Fremdatom (aufweitend / komprimierend)
- Leerstellen
- gleichförmige Präzipitate aus substitutionellen Fremdatomen
- Kanten-Versetzungen
- Versetzungsschleife aus interstitiellen Siliziumatomen / aus Leerstellen
- **Stapelfehler** (ABCABC \Rightarrow ABACABC)

Sauerstoffpräzipitate:

- Entstehen bei niedrigen Temperaturen durch Akkumulation von interstitiellen Sauerstoffatomen aus dem Quarztiegel
- bei höheren Prozeßtemperaturen verdampfen (Ausdiffusion) sie an der Oberfläche, innen wirken sie als Getterzentrum

Oxidationsinduzierte Stapelfehler (OSF):

- wirken anziehend auf Verunreinigungen, da Anlagerung hier energetisch günstiger
--> Verschlechterung von BEL's
- OSF entstehen bei thermischer Oxidation an der Si-Oberfläche. Ihr Wachstum nimmt mit der Temperatur zu. (Grund: Vermehrung von interstitiellen Si-Atomen)
- Das Wachstum ist von der Substratorientierung (100 wachsen schneller als 111), der Anwesenheit von Wachstumskeimen abhängig
- bei n größere Dichte als bei p
- Bei hohen Temperaturen schrumpfen sie wieder (geänderte „mechanische“ Oxidationsparameter) Bild 3.22 50
- Bei Chlorhaltigen Zusätzen werden sie nach anfänglichem Wachstum wieder ganz abgebaut
- Bei Prozeßtemperaturen unter 950 C werden sie ganz vermieden
- einSchrumpfen kann auch durch Hochtemperaturtempem in Stickstoff erreicht werden
- Prozesse zum Gettern zur Vermeidung der Keimbildung:
 - intrinsic Gettern durch Sauerstoffpräzipitate im HL- Inneren (nur bei Cz-Scheiben)
 - Aufrauen der Rückseite
 - Implantation von Argon in die Scheibenrückseite, Zerstörung des Kristalls
 - ⇒ Getterzentren

3.8. 2D Oxidation (Lokale Oxidation)

Bei der lokalen oder selektiven Oxidation wird durch eine Maske aus Siliziumnitrid oxidiert. Das aufgewachsene Oxid ragt um etwa die Hälfte über die Si-Oberfläche heraus. LOCOS wird praktisch immer feucht durchgeführt. Um Spannungen zwischen Nitrid und Silizium zu vermeiden wird unter das Nitrid eine dünne SiO₂-Schicht (Schmierschicht) eingeführt. Durch laterale Unteroxidation kommt es zur Ausbildung eines birds peak

Vorteile :

- oxidierte Si-Substrate mit relativ ebener Oberfläche trotz dicker Oxidschichten möglich ⇒ keine Schwierigkeiten bei Kantenbedeckung bei nachfolgenden Schichtabscheidungen
- dicke Oxidschichten reduzieren unerwünschte Kapazitäten der Metallisierungsebene und die Gefahr der Bildung parasitärer Kanäle

Beim Recessed Oxide LOCOS-Prozeß (ROX) wird im Bereich des Feldoxids das Si geätzt, so daß nach der Oxidation die Oberfläche der aktiven Bereiche und des Feldbereichs auf gleichem Niveau liegen. höhere Packungsdichte durch Verringerung des Vogelschnabels.
Siehe Bild 3.30 55

Länge des Vogelschnabels kann durch Vergrößerung des Nitrid/Si-Dioxid Dickenverhältnisses reduziert werden ⇒ aber Spannungen

Poly Buffered LOCOS (PBL): Poly-Si-Schicht zur Reduzierung des Vogelschnabels ohne Spannungen zwischen Nitrid und Siliciumoxid zu vergrößern.

3.9. Oxideigenschaften und Anwendungen

herausragende Oxideigenschaften: siehe Tab. 3.5 57

Anwendungen:

- Maskierung
Maske für Diffusionsprozesse da Diffusionskoeffizient sehr niedrig gegenüber Si
Dotierung
- Passivierung
für fertige Schaltungen besser: Oxidnitridschichten oder sog. Gläser da nicht für H₂O und Alkalimetalle durchlässig
- Zwischenoxid
Zur Isolation mehrerer Metallisierungsebenen (keine thermische Oxidation sondern chemisch abgeschieden oder gesputtert)
- Feldoxid
zur Isolation mehrerer BEL Aufwachsen eines Dickoxids
zur Verhinderung parasitärer Transistoren
Verringerung der Kapazität von Verbindungsleitungen
Herstellung: feuchte Oxidation + Verstärkung durch CVD

3.8.4 MOS-Kondensator

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{x_0}$$

C_{ox} : Kapazität **pro Fläche!!**

$$\text{tatsächliche Kapazität: } C_{ox} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{x_0} \cdot r^2 \pi$$

$$\Phi_{Si} = \chi_{Si} + \frac{E_g}{2q} + \Psi_B$$

Φ_{Si} : Austrittsarbeit

χ_{Si} : Elektronenaffinität (4,05 V)

E_g : Bandabstand (1,12 eV)

Ψ_B : Potentialdifferenz zwischen intrinsischem
Fermi-niveau E_i und Fermi-niveau E_F

- n-Silicium:

$$\Psi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i}{N_D}$$

N_D : Donatorkonzentration

- p-Silicium:

$$\Psi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

N_A : Akzeptorkonzentration

n_i : intrinsische Ladungsträgerkonzentration
($n_i = 1,08 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_A}$$

ρ : spezifischer Widerstand [Ωcm]

μ_p : Löcherbeweglichkeit in Si [cm^2/Vs]

N_A : Dotierung [cm^{-3}]

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_{Si}$$

Φ_{MS} : Austrittsarbeitdifferenz

$$U_{FB} = \Phi_{MS} < 0$$

U_{FB} : Flachbandspannung (Vorspannung, die bei realem MOS die unterschiedlichen Austrittsarbeiten angleicht)

bei $U < U_{FB}$ gilt:

$$\text{p-HI: } Q_M = -Q_S = -Q_p - q \cdot N_D \cdot W_n$$

$$\text{n-HI: } Q_M = -Q_S = Q_n + q \cdot N_A \cdot W_p$$

Q_M : Ladung auf Metallelektrode

Q_S : Ladung im Halbleiter

Q_n : Inversionsladung im p-Halbleiter

Q_p : Inversionsladung im n-Halbleiter

$$w_{p/n} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}|\psi_s|}{qN_{A/D}}}$$

$$|\psi_s| \leq 2|\psi_B|$$

$w_{p/n}$: Rlz-weite

Poisson-Gleichung:

$$\Delta U = \frac{Q_{eff}}{C_{ox}} = \frac{\int_0^{x_0} x \cdot \rho(x) dx}{C_{ox} \cdot x_0}$$

x : Abstand von der Metallelektrode

$\rho(x)$: Raumladungsdichte im Oxid

$$U_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q_{eff}}{C_{ox}}$$

$$Q_{eff} = Q_m' + Q_{0r}' + Q_f + Q_{it}$$

Q_{eff} : effektive Oxidladungsdichte

Q_f : feste Oxidladung

Q_{it} : getrappte Ladung an der Grenzfläche

Q_m' : bewegliche Ladung

Q_{0r}' : feste getrappte Ladung $Q_{0r}' \neq Q_m$

bei homogen im Oxid verteilten Ladungen

$$\text{gilt: } Q_{0r}' = \frac{Q_{0r}}{2}$$

Annahme: keine Oxidladungen:

$$U_{FB_0} = \Phi_M - \chi_{Si} - \frac{E_g}{2q} - \psi_B$$

$$\Phi_M : 4,1V$$

$$\chi_{Si} : 4,05V$$

$$E_g : 1,12eV$$

$$q: 1e$$

$$U_{FB_0} - U_{FB} = \frac{Q_{eff} q}{C_{Ox}}$$

$$U_{FB_0} : \text{errechnet ohne Oxidladungen}$$

U_{FB} : tatsächlich

$$Q_{eff}: [1/cm^2]$$

$$C_{ox}: \text{flächenbezogen [nF/cm}^2\text{]}$$

Halbleiterkapazität im Flachbandfall:

$$\left. \begin{aligned} C_{SFB} &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{L_D} \\ L_D &= \sqrt{\frac{kT \epsilon_0 \epsilon_{Si}}{q^2 N}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{SFB} = \sqrt{\frac{q^2 \epsilon_0 \epsilon_{Si} N}{kT}} \quad L_D: \text{Debyelänge}$$

$$C_{FB} = \frac{C_{Ox} \cdot C_{SFB}}{C_{Ox} + C_{SFB}}$$

Einsatz- / Schwellspannung:
$$U_T = U_{FB} - \frac{Q_S}{C_{Ox}} + 2\psi_B$$

p-Halbleiter:
$$Q_S = -W_p \Big|_{\psi_s=2\psi_B} \cdot qN_A = -\sqrt{2|\psi_B| \epsilon_0 \epsilon_{Si} 2qN_A}$$

n-Halbleiter:
$$Q_S = W_n \Big|_{\psi_s=2\psi_B} \cdot qN_D = \sqrt{2|\psi_B| \epsilon_0 \epsilon_{Si} 2qN_D}$$

Q_S : Ladung im HL bei max. Rlz $\psi_s = 2\psi_B$

4. Diffusion

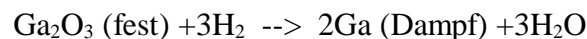
- klassisches Verfahren zur Herstellung unterschiedlich dotierter Gebiete im Halbleiter
- Diffusionsprozesse treten bei vielen halbleitertechnologischen Prozessen auf:
 - Diffusion eines Oxidationsmittels
 - Umverteilung ionenimplantierter Dotierungsverteilungen während der Temperung
 - Epitaxie und gleichzeitiger Umverteilung der Dotierung
 - Vorgänge bei der Legierung von Metallkontakten
- Die Diffusion wird in einem Zweistufenprozeß durchgeführt. Im ersten Schritt wird durch eine Vorbelegung eine oberflächennahe Schicht dotiert. In einem zweiten Schritt werden die Dotieratome dann tiefer eindiffundiert
- Man unterscheidet feste, flüssige, und gasförmige Quellen:

Feste Quellen:

Das Quellenmaterial, meist ein Oxid der Dotiersubstanz: P_2O_5 , B_2O_3 , SbO_2 wird durch ein Trägergas zur Siliziumscheibe transportiert und dort reduziert. Oft wächst gleichzeitig ein Oxid auf.

Alternative: spin on Quellen: dotierte Oxide, flüssig, werden wie Photolack aufgeschleudert, nach einem Ausheizschritt bildet sich ein dotierter Oxidfilm, der konventionell diffundiert wird

Alternative: chemische Reaktion:



Flüssige Quellen:

z.B.: $POCl_3$ Ein Trägergas perlt durch die flüssige Dotiersubstanz. Die Menge der Dotiersubstanz wird durch die Temperatur der Flüssigkeit bestimmt und durch Thermostaten konstant gehalten.

Gasförmige Quellen:

z.B.: Phosphin (PH_3), Diboran (B_2H_6)

Vorteil: bessere Kontrolle der Partialdrücke

Nachteil: hohe Giftigkeit, schlechte Homogenität

4.1. Mathematische Beschreibung von Diffusionsvorgängen

Eine beliebige Stoffmenge mit der ortsabhängigen Konzentration C in einem Volumen V kann sich nur durch Materialflüsse über die Grenzfläche sowie durch Erzeugung und Verlust im Gebiet zeitlich ändern:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = G - R - \text{div}J$$

Treibende Kräfte sind bei Halbleiterprozessen meist Konzentrationsgradienten und elektrische Felder. --> Es ergibt sich ein Materialfluß:

$$J = -D \cdot \text{grad}C + z \cdot \mu \cdot C \cdot \text{grad}\phi$$

μ : Beweglichkeit

z : Ladungszustand

$$\mu = \frac{qD}{kT}$$

Für elektrisch neutrale Teilchen oder für ionisierte Dotieratome ohne Feld gelten die Fickschen Gesetze:

$$J = -D \cdot \text{grad}C = -D \left(\frac{\delta C}{\delta x} \vec{e}_x + \frac{\delta C}{\delta y} \vec{e}_y + \frac{\delta C}{\delta z} \vec{e}_z \right) \quad \text{1. Ficksches Gesetz}$$

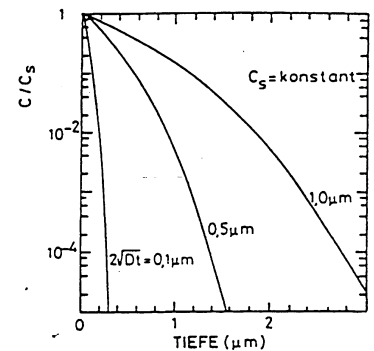
$$\frac{\delta C}{\delta t} = \text{div}(D \cdot \text{grad}C) = D \cdot \left(\frac{\delta^2 C}{\delta^2 x} + \frac{\delta^2 C}{\delta^2 y} + \frac{\delta^2 C}{\delta^2 z} \right) \quad \text{2. Ficksches Gesetz}$$

4.1.1 Diffusion aus unerschöpflicher Quelle

Unter der Annahme einer konst. Oberflächenkonzentration C_s (Schicht aufbringen od. Dotiergas) erhält man eine analytische Lösung der Fickschen Gesetze mit folgenden Randbedingungen:

$$\begin{aligned} C(0, t) &= C_s \\ C(\infty, t) &= 0 \\ C(x, 0) &= 0 \end{aligned} \quad C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{\underbrace{2\sqrt{Dt}}_{\text{Diffusionslänge}}}$$

Eigenschaften der Fehlerfunktion: Tab. 4.1 78



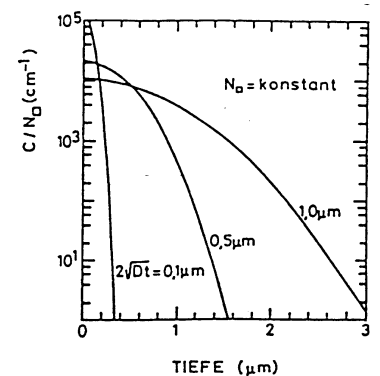
Menge der in den Halbleiter diffundierten Substanz: ($N_{\otimes}(t)$): Belegung)

$$N_{\otimes}(t) = \int_0^{\infty} C(x, t) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt} \cdot C_s$$

4.1.2 Diffusion aus erschöpflicher Quelle

Zur Erzeugung tiefer Fremdatomverteilungen folgt nach der Vorbelegung eine Nachdiffusion (drive in Diffusion) Dies wird durch eine Temperbehandlung in Inertgas (keine Dotieratome), häufig in oxidierender Atmosphäre durchgeführt.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\delta C}{\delta x} \right|_{0,t} &= 0 \\ C(\infty, t) &= 0 \end{aligned} \quad C(x, t) = \frac{N_{\otimes}}{\underbrace{\sqrt{\pi Dt}}_{C_s}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$



4.2. Intrinsische Diffusion

Die Konzentration der Dotieratome muß hinreichend unter der Konzentration der thermisch erzeugten Ladungsträgerkonzentration liegen. Die Eigenleitungskonzentration muß überwiegen. --> der Halbleiter ist intrinsisch (eigenleitend)

Geltungsbereich der intrinsischen Diffusion:

Die Konzentration der Dotieratome muß unter der Ladungsträgerkonzentration n liegen:

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad N_c, N_v: \text{eff. Zustandsdichten}$$

$$n_i = 3,87 \cdot 10^{16} \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{0,605\text{eV}}{kT}\right) \quad [T] = K \quad \text{für Silizium Bild 4.4 88}$$

Temperaturabhängigkeit der intrinsischen Diffusion:

Bei Prozessen in inerter Atmosphäre ist der Diffusionskoeff. Nur von der Temperatur abhängig:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad T \text{ in K}$$

Werte von D_0 und E_a --> Tab. 4.2. 81

Einfluß von Temperaturschwankungen:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{E_a}{k} \cdot \frac{\Delta T}{T^2} \quad \text{--> möglichst hohes T --> kleiner Fehler}$$

Angabe des Fehlers in der Lage des pn- Übergangs:

$$\frac{\Delta x_j}{x_j} = \frac{1}{2} \frac{\Delta D}{D} + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{t}$$

was sich nicht ändert $\Delta x = 0$ setzen !

$$\frac{\Delta x_j}{x_j} = \frac{E_a}{2kT} \frac{\Delta T}{T} + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{t}$$

4.3. Extrinsische Diffusion (Konzentrationsabhängige Diffusion)

Bei hohen Konzentrationen von Fremdatomen (Fremdatomkonz > intrinsische ladungsträgerkonzentration) wird die Konzentration der Majoritätsladungsträger von der Dotierungskonzentration bestimmt. --> extrinsische, feldbeschleunigte Diffusion. Der Halbleiter ist dann nicht mehr feldfrei und die geladenen Dotieratome spielen ein Rolle.

Auswirkung der Ladungsträgerkonzentration auf Punktdefekte/Paare:

elektrisch neutrale Punktdefekte:	keine Abhängigkeit
einfach geladene Punktdefekte (pos od neg)	lineare Abhängigkeit
zweifach geladene Punktdefekte	quadratische Abhängigkeit

$$n = n_i \cdot \exp\left(\frac{q\varphi}{kT}\right) \quad p = n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\varphi}{kT}\right) \quad \text{Bedingung: halbbunendlicher HI}$$

mit $C_A = C_D = 0$

$n = p = n_i$

$\varphi = 0$

jeweils bei $x \rightarrow \infty$

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_0\epsilon_r}{q^2(p+n)}}$$

L_D : Debyelänge

$$D = D_i \cdot d_F = D_i \left(1 + \frac{C}{\sqrt{C^2 + 4n_i^2}} \right)$$

D : Diffusionskoeffizient

d_F : Feldbeschleunigungsterm ($d_F \leq 2$)

Formeln s. S.83-86

Es gilt wieder:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = -\text{div} \left(\sum_{LZ} (J_{Bl} + J_{BV}) \right) \quad J = -D \cdot \text{grad}C + z \cdot \mu \cdot C \cdot \text{grad}\varphi$$

Bsp für Antimon (Paare nur mit Leerstellen wahrscheinlich)

$$C_{SbV+} = \Theta_{SbV+} C_{Sb} \frac{C_{V0}}{C_{V0}^{eq}} \quad \text{einfach pos geladene Leerstellenpaare}$$

$$C_{SbV0} = \Theta_{SbV0} \frac{n}{n_i} \frac{C_{V0}}{C_{V0}^{eq}} \quad \text{elektrisch neutrale Leerstellenpaare}$$

$$\frac{\delta C_{Sb+}}{\delta t} = \text{div} \left(\underbrace{D_{SbV+} \cdot \text{grad}C_{SbV+}}_{J_{SbV+}} + D_{SbV+} \cdot C_{SbV+} \cdot \frac{q}{kT} \cdot \text{grad}\varphi + \underbrace{D_{SbV0} \cdot \text{grad}C_{SbV0}}_{J_{SbV0}} \right)$$

$$\frac{\delta C_{Sb+}}{\delta t} = \text{div} \left(\underbrace{\left(D_{SbV+} \cdot \Theta_{SbV+} + D_{SbV0} \cdot \Theta_{SbV0} \cdot \frac{n}{n_i} \right)}_{D_{HK}} \cdot \left(\text{grad}C_{Sb+} + C_{Sb+} \cdot \frac{q}{kT} \cdot \text{grad}\varphi \right) \right)$$

$$D_{HK} = D_i \cdot \frac{1 + \beta \cdot \frac{n}{n_i}}{1 + \beta} \quad \text{Dotierung mit Donatoren}$$

$$D_{HK} = D_i \cdot \frac{1 + \beta \cdot \frac{p}{n_i}}{1 + \beta} \quad \text{Dotierung mit Akzeptoren}$$

Gekoppelte Diffusion

Das elektrostat. Feld wirkt auch auf andere vorhanden Dotierstoffe. Dabei kann das elektr. Feld, das z.B. von Arsenatomen verursacht wird, eine Diffusion von Boratomen entgegen des Konzentrationsgradienten (Diffusionskoeffizienten ?) bewirken.

4.4. Fermi-niveauabhängige Diffusion

$$D = D_i \frac{1 + \beta \frac{n}{n_i}}{1 + \beta} \quad \beta = \frac{D_i^-}{D_i^0}$$

4.5. Paardiffusionsmodelle:

Die Diffusion läuft über Diffusionsvehikel ab. Man nimmt an, daß sich Paare zwischen Dotieratomen und Leerstellen und Dotieratomen und Eigenzwischengitteratomen bilden. (einige 100nm bis einige 100µm)

Konzentration der Dotieratom (Bor)-Leerstellenpaare:

$$C_{BV} = \Theta_{BV} C_B \frac{C_V}{C_V^{eq}} \quad \Theta_{BV} : \text{rel. Konz. Der Paare im thermodyn. Gl}$$

. C_V : Konzentration der Leerstellen

C_B : Konzentration der Boratome

C_V^{eq} : Konz. Der Leerstellen im thermodyn. Gl.

Konzentration der Dotieratom (Bor)-Zwischengitterpaare:

$$C_{BI} = \Theta_{BI} C_B \frac{C_I}{C_I^{eq}} \quad \text{siehe oben nur statt Leerstellen Zwischengitterat.}$$

--> Kontinuitätsgleichung: $J_{Bi} = -D_{Bi} \text{grad} C_{Bi}$

$$\frac{\delta C}{\delta t} = -\text{div} \left(\sum_{LZ} (J_{BI} + J_{BV}) \right)$$

Oxidationsbeschleunigte Diffusion (OED)

Aufgrund der Oxidationsprozesse an der SiO₂ /Si-Grenzschicht ergibt sich eine Volumenausdehnung (2,6) und ein großer Druck im Oxid. Dadurch werden Si-Atome als Zwischengitteratome ins Si-Gebiet injiziert. --> erhöhte Konzentration von Dotieratom-Zwischengitteratom-Paaren --> erhöhte Dopandendiffusion.

$$\frac{dC_B}{dt} = \text{div} \left(\underbrace{\left(D_{BV} \cdot Q_{BV} \cdot \frac{C_V}{C_V^{eq}} + D_{BI} \cdot Q_{BI} \cdot \frac{C_I}{C_I^{eq}} \right)}_D \cdot \text{grad} C_B \right)$$

$$D = D_{BI} \cdot Q_{BI} \cdot \frac{C_I}{C_I^{eq}} + D_{BV} \cdot Q_{BV} \cdot \frac{C_V}{C_V^{eq}} =$$

$$D = D_i \cdot \left(f_I \cdot \frac{C_I}{C_I^{eq}} + (1 - f_I) \cdot \frac{C_V}{C_V^{eq}} \right)$$

$$0 \leq f_I \leq 0,5$$

Dotierstoff diffundiert über Gitterleerstellen

$$0,5 < f_I \leq 1$$

Dotierstoff diffundiert über Eigenzwischengitteratome

Beschreibung %

Θ_{BV} : rel. Konzentration der Dotieratom-Leerstellen-Paare im thermodyn. Gleichgewicht

C_V : Konzentration der Leerstellen

C_B : Konzentration der Dotieratomatome

C_V^{eq} : Konz. Der Leerstellen im thermodyn. Gl.

Θ_{BI} : rel. Konzentration der Dotieratom-Zwischengitter-Paare im thermodyn. Gleichgewicht

Dotierstoff	f
B, Ph	$f_I \approx 1$
Antimon	$f_I \approx 0$
Arsen	$f_I \approx 0,4$

Implantationsbeschleunigte Diffusion

Durch Implantation wird das Siliziumgitter stark gestört. Es entstehen viele Eigenzwischengitteratome und an den ursprünglichen Positionen Gitterleerstellen. --> Die Diffusion wird stark beschleunigt. Die Punktdefektkonzentrationen rekombinieren jedoch stark, so daß die Diffusion schnell wieder zurückgeht. --> transiente Diffusion

Gleichungen wie bei OED

Phosphor-tail-Diffusion

Im Bereich der Spitzenkonzentrationen werden Paare von Dotieratomen mit intrinsischen Punktdefekten gebildet. Diese diffundieren in Bereiche mit niedrigeren Konzentrationen, wo der Zerfall überwiegt. Die Punktdefektkonzentration steigt dort an und die Diffusion wird dort beschleunigt. Es kommt zur Ausbildung einer Schulter.

Emitter-Push- Effekt

Obiger Effekt beschleunigt auch die Diffusion von räumlich getrennten Dotieratomen. Z.B. erhöhte Diffusion von Bor im Basisbereich von Bipolartransistoren während der Bildung des Phosphor-Emitters.

4.6 Clusterbildung

Zwei oder mehr Arsenatome nehmen benachbarte Position ein, in der sie nicht vollständig ionisiert und unbeweglich sind. Ein Cluster besteht aus m ionisierten Arsenatomen und m Elektronen, die die Ladung neutralisieren.

$$\frac{dC_{Cl}}{dt} = k_c \cdot (C \cdot n)^m - k_d C_{Cl}$$

k_c, k_d : Cluster-/Declusterratenkonstanten

m : Anzahl der Ladungsträger im Cluster

C_{Cl} : Clusterkonzentration

C : Konz. der ungebundenen Dotieratome

n : Konz. der Majoritätsladungsträger

bei hohen Konzentrationen (üblich, entspr. dem Bereich extrinsischer Diffusion): $C=n$

Gesamtkonzentration aller Fremdatome:

$$C^{tot} = C + mC_{Cl} = C + m \cdot \frac{k_c}{k_d} C^{2m}$$

mit $C^{*(1-2m)} = \frac{k_c}{k_d}$ folgt:

$$\frac{C^{tot}}{C^*} = \frac{C}{C^*} + m \left(\frac{C}{C^*} \right)^{2m}$$

Clusterretardierungsfaktor:

$$\frac{\partial C}{\partial C^{tot}} = \frac{1}{1 + 2m^2 \left(\frac{C}{C^*} \right)^{(2m-1)}}$$

4.7 Diffusion in Mehrschichtstrukturen

Segregationskoeffizient (Verhältnis der Dotierstoffkonzentrationen auf beiden Seiten der Grenzschicht (Si/SiO₂))

$$m = \frac{C_1(0,t)}{C_2(0,t)}$$

Bedingungen an der Grenzschicht:

$$D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \quad \text{Massenerhaltung}$$

$$C_2 \cdot m = C_1 \quad \text{Segregation}$$

Diffusion in oxidierender Atmosphäre

Diffusionsgesetze:

$$\text{Oxid: } \frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) + \frac{dx_0}{dt} \cdot \frac{\partial C_1}{\partial x} \quad x_0: \text{Oxiddicke}$$

$$\text{Si: } \frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) + b \cdot \frac{dx_0}{dt} \cdot \frac{\partial C_2}{\partial x} \quad b: \text{Verhältnis Si/SiO}_2$$

mit Diffusionskoeffizient im Oxid = 0:

$$D_2 \cdot \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = D_1 \cdot \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=0} + (m-b) \cdot C_2(0,t) \frac{dx_0}{dt} \quad m: \text{Segregationskoeffizient}$$

4.8 Eigenschaften von pn-Übergängen

4.8.1 abrupter pn-Übergang

- Weite der Raumladungszone:

$$w_{RL} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(U_{Diff} - U)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

- Diffusionspannung:

$$U_{Diff} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

- Sperrschichtkapazität:

$$C_S = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{w_{RL}} = A \sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_r N_A N_D}{2(N_A + N_D)(U_{Diff} - U)}}$$

Auftrag von $1/C_s^2$ über U: --> wenn linearer Verlauf: abrupter pn-Übergang

Auftrag von $1/C_s^3$ über U: --> wenn linearer Verlauf: linear graduiertes pn-Übergang

4.8.2 einseitig abrupter pn-Übergang (Dotierungskonz ist auf einer Seite sehr viel höher)

- siehe Bild 4.28 116

- Weite der Raumladungszone:

$$w_{RL} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r (U_{Diff} - U)}{qN}}$$

N: Dotierung im niedrig dot. Bereich

- Diffusionspannung: (??? im Skript nicht angegeben)

$$U_{Diff} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

- Sperrschichtkapazität:

$$C_S = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{w_{RL}} = A \sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_r N}{2 \cdot (U_{Diff} - U)}} \implies \frac{1}{C_s^2} = (U_{Diff} - U) \frac{2}{\underbrace{A^2 q \epsilon_0 \epsilon_r N}_{\text{Steigung } S}}$$

$$\implies N = \frac{-2}{q \epsilon_0 \epsilon_r A^2 S} \quad \text{N: Dotierung}$$

- Auftrag von $1/C_s^2$ über U: --> wenn linearer Verlauf: abrupter pn-Übergang

--> Achsenabschnitt: Diffusionspannung

--> Steigung der Geraden: Dotierung des schwächer dotierten Gebietes

--> aus der Formel für abrupten pn-Übergang: Berechnung der Dotierungskonz.

Im stärker dotierten Gebiet

4.8.3 linear graduiertes pn-Übergang

- siehe Bild 4.29 117

- Das Dotierungsprofil gehorcht der Beziehung: $|N_D - N_A| = ax$

- Weite der Raumladungszone:

$$w_{RL} = \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon_0\varepsilon_r(U_{Diff} - U)}{qa}}$$

- Diffusionspannung:

$$U_{Diff} \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{aw_{RL}}{2n_i}\right)^2$$

- Sperrschichtkapazität:

$$C_s = A^3 \sqrt{\frac{q\varepsilon_0^2\varepsilon_r^2 a}{12(U_{Diff} - U)}}$$

Auftrag von $1/C_s^2$ über U : --> wenn linearer Verlauf: aprupter pn-Übergang

Auftrag von $1/C_s^3$ über U : --> wenn linearer Verlauf: linear graduerter pn-Übergang

4.8.4. Strom-Spannungsbeziehungen

- Strom über einen realen einseitig aprupten pn-Übergang:

siehe Formel 4.71 100

- Ersatzschaltbild eines realen pn-Überganges

siehe Abb. 4.31 110

- Fluß- und Sperrkennlinie eines pn-Überganges (halblog. Darstellung)

siehe Abb. 4.32 111

- Lawinendurchbruch

$$U_B = 60 \left(\frac{E_G}{1,1}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{N_{A,D}}{10^{16}}\right)^{-\frac{3}{4}} \text{ V} \quad \text{einseitig aprupter pn-Übergang}$$

$$N_{A,D} \equiv N$$

$$U_B = 60 \left(\frac{E_G}{1,1}\right)^{\frac{6}{5}} \cdot \left(\frac{a}{3 \cdot 10^{20}}\right)^{-\frac{2}{5}} \text{ V} \quad \text{linear graduerter pn-Übergang}$$

5. Ionenimplantation

Vorteile der Ionenimplantation:

- Schnelligkeit, Homogenität, Reproduzierbarkeit des Implantationsvorganges
- exakte Kontrollierbarkeit der Ionenmenge durch Stromintegration
- geringe Anforderungen an die Reinheit der Dotiersubstanzen --> Massenseparation
- niedrige Prozeßtemperaturen
- einfache Maskierung (Photolacke, dicke Oxide...)
- Möglichkeit der Implantation durch dünne Schichten
- Modifizierung oberflächennaher Schichten möglich --> geringe Eindringtiefe
- Mehrfachimplantation --> beliebiges Implantationsprofil

Nachteile der Ionenimplantation:

- Strahlenschäden durch Ionenbeschuß --> Tempern
- nur oberflächennahe Schichten beeinflussbar
- nicht genau vorhersehbare Profile aufgrund anderer Effekte (channeling, Diffusion)

Aufbau einer Ionenimplantationsanlage:

- Ionenquelle --> Ionenstrahlerzeugung
- Massenseparation
- variabler Schlitz
- Beschleunigungsrohre
- Ablenkeinheiten x und y
- Neutralstrahlfalle
- Faradaybecher
- Probenkammer
- Siliziumscheibe

Die implantierte Dosis:

$$N_{\otimes} = \frac{1}{q} \int_0^t j(t) dt \quad j(t) : \text{Stromdichte}$$

Abschätzung der Implantationszeit:

$$N_{\otimes} = \frac{I \cdot t}{qA}$$

I: konst. Ionenstrom

A: Rechteckfläche

wenn Durchmesser gegeben:

Durchmesser als Kantenlänge nehmen!

$$\implies A = (\text{Durchm.})^2$$

5.1. Reichweitentheorie nach Lindhard, Scharff und Schiott

- Effekte die beim Beschuß von Festkörpern mit Ionen auftreten:
 - *Unelastische Stöße mit gebundenen Elektronen* des Festkörpers. (Ion und Elektron verkoppeln sich) Energieverlust durch Anregung und Ionisation
 - Unelastische Stöße mit Kernen. --> Bremsstrahlung, Kernanregung, Kernreaktion
 - Elastische Stöße mit gebundenen Elektronen
 - *Elastische Stöße mit Kernen* oder ganzen Atomen --> ein Teil der Energie wird übertragen, sie Summen bleibt gleich
 - Cerenkov-Strahlung: Teilchen die das Medium schneller als mit der Phasengeschwindigkeit des Lichtes passieren
- Prinzipieller Verlauf der elektronischen und der Kernabbremung: --> Bild 5.3 131
- Mittlere Gesamtweglänge eines Teilchens mit der Anfangsenergie E_0 :

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad S_{e,n} = -\frac{1}{N} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{e,n}$$

$$\frac{dE}{dx} = -N(S_n(E) + S_e(E)) \longrightarrow \int_{E_0}^0 \frac{1}{N(S_n + S_e)} dE = \int_0^R dx$$

- **Reichweiteverteilungen:**

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad \text{und} \quad f(x) \geq 0 \quad \text{Frequenz od. Wahrsch.dichte-funktion}$$

$$C(x) = N_{\otimes} f(x) \quad \text{Reichweiteverteilung}$$

- $f(x)$ ist gekennzeichnet durch ihre Momente:

$$\mu_i = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_1)^i f(x) dx \quad i = 2, 3, \dots$$

$$\mu_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad \mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_1)^2 f(x) dx$$

$$\mu_3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_1)^3 f(x) dx \quad \mu_4 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_1)^4 f(x) dx$$

- Normierte Reichweiteparameter:

Mittlere projizierte Reichweite:
(Eindringtiefe in den HL)

$$R_p = \mu_1$$

Standardabweichung:

projizierte Reichweitestreuung

(Breite des Dotierungsprofils)
(bei Gauß: max bis Konz auf $e^{-1/2}$)

$$\begin{aligned}\Delta R_p &= \sqrt{\mu_2} \\ \Delta R_p &= x(C_{\max}) - x\left(C_{\max} e^{-\frac{1}{2}}\right) = \\ &= x(c_{\max}) - x(0,61C_{\max}) = \dots\end{aligned}$$

Schiefe:

(Unsymmetrie der Kurve:

$\gamma < 0$ Max hin zu größeren Eindringtiefen
 $\gamma > 0$ Max näher an der Oberfläche)

$$\gamma = \frac{\mu_3}{\Delta R_p^3}$$

Kurtosis:

(Steilheit der Kurve --> Flachheit des Max)

$$\beta = \frac{\mu_4}{\Delta R_p^4}$$

- **Gaußsche Reichweiteverteilung:**

$$C(x) = \frac{N_{\otimes}}{\underbrace{\sqrt{2\pi\Delta R_p}}_{C_{\max}}} \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right)$$

- **Zusammengesetzte Gaußfunktion:**

siehe 5.19 139

- **Pearsonverteilung:**

Frequenzfunktion: 5.23 142

5.2 Strahlenschäden

Entlang der Ionenbahn kommt es zu einer Anhäufung von Gitterdefekten (Strahlenschäden)
Schwere Ionen können an gestoßenen Gitteratome mehr Energie übertragen als leichte.

- *Einfluß von Strahlenschäden:*
elektrische Parameter: Beweglichkeit, Lebensdauer, Ladungsträgerkonzentration
Materialparameter: Dichte, Elastizität, Diffusionskoeffizient
- *Anzahl der versetzten Atome:*
Die Anzahl der Strahlenschäden und deren Verteilung hängt von Ionenart, Temperatur, Energie, Dosis, Channeling ab.

Gesamtzahl der Teilchen die durch ein Ion versetzt werden:

$$N_D = \frac{E_n}{2E_d} \quad \begin{array}{l} E_n: \text{ Gesamtenergieabgabe eines Ions in Kernstöße} \\ E_d: \text{ Versetzungsenergie eines Gitteratoms Si: 14 eV} \end{array}$$

- *Reichweiteverteilung von Strahlenschäden:*
Das Maximum der Strahlenschädenverteilung liegt näher zur Oberfläche als das Max der Ionenverteilung

grobe Schätzung: $2/3R_p$

- *Bildung von amorphen Schichten:*
Wenn die Ionendosis und damit die Strahlenschädendichtegenügend hoch ist, überlagern sich die Strahlenschädencluster und es bildet sich eine amorphe Schicht aus.

Annahme 50% der Atome versetzt --> amorph
amorphisierende Dosis:

$$N_{\otimes,a}^0 = \frac{E_d N}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_n} \quad \begin{array}{l} E_d : \text{ Versetzungsenergie eines Gitteratoms} \\ N : \text{ atomare Dichte der Substratome} \\ \left(\frac{dE}{dx}\right)_n : \text{ Energieabgabe } \left[\frac{\text{Kernstöße}}{\text{Wegeinheit}} \right] \end{array}$$

--->>> unterschätzt die amorphisierende Dosis wegen Ausheilwirkungen Abhilfe:

$$N_{\otimes,a} = \frac{N_{\otimes,a}^0}{\left(1 - \underbrace{2\sqrt{D_v t}}_{\delta R} \cdot \left(N_{\otimes,a}^0\right)^2\right)^2} \quad \begin{array}{l} N_{\otimes,a}^0 : \text{ entspricht } N_{\otimes,a} \\ \delta R : \text{ Verkleinerung des Strahlenschädenclusters durch Ausdiffusion} \\ D_v : \text{ Diffusionskoeffizient der Leerstellen} \\ t : \text{ Zeit in denen Leerstellen diffundieren} \end{array}$$

5.3 Channeling

Ionen können längs bestimmter Kristallrichtungen tiefer in den Kristall eindringen. Abbremsung durch Kernstöße entfällt weitgehend. Es bleibt elektronische Abbremsung.

- Kritischer Winkel

der kritische Winkel muß überschritten werden damit kein Channeling auftritt. Tab 5.4 132

$$U(r) = \frac{Z_1 Z_2 q^2}{d} \ln \left[\left(\frac{C a}{r} \right)^2 + 1 \right]$$

$Z_{1/2}$: Ordnungszahlen von Ion bzw. Targetatom

d: Abstand der Atome

$$C \approx \sqrt{3}$$

a: Abschirmparameter $a \approx a_0 \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$

r: Abstand zwischen Ion und Atomreihe

$$\psi_{c1} = \sqrt{\frac{2Z_1 Z_2 q^2}{E \cdot d}} \quad \text{für} \quad E \geq 2Z_1 Z_2 \frac{q^2}{a^2}$$

$$\psi_{c2} = \sqrt{\psi_{c1} \frac{C a}{\sqrt{2} d}} \quad \text{für} \quad E < 2Z_1 Z_2 \frac{q^2}{a^2}$$

- Mit steigender Ionendosis werden immer mehr Strahlenschäden erzeugt und die Kanäle zerstört. -> amorphisierende Dosis

Abhilfe:

- Temperaturerhöhung:

Strahlenschäden heilen ganz oder teilweise während der Implantation aus --> ein geringerer Anteil der Ionen wird aus den Kanälen gestreut. Andererseits nimmt die Amplitude der Gitterschwingungen zu und der effektive Durchmesser der Kanäle ab. Die Verringerung der Kanalabmessungen ist der dominierende Effekt.

- Oxidbedeckung:

Eine Oxidabdeckung streut die Ionen abhängig von ihrer Geschwindigkeit und verhindert dadurch Channeling.

5.4. Ausheilen von Strahlenschäden

Durch geeignete Temperbehandlung (Temperung, Ausheilen) muß das Kristallgitter restauriert werden und die implantierten Ionen elektrisch aktiviert werden.

- Temperaturabhängigkeit Arrhenius-Kurve
- Orientierungsabhängigkeit
<100> -Si heilt viel schneller aus als <111> Si. <111> - Si zeigt eine starke Abhängigkeit von der thermischen Vorgeschichte.
- Defekte in getemperten Schichten
- elektrische Aktivierung implantierter Ionen

5.5. Zweischichtstrukturen

gute Ergebnisse mit Annahme, daß die Reichweite umgekehrt proportional zur Dichte ist.

siehe Abb. 5.23 140

5.6. Maskierungskanten S.141

lokale Dotierung erwünscht \Rightarrow Maske

- Dicke der maskierende Schicht (minimal benötigte Dicke :Gl. 5.23 141)
- Laterale Streuung (Gl. 5.25 144)
Eine weitere wichtige Größe ist die laterale Streuung ΔR_{pl} . (Streuung der Ionen aus der Senkrechten)

siehe Bild 5.25-27 143

5.7. Sputtern (Ionenzerstäubung)

Während der Ionenimplantation wird durch senkrecht auftreffende Ionen eine kleine Si-Schicht abgesputtert.

- Die Sputterausbeute (wieviel Targetatome pro Primäriion) ergibt sich zu: Siehe 5.26 145

$$S = \frac{3 S_n(E) \cdot \alpha(M_2 / M_1)}{4 \pi 2 C_0 U_0}$$

$$C_0 : 0,826 \text{ nm}^2$$

$\alpha(M_2 / M_1)$: numerisch berechn. Fkt.

U^0 : Oberfl.-bindungen. für Si 7,81 eV

$S_n(E)$: Bremsquerschnitt für Kernabbrem-
sung

- Abgesputterte Dicke von Silizium durch Ionenzerstäubung: siehe Tab. 5.5 146

$$d = \left(\frac{S}{N} \right) N_{\otimes}$$

S : Sputterausbeute

N : Atomare Dichte von Si ?

N_{\otimes} : Dosis

- Veränderung des Implantationsprofils unter Annahme von Vereinfachungen:

siehe 146/147

für $N_{\otimes} \rightarrow \infty$ gilt für das Sättigungsprofil:

$$C(x) = \frac{N}{2S} \operatorname{erfc} \frac{x - R_p}{\sqrt{2} \Delta > R_p}$$

dann folgt die Maximalkonzentration an der Oberfläche zu

$$C_{\max} = \frac{N}{2S} \operatorname{erfc} \left(\frac{-R_p}{\sqrt{2} \Delta R_p} \right) = \frac{N}{S} \quad \text{für } R_p > 3\Delta R_p$$

5.8. Diffusion

Während des Ausheilens kommt es zu einer Profilveränderung durch Diffusion. Für ein gaußförmiges Diffusionsprofil und einen unendlich ausgedehnten Halbleiter gilt:

$$C(x) = \frac{N_{\otimes}}{\underbrace{\sqrt{2\pi} \sqrt{\Delta R_p^2 + 2Dt}}_{c_{\max}}} \exp\left(-\frac{(R_p - x)^2}{2\Delta R_p^2 + 4Dt}\right)$$

5.9. Schreiben mit fokussierten Ionenstrahlen

Fokussierte Ionenstrahlen könnten zum direkt schreibenden Dotieren oder zur Belichtung von Photolack eingesetzt werden. (Scheitert am geringen Durchsatz)

- Einsatzgebiete: lokale Materialbearbeitung zur Fehleranalyse und Schaltungsreparatur:

Sputtererosion zur lokalen Entfernung von Deckschichten
 zur Erzeugung von Querschnitten
 zum Durchtrennen von Leiterbahnen
 Öffnen von Kontaktlöchern

Durch Injektion metall. Dämpfe:
 Abscheidung von metallischen Schichten zur Reparatur von Prototypen

Aufbau eines Feinfokussionensystems:

siehe Bild 5.33 150

5.10 Meßmethoden zur Untersuchung ionenimplantierter Schichten

- **Anätzen implantierter Schichten**

Es werden Schrägschliffe mit unterschiedlichem Winkel der zu untersuchenden Struktur hergestellt. (Vorteil: Vergrößerung)

Nach dem Schleifen wird die Probe angeätzt. Unter dem Mikroskop zeigen sich feine Linien (Aquikonzentrationslinien) oder verschiedenfarbige Schattierungen

- **Bestimmung des Dotierungsprofils durch Kapazitäts-Spannungsmessung**

Voraussetzung ist ein abrupter pn-Übergang, eine MOS-Struktur oder eine Schottky-Kontakt. Die differentielle Sperrschichtkapazität als Funktion der Sperrspannung wird gemessen.

$$\frac{1}{C^2(U)} = \frac{2(U_{\text{Diff}} - U)}{q\epsilon_0\epsilon_r N(x)A^2}$$

U: Sperrspannung

U_{Diff} : Diffusionsspannung

A: Kontaktfläche

ϵ_r : relative Dielektrizitätskonstante

$$N(x) = \frac{C^3(U)}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2} \left(\frac{dC(U)}{dU} \right)^{-1}$$

$$x = \epsilon_0\epsilon_r \frac{A}{C(U)}$$

Siehe Gl. 5.32 153 (siehe auch Kap. 4.8.2)

Bei konstanter Dotierung ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen $1/C^2$ und U: Die Dotierung ergibt sich aus der Steigung der resultierenden Geraden.

Bei Vorliegen eines Dotierungsprofils: ?? S. 153

Die Kapazität unmittelbar am Rand der RLZ wird bestimmt

- **Messung der Leitfähigkeit und der Beweglichkeit**

Schichtwiderstand (Ohmscher Widerstand einer quadratischen Leiterbahn):

$$R_s = \frac{\rho}{d} = \frac{L}{W} R$$

Einheit: Ohm/Square

$$R_s = \frac{1}{q \int_0^q \mu(x) N(x) dx}$$

Vierspitzenmessung:

Vier Metallspitzen werden auf die Probe gepreßt. Durch die beiden äußeren Kontakte wird ein Strom eingepreßt, zwischen den beiden inneren wird die Potentialdifferenz gemessen. Vorteil von 4 Spitzen: Kontaktwiderstand wird minimiert.

Für den gemessenen Schichtwiderstand ergibt sich:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I}$$

U: Potentialdiff. Zw. Inneren Spitzen

I : zw. Äußern Spitzen eingepre. Strom

- **Rutherford Rückstreutechnik**

Zur Bestimmung der Fremdatomverteilung und Messung der Strahlenschädenverteilungen. Es wird die Energieverteilung rückgestreuter Teilchen (H, He -Ionen) gemessen.

- **Channeling-Verfahren**

Spezialfall der Rutherford Rückstreutechnik: Ionen dringen entlang der Kanäle besonders tief in den Festkörper ein. Treffen sie auf Fremd-oder Si-Atome im Kanal, so werden sie zurückgestreut. Es lassen sich Kristalldefekte untersuchen.

- **Schichtwiderstand einer implantierten Schicht:**

$$R_s = \frac{L}{W} R \quad R_s = \frac{1}{q \cdot \int_0^q \mu(x) N(x) dx}$$

L = Bahnlänge

w = Bahnweite

q = Schichtdicke

μ = Beweglichkeit

N(x) = Dotierungskonzentration

- **Antimon**
- **Arsen**
- **Bor**
- **Phosphor**

5.11. Implantierte Bauelemente

5.11.1 MOS-Transistoren

Bild 5.49 169 Struktur eines MOS-Transistors mit starker Überlappung

Bild 5.49 b 169 Struktur eines MOS-Transistors selbsteinstierende Technik

- Einteilung der MOS-Transistoren (Bild 5.46 164)

N-Kanal: Stromfluß durch Elektronen

P-Kanal: Stromfluß durch Löcher

Verarmungstyp, selbstleitend: ohne Spannung Kanal vorhanden --> offen (durchgezogenes Symbol)

Anreicherungstyp, selbstsperrend: kein Kanal --> gesperrt (unterbrochenes Symbol)

- Linearer Bereich, Triodenbereich, Sättigungsbereich (--> Bild 5.65 207)

$$I_D = \begin{cases} 0 & U_{GS} \leq U_T \\ \beta(U_{GS} - U_T)U_{DS} & 0 < \frac{U_{DS}}{2} \ll (U_{GS} - U_T) \\ \beta \left[(U_{GS} - U_T)U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] & 0 < U_{DS} < (U_{GS} - U_T) \\ \frac{\beta}{2}(U_{GS} - U_T)^2 & 0 < (U_{GS} - U_T) \leq U_{DS} \end{cases}$$

Kennlinie für den linearen Bereich (Spezialfall der mittleren KL):

$$I_D = \beta(U_{GS} - U_T)U_{DS} \quad 0 < \frac{U_{DS}}{2} \ll (U_{GS} - U_T)$$

$$\beta = C_{ox} \mu \frac{W}{L}$$

β : Stromverstärkungsfaktor

C_{ox} : flächenbezogene Oxidkapazität

μ : Beweglichkeit der Ladungstr im Kanal

W : Kanalweite

L : Kanallänge

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d_{ox}}$$

C_{ox} : flächenbezogene Oxidkapazität

d_{ox} : Oxiddicke

- Einsatzspannung des MOS-Transistors

- $$U_T = \Phi_{MS} + 2\Phi_B - \frac{Q_{OX} + Q_S}{C_{OX}}$$
 - Φ_{MS} : Austrittsarbeit zwischen Gate und Si
 - Φ_B : Fermipotential
 - Q_{OX} : Oxidladung an der Grenzschicht Oxid/HL
 - Q_{OX} : eff. Ladung (= eff. Ladungsdichte * q !!!!)
 - C_{OX} : Oxidkapazität: $C_{OX} = \frac{C_{OX}}{WL}$ (flächenbezogen)
 - Q_S : Ladung in der Raumladungszone

$$\Phi_B = \pm \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_i}{N_S}\right)$$

N_S : Dotierungskonzentration im Si

+ : n - Substrat

- : p - Substrat

Vorsicht bei Wannern : $C_{wanne} - C_{substrat}$

$$\frac{kT}{q} = 0,025829 \text{ bei } T = 300K$$

$$Q_S = \pm \sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{Si}N_S(2\phi_B + U_{BS})} \quad U_{BS} : \text{Zwischen Substrat und Source angelegte Spannung}$$

$$U_T = U_{FB} + 2\phi_B - \frac{Q_S}{C_{OX}}$$

- Einstellung der Einsatzspannung durch Implantation einer zusätzlichen oberflächennahen Ladung im Kanal. (Verschiedene Profile Bild 5.48 167) Unter der Voraussetzung, daß die Tiefe der Implantation sehr viel kleiner als die Weite der RLZ ist ergibt sich für die Verschiebung der Einsatzspannung:

$$\Delta U_T = \frac{Q_{impl}}{C_{OX}} = \pm Kq \frac{N_{,Si}}{C_{OX}}$$

ΔU_T : Verschiebung der Einsatzspannung

Q_{impl} : zusätzlich ins Si implantierte Ladung

K : Korrekturfaktor der den Anteil der Ionen angibt die innerhalb der RLZ liegen und elektrisch aktiv sind.

+ : Implantation von Akzeptoren

- : implantation von Donatoren

$N_{D,Si}$: die ganze ins Si implantierte Dosis:

$$N_{D,Si} = \int_{x_0}^{\infty} C(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} C(x) dx - \int_{-\infty}^{x_0} C(x) dx =$$

$$= N - \int_{-\infty}^{x_0} C(x) dx = \text{substituieren}$$

5.11.2 CMOS-Inverter

siehe S.173

5.11.3 Bipolarer-Transistor

npn:

$$I_B = \frac{q n_i A_E}{(Q_E / D_E)_{\text{eff}}} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

U_{BE} : Basis-Emitterspannung in Flußrichtung

A_E : Emitterfläche

D_E : Diffusionskoeffizient der Minoritäten im Emitter

Q_E : Emitter-Gummelzahl

$$Q_E = N_{AE} L_E$$

N_{AE} : Emitterdotierung

L_E : Diffusionslänge der Minoritäten im Emitter

$$I_C = \frac{q n_i^2 A_E}{Q_B / D_B} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

D_B : Diffusionskoeffizient der Minoritäten in Basis

Q_B : Basis-Gummelzahl mit

$$Q_B = \int_0^{w_B} N_{DB}(x) dx$$

w_B : Basisweite

$N_{DB}(x)$: Basisdotierung

$$B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{(Q_E / D_E)_{\text{eff}}}{Q_B / D_B} \sim \frac{1}{N_{\otimes \text{Basis}}} \quad \text{B: Stromverstärkung}$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{EC}} = \frac{1}{2\pi(\tau_E + \tau_B + \tau_C)} = \frac{1}{2\pi\left(\frac{kT(C_e + C_c + C_p)}{qI_C} + \frac{w_B^2}{\eta D_B} + \frac{x_c - w}{2v_s}\right)}$$

f_T : Transitfrequenz

C_e : Emitterkapazität

C_c : Kollektorkapazität

C_p : parasitäre Kapazität

η : Dotierungskennziffer $\eta = 2$ für homogen dotierte Basis

$(x_c - w)$: Weite der Basis-Kollektor-Raumladungszone

v_s : Sättigungsgeschwindigkeit im Kollektor

τ_B : zum Umladen der Basis benötigte Zeit

6. Chemische Gasphasenabscheidung

Unter chemischer Gasphasenabscheidung versteht man eine Methode der Schichtabscheidung, bei der Gase oder Dämpfe, die die Komponenten der abzuscheidenden Schicht enthalten, auf einer Substratoberfläche miteinander chemisch reagieren und einen festen Film bilden.

wichtigste Methode zur Schichtabscheidung bei der Herstellung höchstintegrierter Schaltkreise

- Vorteile von CVD-Verfahren:
 - Vielseitigkeit der Methode
 - kostengünstige Schichten
 - hohe Qualität und Reinheit
 - einfache Erzeugung mit variabler und kontrollierbarer Zusammensetzung

Es können auch epitaktische (einkristalline) Schichten abgeschieden werden

- Wahl einer best. Reaktion zur Schichtabscheidung ist abhängig von:
 - Abscheidetemperatur
 - Filmeigenschaften
 - Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen
- Zweck der Schichten
 - Zwischenisolation
 - Kontaktierung
 - Metallsisierung
 - Planarisierung
 - Passivierung
 - Diffusionsquelle

6.1 Kinetik von CVD-Prozessen

Ein Gasgemisch wird im Reaktor über die zu beschichtenden, auf Abscheidetemperatur geheizten Wafer auf einem Substratträger (Boot, Suszeptor) geleitet. Die heterogene (gasförmig/fest) Reaktion erfolgt in 5 Schritten. Der Langsamste bestimmt die Reaktionsgeschwindigkeit und damit die Abscheiderate:

1. Diffusion der Ausgangsstoffe an die Oberfläche
2. Adsorption der Ausgangsstoffe an der Oberfläche
3. Chemische Reaktion und Bildung der Schicht
4. Desorption der restlichen Reaktionsprodukte von der Oberfläche
5. Diffusion der Reaktionsprodukte in die Gasphase

- *niedrige Temperaturen --> Reaktionsbegrenzter Prozeß* (Schritt 2,3)

$$R_A = \text{const.} \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right)$$

E_A : Aktivierungsenergie für betreffende Reaktion
 T : Abscheidetemperatur

hohe Temperaturen --> Diffusionsbegrenzter Prozeß (Schritt 1,5)

$$R_A = \text{const} \cdot T^{1,5 \dots 2,0} \quad T : \text{Abscheidetemperatur}$$

Die Dynamik wird durch das Grenzschichtmodell beschrieben. BLT Boundary Layer Theory
Die Gasmoleküle müssen aus dem turbulenten Gaskern durch eine Grenzschicht der Dicke δ diffundieren um an die Substratoberfläche zu gelangen. Der eindimensionale Teilchenfluß:

$$J = -D \cdot \frac{n_g - n_s}{\delta}$$

n_g : Teilchenkonz im Gastrom
 n_s : Teilchenkonz an der Oberfläche
 δ : Dicke der Grenzschicht

$$\delta = \frac{x}{\sqrt{\text{Re}}}$$

Re : Reynoldszahl $\text{Re} < 2000$ --> laminar
x : Abstand vom Gaseinlaß

$$D = \text{const} \cdot \frac{T^{3/2}}{p \cdot \sigma^2 \cdot \sqrt{M}}$$

T : absolute Temperatur
 σ : Stoßquerschnitt
M : Molmasse
p : Druck

$$\text{Re} = \frac{\nu L p}{\eta}$$

L : Rohrdurchmesser (char. Länge)
 η : dynamische Zähigkeit
 ν : Strömungsgeschwindigkeit

Re < 2000 ==> laminare Strömung (erwünscht)
sonst ==> turbulente Strömung

- Gassicherheit Tab. 6.1 S.185
- Unterschied zwischen LPCVD und APCVD:
Bei CVD unter Atmosphärendruck sind Massentransferrate und die Reaktionsrate in gleicher Größenordnung. --> sie müssen beide kontrolliert werden --> schlechte Kontrolle der Massentransferrate
Bei LPCVD überwiegt die Oberflächenreaktionsrate. --> reaktionsbestimmt. --> bessere Schichteigenschaften (Homogenität, Kantenbedeckung)

	LPCVD	APCVD
Druck	1	1000
Strömungsgeschw	10-100	1
Temperatur	1	1

Tab 6.2 186

6.1.1 Vergleich verschiedener Methoden und Reaktorsysteme

siehe Bild 6.4 186

Plasmaunterstützte CVD

Bei den thermischen Varianten herrscht relativ große thermische Belastung des Substrats während des Prozesses.

Lösung: plasmaunterstütztes CVD (PECVD)

Es wird durch eine Niederdruck-Glimmladung eine hohe Konzentration von reaktiven freien Radikalen erzeugt.

Vorteil: Schichtabscheidung bei wesentlich niedrigeren Temperaturen

Nachteil: schlechtere Kantenbedeckung, schlechtere Filmeigenschaften wie hohe mech. Zugspannungen oder hoher Wasserstoffgehalt

6.1.2 Verschiedene CVD-Verfahren (nicht gebräuchlich)

- **Electron Cyclotron Resonance CVD (ECRCVD)**

Besonders Einzelscheibenprozessierung, Substrat erwärmt sich durch Ionenbeschuss (keine zusätzliche Heizung)

siehe Abb. 6.6 188

Vorteile einer ECR-Plasmaquelle:

- sehr niedriger Arbeitsdruck bei gleichzeitig hoher Plasmadichte
- Ionisierungsrate 1000 mal höher
- breiter Plasmastrahl

Polysilicium, Si_3N_4 , SiO_2 - Schichten können abgeschieden werden

- **Elektronenstrahl-CVD (EBCVD)**

Mit einem Elektronenstrahl wird über dem Substrat ein lokales Plasma erzeugt. Die Radikale diffundieren zur Substratoberfläche und reagieren

Vorteil: die Wafer liegen nicht auf einer Elektrode --> keine energiereichen Ionen, Elektr

sonst wie PECVD (gleiche Eigenschaften)

Abb. 6.7 189

- **Photonenunterstütztes CVD (PHCVD)**

Energereiche Photonen (Queckilberlampen) regen die Moleküle an ohne die Substrattemperatur zu erhöhen. (Bereits bei 100 C möglich)

Damit die Reaktanten die Strahlung aufnehmen können werden Sensibilisatoren (Quecksilberdampf) benutzt.

- **Laserinduziertes CVD (LCVD)**

wie PHCVD nur als Strahlungsquelle Excimer-Laser.

2 Möglichkeiten:

Laser flächig parallel zur Substratoberfläche --> gleichmäßige Beschichtung, gute Kantenb.

Laser senkrecht zur Substratoberfläche --> Schreiben von strukturierten Schichten

Qualität wie PECVD

- Schnelles Thermisches CVD (RTCVD)
deutlich reduzierte Themische Belastung (nur wenige Minuten)
gute Temperaturhomogenität --> Schichtdickengleichmäßigkeit
Erzeugung polykristalliner dotierter + undotierter Schichten
Energiequelle : Halogenlampen

6.2 Silizium-Epitaxie

Aufwachsen einer einkristallinen Schicht. Erlaubt von der Substratdotierung unabhängige Wahl der Schichtdotierung.

6.2.1 Gasphasenepitaxie

Silizium wird in Form eines Gases oder einer dampfförmigen Verbindung an die Si-Oberfläche herangebracht. Die Verbindung spaltet sich auf und Si scheidet sich epitaktisch ab.

Arten von Epi-Reaktoren: Barrel-Reaktor, Pancake-Reaktor, Horizontal-Reaktor

Selbstdotierung: Aus dem Substrat stammende Dotieratome werden während des Wachstumsprozesses eingelagert. Abhilfe: Niederdruckprozesse

Die Anwesenheit vergrabener Schichten kompliziert den nachfolgenden Epitaxieprozeß wegen Selbstdotierung, Strukturverschiebung, -verzerrung, Erzeugung von Defekten

Defekte: Die Güte der eptaktischen Schicht ist häufig schlechter als die des Substrats. Es treten Epi-Stapelfehler auf (durch Niederschläge von Verunreinigungen), Hillocks (Prozeßablauf), Spikes (Kristallfehler), Stufenversetzungen, Bulkstapelfehler

6.2.2 Molekularstrahlepitaxie

Beruh auf der Verdampfung von hochreinem Silizium und Dotiermaterial. Die sich in der Gasphase befindlichen Komponenten werden mit hoher Geschwindigkeit im Ultrahoch-Vakuum zum Substrat transportiert.

Vorteil: niedrigere Temperaturen, exakte Kontrolle der Dotierkonzentration

6.2.3 Flüssigphasenepitaxie

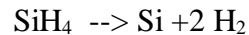
6.2.4 Festphasenepitaxie

6.3. Abscheidung von Polykristalinem Silizium

Verwendung:

- Gateerlektrode in MOS-Strukturen
- Herstellung von Widertänden und Leiterbahnen
- ohmscher Kontakt zu kristallinem Silizium
- Diffusionsquelle

Die Abscheidung erfolgt bei Niederdruck (25-130 Pa) bei 600 -650 C durch thermische Zersetzung von Silan:



Abscheiderate: 100-200 A/min (nichtlineare Fkt der Silankonzentration)

Die Struktur von Poly ist abhängig von:

- Temperatur: < 600 C amorph
625 C Säulenstruktur
ab 700 C Kristalisation und Kornwachstum
- Dotierung (Arten: in situ, Diffusion, Implantation)

6.4. Abscheidung von SiO₂

hängt ab von: Temperatur, Prozeßdruck, Gaskonzentration, Anwesenheit von Dotiersubstanzen

Verwendung:

undotiert abgeschiedenes SiO₂:

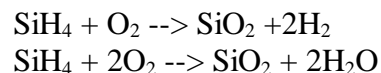
- Zwischenisolation bei Mehrlagenmetallisierung
- Implantations- und Diffusionsmaske
- Verstärkung des Feldoxids

dotiert abgeschiedenes SiO₂:

- Zwischenisolation bei Mehrlagenmetallisierung
- Passivierungsschichten für fertige Bels (nicht so geeignet auf Dauer können Alkaliionen und H₂O eindringen)
- Gettern von Verunreinigungen
- Diffusionsquellen

Abscheidungsverfahren:

- Abscheidung von **LTO** bei 400 - 450 C unter Normal oder Niederdruck:

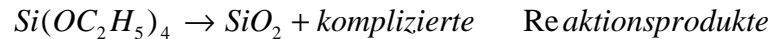


Abscheiderate: 10 nm/min

Vorteil: niedrige Abscheidetemperatur

Nachteil: schlechte Kantenbedeckung, Partikelgenerierung

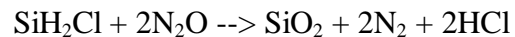
- Thermischer Zerfall von Tetraethoxysilan (**TEOS**) bei 650 -700 C unter Niederdruck



Vorteil: konforme Kantenbedeckung, gute Schichtdickenhomogenität + gute Filmeigenschaften
⇒ Spacer

Nachteil: hohe Temperatur (nicht Al-kompatibel), flüssigige Quellen

- Abscheidung von SiO₂ (**HTO**) bei 900C in LPCVD-Prozeß



Vorteil: hohe Schichtdickenhomogenität

Nachteil: hohe Abscheidetemperatur (nicht Al-kompatibel)

- Abscheidung von SiO₂ bei 100 -400 C mit Plasma-CVD
großer Anteil gebundener Wasserstoffatome, starke Abhängigkeit von den Prozeßbedingungen und Reaktorparametern



Dotierung von SiO₂

Die Dotierung erfolgt in situ durch Zugabe von PH₃, AsH₃, B₂H₄

Dotiergase werden Oxidiert : z.B.: $\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$

Kantenbedeckung bei verschiedenen Verfahren

Konforme Kantenbedeckung erhält man, wenn die Moleküle vor der Reaktion auf der Oberfläche diffundieren. --> homogene Konzentrationsverteilung (unabhängig von der Topographie) --> führt zu homogener Schichtdicke. Siehe Bild 6.32 a 210

Reagieren die Moleküle ohne Oberflächenwanderung so ist die Abscheiderate proportional zum Anströmwinkel ϕ der Gasmoleküle

$$\Phi = \arctan \frac{w}{d}$$

w : Breite des „Loches“

d : Höhe des „Loches“

Eine Verbesserung der Kantenkonformität kann durch Erhitzen des Substrats erzielt werden. Das SiO₂ beginnt zu fließen.

Eigenschaften von abgesch. SiO₂: Tab. 6.4. 211

abgeschiedenes SiO₂ ist amorph aus irregulär angeordneten SiO₄- Tetraedern

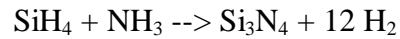
6.5. Abscheidung von Siliziumnitrid (Si_3N_4)

Verwendung:

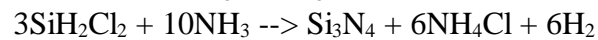
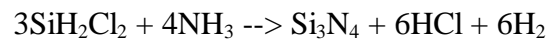
- Diffusionsbarriere für Feuchtigkeit und Natriumionen --> Passivierung
- Locos -Technik /für Maskierung bei Oxidation

Abscheidungsverfahren:

- Reaktion von Silan und Ammoniak unter Atmosphärendruck (**APCVD**) bei 700 - 900 C



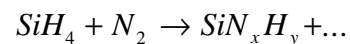
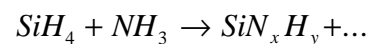
- Reaktion von Dichlorsilan und NH_3 unter Niederdruck (**LPCVD**) zwischen 700 -800 C



Vorteil: exzellente Schichtdickenhomogenität, hoher Waferdurchsatz

- Abscheidung durch **Plasma-CVD**
man erhält Filme mit nicht stöchiometrischer Zusammensetzung

Eigenschaften: Tab. 6.5 213



6.6. Abscheidung von Metallen

- CVD-Abscheidung für die Herstellung von Metallisierungsschichten

Vorteile:

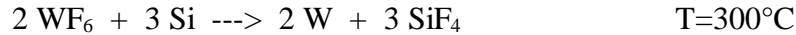
- exzellente Kantenbedeckung
- hoher Durchsatz
- selektive Abscheidung möglich
- keine Strahlenschäden

Widerstandswerte von CVD-Filmen entsprechen denen von gesputterten Filmen

6.6.1 CVD-Abscheidung von Wolfram

- selektive Abscheidung:

- zur Kontaktlochauffüllung (nur auf blankem Silicium selektive Abscheidung)



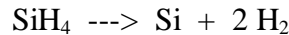
WF₆: Wolframhexafluorid

- bei 20nm selbstlimitierender Prozess
- Reaktion mit Substrat ==> glatte Grenzfläche ==> sehr geringer Kontaktwiderstand
- Kontaktlochauffüllung:

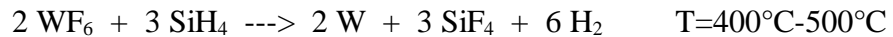
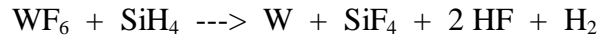


- ganzflächige Abscheidung:

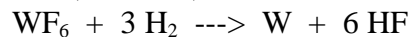
- zuerst dünne Siliciumschicht abscheiden



- Zugabe von WF₆ startet Wolframabscheidung



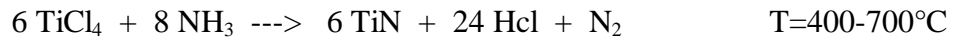
- dicke Schichten (>100nm) entstehen erst durch:



- durch Photolackplanarisierung und Rückätzen werden unerwünschte Wolframpilze entfernt
- Herstellung von Aluminiumfilmen: kein industrieller Einsatz
- Herstellung von Silicid-Filmen

6.6.2 CVD-Abscheidung von Barrierschichten

- Ti oder TiN-Schicht verhindert Bildung einer Legierung
- beim Kontakt von Al und W: Kontaktloch-Elektromigration
- beim Kontakt von Al und Si: Spiking kann pn-Übergänge kurzschließen
- bei Wolframabscheidung: Wormholes, da WF₆ das Si anätzen würde
- Erzeugung der Titanschichten:



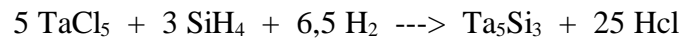
oder durch Aufputtern

6.6.3 CVD-Abscheidung von Aluminium und Kupfer

- Aluminium:
 - exzellente Kantenbedeckung
 - nur reines Al möglich ==> Spiking, Elektromigration
 - Wachstum beginnt langsam + unreproduzierbar
- Kupfer:
 - niedrigerer Schichtwiderstand
 - keine Elektromigration
 - Lebensdauer der Minoritätsladungsträger verringert

6.6.4 CVD-Abscheidung von Siliciden

- bessere Temperaturstabilität, selbstjustierende Technik
- Nachteil: relativ hoher Widerstand ==> Silicide als Gate-Metallisierung
- Tantalasilicidherstellung bei 600°C:

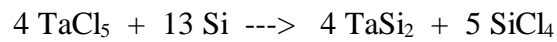


TaSi₂ wird nur bei zusätzlich vorhandenem Si gebildet

an TaSi_x / Poly Si-Grenzschicht:



an Source-/Draingebieten des MOS-Transistors: TaCl₅ reagiert direkt mit Si selbstlimitierend bei 150-250nm



- Gleichungen für Wolframsilicid, Titansilicid s.S. 219f

7. Physikalische Schichtabscheidung (Metallisierung)

vorwiegend Metallisierungsschichten, auch diel. Schichten(Al_2O_3 , SiO_2)

Metallisierung: Schaltungsverbindungen, Kontakte, Gateelektroden, Kondensatorelektroden, Anschlußpads für Verbindung nach außen

Probleme: Schicht- und Kontaktwiderstand, Kantenbedeckung, Kontaktlochauffüllung, Planarisierung

Einsatzgebiete von Metallen für ein BEL:

- Kontakte zum HL
- Kontakte zur Gateelektrode
- Lokale Verbindungen
- Schaltungsverbindungen
- Kontakte zwischen Leiterbahnebenen („Vias“)
- Bondpads und -drähte

Poly-Gates statt Alu:

- Poly ist temperaturstabiler für folgende Prozeßschritte
- es ist möglich Leitungsüberkreuzungen über Poly zu führen
- selbstiustierende Herstellung der Source/Drain Gebiete --> Reduzierung der die Schaltzeiten vergrößern Überlappungskapazitäten

Nachteil von Poly: 3-fach größerer Widerstand --> Abhilfe: Verstärkung gurch Silicid-Schicht

Tab 7.1 Eigenschaften der Metallisierung im Vergleich zu CVD

7.1 Schichtmaterialien

leitende Schichten:

- Kontakt/Haftsichten (TiN, TiW, W)
- Diffusions/Legierungsbarrieren (Nitride, Boride)
- Leitungssichten (Alu)

nichtleitende Schichten:

- Isolatoren (Oxide: LTO, Gläser, Keramiken)
- Diffusionsbarrieren (verhindern die Sauerstoffoxidation von Leiterbahnen und Kontakten)

Alu-Technologie:

- sehr gutes Verständnis
- AlSiCu- Legierung (Si: verhindert Spikes, Cu: verhindert Elektromigration)

7.2 Vakuumverdampfung

Moleküle verdampfen unter sehr niedrigem Druck (freie Weglänge 1 m --> keine Kollisionen) und fliegen nahezu geradlinig auf das Substrat.

Mittlere freie Weglänge in einem Gas:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{V}{\sqrt{2N}}$$

V: Volumen; N: Anzahl der Teilchen

r: Atom/Molekülradius

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(r_1 + r_2)^2} \cdot \frac{kT}{p} \quad r_1, r_2: \text{Atom/Molekülradien; } p: \text{Gasdruck}$$

speziell für Luft gilt:

$$\lambda = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{p} \quad (\text{cm}) \quad p: \text{Totaldruck in der Kammer in mbar}$$

(1mbar 10^2 Pa = 0,760 Torr)

Verdampfung von Metall aus der Schmelze:

$$R = 4,43 \cdot 10^{-4} \cdot p_e \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \quad R: \text{Verdampfungsrate (g/cm}^2\text{sec)}$$

p_e : Gleichgewichtsdampfdruck
(Partialdruck) $p_e \approx \exp\left(-\frac{c}{T}\right)$
M : Molmasse

Masseverlust der Verdampfungsquelle:

$$R_T = \int R dA_s \quad (\text{g/sec}) \quad A_s: \text{Quellenfläche}$$

Formeln für Kugelförmiges Aufdampfsystem Bild 7.5 226
gleichmäßige Kantenbedeckung

$$D = \frac{R_T}{\pi r^2 \rho} \cos(\Phi) \cos(\Theta) \quad 0 \leq \Phi, \Theta \leq 180^\circ$$

ρ : spez. Dichte (g/cm³)

wenn Quelle und Substrat auf Kugel mit Radius r_0 :

$$D = \frac{R_T}{4\pi r_0 \rho} \quad \text{mit} \quad \cos(\Phi) = \cos(\Theta) = \frac{r}{2r_0}$$

abgeschiedene Masse m:

$$m = 4\pi r_0^2 d \rho \quad d: \text{Schichtdicke}$$

Formeln für Kuppelförmiges Aufdampfsystem Bild 7.6 226

geringe Kantenbedeckung (gut für Schichtabhebetechnik)

Mit Anlagen dieser Art erreicht man gute Schichtdickenhomogenität für eine große Anzahl von Scheiben

- Verschiedene Quellen (siehe Bild 7.7 226)
Vor/Nachteile: Tab 7.2 227

7.3. Sputtern

Ein an negative Spannung angelegtes Target wird mit positiven Gasionen beschossen. Die Targetionen fliegen auf das Substrat. \Rightarrow Abtrag von Atomen

Ionenstrahlsputtern: (Abb 7.9a 228) Aus einer Ionenquelle wird ein Argonionenstrahl extrahiert und auf das Target geschossen. Die abgesputterten Atome fliegen geradlinig wie beim Aufdampfen auf das Substrat. (Geringe Abscheideraten \rightarrow kein Einsatz)

Kathodenzerstäubung: (Abb 7.9b 228) Im Niederdruckbereich (10^{-3} - 10^{-2} mbar) wird das Sputtergas Argon durch Gleich- oder Wechselfeldspannung zur Glimmentladung gebracht. Es entsteht ein Plasma aus Elektronen, Radikalen, Ionen und angeregten Atomen. Die pos. Gasionen fliegen zur Kathode und schlagen aus dem Target neutrale Atome heraus. Diese fliegen auf das Substrat.

Die Zerstäubungsausbeute (Sputterausbeute) ist definiert als Anzahl der herausgeschlagenen Atome pro auftreffendes Ion. Sie ist abhängig von Atommassen, Beschleunigungsspannung, Auftreffwinkel, Kristallorientierung, Temperatur und Oberflächenbindungsenergie.

Nebeneffekte: Erwärmung des Proben- Targetmaterials, Einbau von Argon in den Film, Strahlenschäden durch Beschuß von Elektronen

Ionisiergas: i.a. Argon wegen hoher Masse und hoher Zerstäubungsausbeute zudem billig (inert: verunreinigt nicht)

reaktives Sputtern: Gaszusätze zum Sputtergas Argon ergeben andere Schichten. Die Menge des Reaktivgases muß genau kontrolliert werden. \Rightarrow Sputtern von Oxiden

Durch Streuung der Atome an den Plasmaionen ergibt sich beim Sputtern eine bessere Kantenbedeckung (höherer Druck als beim Verdampfen)

7.3.1 Targettechnologie

unterschiedliche Verfahren zum Aufbringen von Targets auf Kathoden:

- Löten: gute elektrische Verbindung und bester Wärmeübergang von Target zur Kathode. Probleme: Targetwiderstand- und Erwärmung
- Aufkleben: Verbindung z.T. vergleichbar mit Löten, Kleber kann ausdampfen bei hohen Temperaturen. Ablösen meist schwierig. Keine hohen Sputterleistungen
- Aufpratzen: Aufschrauben mittels Halteleisten. Vorteil: schnelles Auswechseln, Halteleisten müssen aus Targetmaterial sein

Merkmal der Kathodenzerstäubung ist auch die Erosionszone des Targets: Bereich des Target mit dem größten Massenabtrag

7.3.2 Sputterarten

- Gleichspannungszerstäubung (DC-Sputtern)
nur für Metalle, Verfahren wie Kathodenzerstäubung (niedrigste Abscheideraten)

- **DC-Magnetron-Sputtern**
Auf der Rückseite des Targets sind Magnete angebracht, die die Ladungsträger auf eine Kreisbahn zwingen. Die Elektronen bleiben dadurch in der Nähe der Targetoberfläche, der Ionisationsgrad nimmt zu. --> erhöhte Sputterraten. Vorteil: Keine Sekundärelektronen auf den Substraten
- **Biassputtern**
Es wird eine kleinere negative Spannung an das Substrat gelegt. Materialatome die nicht fest genug haften und Gasatome werden wieder abgestäubt. Elektronen werden ferngehalten. Vorteile: Schichten von hoher Reinheit, großer Härte, bessere Kantenbedeckung
- **HF-Sputtern**
wird zum Zerstäuben von Dielektrika und Isolatoren verwendet (-> wenig leitend).

7.4. Charakterisierung und Probleme von Metallisierungsschichten

- **Leitfähigkeit** (*stark abhängig von Schichtdicke und Morphologie*)
Die Leitfähigkeit dünner Metallschichten wird im wesentlichen von 3 Faktoren bestimmt:
 - 1) Kristallitkörner sollen so groß wie möglich sein (Korngrenzpotentiale beeinflussen stark die Beweglichkeit der Elektronen)
 - 2) große Defektdichten in den Kristalliten erhöhen die Volumenstreuung der Elektronen
 - 3) um Oberflächenstreuung zu vermeiden: Spiegelung hoch, Rauigkeit niedrig

Die Leitfähigkeit ist stark von der Schichtdicke abhängig

$$\sigma_s = \frac{1}{\rho_s} \quad \rho_s : \text{Spez. Widerstand}$$

elektrischer Widerstand einer rechteckigen Leiterbahn:

$$R = \rho_s \frac{l}{b \cdot h} \quad l, b, h : \text{Abmessungen}$$

Schichtwiderstand (Widerstand eines quadratischen Flächenstücks)

$$R_{\otimes} = \frac{\rho_s}{h} \quad h: \text{Schichtdicke} \quad (\text{Für } l=b \text{ --> } R=R_{\otimes})$$

Vorteile des Schichtwiderstands:

- Widerstandswert einer Leiterbahn kann direkt aus dem Layout ermittelt werden
- einfach meßtechnisch zu erfassen mit 4-Spitzenmessung:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I}$$

U = gemessene Spannung

I = eingepprägter Strom

- **Korngröße und Korngrenzen**

Für reproduzierbare Metallisierungsschichten ist die Kontrolle des Kornwachstums nötig. Es hängt von Argondruck und Substrattemperatur und Restgasen ab. Außerdem: unter der Metallschicht liegende Prozeßschichten und einlegierte Materialien. Erstrebt wird eine großkörnige Struktur. typisch verwendete Korngröße: 3 µm - 6 µm

- **Kantenbedeckung**

Definition: Abb. 7.18 S.236

$$\text{Kantenbedeckung} = \frac{a}{t} \cdot 100\%$$

in Abb. 7.18 gilt:

β: Maß für Planarisierung (β=90° entspr. vollkommene Planarisierung)

Aufdampfen: Schlechte Kantenbedeckung

Biassputtern: gute Kantenbedeckung

Sputtern mit Substraterhitzung: gute Kantenbedeckung

CVD: konforme Kantenbedeckung selbst bei steilen Kanten

- **Kontaktlochauffüllung**

Definition: Abb. 7.18 S.236

$$\text{Kontaktlochauffüllung} = \frac{d}{t+h} \cdot 100\%$$

Entweder scheidet man Wolfram selektiv (CVD) ab und ätzt überschüssiges Wolfram zurück oder man scheidet Wolfram ganzflächig ab und ätzt zurück. oder: Force Fill (Auffüllen der Kontaktlöcher mit hohem Druck)

- **Planarisierung**

Probleme: bei der Kantenbedeckung der Metallschichten, Schärfbereich bei Belichtung des Lacks und bei der unterschiedlichen Ätztiefe bei der Metallstrukturierung.

lokale Planarisierung: Spin-on-glass

mehr als 3 Metallschichten: globale Planarisierung durch chemisch-mechanisches Polieren

- **Elektromigration**

Elektromigration tritt bei sehr hohen Stromdichten auf und führt zu einem Materialtransport in der Metallschicht. Es kommt zur Temperaturerhöhung. --> mehr Elektromigration --> Leiterbahnen können reißen weiteres siehe Script S.239

$$J_M = \frac{N D Z \cdot q}{kT} \cdot \frac{a}{d_k} \rho_s \cdot J_e \quad a: \text{Breite der Korngrenze}$$

d_k : mittlere Korngröße

N: atomare Dichte des Materials

D: Selbstdiffusionskoeffizient der Materials

J_e : elektrische Stromdichte

Z q: effektive Ladung

ρ_s : spez. Widerstand der Metallisierung

- **Spiking**

Die treibende Kraft ist die Diffusion von Si in Al. Die Diffusion von Al in Si ist ca. 12 mal kleiner als umgekehrt und erfolgt über Leerstellen im Si-Gitter. Durch Diffusion von Al in der Halbleiter können pn-Übergänge kurzgeschlossen werden.

--> Abhilfe: Barrierschichten oder AlSi-Legierungen

- **Hillocks**

Hillocks sind aus der Al-Oberfläche herausragende Kristallspitzen ($2\mu\text{m}$), die durch hohe Druckspannungen in der Metallschicht entstehen. Hohe Konzentrationen zeigen sich durch milchigweiße Oberflächen.

Hillocks verursachen Probleme beim Aufbringen, Entwickeln und Ablösen des Fotolacks, Maskenjustierung, Kurzschlüsse von Verbindungsleitungen bei Mehrlagenmetallisierung
Abhilfe: kontrollierte Temperatur, AlCu-Legierung, niedrigen Restgasanteil im Sputtergas.

- **Korrosion**

Abhilfe: Scheibenreinigung mit deionisiertem Wasser, zus. Temperaturschritt (400°C , 1h)

- **Schichthaftung**

4 Mechanismen der Schichthaftung

- Mechanische Verzahnung
- Vermischung an der Grenzfläche durch Diffusion
- Elektrostatische Anziehung
- Adsorption

Der am häufigsten auftretende Mechanismus ist die Adsorption (Van der Waals Kräfte zwischen benachbarten Atomen beider Schichten).

gute Schichthaftung: Scheibenreinigung, Zwischenschichten bei schlechthaftenden Materialien

Tab 7.2 246

7.5 Ohmsche Kontakte zu Silicium

2 Gruppen von Kontakten: 1) zu Si 2) zwischen Metallisierungsebenen

2 Vorgehensweisen die Metallisierung eines freigeätzten Kontaktloches aufzubringen:

- 1) gesamte Met. in einem Schritt „Force Fill“
- 2) Kontakt alleine und in 2 Schritt die Verbindungsleitungen

Der Kontaktwiderstand zum Halbleiter ist von seiner Dotierung abhängig. Je höher die Dotierung ist, desto leichter ist es einen ohmschen Kontakt herzustellen. Wichtig ist die Vermeidung einer isolierenden Zwischenschicht --> Ätzen um das natürliche Oxid zu entfernen.

Rekombinationskontakte:

Tunnelkontakte:

Einsatzgebiete von Metallisierungsschichten (Policid, Silicid-Prozesse)

7.6 Gatemetallisierung und lokale Verbindung

7.7 Mehrlagenmetallisierung

7.8 Supraleitende Metallisierung

8. Lithographie

- Positiv-Verfahren: bestrahlt --> weg
- Negativ-Verfahren: unbestrahlt --> weg

8.1. Technologie der Lackbearbeitung

Unterteilung in 5 Bereiche:

- Vorbereitung der Scheiben für den Belackungsprozeß:
 - Reinigung
 - Ausheizen (Wassermoleküle werden entfernt (bessere Lackhaftung), es bildet sich eine Silanoberfläche)
 - Aufbringen des Haftvermittlers (Hexamethyldisilazan HMDS) zur Verbesserung der Haftung des Lackes durch:
 - Aufschleudern (spin on-Verfahren)
 - Dampfphasenabscheidung (Vapor-Verfahren)
 - Dampfphasenabscheidung im Grobvakuum
- Belackung und Ausheizen der Scheiben:
 - Spray-Verfahren (Lackaerosol wird aufgesprüht) --> schwierig zu handhaben
 - Spin-On-Verfahren Lack wird aufgeschleudert
 - Ausheizen (70 -100C): Austreiben des Lösungsmittels, bessere Lackhaftung
- Belichten der Lackschicht
- Entwickeln der Lackschicht (Die Struktur im Lack wird in ein Relief umgewandelt):
 - Tauchverfahren: Horde im Tank bewegen, Entwicklerverbrauch berücksichtigen
 - Sprayverfahren
 - Puddelverfahren
 - nach Entwicklung immer spülen
- Aushärten des Photolackes (hard bake, post-bake) (chem Resistenz erhöhen)
- Lackentfernen nach dem Prozeß mit Aceton oder Veraschung oder Caro'scher Säure (Sauerstoffplasma)

8.2 Optische Photolithographie

Tab 8.3 Wellenlängen Optiken und Quellen bei UV-Belichtung

Bild 8.7. 315 Beugungsmuster an Photomaskenkanten

- **Belichtungsquellen:** Am gebräuchlichsten sind Quecksilberdampf lampen (230 nm -600nm) mit folgenden Wellenlängen:
 - 365 nm i-Linie
 - 405 nm h-Linie
 - 436 nm g-Linie

- **Kontaktbelichtung**

Die Scheibe wird zuerst bis kurz unter die Maske gefahren (Abstand: align gap), mit einer Splitfeldoptik iustiert und dann angepreßt (Weich- oder Hartkontakt)

Die Abbildungsqualität hängt von der Ebenheit der Oberfläche ab. Die minimale Strukturbreite beträgt wegen der Fresnelbeugung:

$$w_{\min} = \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \cdot \frac{d_L}{2}} \quad d_L : \text{Lackdicke}$$

Vorteile: hohe Auflösung
kurze Belichtungszeiten

Nachteile: Partikel --> Defekte, Scheibenverbiegung, Maskenbeschädigung

- **Abstandsbelichtung (Proximity-Belichtung)**

gleiches Belichtungsgerät aber kein Kontakt sondern ein kleiner Abstand

Vorteile: besser als Kontakt

Nachteile: reduzierte Auflösung und verminderter Abbildungscontrast durch Beugungseffekte

$$w_{\min} = \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \cdot \left(a + \frac{d_L}{2} \right)} \quad a : \text{Proximity-Abstand}$$

- **Spiegeloptische Projektionsbelichtung**

Bild 8.11 271 1:1 Spiegelprojektionsgerät

Maske und Scheibe werden gleichzeitig an einem Spalt vorbeigefahren und abgescannt. Auflösungsgrenze: 1,5 µm

Vorteil: - ganze Scheibe in einem Vorgang belichtet
- polychromatisches Licht
- größere Fokustiefe

Nachteil: Aufwendige Optik + Mechanik

Vorteile der Reduktionsbelichtung:

- hohes Auflösungsvermögen
- hohe Justiergenauigkeit
- geringe Defektgeneration
- Maskenfehler werden verkleinert abgebildet

- **Linsenoptische Projektion**

Bild 8.12 271 Schema eines Step and Repeat-Belichtungssystem

Das Licht gerät durch einen Filter (monochromatisch) in die Kondensoroptik. Die Maske (Reticle) enthält die vergrößerten Strukturen einer Schaltkreisebene. Die Belichtung erfolgt schaltkreisweise über Steuerung des x-y- Tisches, wobei jedesmal nachfokussiert werden muß um Unebenheiten auf der Scheibe auszugleichen.

Vorteil: hohes Auflösungsvermögen
bessere Justiergenauigkeit

Nachteil: geringe Fokustiefe ---> pro Schritt nachjustieren

Die Auflösung wird durch Fernfeldbeugung (Fraunhoferbeugung) begrenzt:

$$NA = n \cdot \sin \Theta = \frac{D}{2f}$$

NA: Numerische Apertur

D: Linsendurchmesser

f: Abstand zwischen Linse und Maske

Die Intensitätsverteilung der Fraunhoferbeugung in der Bildebene ergibt sich zu:

$$I(\Phi) = I_0 \frac{\sin^2(\beta)}{\beta^2}$$

$$\text{mit } \beta = \frac{\pi b}{\lambda} \sin(\Phi)$$

b: Spaltbreite

λ : Wellenlänge

Φ : Strahlwinkel (vgl. Abb. 8.14)

Vergrößert man die numerische Apertur verkleinert sich die Tiefenschärfe:

$$\Delta f_R = \pm \frac{\lambda}{2NA^2} \quad (\text{Raleigh-Tiefenschärfe})$$

minimale Wellenlänge für optischen Fokus:

$$\text{Höhe} / 2 = \lambda_{\min} / 2 NA^2$$

Kohärenzgrad s (Maß für die Phasenbeziehung von Lichtwellen):

$s = 0$ kohärente Punktquelle

$s = \infty$ inkohärente unendliche Quelle

$s = 0,7$ Optimum bei der Übertragung auf konventionellen Lack

$$s = \frac{NA_{\text{Kondensorlinse}}}{NA_{\text{Objektivlinse}}}$$

Mit der Projektionsbelichtung erreichbare minimale Strukturbreite:

$$w_{\min} = \frac{\lambda}{2NA} \left(\frac{1+3s}{1+s} \right) \left(1 + 0,15 \cdot \underbrace{\left(\frac{\Delta f}{\Delta f_R} \right)^2}_{\text{optimale Fokussierung = 0!!!}} \right) \quad \Delta f : \text{Defokuslänge}$$

s: Kohärenzgrad

Tab 8.5 275 Übersicht über verschiedene Belichtungssysteme

- Entstehung von stehenden Wellen:
Der Stehwelleneffekt entsteht durch lokale Schwankungen der Lichtintensität im Photolack und führt zu welligen Strukturflanken.

Lichtwellenlänge im Lack:

$$\lambda_{Lack} = \frac{\lambda}{n_{Lack}} \quad n_{Lack} : \text{Brechungsindex}$$

Formeln siehe Seite 276

Verhinderung von stehenden Wellen:

- Reflexionsverminderung durch Anti-Reflex-Schichten
- Breitbandbelichtung
- Mikrorauhigkeit des Substrats
- Ausheizen nach Belichtung
- Mehrlagentechniken

8.3 Photolacke

- Eigenschaften:
 - Kontrast, Empfindlichkeit, Absorptionskoeff, Auflösungsvermögen
 - gute Verarbeitungseigenschaften, keine Toxizität, geringer Partikelgehalt, gute Haftung, schnelle Entwicklung...

$$\text{Kontrast: } \gamma = \frac{1}{\log_{10} \frac{D_0}{D_{100}}}$$

D_0 : vollständig belichtet

D_{100} : gerade nicht belichtet

- Positivlacke für optische Lithographie enthalten:
 - Filmbildner (Resin) Novolack
 - Photosensibilisator (Diazonaphtochinonsystem)
 - Lösungsmittelsystem
- Negativlacke für optische Lithographie:
 - Grundprinzip: Die Löslichkeit des Lackes wird durch Bestrahlung herabgesetzt.
 - Vernetzungssysteme: Licht bewirkt die Verkettung von Molekülen --> vernetzte Gebiete
- Umkehrlacke
 - Ein zunächst positiv arbeitendes Lacksystem wird durch geeignete Prozeßführung in ein Negativsystem umgewandelt
- Lacke für die Elektronenstrahl/Röntgenstrahlithographie:
 - Negativlacke: Elektronenbeschuß vernetzen Molekülketten --> unlöslich
 - Positivlacke: Elektronenbeschuß spaltet Molekülketten auf --> löslich

8.4. Maskentechnik

Allgemeine Anforderung an Masken:

- *Anforderung an das Trägermaterial (Quarzglas)*
 - Stabilität
 - geringe Wärmeausdehnung
 - hohe Transparenz
 - Hohe Ebenheit
- *Anforderungen an die Absorptionsschicht (Chromschicht)*
 - Gute Haftung auf dem Substrat
 - hoher Absorptionskoeffizient
 - geringe Reflexion (--> Antireflexschicht)
- *Anforderungen an die Lackschicht*
 - Hoher Kontrast
 - gute Löslichkeit
 - gute Haftung
- *Anforderungen an die erzeugten Strukturen*
 - Abbildungsgenauigkeit
 - Strukturfeinheit
 - Fehlerfreiheit

Maskenherstellungsverfahren:

- Pattern Generator (ein Programm steuert eine variable rotierende Rechteckblende, durch die mittels einer verkleinerten Optik ein Blank belichtet wird)
- Step and Repeat Kamera (Photorepeater) (Mittels einer verkleinernden Projektion wird ein Reticle sequentiell auf einer Arbeitsmaske abgebildet)
- Elektronenstrahldirektschreiben (Standardverfahren: ein abgelenkter Elektronenstrahl wird mit einer Blende ein und ausgeschaltet, Raster-Scan-Verfahren --> Fernseher; Vector-Scan-Verfahren --> nur einzelne Bereiche mäanderförmig schreiben)

Phasenverschiebungsmasken

Verbesserung des Auflösungsvermögens durch Verwendung von Phasenverschiebungsmasken bei periodischen Maskenstrukturen: (Bild 9.8 343)

Um eine Phasenverschiebung von 180° zwischen benachbarten Strukturen zu erreichen muß gelten:

$$D = \frac{(2m - 1) \cdot \lambda}{2(n_p - 1)}$$

D : Dicke des Phasenschiebers

m : 1,2,3...

λ : Belichtungswellenlänge

n_p : Brechungsindex des Phasenschiebers

Vorraussetzung für den Einsatz von Phasenverschiebungsmasken ist der Einsatz von kohärentem Licht.

Nachteil : kompliziertes Maskendesign

Emulsionsmasken

Emulsionsmasken haben eine 6 µm dicke Silberhalogenidschicht als Absorptionsschicht auf gezogenem Natronkalkglas. Handhabung bei Rotlicht. Auflösungsvermögen: 2µm. Nach 20 Kontaktbelichtungen ist die Maske kaputt. Sehr billig.

Pellicles

Zum Schutz der Maske wird eine Membran auf einem Ring 3mm über der Chromstruktur auf der Maske angebracht, die den Staub auffängt und außerhalb des Tiefenschärfebereichs hält.

Masken für die Elektronenstrahlithographie

Es werden Transmissionsmasken aus anisotrop geätzten Siliziummembranen. Da Teile aus der Maske herausfallen würden: Aufteilung in 2 komplementäre Masken oder Einlegen eines Gitters

Masken für die Ionenstrahlithographie

Trägerfolienmasken (dünne Al₂O₃-Schicht mit Gold als Absorber)

Channelingmasken: Dünne Maskenfolie aus {100} od {110} Si mit einer Gold/Wolfram-Absorberschicht. Die Si-Schicht wird von den Ionen durchstrahlt. Probleme: Verzerrungen durch Erwärmung

Masken für die Röntgenstrahlithographie

hohe Anforderungen an die Materialien. Maske aus einer Dünnen Siliziummembran mit einer Absorberschicht aus schweren Elementen (Au, W, Mo, Ta)

Maskenkontrolle

3 Aspekte werden berücksichtigt:

- Strukturbreitenmessung auf Einhalten der Toleranzen
- Passgeauigkeiten zueinander (bei mehreren Maskenebenen)

Inspektion der Maske auf Defekte (Verunreinigungen, Fehler bei Entwicklung, Löchern, Verdickungen, Glasfehler) Masken werden mit automatischen Maskeninspektionssystemen inspiziert (*die to die Inspektion*: zwei benachbarte Reticles werden verglichen --> Fehler auf einigen können gefunden werden; *die to database - Inspektion*: Vergleich mit den Layout-daten)

Reparatur von Maskendefekten:

überschüssiges (opaque-Fehler) oder fehlendes (clear-Fehler) Absorbermaterial kann vermieden werden durch:

- Laserreparatur:
 - Laserverdampfen bei opaque-Fehler
 - laserinduzierte Abscheidung bei clear-Fehler
- Ionenstrahlreparatur:
 - Ionen-Sputtern bei opaque-Fehler
 - Ionenstrahlinduzierte Abscheidung bei clear-Fehler

8.5. Röntgenstrahlolithographie

Für Wellenlängen von 0,5 - 2 nm. Da für Röntgenstrahlen keine abbildenden System existieren gibt es nur Schattenprojektionsverfahren (Kontakt- und Abstandsbelichtung) Durch kurze Wellenlängen wird das Auftreten von Beugungseffekten stark verringert.

Grenzen des Auflösungsvermögens:

- Beugungserscheinungen an den Maskenkanten
- durch Röntgenstrahlung aus der Maske, dem Substrat herausgelösten Elektronen
- durch geometrische Effekte

Lacke für die Röntgenstrahlolithographie:

- elektronenempfindliche Lacke, Diazonaphthochinonsysteme
linearer Zusammenhang zwischen Elektronen- und Röntgenempfindlichkeit
- Probleme: - Empfindlichkeit (Strahlungsintensität gering, wenig Absorption)
- schlechte Stabilität gegenüber Folgeprozessen
- Lösung: - Einbau stärker absorbierender Gruppen
- Lacke in Mehrlagentechnik mit Lack als Topresistschicht
- Einbau reaktiver Gruppen
- chemische Verstärkung durch katalytische Reaktionen bei Belichtung und Entwicklung

Masken für die Röntgenstrahlolithographie:

- Anforderungen:
- hohe Transparenz des Maskenträgers bei gegebenem Quellspektrum
 - Maskenkontrast, d.h. größtmögliches Verhältnis der Absorptionskoeffizienten von Absorber und Träger
 - Transparenz im sichtbaren Bereich für Justierung
 - mechanische Stabilität
 - Lebensdauer größer gleich 10.000 Belichtungen
 - Ebenheit

8.6 Elektronenstrahlolithographie

Bei der Elektronenstrahlolithographie erfolgt die Belichtung mit Elektronen die durch elektrische und magnetische Felder abgelenkt werden.

Elektronenstrahlproximitybelichtung: Bild 8.33a S297

Elektronenstrahlprojektionsbelichtung Bild 8.22 b S291

Elektronenstrahldirektschreiben für Masken und Reticles:

- Raster scan: vgl. Bildröhre beim Fernseher; zeilenweises Abfahren, Strahl ein/aus
- Vektorscan: Punkt anfahren, mäanderndes Überfahren zu belichtender Bereiche
Vorteil: schneller
Nachteil: Ansteuerung schwieriger
- Strahlform: - Fixed shaped beam system (punkt-, rechteck-, kreisförmiger Strahl)
- Variable shaped beam system

Proximity-Effekt: Strukturweitenänderung durch rückgestreute Elektronen

Das Auflösungsvermögen wird durch Elektronenstreuung im Lack und Substrat begrenzt.

8.7 Ionenstrahlolithographie

Die mit 20 -200keV geladenen Ionen verlieren wegen ihrer großen Masse und großen Wirkungsquerschnitt ihre Energie in einem kleinen Festkörpervolumen und können den Photolack in einem sehr begrenzten Bereich belichten. --> größte Auflösung, höhere Empfindlichkeit

- > - begrenzt durch laterale Auflösung
- ... Effekte
- Linsenfehler

Verschiedene Abbildungsverfahren:

- Ionenstrahlproximitybelichtung
- Ionenstrahlprojektionsbelichtung
 - + hohe Ionenstromdichten
 - + kurze Belichtungszeit
 - + hohe Tiefenschärfe
 - aufwendige Optik
- Rasterbelichtung mit fokussiertem Ionenstrahl (für die Herstellung und Reparatur von Masken; keine Masken notwendig; aufwendige Optik)

Minimale Anzahl der erforderlichen Ionen N_{\min} zur Belichtung einer quadratischen Fläche der Kantenlänge l_p :

$$N_{\min} = S \cdot l_p^2$$

N_{\min} : Minimale Dosis zur Belichtung eines Pixels

S : Empfindlichkeit des Lackes

l_p : Kantenlänge des Pixels

Minimale auflösbare Strukturweite (Auflösungsgrenze) l_{\min} ergibt sich aus der Fläche, die gerade von einem Ion getroffen wird:

$$l_{\min} = \frac{1}{\sqrt{S}}$$

S : Empfindlichkeit des Lackes

Schwankung der Ionenemission:

$$\sigma = \sqrt{N_{\text{Mittel}}}$$

N_{Mittel} : Mittelwert der emittierten Ionen
siehe auch Skript

Masken für die Ionenstrahlolithographie:

- Trägerfolienmasken für Proximityverfahren
- Channelingmasken für Proximityverfahren
- Ionendurchstrahlungsmasken für Projektionsverfahren

9. Ätztechnik

Kenngrößen die einen Ätzprozeß charakterisieren:

- Ätzrate:

$$r_{\ddot{A}} = \frac{d}{t}$$

d : geätzte Tiefe
t : Ätzzeit

$$r_{\ddot{A}} = r_{\ddot{A}_0} \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

- Selektivität S:

$$S = \frac{r_{\ddot{A}1}}{r_{\ddot{A}2}}$$

$r_{\ddot{A}1}$: Ätzrate im Material 1 (zu ätzende Schicht)
 $r_{\ddot{A}2}$: Ätzrate im Material 2 (darunterliegende Schicht)

- Ätzfaktor $f_{\ddot{A}}$:

$$f_{\ddot{A}} = \frac{d}{u}$$

u : Unterätzung Bild 10.2 357
d : geätzte Tiefe

- Anisotropiefaktor A_f :

$$A_f = 1 - \frac{r_{\text{horizontale (laterale) Ätzrate}}}{r_{\text{vertikale Ätzrate}}}$$

rein isotropes Ätzen: $u = d \rightarrow A_f = 0$
anisotropes Ätzen : $u < d \rightarrow 0 < A_f \leq 1$
Bild 9.3 316

$$A_f = 1 - \frac{u}{d}$$

- Homogenität:

Gleichmäßigkeit des Ätzprozesses:
über eine Scheibe
von Scheibe zu Scheibe innerhalb einer Charge
von Charge zu Charge

Maß für die Inhomogenität:

$$\Delta r_{\ddot{A}} = \frac{r_{\ddot{A},\max} - r_{\ddot{A},\min}}{r_{\ddot{A},\text{mittel}}} \cdot 100\%$$

$$r_{\ddot{A},\min} = \frac{d}{t_{\max}} = \frac{d}{t_{\text{mittel}} + \Delta t}$$

- Durchsatz:

Anzahl der Scheiben die pro Zeiteinheit (pro Stunde) geätzt werden

- Überätzzeit:

Die Überätzzeit wird zum vollständigen Durchätzen einer Schicht benötigt Bild 9.4 316

Unterscheidung:

- a) ganzflächige Ätzung; gesamte Oberfläche angegriffen
- b) selektive Ätzung; bestimmte Bereiche geätzt

Ganzflächige Ätzung:

- Rückseitenätzung
- Reduzierung der Scheibendicke (chem. Ätzverfahren, mechan. Verf. auch mögl.)
- Reinigung von Scheiben (Abtrag einer dünnen Oberflächenschicht)
- Defektätzung (Schäden der Kristallstruktur sichtbar machen)

Selektive Ätzung:

- Strukturierung von Schichten auf Scheibenoberfläche
- Herstellung von μ -mechanischen Bauelementen)

Ätzverfahren:

Naßätzen

Naßchemisches Ätzen

- Reinigung
- Abtragung von Kristalldefekten
- Reduzierung der Scheibendicke
- Bestimmung von Kristalldefekten
- Rückseitenätzung
- Strukturierung (Erzeugung 3-dim Strukturen; Ätzstop)

Vorteil: Einfachheit und hohe Selektivität

Nachteil: große Unterätzung beim selektiven, maskierten Ätzen

Elektrochemisches Ätzen

- Scheibe gegen Platinanode anodisch gepolt, Dotierung bestimmt Ätzrate

Ätzen in Schmelze:

- Scheibe in Salzsäure
- Bestimmung von Kristalldefekten
- Ätzung III-V-Halbleiter

Naßchemisches Ätzen $< 2\mu\text{m}$ nicht sinnvoll, da keine anisotropen Ätzprofile mehr möglich

Trockenätzen (ionisiertes Gas als Ätzmedium)

physikalisch:

- Sputterätzen
- Ionenstrahlätzen

physikalisch-chemisches Trockenätzen

- Plasmaätzen im Parallelplattenreaktor

- Reaktives Ionenätzen (RIE)

==> physikalischer Beschuss mit Ionen relativ hoher Energie, hohe Anisotropie, keine ausreichende Selektivität

- Reaktives Ionenstrahlätzen (RIBE)
- Elektroneninduziertes Ätzen (Ätzreaktion nur

an Stellen, wo Elektronenstr. auftreffen)

möglich: Strukturierungsätzen ohne Maske

Problem: Durchsatz, Strahlenschäden

- Photoinduziertes Ätzen

Ätzreaktion nur an Stellen wo Licht

auftrifft (Vorteil: keine Strahlungsschäden)

chemisch:

- chemisches Trockenätzen

mit HCl oder H_2 Gas bei $T > 1000^\circ\text{C}$ zur in-situ Oberflächenreinigung vor Epitaxie

- Plasmaätzen

- Thermisches Ätzen

ungewollter Effekt beim Tempern von Si

Nachteile Trockenätzen:

- geringe Selektivität
- Probleme der Homogenität
- Strahlenschäden

9.1 Naßchemisches Ätzen

Der Ätzzvorgang setzt sich aus mehreren Einzelschritten zusammen:

1. Aufbringen des Ätzmittels
2. Diffusion des Ätzmittels zur Scheibenoberfläche (durch geeignetes Bewegen)
3. Adsorption an der Scheibenoberfläche
4. Reaktion Redox-Reaktion oder Komplexbildung
5. Desorption von der Oberfläche
6. Diffusion des Reaktionsproduktes von der Scheibenoberfläche durch die Diffusionsschicht
7. Lösen der Reaktionsprodukte
8. Spülen der Scheiben
9. Trocknen (Ausheizen, Plasmareinigen: Ionen, Radikale reagieren mit Verunreinigungen)
evtl noch Ausheizen / Plasmareinigen

- Liegt das Ätzmittel in geringer Konzentration vor ist der Prozeß **diffusionsbegrenzt**:

$$J_{\dot{A}} = D \frac{C_v - C_0}{\delta_x}$$

$J_{\dot{A}}$: Teilchenfluß

D : Diffusionskonstante

δ_x : Dicke der Diffusionsschicht

C_v : Konzentration im Volumen

C_0 : Konzentration an der Reaktionsfläche

- Liegt das Ätzmittel in hoher Konzentration vor ist der Prozeß **reaktionsbegrenzt** (temperaturabhängig):

$$r_{\dot{A}} = k_R C_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

k_R : Reaktionskonstante

E_a : Aktivierungsenergie der Reaktion

C_0 : Konzentration an der Reaktionsoberfl

Bei reaktionsbegrenztem Ätzen kann die Diffusion durch geeignetes Bewegen der Scheiben in der Ätzlösung beschleunigt werden. Jedoch bei zu starker Bewegung Störung der Adsorption des Ätzmittels möglich.

Verunreinigungen in Ätzlösung bewirken ebenfalls Störung der Adsorption des Ätzmittels reaktionsbegrenzter Prozeß wird beschleunigt durch:

- erhöhte Reaktionstemperatur
- erniedrigte Aktivierungsenergie (durch Katalysator)

- Ätzlösungen bestehen aus:
 - Oxidationsmittel (Salpetersäure, HNO_3 , Wasserstoffperoxid H_2O_2 , H_2SO_4)

- Komplexbildner (F^- , OH^-)
- Lösungsmittel (deionisiertes Wasser)
- Inhibitoren (zur Verlangsamung schneller Reaktionen, Essigsäure, Brom)
- spez. Zusätze

die eigentliche Ätzung passiert durch Oxidationsmittel und Komplexbildner

- Trocknung durch:
 - Verdunstung im IR-Ofen
 - Verdünnen in Zentrifuge
 - Verdrängen durch Abblasen mit Stickstoff
 - Isopropylalkohol auf Wasseroberfläche, sehr langsames Rausheben der Scheiben, Isopropyl verdrängt wegen höherer Oberflächenspannung Wasser, ==> Scheiben kommen trocken raus
- Ausheizen: Entfernen von absorbierten Rückständen (H_2O) von der Scheibenoberfläche
- Plasmareinigen: Erzeugen von Ionen und Radikalen in einer Glimmentladung
 - Ionenbeschuss führt zur Vernetzung der Photolacke
 - ==> Problem beim Ablösen
 - Strahlenschäden

Ätzverfahren:

- *Tauchätzen:* Eintauchen in eine Wanne mit Ätzlösung Vorteil: hoher Durchsatz, beidseitige Ätzung; Nachteil: schlecht zu automatisieren, hoher Verbrauch von Ätzlösung
- *Sprühätzen:* Scheiben werden besprüht Vorteil: geringer Verbrauch, gute Automatisierbarkeit, Integration von Spül und Trockenprozessen; Probleme: Schichthaftung, einseitige Ätzung

Anwendungen der verschiedenen Ätzverfahren:

- Reinigungsätzen
- Ganzflächige Ätzung von Si
- Defektätzen (Anätzen von Kristalldefekte)
- Anisotropes Ätzen (Mikromechanik)
- Ätzen aller anderen Materialien (SiO_2 , Silicide, Metalle)

9.1.1 Reinigungsätzen

Reinigung von HI-Scheiben um Verunreinigungen zu entfernen

Arten von Verunreinigungen: - Läpp- & Poliermittel

- Staub
- Brösel aus Schichtherstellungsprozessen

- atomare und ionische Verunreinigungen
stören den weiteren Schichtaufbau

Schwermetalle und Alkaliionen führen zu Problemen:

- Schwellspannungsverschiebung bei MOS-Transistoren
- Herabsetzung der Durchbruchspannung
- Rekombinationszentren

Abhilfe: Ätzyklus (die RCA-Methode):

- 1.) Caro 130 - 150°C
- 2.) Spülen mit H₂O
- 3.) SC-1 80°C
- 4.) HF-H₂O (1:50)
- 5.) SC-2 80°C
- 6.) Spülen mit H₂O

Caro: Entfernung von Photolack und organ. Verunreinigungen

SC-1: Entfernung von organ. Verunreinigungen und Metallen

SC-2: Desorption von atomaren und ionischen Verunreinigungen

Flußsäure (HF): Oxidentfernung

Salpetersäure (HNO₃): Entfernung organischer und anorganischer Stoffe

Fingerabdrücke müssen mechanisch entfernt werden

9.1.2 Ätzen von Si

Politurätzen: Ätzlösungen, die Oberflächenunebenheiten eibebnen

Strukturätzen: Ätzlösungen, die Ätzgruben bilden

Ganzflächige Ätzung:

Wichtig: gleichmäßiger und schneller Abtrag (hohe Ätzrate)

Oxidationsmittel: HNO₃

Komplexbildner: HF

Lösungsmittel: H₂O

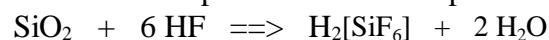
Inhibitor zur Prozeßkontrolle: Essigsäure

Ablauf:

- Oxidation des Si mit Oxmittel:



- Lösen des Reaktionsproduktes mit Komplexbildnern:



Defektätzen:

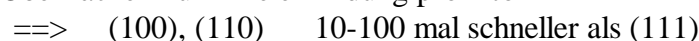
geringe allg. Ätzrate aber hohe defektabhängige Ätzrate

Anisotropes Ätzen:

Strukturätzen mit hoher Selektivität, tw. selbstjustierend erforderlich

(100)- und (110)-Si-Oberflächen haben 2 freie Bindungen pro Atom

(111)-Oberflächen nur 1 freie Bindung pro Atom



Ätzstop durch: hohe Dotierung (Bor, Phosphor, Germanium)
bei pn-Übergang: Spannung von 1V in Sperrrichtung

9.1.3 Ätzen von SiO₂, BSG, PSG

SiO₂ wird von komplexbildenden Fluorid- und Hydroxidionen geätzt
z.B. mit wässrigen HF-Lösungen oder gepufferter Flußsäure

Ätzrate hängt von Temperatur, Herstellungsart des Oxids (Dichte, Porösität, Defektdichte, Reinheit, Dotierung, Stöchiometrie) Bewegung des Bades

typische Ätzraten: 80-140nm/min (thermisches Oxid)
200-350nm/min (LTO)

Erhöhung der Ätzrate durch: - Erzeugung von Defekten durch Elektronen- oder Ionenbeschuß
hohe Selektivität zu Silicium; greift aber Aluminium an

PSG (phosphordotiertes Oxid):

Ätzrate steigt mit steigendem Phosphorgehalt
Ätzmittel: HF, BHF, BOE

BSG (bordotiertes Oxid):

ähnliches Verhalten beim Ätzen mit HF wie PSG
beim Ätzen mit BHF (buffered HF) sinkt die Ätzrate erst ab, steigt dann wieder

9.1.4 Ätzen mit Si₃N₄ und Si_xN_yO_z

Si₃N₄-Ätzmittel: - Flußsäure (schlechte Selektivität gegenüber Oxid)
- heiße Phosphorsäure (bessere Selektivität, Ätzrate 2-3,5 nm/min,
Aluminium und Photolack wird angegriffen
==> Maskierung mit Oxid oder Trockenätzen

Si_xN_yO_z (Oxinitride): gleiche Ätzlösungen wie Si₃N₄

- HF und BHF: Ätzrate steigt mit Sauerstoffanteil
- heiße Phosphorsäure: Ätzrate sinkt mit Sauerstoffanteil

9.1.5 Ätzen von Siliciden

==>s. Tab. 9.4 S.325

9.1.6 Ätzen von Metallen

Ätzlösungen s. Tab. 9.5 S.326

Nachteil der meisten Ätzlösungen: ätzen Photolack an
Ausweg: Trockenätzen

9.1.7 Probleme beim naßchemischen Ätzen

- Überätzen bei verspätetem Ätzabbruch
- Lackhaftung
- Gasblasenbildung
- Einstellung des Kantenwinkels
- Maskenvorhalt
- Konstanz der Ätzbedingungen
- Kontamination
- Einhaltung der Ätzzeit

9.2 Trockenätzen

Im Bereich von 2 µm Strukturbreite ist naßchemisches Ätzen wegen der großen Isotropie nicht mehr sinnvoll. --> Trockenätzverfahren : Es dienen Gase als Ätzmedien. Der Prozeß findet in einer Vakuumkammer bei niedrigem Druck statt. Gasförmige Reaktionsprodukte werden abgepumpt.

Eigenschaften und Erzeugung eines Plasmas

- Hochfrequenzentladung im Parallelplattenreaktor
Beim Anlegen der Hochfrequenz gelangen während der pos Halbwelle mehr Elektronen zur Elektrode als Ionen während der negativen Halbwelle ---> Die Elektronen fließen ab und es bildet sich ein positives Plasmapotential
- Hochfrequenzentladung im Barrelreaktor
Beide Elektroden sind halbkreisförmig um das Prozeßrohr angebracht. Die Scheiben sind durch einen perforierten Metallzylinder vor dem Plasma geschützt.
- Kaufmann-Ionenquelle
Gleichspannungsanregung
- Elektronenzyklotronresonanzquelle (ECR)
Elektronen werden durch Mikrowellen angeregt und werden durch ein Fenster ins Vakuum eingekoppelt. Im Magnetfeld bewegen sie sich im Kreis . Sie nehmen Energie auf und ionisieren das Gas. Die pos. Ionen fliegen durch das Extraktionsgitter und ätzen.

Verschiedene Ätzverfahren

verschiedene Trockenätzverfahren Abb.10.12

9.2.1 Plasmaätzen

1. Generierung von reaktiven Teilchen im Plasma
2. Bewegung der reaktiven Teilchen zur Substratoberfläche
3. Adsorption
4. Reaktion
5. Desorption
6. Abtransport der flüchtigen Reaktionsprodukte

Plasmaätzen ist **immer isotrop!!!** --> Einsatz für schräge Flanken, Photolackentfernung

9.2.2 Ätzreaktionen

1. Chemisorption (Adhäsion) an der Oberfläche
 $(\text{Cl}_2)_{\text{gas}} \implies (\text{Cl}_2)_{\text{ads}} \implies 2 (\text{Cl})_{\text{ads}}$
2. Reaktion des Cl_2 zu SiCl_4 und Bildung flüchtiger Reaktionsprodukte
 $\text{Si} + 4 (\text{Cl})_{\text{ads}} \implies (\text{SiCl}_4)_{\text{ads}}$
3. Desorption in die Gasphase
4. $(\text{SiCl}_4)_{\text{ads}} \implies (\text{SiCl}_4)_{\text{gas}}$

9.2.3 Reaktortypen

- Tunnelreaktor (HF-Spannung erzeugt Plasma, abgeschirmt durch Faradaykäfig
 \implies nur ungeladene Teilchen diffundieren zu Scheiben)
- Downstreamreaktor (Mikrowellen- / HF-Anregung; Vorteil: geringe Strahlenschäden)

- Parallelplattenreaktor (verwandt zum Ätzen von Si, SiO₂, Si₃N₄, Al)

9.3 Sputterätzen (physikalisches Ätzen) und Ionenstrahlätzen

Ionen werden aus dem Plasmaraum zur Substratoberfläche beschleunigt und sputtern Atome ab. Die auftretenden Profile sind anisotrop und es bildet sich ein Ätzgraben an den Maskenrändern durch Streuung der einfallenden Ionen. Problem: Es kann zur Redeposition des Teilchen kommen --> Wulstbildung nach Entfernen der Maske

9.4 Reaktives Ionenätzen + reaktives Ionenstrahlätzen

Beim reaktiven Ionenätzen werden die Vorteile des physikalischen und chemischen Trockenätzen so kombiniert, daß anisotrope Ätzprofile erzielt werden können.

- Polymerbildner belegen Boden- und Seitenflächen mit Polymeren
 - beschleunigte Ionen sputtern Boden frei; Wände weiter mit Polymeren bedeckt
 - Boden kann gerichtet geätzt werden
- ==> besseres Ätzprofil, langsamere Ätzung

9.5 Endpunkterkennung

Beim Trockenätzen muß wegen der schlechten Selektivität der Endpunkt des Prozesses erkannt werden. Bei durchsichtigen Schichten wird die Reflektivitätsmessung durchgeführt. Bei undurchsichtigen Schichten wird das emittierte Spektrum der Reaktionsprodukte gemessen --> wenn die Spektrallinien nicht mehr auftauchen ist der Prozeß zu Ende (Emissionsspektroskopie)

Weitere Verfahren: Massenspektrometrie, Spektralanalyse

10. Aufbautechnik

10.1 Chiptrennen

- Ritzen + Brechen
Ritzen mit einem Diamanten --> Es entstehen Gleitlinien entlang derer der Kristall bricht.
Brechen an runden oder scharfen Kanten

Problem: große Chips brechen nicht reproduzierbar entlang der Kristallebenen --> Sägen

- Sägen (Trennschleifen)
Der Wafer wird mit Selbstklebefolie hinterklebt und mit einer dünnen Stahlscheibe bis auf die Folie durchgesägt. Kühlung mit Wasser.

10.2 Chip- oder Diebonden

Der Chip wird in ein Gehäuse geklebt oder gelötet oder legiert.

Vorteile des Klebens:

- geringe Temperaturbelastung ($\leq 150^\circ\text{C}$)
 - kurzzeitige Belastung bis 320°C möglich
 - leitfähige oder isolierte Befestigung möglich
 - gute Wärmeleitfähigkeit (mit met. Partikeln)
 - Ausgleich mechanischer Spannungen
- Drahtbonden (Bondflächen immer geheizt)
Al- oder Au-Drähte mit $17\text{-}50\mu\text{m}$ Durchmesser
mit Ultraschall angetrieben
 - Wedge-Bonden: Der horizontal über der Bondfläche verlaufende Draht wird mit einem Keilwerkzeug auf der Bondfläche abgequetscht und weggezogen.
 - Ball-Point-Bonden: Am Drahtende wird durch eine Wasserstoffflamme eine kleine Kugel gebildet und diese dann auf die Bondfläche gedrückt
 - Flip-Chip-Technologie
Der Chip wird umgedreht und an den mit Lötsockern versehenen Kontakten direkt auf eine Leiterplatte gelötet.
Vorteile: höchste Anschlußzahlen
beste elektr. Eigenschaften
kurze Signallaufzeiten
Multi-Chip-Integration
größte Packungsdichte
verschieden Bels übereinander

- **Tape Automated Bonding**
Der Chip wird mit gold/ kupfer plattierten Höckern versehen und auf einem Band fixiert. Die Höcker werden mit Kupferleitungen die auf einem flexiblen Band befestigt sind verbunden. Im nächsten Schritt werden die Kupferbahnen durch Thermokompressionsschweißen mit einem Substrat, einem Gehäuse oder einer Metallspitze verbunden.

Vorteile: flache Bauform
hohe Packungsdichte +
bessere Zuverlässigkeit gegenüber Drahtbonden
Nachteile: wenig flexibel --> hohe Stückzahlen

10.4 Gehäusung

Aufgaben:

- Schutz vor Umwelteinflüssen wie:
 - mechanische Zerstörung
 - chemische Angriffe durch aggressive Medien

sowie:

- Feuchte
- elektromag. Strahlung und Lichteinfall
- Wärmeabfuhr
- Herstellung der Außenanschlüsse
- Erleichterung der Handhabung

Gehäusearten:

- *Dual In-line Package* (DIL) (64 Pins)
- *Small Outline Package* (SO)
- *Pin-Grid-Array Package* (PGA)
Anschlüsse nach unten --> mehrere hundert Anschlüsse

Chip-Carrier

Anschlüsse an allen 4 Seiten

Vorteile gegenüber DIL-Gehäusen:

- kleinere Abmessungen
- höhere Zahl der Anschlüsse
- verbesserte elektrische Eigenschaften
- volle Testbarkeit vor der Montage
- Oberflächenmontage
- niedrigere Stückkosten bei vergleichbarer Stückzahl

11. Ausbeute und Zuverlässigkeit

- **Endausbeute:**

Sie setzt sich aus Teilausbeuten zusammen: Linien-, Beurteilungs-, Montage-/Testausbeute

$$Y = \frac{\text{funktionierende Systeme}}{\text{gefertigte Systeme}}$$

- **Linienausbeute:**

$$Y = \frac{\text{zu den elektrischen Tests angelieferte Scheiben}}{\text{in die Linie eingeschleuste Scheiben}}$$

Die Linienausbeute errechnet sich aus allen Einzelprozeßausbeuten:

$$Y_f = Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 \cdot Y_4 \cdot \dots$$

Je weiter hinten ein Fehler auftritt desto teurer wird es!!

Fehlermöglichkeiten:

- Scheibenbruch (heute kein Problem mehr --> Cassette zu Cassette-Fertigungsgeräte)
- prozeßinduzierte Defekte: Kratzer, Lackreste, Partikel; nicht immer elektrisch wirksam aber erhöhen die Frühausfälle ; Defektdichten optisch meßbar
- Prozeßschwankung: Alle Prozesse unterliegen statistischen natürlichen Schwankungen. Die Schwankungsbreite darf die Toleranzgrenzen nicht verletzen
- organisatorische und Menschenbedingte Fehler:
 - misprocessing: falsche Prozeßeinstellungen, Anlagenausfall
 - misrouting: falscher Prozeß , falsche Prozeßreihenfolge

- **Beurteilungsausbeute:**

$$Y = \frac{\text{funktionsfähige Systeme auf einer Scheibe}}{\text{alle Systeme auf einer Scheibe}}$$

Abhängigkeiten der Beurteilungsausbeute:

Scheibendurchmesser: größer --> Ausbeute steigt, weniger Systeme am Rand

Chipfläche: Verkleinerung --> Ausbeute steigt

Anzahl der Prozeßschritte: größer --> Ausbeute sinkt

Integrationsdichte: größer --> Ausbeute sinkt (Überlappung des aktiven Teils mit Defekt wird wahrscheinlicher)

Defektdichte: größer --> Ausbeute sinkt

Dichte von Kristallfehlern: --> Ausbeute sinkt

- **Montage und Testausbeute:**

$$Y = \frac{\text{an das Lager ausgelieferte Chips}}{\text{nicht geinkte (gute) Chips}}$$

Die Ausfallrate bei der Montage ist niedrig, bei der Bausteinprüfung (dynamische Tests, Funktionstests) höher

11.1 Ausbeutemodelle für die Beurteilungsausbeute

- **Poisson-Modell** (konst Defektdichte, homogene Verteilung der Defekte über die Scheibe): Herleitung der Formel siehe 366

$$Y_B = \exp(-D_0 \cdot A)$$

Y_B : Ausbeute: Wahrscheinlichkeit, daß ein Chip keine Defekte enthält

A : Chipfläche

D_0 : Defektdichte auf der Scheibe

$$m = \frac{n}{N} = D_0 \cdot A$$

m : mittlere Anzahl der Defekte/Chip

n : Defekte pro Scheibe

N : Chips pro Scheibe

D_0 : Defektdichte auf der Scheibe

Nachteil der Modells:

Die Verteilung der Defekte ist nicht homogen. Am Rand ist sie größer. --> Ursachen:

- Ränder werden mechanisch stark beansprucht --> Abrieb, Partikel
- bei Photolithographie können sich an den Rändern Partikel bilden
- die Belichtungsgeräte haben bessere Ausleuchtungshomogenität in der Mitte
⇒ weniger Strukturfehler
- Temperaturschwankungen bei Ofenprozessen am Rand größer
mehrere angrenzende Punktdefekte können zu einem Flächen- oder Liniendefekt zusammengefaßt werden

Wahrscheinlichkeit, daß Chip kaputt:

$$P = 1 - e^{-D_0 A}$$

D_0 : Defektdichte

A : Fläche

$D_0 \neq$ Partikeldichte !!

$D_0 =$ Partikeldichte * Ausfallwahrscheinlichkeit

- **Dreieckverteilung von Murphy** (nimmt eine Dreieckfkt als Verteilungsfkt der Defektdichte)

$$Y_B = \left(\frac{1 - \exp(-D_0 A)}{D_0 A} \right)^2$$

A : Chipfläche

D_0 : Defektdichte auf der Scheibe

Wenn $AD_0 \gg 1$ gilt (Chipfläche groß) Vereinfachung der Dreiecksformel:

$$Y_B = \frac{1}{(D_0 A)^2}$$

- **Rechteckverteilung** (nimmt eine Rechteckfkt. als Verteilungsfkt. der Defektdichte an)

$$Y_B = \frac{1 - \exp(-2D_0 A)}{2D_0 A}$$

A : Chipfläche

D_0 : Defektdichte auf der Scheibe

Wenn $AD_0 \gg 1$ gilt (Chipfläche groß) Vereinfachung der Rechtecksformel:

$$Y_B = \frac{1}{2D_0 A}$$

- **Ausbeutemodell von Seeds** (nimmt eine Exp-fkt für die Defektdichte an)
niedrigere Defektdichte ist wahrscheinlicher als hohe

$$f(D) = \frac{1}{D_0} \cdot \exp\left(-\frac{D}{D_0}\right)$$

$$Y_B = \frac{1}{1 + AD_0}$$

- **allgemeine Beschreibung (Gammaverteilung)**

$$Y_B = \frac{1}{(1 + SAD_0)^{1/S}}$$

S : bestimmt die Form der Verteilung

S = 0 --> Deltafkt --> Poisson-Formel

S = 1 --> Seeds

S \ll 1 --> Gaußverteilung

11.2 Zuverlässigkeit

11.2.1 Ausfallmechanismen

- Injektion heißer Ladungsträger
- zeitabhängiger Oxiddurchbruch
- Elektromigration
- Leitbahnmigration durch mechanische Spannungen

11.2.2 Kenngrößen der Zuverlässigkeit

Die *Ausfallrate* λ gibt an wieviele ICs aus einer Gesamtpopulation ausfallen werden Sie ist statisch und kann nur geschätzt werden. Sie wird in FIT angegeben

$$1 \text{ FIT} = 1 \text{ Ausfall} / 10^9 \text{ Objektstunden} \quad 1 \text{ FIT} = \frac{\text{Ausfälle}}{\frac{\text{Objektstunden}}{10^9}}$$

1 Objektstunde = Anzahl der ICs mal Anzahl der Betriebsstunden

Die Ausfallrate λ läßt sich aus der *Zuverlässigkeitsfunktion* $R(t)$ herleiten. $R(t)$ ist die kumulative Wahrscheinlichkeit daß ein IC die Zeit t ohne Ausfall überlebt.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad F(t) : \text{Ausfallwahrscheinlichkeit (proz Ant. d. Ausfälle)}$$

$$\lambda = \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta)}{R(t)}$$

λ : **mittlere** Ausfallrate

Δ : Zeitintervall

$R(t)$: Zuverlässigkeitsfunktion

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} \ln R(t)$$

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right)$$

Mittlere Ausfallzeit t_{50} (Zeit nach der 50% der BEL ausgefallen sind):

$$R(t_{50}) = 0,5$$

Lebensdauer MTTF (Mean Time to Failure)

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

11.2.3 Modelle zur Beschreibung der Zuverlässigkeit

- **Die Ausfallrate wird als konstant angenommen** ($\lambda(t) = \lambda_0$) nur z.T. realistisch:

$$R(t) = \exp(-\lambda_0 t)$$

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda_0 t)$$

$$f(t) = \lambda_0 \cdot \exp(-\lambda_0 t)$$

$$t_{50} = \frac{0,7}{\lambda_0}$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_0}$$

$$t_{50} = A \left(\frac{I}{bd} \right)^{-n} \cdot e^{\frac{E_a}{kT}}$$

b: Breite der Leiterbahn

d: Dicke der Leiterbahn

n: Stromdichteexponent (dimensionslos)

A: Fläche

E_a : Aktivierungsenergie

- **Weibull-Verteilung** (Badewannenkurve), realistischer:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} t^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\alpha} t^\beta\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} t^{\beta-1}$$

α : Konstante

$\beta < 1$ fallender Teil der Badewanne

$$R(t) = \exp\left(-\frac{1}{\alpha} t^\beta\right)$$

$\beta = 1$ konstanter Teil der Badewanne

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha} t^\beta\right)$$

$\beta < 1$ steigender Teil der Badewanne

Nachteil: die Badewannenkurve läßt sich nur abschnittsweise modellieren

- **IDB-Verteilung (vollständig analytische Beschreibung)**

$$\lambda(t) = \alpha t + \frac{\gamma}{1 + \beta t}$$

α, β, γ : Parameter Die Kurve ist badewannen

förmig für $0 < \alpha < \beta\gamma$

Lognormalverteilung mit transformierter Größe $x = \ln(t)$

11.2.4 Zuverlässigkeitstests

Ausfälle sind selten. --> Verfahren die eine Beschleunigung des Alterungsprozesses durch höhere thermische, elektrische oder mechanische Belastung der integrierten Schaltung basieren.

Ursachen für Ausfälle:

- Korrosion
- Interdiffusion benachbarter Materialien
- Materialwanderung (Elektro- Thermomigration)
- Materialermüdung
- betriebsbedingte Ausfallmechanismen

temperaturbedingte Lebensdauer:

$$\ln(t_F) = C + \frac{E_a}{kT}$$

E_a : Aktivierungsenergie

t_F : Lebensdauer

==> große Beschleunigung der Alterung möglich

Bei erhöhten Strom- / Spannungsbelastungen werden nur geringe Beschleunigungen erzielt