

Technologie der Leistungselektronik

Heft 1
— Doppelheft —

Zyklus I
Scheibenprozesse

Technologie der Leistungselektronik

Allgemeingültige Arbeitsunterlage für wissenschaftlich-technische Mitarbeiter

im VEB MLS

Heft 1

Doppelheft

Zyklus I - Scheibenprozesse

Autoren:

Dr. sc. nat. U. Mohr
Dipl.-Phys. A. Gottbehüt
HS-Phys. G. Förster
Dipl.-Ing. V. Storch
Dipl.-Ing., P. Creutzburg
Dr. rer. nat. D. Zach

Herausgegeben von:

Betriebssektion der KDT
VEB Mikroelektronik "Karl Liebknecht" Stahnsdorf
1533 Stahnsdorf
Ruhlsdorfer Weg

Redaktion:

Kommission für Weiterbildung der KDT-BS
Umschlag: Uwe Reuter
Druck: Reg.-Nr.:
1986

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers!
Alleinvertrieb:

KDT-Betriebssektion im VEB MLS



Vorwort

In den letzten Jahren hat die Mikroelektronik eine außerordentlich große Bedeutung erlangt und viele Zweige der Technik geradezu revolutioniert. Sie gehört zu den Schlüsseltechnologien, denen auf dem XI. Parteitag der SED besondere Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

Einen Teil der Mikroelektronik bildet die Leistungselektronik, deren führender Bauelementehersteller in der DDR der VEB Mikroelektronik "Karl Liebknecht" Stahnsdorf ist.

In Gemeinschaftsarbeit im Rahmen der Betriebssektion der KDT des VEB Mikroelektronik "Karl Liebknecht" Stahnsdorf entstand die vorliegende Schriftenreihe, deren Ziel es ist, Facharbeiter und Absolventen verschiedener Fachrichtungen mit dem umfangreichen Wissensgebiet der Technologie der Leistungselektronik vertraut zu machen. Dazu soll die Schriftenreihe in der Berufsausbildung, bei der Erwachsenenqualifizierung und für die schnelle Einarbeitung von Hoch- und Fachschulabsolventen dienen. Sie kann aber sicher auch den auf dem Gebiet der Leistungselektronik arbeitenden Technikern, Ingenieuren und Wissenschaftlern zum Nachschlagen bestimmter Wissenskomplexe nützlich sein.

Da die Hefte von den verschiedenen Autoren bzw. Autorenkollektiven gleichzeitig verfaßt wurden, ließen sich gewisse Überschneidungen bzw. Doppeldarstellungen nicht ganz vermeiden. Gliederung und Stoffauswahl erfolgten entsprechend dem üblichen Fertigungsablauf unter Berücksichtigung von derzeitigen Aufgabenabgrenzungen im Betrieb. Im Heft 6 wurden aus Gründen der Darstellbarkeit einige spezielle Beispiele aus anderen Produktionsgebieten gewählt.

Wir hoffen, daß die in jahrelanger, erfolgreicher Arbeit gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse sich in der Darstellung für den Leser vorteilhaft widerspiegeln.

Wir danken allen, die an dieser Schriftenreihe mitgewirkt haben. Besonderer Dank gilt dem VEB Mikroelektronik "Karl Liebknecht" Stahnsdorf für die vielfältige Unterstützung und der Druckerei der Kammer der Technik Zeuthen für das freundliche Entgegenkommen bei der Drucklegung.

Stahnsdorf, Juni 1987

Dipl.-Ing. E. Bura

Vorsitzender der KDT-Betriebssektion

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Begriffsbestimmung und Abgrenzung Zyklus I	1
2. Spezifische Merkmale der Silizium-Leistungsbau-elemente-Technologie (Abgrenzung zur Mikroelektronik)	1
2.1. Charakterisierung, des Ausgangsmaterials Silizium	7
2.1.1. Strukturelle Kristallparameter	9
2.1.2. Elektrische Parameter	13
2.1.3. Scheibenparameter	15
2.2. Das Prinzip der Sauberkeit/Prozeßhygiene	21
3. Die verschiedenen Grundtechnologien der Leistungsbau-elemente	27
3.1. Die konventionellen Verfahren der Diffusion	27
3.1.1. Dioden	27
3.1.2. Leistungstransistoren	30
3.2. Simultanverfahren der Diffusion	35
3.2.1. Dioden	35
3.2.2. Transistoren	37
3.3. Epitaxie-Verfahren	40
3.3.1. Dioden	42
3.3.2. Mehrschichten-Epitaxie-Technologie (MET) für Transistoren	42
4. Die Hauptverfahrensabschnitte	46
4.1. Silizium-Scheibenreinigung	46
4.2. Herstellungsverfahren für pn-Übergänge	48
4.2.1. Diffusion	48
4.2.1.1. Trägergas-Diffusion	52
4.2.1.2. Flüssigdotierphasen-Diffusion	56
4.2.1.3. Diffusion aus Quellscheiben	58
4.2.1.4. Diffusion aus festen Dotierphasen (CVD-dotierte Oxide)	61
4.2.1.5. Ionenimplantation und Tiefendiffusion	63
4.2.2. Epitaxie	66
4.2.2.1. Zum Epitaxieverfahren	66
4.2.2.2. Einfluß des Substrats	69
4.2.2.3. Einfluß der Reaktions- und Dotiergase	71

	Seite
4.3. Oxidation	71
4.3.1. Trockenoxidation	72
4.3.2. Feuchtoxidation	74
4.4. Fotolithografie	75
4.4.1. Zur Chemie der fotolithografischen Hilfsmaterialien	78
4.4.2. Die Hauptarbeitsgänge der Komplexen Fotolithografie	80
4.4.3. Fotolithografische Kontrollen	89
4.5. Verfahren der Passivierung von pn-Übergängen	91
4.5.1. Planartechnik-Passivierung	91
4.5.2. Glaspassivierung	93
4.6. Metallisierung von Emitter-/Basis- und Kollektorkontaktflächen	98
4.6.1. Naßchemische Verfahren	98
4.6.2. Physikalische Metallisierung	101
4.6.2.1. Bedampfen	101
4.6.2.2. Katodenerstäuben	104
4.7. Mechanische Bearbeitung von Prozeßscheiben	109
4.7.1. Abdünnen der Prozeßscheiben durch Zwischenläppen	109
4.7.1.1. Zielstellung	109
4.7.1.2. Verfahren und Ausrüstungen	109
4.7.1.3. Materialien	112
4.7.1.4. Kontrollverfahren	113
4.7.2. Mechanische Bearbeitung der Siliziumscheiben nach dem Epitaxieprozeß	113
4.7.3. Grabenherstellung durch Sägen	114
5. Das Problem der Einheitstechnologie, insbesondere für vergrößerte Scheibendurchmesser	115
6. Kontrollmessungen im Zyklus I	117
Literaturverzeichnis	122
Angewendete Kurzzeichen	124

1. Begriffsbestimmung und Abgrenzung Zyklus I

Der Begriff Zyklus I entstammt dem täglichen Sprachgebrauch in der Halbleiter-Branche. Er bezeichnet den Komplex von Verfahren zum Herstellen eines Halbleiterbauelementes, dessen Bearbeitungsobjekt die Halbleiterscheibe ist.

In der Leistungselektronik ist das gegenwärtig ausschließlich die Siliziumscheibe.

Genau genommen beginnt der Zyklus I mit der Eingangskontrolle der Halbleiterscheibe – hierfür gelten die mit der TKO vereinbarten Eingangsprüfungen - und er endet mit dem letzten Arbeitsgang vor dem Zerlegen (Vereinzeln) der Halbleiterscheibe in die einzelnen, bauelementegerechten Kristallplättchen (Chips).

Während in der Mikroelektronik-Technologie im Zyklus I stets das elektrisch voll funktionsfähige Kristall-Chip (lediglich ohne elektrische Anschlüsse und Gehäuse) in nahezu allen wichtigen Daten prüffähig hergestellt wird, ist das bei den leistungselektronischen Technologien nur zu einem Teil der Fall. Die Technologien der verschiedenen zeitlichen Entwicklungsstadien entsprechen jedoch dem Trend in Richtung auf das Prinzip der Mikroelektronik, d. h., die Herstellung des voll funktionsfähigen Chips innerhalb des Zyklus I.

Dieser Entwicklungstendenz entsprechen z. B. die Transistor-Technologien in der Reihenfolge

1. konventionelle Technologie
2. Technologie der Sofortabdeckung
3. Technologie der Glaspassivierung.

2. Spezifische Merkmale der Silizium-Leistungsbaulemente-Technologie

(Abgrenzung zur Mikroelektronik)

Die Grenzen zwischen der Leistungselektronik und der Mikroelektronik sind fließend; dennoch lassen sich für die häufigsten Produkte der beiden technischen Entwicklungszweige typische Merkmale angeben. So handelt es sich im allgemeinen bei der Leistungselektronik um diskrete Einzelbauelemente, die für größere elektrische Leistungen ausgelegt sind. Etwas willkürlich, aber durchaus der Praxis nahe kommend, sollen darunter Bauelemente für Ströme $I_F > 0,5 \text{ A}$ und Sperrspannungen $U_{SP} > 100 \text{ V}$ verstanden werden. Die oberen Grenzen des gegenwärtigen internationalen Entwicklungsstandes dürften mit $I_F \sim 2\,000 \text{ A}$ und $U_{SP} \sim 5.000 \text{ V}$ (nicht gleichzeitig in einem Bauelement realisiert) annähernd richtig angegeben sein.

Die Mikroelektronik ist im wesentlichen durch die Integration einer großen Anzahl von einzelnen Bauelementen zu Schaltkreisen oder Schaltkreiskomplexen, monolithisch, in einem einzelnen Halbleiterplättchen hergestellt, charakterisiert.

Obwohl zur Entwicklung und Produktion von leistungselektronischen wie mikroelektronischen Erzeugnissen prinzipiell gleichartige bzw. gleiche Materialien, Verfahren und Anlagen zum Einsatz kommen, gibt es doch eine Reihe technisch-wissenschaftlicher Merkmale, die ganz spezifische Probleme und Lösungsanstrengungen bedeuten. Die wesentlichen Merkmale sind im Vergleich in Tabelle 2.1. zusammengestellt.

Wie in der Tabelle 2.1. angegeben, sind die verschiedenartig leitenden Schichten bei den leistungselektronischen Bauelementen von größerer Dicke. Da deren Herstellung im allgemeinen mit der Anwendung hoher Temperaturen verbunden ist, z. B. bei Diffusion, ist die Temperaturbelastung des Halbleitermaterials im Vergleich zur Schaltkreisherstellung wesentlich größer. Dementsprechend höher sind die Gefahren des Eindringens unerwünschter störender Fremdatome, was zu extremer Sauberkeit in der Technologie zwingt (häufige Reinigungsarbeitsgänge, z.B. vor Hochtemperaturschritten; Anwendung von Getterverfahren zur Schwermetallgetterung, gezielte Ablagerung der Schwermetallverunreinigungen in elektrisch inaktiven Scheibengebieten bzw. in nach dem Gettern abtragbaren Kristallbereichen; Anwendung von Schutzschichten).

Die metallischen Elektrodenschichten, z. B. Aluminium, sind dicker als bei mikroelektronischen Bauelementen, bedingt durch die höheren Ströme einerseits und andererseits, um die beim Bonden (auf den elektrisch aktiven Chipflächen) eingetragenen Energiebeträge so abzuschwächen, daß sie für das Kristallelement unschädlich sind. Dicke Metallschichten haben ferner Probleme der Fotolithografie zur Folge (Unterätzungserscheinungen, Flankensteilheit der Schichtböschungen), siehe Abschnitt 4.4.

Die Fragen der Kontaktschichten für die Chipkontaktierung auf das Gehäusebauteil sind in der Leistungselektronik-Technologie komplizierter. Während für Schaltkreise die Forderungen nach guter Wärme-Leitfähigkeit und mechanischer Festigkeit ganz allgemein zu erfüllen sind, kommen für einen Leistungstransistor z. B. hinzu:

- gute elektrische Leitfähigkeit,

- Haftfestigkeiten der Schichten, auch bei periodischen, mechanischen Verbiegungen, hervorgerufen durch thermische Einflüsse bei Wechsellast.

Ein weiteres wesentliches Merkmal ist die Art des Schützens der pn-Übergänge.

Die so genannte Planarstruktur, die für die Mikroelektronik typisch ist, nimmt in der Leistungselektronik nur einen geringen Umfang ein. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß die pn-Übergänge alle auf einer Seite der Halbleiterscheibe - der polierten - an die Oberfläche stoßen und dort durch eine oder mehrere anorganische Deckschichten geschützt werden. Meistens handelt es sich um Siliziumoxidschichten. Bei leistungselektronischen Bauelementen werden die pn-Übergänge (überwiegend mindestens die hoch-sperrenden) erst durch die Vereinzelung der Halbleiterscheibe in Chips bzw. durch Einsenken von Gräben an die Oberfläche gebracht, meistens so, daß die pn-Oberflächen gleichzeitig die seitlichen Begrenzungsflächen der Plättchen sind.

Insbesondere bei hochsperrenden pn-Übergängen ist dabei die Art der Grabeneinsenkung bzw. der Vereinzelung schon von grundlegender Bedeutung für die Sperreigenschaften (Sperrkennlinie) des Bauelementes.

Sofern mechanische Methoden, wie z. B. Trennschleifen mit Diamantscheiben oder Ultraschall-Stoßläppverfahren eingesetzt werden, müssen die mechanischen Kristallstörungen erst beseitigt werden, ehe die eigentliche Passivierungsbehandlung vorgenommen werden kann.

Den mechanischen Bearbeitungsverfahren kommt daher in der Leistungselektronik eine größere Bedeutung zu als in der Mikroelektronik (siehe hierzu Abschnitt 4.7.).

Abb. 2.1. dient der Veranschaulichung der Unterschiede zwischen rein planaren Bauelementen und solchen der Leistungselektronik.

Die angezogenen Positionen zeigen folgende Einzelheiten der Bauelemente:

- | | |
|------------|---|
| 1, 2, 3, 4 | Schichten verschiedenartiger Leitfähigkeit bzw. Leitungsart im Si-Chip; |
| 5, 6, 7 | Übergänge zwischen den verschieden leitenden Schichten; |
| 8 | Oxid; |
| 9 | Metallisierung; |
| 10 | Elektroden; |
| 11 | Abdeckstoff für pn-Übergang |

Teilbild b) links z. B. Glas; rechts z. B. Silikongummi

Tabelle 2.1. auf Seite 6 zeigt Vergleiche spezifischer Merkmale der Leistungselektronik mit denen der Mikroelektronik.

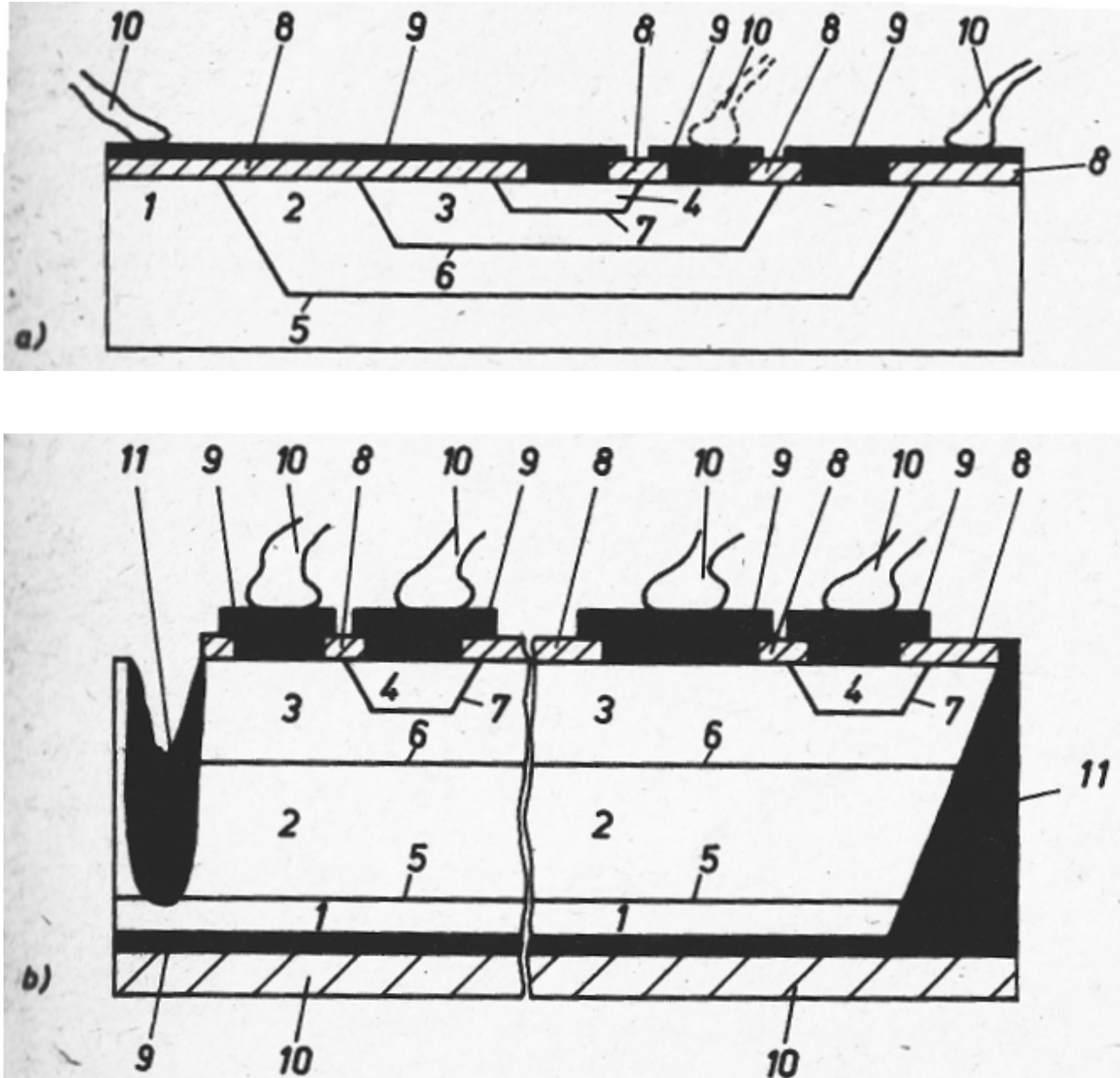


Abb. 2.1. Transistorchips (stark schematisierte Schnittdarstellung)

a) Planartechnologie

b) Leistungstransistor-Technologie

linkes Teilbild: Glaspassivierung des hochsperrenden pn-Überganges

rechtes Teilbild: Passivierung konventionell mit Silikongummi

<u>Merkmal</u>	<u>Leistungselektronik</u>	<u>Mikroelektronik</u>
geom. Abmessung der einzelnen elektr. Funktionseinheit	groß (mm-Bereich)	sehr klein (μm -Bereich)
Schichtenaufbau des Einzelelementes: Dicke der elektr. aktiven Schichten	5 bis einige 100 μm	5 μm
laterale Abmessungen	gemäß Chip-Abmessung	sehr klein (μm -Bereich)
Siliziumscheiben im Eingangszustand	Anwendung von geläpften Scheiben (z. B.: - Gleichrichter und Kollektorflächen beim Transistor) neben einseitig polierten Scheiben Scheibendicke beeinflusst direkt die elektr. Kenndaten des BE und muß eng angepaßt sein.	Einsatz von einseitig polierten Scheiben ausschließlich Scheibendicke beeinflusst die elektr. Kenndaten des BE nur indirekt (Wärmeableitung größere Auswahlmöglichkeiten sind gegeben).
Forderungen an Mikrohomogenität hinsichtlich des spez. elektr. Widerstandes und der strukturellen Perfektion	hohe Forderungen	weniger hohe Anforderungen – Angleichung der Forderungen bei sehr hoher Integrationsdichte bzw. Integration großer Anzahlen von Einzelelementen
Elektrodenanschlüsse	beidseitig am Chip auf elektrisch aktivem Gebiet Kombination zwischen Löten (Kollektor bei Transistoren; Gleichrichter überwiegend beide Elektroden) und Bonden	einseitig am Chip auf elektr. inaktivem Gebiet Im Randbereich der Chips Bonden fast ausschließlich (siehe Lehrbrief Nr. 3)
Lage der pn-Übergänge,	zumindest die hochsperrenden pn-Übergänge treten an den Trennflächen der Chips bzw. in extra eingebrachten Passivierungsgräben an die Oberfläche; Vereinzelungsverfahren haben Einfluß auf Sperrspannungseigenschaften	pn-Übergänge laufen alle zu einer Seite des Chips zur Planarseite hin. Vereinzelungsverfahren haben keinen Einfluß auf Sperrspannungseigenschaften.

Tabelle 2.1. Vergleich spezifischer Merkmale der Leistungselektronik mit denen der Mikroelektronik .

2.1. Charakterisierung des Ausgangsmaterials Silizium

Während die Mikroelektronik fast ausschließlich Siliziumscheiben aus so genannten Czochralski-Kristallen einsetzt, d. h., Kristallen, die nach einem von Czochralski eingeführten Verfahren aus einer Schmelze im Tiegel gezüchtet werden (abgekürzt CZ-Kristalle), basiert die Leistungselektronik auf der hauptsächlichlichen Verwendung von tiegelfrei gezüchteten Einkristallen (abgekürzt FZ-Kristalle), abgeleiteter Ausdruck von floating-zone-crystal) mit Ausnahme von Substratscheiben für Epitaxieverfahren (CZ-Kristalle).

Die wesentlichen Gründe dafür liegen in der höheren Reinheit des FZ-Siliziums und in einem geringeren Gehalt an strukturellen Mikrodefekten, was auf den höheren Reinheitsgrad zurückzuführen ist. Die Verunreinigung mit der größten Konzentration im CZ-Silizium ist der Sauerstoff, der durch den Kontakt der Schmelze mit dem Tiegel (synthetischer Quarz) aus diesem herausgelöst wird.

Die typischen Fremdatomkonzentrationen in CZ- und FZ-Kristallen enthält Tabelle 2.2.

Element	Konzentration/Atome cm ⁻³	
	CZ-Kristalle	FZ-Kristalle
Na	$2 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$
Fe	$4 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$
Cu	$1 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{11}$
Ag	$5 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{11}$
Au	$1 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$
C	$6 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$
O	$5 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{15}$
	bis	bis
	$1 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{15}$

Tabelle 2.2. Typischer Gehalt von Fremdatomen in CZ- und FZ-Siliziumkristallen

Die hohen Ansprüche, die durch die Integrationsdichte in der Mikroelektronik an die Perfektion des Kristallmaterials bez. der Mikrodefekte gestellt werden, können durch Bearbeitung der Scheiben mit modernen Verfahren (Intrinsic-Getterung, Laser-Behandlung) in dünnen, jedoch für die Schaltungstechnologien ausreichend dicken Bereichen der Halbleiterscheiben realisiert werden. Diese auf die der Oberfläche der Siliziumscheibe nahe gelegenen Schichten begrenzte Verbesserung ist jedoch für die Leistungselektronik keine Lösung, da hier entsprechend der gesamten Scheibendicke elektrisch aktives Kristallmaterial vorliegt.

In der Leistungselektronik können für bestimmte Sortimente von Bauelementen, z. B. für kleinflächige Dioden mit niedrigeren Sperrspannungen, etwa Chipflächen $A = 4\text{mm}^2$ und $U_{\text{sp}} = 500\text{ V}$, auch CZ-Kristalle eingesetzt werden. Vorerst bleibt die Anwendung von solchem Material jedoch auf Billigtechnologien beschränkt.

CZ-Kristalle finden ferner als Substratscheiben bei Epitaxie-Technologien Verwendung. Bei den FZ-Kristallen ist ein spezielles Sortiment n-leitender Kristalle, besonders zu erwähnen, welches für extreme Anforderungen (große Chipflächen und hohe Sperrspannungen) zur Anwendung kommt. Es wird durch unterschiedlich langen Beschuß von hochgereinigten FZ-Kristallen mit thermischen Neutronen (in einem Reaktor) und nachfolgendes Ausheilen hergestellt.

Die Dotierung basiert auf einer Kernreaktion. Das in jedem Silizium enthaltene $\text{Si } 30$ -Isotop wird in radioaktives $\text{Si } 31$ umgewandelt, das dann in kurzer Zeit unter Aussendung von β -Strahlung in das stabile Phosphorisotop $\text{P } 31$ übergeht. Die Kernreaktion wird durch folgende Reaktionsformel beschrieben:



So genanntes neutronendotiertes Silizium zeichnet sich durch eine besonders große Homogenität des elektrischen Widerstandes (Makro- und Mikrohomogenität) aus.

Siliziumscheiben werden in den Durchmessern 36; 51; 62; 75; 100; 125 und 150 mm hergestellt; FZ-Kristalle sind gegenwärtig bis 75 mm verfügbar. Die 100 mm-Si-Scheibe ist in Vorbereitung.

Die Haupt-Dotierungselemente sind Phosphor (für n-leitende Kristalle), Bor und Aluminium (für p-leitende Kristalle). Daneben werden insbesondere für hochdotierte, hochleitfähige n-Kristalle, z.B. für die Anwendung als Substrat für die Epitaxie, auch Arsen (As) und Antimon (Sb) eingesetzt.

2.1.1. Strukturelle Kristallparameter

Halbleiterkristalle für technische Zwecke sind Einkristalle, d. h. sie besitzen einen regelmäßigen atomaren Aufbau. An jeder Stelle des kompakten Kristalls liegt die gleiche Anordnung der Halbleiteratome vor. Atomare Halbleiter wie Silizium und Germanium gehören dem kubischen Kristallsystem an und kristallisieren im speziellen Gittertyp des Diamanten.

In jedem Einkristall (Kristallgitter) existieren bestimmte ausgezeichnete kristallographische Ebenen (Netzebenen, atomare Ebenen, Kristallflächen) und kristallographische Richtungen (Gitterrichtungen). So ist z. B. die Richtung, in der ein Kristall gezüchtet wird, stets eine bestimmte kristallographische Richtung meist eine der Hauptrichtungen.

Die kristallographischen Ebenen werden mit den sogenannten Millerschen Indizes bezeichnet. Es sind dies die ganzzahlig angegebenen Verhältnisse der reziproken Achsenabschnitte (in Atomabständen) einer atomaren Ebene auf den Achsen des Kristallsystems. Die Hauptebenen bei Silizium sind:

$\{111\}$, $\{100\}$ und $\{110\}$.

Die entsprechenden Richtungen verlaufen senkrecht dazu. Spezielle Ebenen werden in runden Klammern und ggf. mit Minuszeichen über der entsprechenden Zahl angegeben. Das Minuszeichen weist darauf hin, daß es sich um die Achsenabschnitte im entgegengesetzten Richtungssinn vom Nullpunkt aus handelt.

Bei Ebenen wird verallgemeinernd eine geschweifte Klammer als Symbol für kristallographisch gleichartige, aber mehrfach in jeweils unterschiedlichen Richtungen zu einem festen Gitterelement vorkommenden Ebenen geschrieben (s. o.). Symbole für verallgemeinerte Richtungen stehen in spitzen, solche für spezielle in rechteckigen Klammern (Verwendung des Minuszeichens wie bei den Ebenen).

Da die Einkristalle nicht ideal wachsen, weisen sie in jedem Fall mehr oder weniger viele Strukturbaufehler auf (lokale Stellen, an denen der atomare Aufbau nicht den strengen Regeln des Gitters folgt). Für diese Fehler sind mehrere allgemeine Ausdrücke gebräuchlich wie Strukturdefekte, Gitterdefekte, Gitterfehler, Strukturbaufehler.

Es gibt eine Reihe spezieller Arten von Fehlern. Jede Fehlerart hat ihre spezifischen kristallphysikalischen Wirkungen. Hier muß auf das Studium der Spezialliteratur verwiesen werden. Einige der wichtigsten Fehlerarten seien hier aufgezählt, da sie aufgrund ihres Einflusses auf die

halbleiterphysikalischen Größen (speziell bis hin zu den Kenndaten der Bauelemente) Einfluß haben können und zum täglichen Sprachgebrauch in der Halbleitertechnik gehören.

Kristallstörungen

Begriff	Erklärung in Anlehnung an KME-Standard, KME-S/013
Versetzung	Kristallstörung 1. Ordnung (eindimensional), bei der sich die Baufehler längs offener oder geschlossener Linien im Kristall erstrecken Offen heißt in diesem Fall, daß sie von Oberflächen oder gröberen Störungen begrenzt sind.
Versetzungsdichte (epd)	Maß für den Versetzungsinhalt in einem bestimmten Kristallvolumen angenommen als: Anzahl der Versetzungsdurchstoßpunkte durch eine bestimmte Ebene, bezogen auf die Flächeneinheit; Bestimmt aus der Anzahl der Ätzgruben je cm ²
mittlere Versetzungsdichte	arithmetisches Mittel der Versetzungsdichte von mehreren Stellen der Scheibe
max. Versetzungsdichte	größte lokale Versetzungsdichte auf der Scheibe
Versetzungsreihe	lineare Anordnung von Ätzgruben mit erhöhter Dichte, die in der Regel nicht streng kristallographisch ausgerichtet ist
Gleitlinie	lineare Anordnung von Ätzgruben mit erhöhter Dichte, die in <110>-Richtung verläuft
Versetzungsätzgrube	tiefe Ätzgrube mit Fußpunkt an der Austrittsstelle einer Versetzung an der Scheibenoberfläche
Flache Ätzgrube	durch Mikrodefekte verursachte flache Ätzgrube ohne Fußpunkt, die vorzugsweise bei versetzungsfreiem Silizium auftritt
Swirls	spiralförmige, wolkige oder ringförmige Anhäufungen von flachen Ätzgruben Die Ursache von Swirls sind strukturelle Mikrodefekte, wie z.B. kleinste, dem µm-Bereich zuzuordnende Versetzungsschleifen, an deren Entstehung Kohlenstoffausscheidungen beteiligt sind.
Striations	nahezu periodisch auftretende Inhomogenitäten der Fremdstoffverteilung in der Scheibe. Striations können durch die bewußt zugesetzten Dotierstoffe oder auch durch Fremdstoffe bei der Kristallzüchtung entstehen.
Zwillingslamelle	Bereich der Scheibe, der durch Zwillings Ebenen vom umgebenden Silizium getrennt ist.

besser:

sich abgrenzt, hauptsächliche Zwillingssebene im Silizium ist die $\{111\}$ -Ebene. Die Lamellen-Richtung ist auf der $\{111\}$ -Ebene die, $\langle 110 \rangle$ -Richtung

Mikrodefekte

mikroskopische Störungen im Kristallvolumen, wie z.B. cluster; Ausscheidungen und Versetzungsschleifen

Korngrenze

Grenze zwischen Scheibenbereichen mit stark - nicht gesetzmäßig - voneinander abweichenden kristallographischen Orientierungen

Es gibt auch Korngrenzen mit gesetzmäßig voneinander abweichenden Orientierungen zweier angrenzender Kristallbereiche, diese sind aber praktisch nicht relevant (Spezialfälle).

Wasserstoffporen

Kristallstörung, die speziell bei Material auftritt, das in wasserstoffhaltiger Atmosphäre hergestellt worden ist und die beim Ätzen als gut sichtbarer Krater bzw. Stäbchen erscheint. Es handelt sich um einen die Normalfunktion des Bauelements zerstörenden Defekt.

Jede Kristallsorte besitzt bei der Lieferfirma (VEB Spurenmetalle Muldenhütten) ein Sortenblatt.

Die Mindestangaben hinsichtlich der strukturellen Kristallparameter beziehen sich auf folgende Größen:

1. *Hauptorientierung der Si-Scheiben:*

In der Leistungselektronik ist dies die $\langle 111 \rangle$ -Orientierung, d. h., die Oberfläche der Scheibe liegt einer (111) -Ebene parallel.

2. *Fehlorientierungswinkel:*

Das ist entweder der Fehler, der bei Einstellung der kristallographischen Orientierung der Oberfläche gemäß 1. auftritt (meist dann als $\pm 1^\circ$ angegeben) oder d. h., die Scheibenoberfläche liegt in dem Fall keiner kristallographischen Hauptebene parallel, sondern einer anderen, die nach Winkelbetrag und Richtung der Abweichung von der Hauptfläche angegeben wird. Solche fehlorientierten Oberflächen werden z. B. bei Substratscheiben für die Epitaxie angewendet.

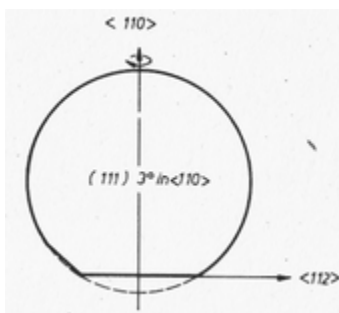


Abb. 2.1.1. S1-Scheibe mit gezielter Fehl-Orientierung $(111) 3^\circ$ in $\langle 110 \rangle$

3. Strukturbaufehlergehalt:

3.1. Versetzungsdichte

Für FZ-Kristalle des Durchmessers $d = 50 \text{ mm}$ gilt generell $epd = 0$, d. h., es können einzelne Versetzungen auftreten, was aber in der Regel nicht der Fall ist. Damit dürfen auch die Fehler, welche sich aus Versetzungen aufbauen, nicht enthalten sein, wie z. B. Versetzungsreihen, Gleitlinien, Korngrenzen.

3.2. Wasserstoffporen

Für FZ-Kristalle der Leistungselektronik gilt die Forderung nach Null Wasserstoffporen je Scheibe.

3.3. Swirls:

Swirl - Defekte sind unzulässig. Diese Forderung ist streng nur für den Zustand nach der Kristallzüchtung einzuhalten, d. h., ohne eine nachfolgende Temperbehandlung, Swirls, d. h., ihr Auftreten und ihre Wirkungen im technologischen Prozeß der Bauelementeherstellung sind noch Gegenstand von Grundlagenuntersuchungen.

2.1.2. Elektrische Parameter

Hier soll eine Beschränkung auf die Angaben erfolgen, welche im Sortenblatt des Si-Scheibenlieferanten vereinbart sind:

1. Leitungstyp

Der Leitungstyp N oder P ist in der Schlüssel-Nr. der Sorte enthalten. (3. Stelle von vorn).

Das Dotierungselement ist an der 4. Stelle von vorn zu erkennen.

Beispiel Schlüssel-Nr.: 7FNP

Es bedeuten: 7 - 76 mm Durchmesser der Scheibe

F - Züchtungsart FZ

N - n-leitend

P - Dotierungselement Phosphor.

2. Spezifischer elektrischer Widerstand

Für die Bauelemente der Leistungselektronik ist bei direktem Einsatz des Materials zur Ausbildung einer für die Bauelementefunktion entscheidenden Schicht der

Widerstandsbereich von 20 - 200 Ωcm

von hauptsächlichem Interesse. Dabei wird vorzugsweise n-leitendes Material angewendet.

Substratscheiben für Epitaxiebauelemente liegen im Bereich von

$$\rho = 3 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$

Der spezifische elektrische Widerstand wird bei Raumtemperatur

($R_T = 296 \pm 1 \text{ K}/23 \pm 1^\circ \text{C}$) mit dem Vierspitzenverfahren gemessen.

Im Sortenblatt werden grundsätzlich zwei Widerstandsbereiche angegeben. Es sind dies ,

- Sortengrenze und
- Postengrenze.

Die Postengrenze ist der bei einer Überprüfung zu verwendende Grenzwert, der geringfügig erweiterte Grenzwerte zur Sortengrenze beinhaltet. Innerhalb der Sortengrenze müssen 95% aller Scheiben liegen. Gemessen wird im Zentrum der Scheibe oder an 5 Punkten.

(1x Zentrum, 4x diametral gegenüberliegende Punkte am Rand im gleichen Abstand untereinander)

Sofern n-dotierende und p-dotierende Substanzen gleichzeitig in denselben Kristallbereich eingebracht werden, führen sie zur Kompensation ihrer elektrischen Wirkungen (Grad je nach Mengenverhältnis), d. h. es können dadurch sehr hohe spezifische elektrische Widerstände bei Raumtemperatur erreicht werden, die jedoch bei Temperaturbehandlungen, insbesondere im technologischen Prozeß der Bauelementeherstellung, nicht stabil sind. Man spricht in diesen Fällen von Kompensation.

Um sicher zu gehen, daß die n-leitenden Kristalle nicht durch anteilige Kompensation hohe Widerstandsbereiche erlangen, gibt es für n-leitende Kristalle eine Zusatzforderung des maximalen Gehalts an Akzeptoren (p-Leitung verursachend).

Für die Spitzenqualität der in der Leistungselektronik verwendeten Kristalle lautet die Bedingung:

$$N_A \leq 6 \cdot 10^{12} \text{ Atome} \cdot \text{cm}^{-3}.$$

3. Inhomogenität des spezifischen Widerstandes

Sie ist das Verhältnis von den vier größten zu den vier kleinsten Meßwerten des spezifischen Widerstandes eines Scheibendurchmessers.

Sie wird mit der Vierspitzenmethode gemessen. Bei neutronendotierten Siliziumkristallen kann diese Angabe entfallen, da die Homogenität der Dotierungsverteilung durch das Dotierungsverfahren garantiert ist und Dotierungsinhomogenitäten mit dem angegebenen Verfahren nicht nachweisbar sind.

4. Trägerlebensdauer

Sie gibt Auskunft über Störzentren (Verunreinigungen/O-dimensionale Kristalldefekte), an denen erzeugte Ladungsträger rekombinieren.

Sie ist ein relatives Maß für die Reinheit bzw. Perfektion eines Kristalls (z. B. Reinheit von Schwermetallverunreinigungen). Die Trägerlebensdauer des Ausgangs-Siliziums ist nicht gleichzusetzen mit der, die nach dem Bauelemente-Herstellungsprozeß im Halbleiterbauelement gemessen wird.

Die Angabe der Lebensdauer erfolgt in μs . Als Meßverfahren werden angewendet:

- Fotoabklingverfahren,
- Phasenkompensationsverfahren,
- Doppelimpulsverfahren.

Die Lebensdauerwerte sind u. a. abhängig von der Dotierungskonzentration.

Für qualitativ hochwertige versetzungsfreie, n-leitende, phosphordotierte FZ-Kristalle im Bereich von 50 ... 150 cm liegen die Werte z. B. bei $t = 500 \mu\text{s}$.

Abhängig vom Dotierungsverfahren sind die Werte bei Neutronendotierung im gleichen Widerstandsbereich niedriger: $t > 100 \mu\text{s}$.

2.1.3. Scheibenparameter

Die Scheibenparameter, die sich auf die Dicke der Halbleiterscheiben beziehen, haben eine spezifische Bedeutung für die leistungselektronischen Bauelemente, insbesondere Beeinflussung der elektrischen Kenndaten im Durchlaßfall:

- Flußkennlinie,
- Dauerlastbeständigkeit.

Ungleichmäßige Stromverteilung bei Keiligkeit größerer Chips führt zu lokal unterschiedlichem Aufheizen. Zu den Mindestangaben einer Silizium-Scheibensorte gehören folgende Parameter:

1. Durchmesser

(1. Ziffer der Schlüssel-Nr. s. Abschnitt 2.1.2., Punkt 1)

Es bedeuten:

1. Ziffer	Durchmesser
5	$51 \pm 1 \text{ mm}$
6	$62 \pm 1 \text{ mm}$
7	$76 \pm 1 \text{ mm}$

2. Dicke

Dicke wird mit Sortengrenze und Postengrenze angegeben. Für poliert/geätzte Scheiben ist eine Dickentoleranz von $\pm 25 \mu\text{m}$ typisch.

Für spezielle Zwecke der Leistungsbau-elemente-Technologie ist diese Toleranz zu groß. Für solche Fälle, z. B. bei Material für Hochspannungstransistoren einer bestimmten Variante der Dreifach-Diffusions-Technologie (DDT), muß daher eine Unterteilung in Gruppen von 5 µm-Dickenunterschied vorgenommen werden. Die jeweils kleineren Werte in der Dickentoleranz lassen sich bei doppelseitig geläppten Scheiben erzielen (typischer Wert $\pm 10 \mu\text{m}$)

3. *Bearbeitungszustand*

Folgende Zustände sind zu unterscheiden:

Bezeichnung	Vorderseite	Rückseite
LL	geläppt	geläppt
ÄÄ	geätzt	geätzt
PL	poliert	geläppt
PÄ	poliert	geätzt.

Die häufigsten Anwendungen beziehen sich auf LL für Dioden und Gleichrichter und auf PÄ für Transistoren.

4. *Parallelitätsabweichung*

Es ist die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Dickewert einer Scheibe. Die Verhältnisse sind ähnlich wie bei der Dicke. Typische Werte für 51 mm Si-Scheiben sind für die Bearbeitungszustände

doppelseitig geläppt - 7 µm (Bestwert 5 µm) und
poliert geätzt - 20 µm (Bestwert 15 µm).

5. *Unebenheit*

Hierunter versteht man die Differenz in µm zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt einer polierten Scheibenoberfläche unter Ausschluß einer 3 mm breiten Randzone. Derartige Angaben sind wichtig für die Fotolithografie. Es wird mit interferenzoptischen Methoden gemessen. Für PÄ-Scheiben liegen die typischen Werte bei 1 µm (maximal 3 Dellen zugelassen).

6. *Durchbiegung der Scheibe*

Die Durchbiegung wird aus der Differenz der je Scheibenseite einmal im Zentrum gemessenen Höhenwerte bestimmt. Dazu werden Längenmeßgeräte wie Feinzeiger eingesetzt. Die Durchbiegung kann mit speziellen mechanischen Sphärometern gemessen werden (Meßkraft 0,15 N). Je unterschiedlicher der Bearbeitungszustand der beiden Scheibenseiten hinsichtlich der strukturellen Störungen und der Ebenheit desto größer der Wert der Durchbiegung. PÄ-Scheiben weisen folgende Werte auf:

Durchmesser (mm)	typ. Wert (μm)	Grenzwert (μm)
51	15	35
76	15	40
100	20	50

Bei PL-Scheiben mit Durchmesser 51 mm betragen die Werte bis zu 140 μm .

7. Oberflächengüte

Die Oberflächengüte wird durch eine Reihe von Störungsarten des Oberflächenprofils beschrieben, die folgendermaßen unterschieden werden:

- Risse: generell unzulässig,
- Löcher: unzulässig,
- Kratzer auf der Vorderseite: Bei polierten Scheiben der Güteklasse B bis zu einer Gesamtlänge von 0,5 d (d Scheibendurchmesser) zulässig, bei ÄÄ-Material bis 2 d zulässig. Kratzer auf polierten Flächen sind unzulässig (Güteklasse A der Politur).
- Kratzer auf der Rückseite: Bei den Qualitäten ÄÄ, PL und PÄ zulässig bis 2 d,
- Wischer: Es handelt sich um einen typischen Pollerfehler, eine zufällige, flache, grabenförmige Störung mit abgerundeter Kontur (sichtbar im Stereomikroskop, wenn das Licht bei Dunkelfeldbeleuchtung in einem -bestimmten Winkel einfällt, als aufleuchtende Spur, ähnlich einem Haar).

Zulässige Gesamtlänge auf der polierten Fläche bei Güteklasse A bis 1x5 d, bei Güteklasse B bis 390 d.

8. Rauheitsangaben

Der Zustand der geläppten Oberfläche wird durch zwei Größen beschrieben:

mittlere Rauhtiefe	$R_t - 5 \mu\text{m}$
Mittenrauhwert	$CLA - 2 \cdot 10^{-1} \mu\text{m}$.

Für geätzte und polierte Scheiben wird nur die Rauhtiefe angegeben:

geätzt	$R_t - 4,5 \mu\text{m}$
poliert	$R_t - 3 \cdot 10 \text{nm}$
Narbigkeit	$-5 \cdot 10^1 \text{nm}$.

9. Scheibenrand

Neben der üblichen Randgeometrie, die sich durch Trennschleifen und die Nachbearbeitungstechnologien der Scheiben einstellt und im Querschliff einem Rechteck mit undefiniert und wenig abgerundeten Ecken gleicht, besteht die Möglichkeit, in definierter Weise am Scheibenrand abgeschrägte ("angespitzte") Scheiben zu beziehen.

Die Anschrägungen sind unterschiedlich entsprechend ihrem Zweck.

Vorteile ergeben sich durch Anströgen, z. B. als Bruchminderung, Unterdrückung bzw. Abschwächung bei der Epitaxie, Unterdrückung bzw. Abschwächung von Randwulsten bei der Fotolackbeschichtung. Zu beachten ist, daß die Störtiefen am Rand den Störtiefen des Bearbeitungszustandes Rückseite entsprechen. Kantenausbrüche in radialer Richtung - 1 mm Tiefe sind gemäß Standard zulässig. Im übrigen müssen Daten über Randausbrüche vereinbart werden.

10. Orientierungsfasen

Die Halbleiterscheiben besitzen am Rand gerade verlaufende Abflachungen (Fasen).

Die so genannte Hauptfase ist kristallographisch orientiert, d. h., ihre Ebene bzw. Richtung ist identisch mit einer kristallographischen Ebene bzw. Richtung. Die Nebenfase ist in einem bestimmten azimutalen Winkel zur Hauptfase abgebracht.

Die Hauptfase hat bei (111)-Scheiben die Orientierungen $\langle 110 \rangle$ bzw. $\langle 112 \rangle$ für n-leitende Scheiben liegt die Nebenfase in einem Winkel von 45° (Schnittpunkt der Mittelsenkrechten der Fasen), während p-leitende (111)-Scheiben keine Nebenfase besitzen.

In Abb. 2.1.2. sind die für die beiden Leitungstypen geltenden Fasen in jeweils eine Skizze eingezeichnet worden, Teilbild a) entspricht der n-leitenden Scheibe. (Im Fall der p-leitenden Scheibe fehlt Fase 2.)

Im Teilbild b) sind bei n-leitenden (100)-Scheiben die beiden Fasen 1 und 2, bei p-leitenden die Fasen 1 und 3 vorhanden.

Es ist zu beachten, daß es für spezielle technologische Zwecke auch Ausnahmeregelungen gibt. Im Zweifelsfall sollten Informationen eingeholt werden, bzw. es sollte eine Nachmessung erfolgen.

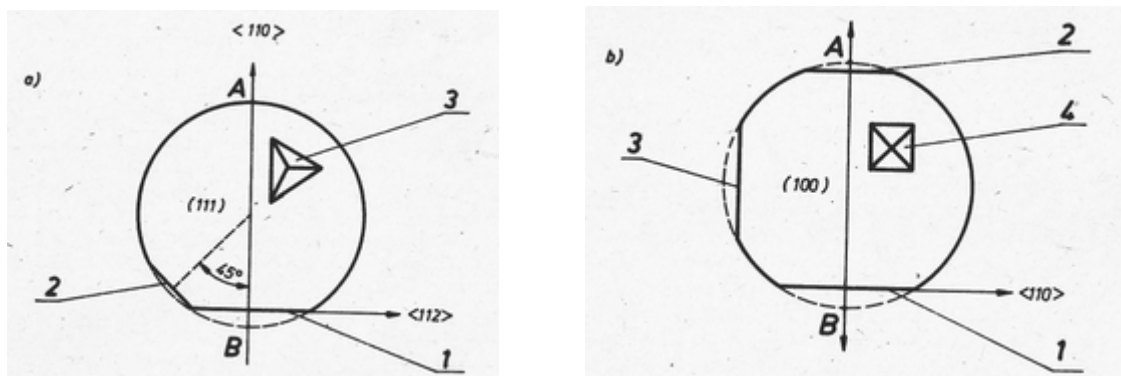


Abb. 2.1.2. Orientierungsfasen an Si-Scheiben

a) (111)-Scheibe

b) (100)-Scheibe

a) 1 Hauptfase, 2 Nebenfase, 3 Ätzgrube bei Orientierungsätzung

b) 1 Hauptfase, 2; 3 Nebenfasen, 4 Ätzgrube bei Orientierungsätzung

2.2. Das Prinzip der Sauberkeit /Prozeßhygiene

Die Hochtemperaturbehandlungen im Zyklus I bedingen eine extreme Sauberkeit aller mit der Siliziumscheibe direkt oder indirekt in Berührung kommenden Stoffe (Schutz vor Verunreinigungen, die eindiffundieren oder sich in Oberflächenschichten festsetzen können).

Unter indirekter Berührung soll eine Übertragung durch einen zweiten Stoff, der als Transportmittel wirkt, verstanden werden. Das Eindringen des Fremdstoffes setzt selbstverständlich immer einen direkten Kontakt mit dem Halbleiterkristall voraus. Verunreinigungen sind unerwünschte feste, flüssige oder gasförmige Bestandteile sowie Mikroorganismen, die beim technologischen Prozeß Fehler verursachen.

Sauberkeit bedeutet in diesem Zusammenhang die Beachtung mehrerer Faktoren:

- a) Chemisch definierter Fremdstoffgehalt aller verfahrensmäßig eingesetzten Substanzen (Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase),
- b) Staub (meist chemisch undefinierbar; in diskreten Teilchen auftretende Fremdstoffe),
- c) Aerosole als Bestandteile der Raumluft,
- d) Gehalt biologischer Keime (Bakterien im Wasser).

zu a):

Die im Zyklus I eingesetzten Substanzen unterliegen definierten Reinheitsforderungen, die sich insbesondere auf den Gehalt an Schwermetallen und Alkalimetallen beziehen (letztere sind für Oberflächenwirkungen an pn-Übergängen von besonderer Wichtigkeit).

In diese strengen Forderungen sind primär alle während der Hochtemperaturbehandlung, z. B. Diffusion und Oxidation, in unmittelbarer Umgebung der Halbleiterscheiben vorhandenen Vorrichtungen eingeschlossen wie:

- Diffusionsmagazine (aus reinstem, synthetischen Quarz hergestellt, Berührungskontakt mit den Halbleiterscheiben)
- Diffusionsrohre (Material wie bei Diffusionsmagazinen),
- Heizer für die Epitaxie/Suszeptoren:
Trägerplatten aus Graphit mit Oberflächenschutzschichten, z. H. SiC oder Kohlenstoff, auf denen die Halbleiterscheiben während des Epitaxieprozesses aufliegen. Die Suszeptoren werden mitbeschichtet und müssen Reinigungsarbeitsgängen unterzogen werden.

Stoffe, die im direkten Kontakt mit dem Halbleitermaterial während der Hochtemperaturprozesse stehen:

- sämtliche Arten von Diffusionsquellen, z. B. Ga_2O_3 , BBr_3 , Dotierflüssigkeiten,
- Gase, wie z. B. Sauerstoff für die Oxidation von Silizium oder Trägergase bei der Diffusion wie Stickstoff und Wasserstoff,
- Reaktionsgase für die Epitaxie, wie z. B. Siliziumtetrachlorid (SiCl_4) und Dichlorsilan: SiHCl_2 ,
- Dotiergase für die Epitaxie und das CVD-Verfahren, wie z. B. Phosphin (PH_3), Diboran (B_2H_6), Arsin (AsH_3), die in verschiedenen konzentrierten Mischungen (meist mit Wasserstoff und Stickstoff gemischt) benötigt werden,
- Reaktionsgase für das CVD-Verfahren, wie z. H. Silan: SiH_4 , Ammoniak: NH_3 ,
- Quellensubstanzen für die Ionenimplantation wie Bortrifluorid (BF_3), Arsentrifluorid (AsF_3), Phosphorpentafluorid: PF_5

Es sind auch die Gerätschaften und Materialien einzubeziehen, mit denen die Halbleiterscheiben vor den Hochtemperaturschritten in Berührung kommen, wenn danach nicht noch einmal eine spezielle Reinigung erfolgt. Dazu sind zu zählen:

- Transport- und Lagermagazine,
- Pinzetten und andere Vorrichtungen zur individuellen Scheibenbewegung (Saugheber etc.).

Es gehören dazu sämtliche Chemikalien, die im Verfahrenskomplex zum Einsatz kommen. Die Reinheitsforderungen sind unterschiedlich hoch, je nachdem, ob die auf der Oberfläche der Halbleiterscheiben vorgenommene Behandlung ein letztes Stadium vor der Hochtemperaturbehandlung darstellt oder der Zustand vorher durch noch weitere Behandlungen wieder beseitigt oder verändert wird bzw. welcher Arbeitsschritt folgt. Es sind besonders zu nennen:

- Reinigungschemikalien für die vielfältigen technologischen Scheibenreinigungsschritte (Lösungsmittel, Säuren, Laugen, Netzmittel).

Es zählen weiterhin dazu:

- Ätzchemikalien, die zu einem Abtragen der Halbleiterscheibe verwendet werden, hauptsächlich HF , HNO_3 , NaOH , KOH ,
- Fotochemikalien, wie z. B. Fotolacke und spezielle Lösungsmittel dafür,
- Wasser-Reinheit

Da Wasser in vielfältiger Weise als Lösungs- und Spülmittel eingesetzt wird, werden die ionischen Verunreinigungen (elektrisch wirksame Verunreinigungen) durch Ionenaustauscher herausgezogen und die diesbezügliche Qualität des Wassers wird

kontinuierlich durch die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes kontrolliert.

Typische Werte einer guten Wasserqualität liegen bei - 20 MOhm*cm.

Bestimmte Forderungen bestehen auch für die Kontaktierungsmetalle.

- Metalle, die durch Verdampfungs- oder Sputterverfahren auf die Halbleiterscheibe aufgebracht werden wie Al, Ni und Au (hier vor allem Forderungen nach Alkalimetallfreiheit).

zu b):

Staub besteht aus sehr kleinen Schwebeteilchen, die unter normalen Bedingungen in Gasen bzw. in der Luft vorkommen bzw. aus größeren Teilchen, die durch mechanischen Abrieb von im Prinzip allen in der Arbeitsumgebung vorhandenen Substanzen entstehen können. Auch der Mensch ist in diesem Zusammenhang als wesentliche Staubquelle zu betrachten

Die Kontrollen auf Staub werden mit speziellen Staubmeßgeräten durchgeführt.

Wichtig ist dabei die Erfassung mehrerer Meßpunkte in einem Raum und die kontinuierliche Kontrolle.

Nach Störungen der Luftversorgung sollte besonders sorgfältig nachgemessen werden. Im allgemeinen braucht das System eine bestimmte Zeit, ehe es sich wieder auf den Normalwert eingepegelt hat. Staub kann auf verschiedene Weisen wirken. Es sind hier zu nennen:

1. Geometrische Störungen im Schichtenaufbau, z. B. Unterbrechungen der Schicht an der Stelle des Staubkornes. Die Folge können Löcher in der Schicht sein bzw. Konturstörungen an der Kante einer Schicht. Besonders kritisch sind Staubteilchen bei der Fotolithografie. Einmal kommt es beim Festsetzen des Staubkornes auf einer ungedeckten Fläche der Schablone zu einem punktförmigen Wiederholungsfehler in der belichteten Schicht (nach dem Entwickeln), so oft die Schablone angewendet wird. Staub kann bei Kontaktbelichtung mit Fotoemulsionsschablonen auch zu Kratzern auf gedeckten Flächen führen, was prinzipiell gleichartige Störungen erzeugt.
2. Elektrische Punktionsstörungen den Halbleiterbauelementes, z. B. als Folge der geometrischen Schichtstörungen, dabei wäre besonders an die Diffusion lateral begrenzter Gebiete (Emitter-Diffusion) zu denken. Sofern der Staub Schwermetalle enthält, kann er sich degradierend auf die Trägerlebensdauer im Bauelement sowie negativ auf die Sperrspannung auswirken (Anomalien der Sperrkennlinien).

Um den Arbeitsbereich den Zyklus I grundsätzlich von Staub freizuhalten (ein Ziel, welches ideal nicht zu erreichen ist und ansonsten als Kompromiß zwischen technischem Erfordernis und ökonomischem Aufwand für Staubschutzmaßnahmen realisiert wird), werden folgende Maßnahmen angewendet:

- Anwendung von Reinräumen (clean-rooms):

In einem an sich schon staubarm gehaltenen Raum wird aus abriebfestem Material, vollkommen dicht geschlossen, ein Innenraum hineingebaut, durch den nur staubgefilterte Luft, in laminarer Strömung einer bestimmten Vorzugsrichtung - Beseitigung von Staub aus Raumquellen, der während der Tätigkeit entsteht - geleitet wird und der nur über spezielle Schleusen in staubgeschützter Kleidung betreten worden darf (siehe Abb. 2.2.1.).

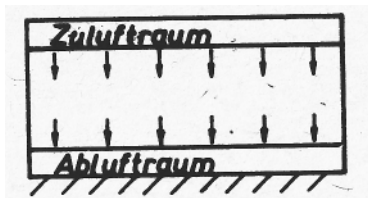


Abb. 2.2.1. Reinraum Luftströmung

Reinheitsklasseneinteilung gemäß TGL 33367/01

Klasse	Maximale Teilchenzahl je Liter mit Durchmesser	
	= 0,5 μm	= 5 μm
10	0,35	-
100	3,5	-
1000	35	0,2
10 000	350	2,3
100 000	3 500	25

Tabelle 2.2.1.

Die Staubgüte von Räumen und Arbeitsplätzen wird durch standardisierte Staubklassen ausgewiesen (siehe Tabelle 2.2.1.). Der Staubgehalt wird messend überprüft.

Für anspruchsvolle Aufgaben der Leistungselektronik ist die Staubklasse 100 charakteristisch, d. h., es sind maximal 3,5 Teilchen mit einem Durchmesser - 0,5 μm je Liter Raumluft zugelassen, jedoch kein Teilchen - 5 μm .

- Filtern von Flüssigkeiten aller Art (Säuren, Laugen, Lösungsmittel, Fotolacke etc.).

Dieser Vorgang wird als Ultrafiltration bezeichnet. Filtern erfordert zumeist eine Druckstufe, da die feinporigen Filter einen erheblichen Strömungswiderstand bilden (speziellere Angaben s. Lehrbrief Nr. 7).

- Filtern der Raumluft, sofern kein spezieller Reinraum notwendig ist. Hierzu werden Faservliesfilter-Einsätze verwendet. Wichtig ist der regelmäßige Wechsel solcher Filter, da sich diese im Laufe des Betriebes zusetzen.
- Verwendung von staubgeschützten Arbeitsplätzen (Staubschutzboxen),
- ständiges, feuchtes Wischen mit nicht fasernden Lappen,
- ununterbrochener Lauf der Luftversorgung (beim Abschalten gibt es Luftwirbel und Einschleppen des Staubes aus den Abluftschächten).
- Spezialkleidung (aus synthetischem Material – nicht fasernd - besonders wichtig ist der Einschluß der Haare, die als Teilchenquelle wirken).

zu c):

Aerosole sind kleinste Flüssigkeitströpfchen in der Luft mit verschiedenen Gehalten von chemischen Stoffen, die unter bestimmten Bedingungen sich auf den Halbleiterscheiben abscheiden können.

zu d):

Bakteriengehalt des Wassers

Bakterien (Keime) bestehen aus Makromolekülen, in denen ein wesentlicher Bestandteil Kohlenstoff ist. Sie haben Ausmaße im μm -Bereich. Ist das Wasser mit Bakterien angereichert, dann bleiben bei Spülprozessen diese auch z. T. auf der Oberfläche haften, insbesondere bei profilierten Oberflächen. Bei Temperaturprozessen verbrennen die Bakterien und Kohlenstoff bleibt jeweils als lokale Störung der Oberfläche zurück.

Daher sind Bekämpfungsmaßnahmen gegen das Bakterienwachstum im Spülwasser notwendig (Behälter und Rohrleitungssystem müssen im Bedarfsfall sterilisiert werden). Die Reinheitsangabe in dieser Hinsicht ist die Keimzahl. Eine gute Wasserqualität wird durch eine Keimzahl von $K_z = 0$ pro 1 charakterisiert. Die Keimzahlen werden von Zeit zu Zeit kontrolliert.

3. Die verschiedenen Grundtechnologien der Leistungsbaulemente

3.1. Die konventionellen Verfahren der Diffusion

Bauelementekonstruktion und Verfahren zur Realisierung derselben bilden eine Einheit und müssen aufeinander abgestimmt sein. Als konventionelle Verfahren der Herstellung von unterschiedlich leitenden Schichten im Siliziumkristall der Leistungsbaulemente sollen die verstanden werden, welche über viele Jahre hinweg angewendet wurden, noch heute anteilig für bestimmte Spezialtypen Bedeutung haben und im wesentlichen durch folgende Merkmale bestimmt sind:

1. Einsatz von tiegelfrei gezüchteten Silizium-Einkristallen (FZ-Kristallen), durch deren spez. elektr. Widerstand die Höhe der Sperrspannung vorbestimmt ist,
- 2 Anwendung der Gasphasen-Diffusion,
3. Zwischenabtrag von Diffusionsschichten.

3.1.1. Dioden

Zur Herstellung des einen pn-Überganges einer Diode bzw. eines Gleichrichters wäre prinzipiell nur ein Diffusionsvorgang nötig. Um jedoch die Höhe der durch die Dotierung des FZ-Kristalls vorgegebenen maximalen Sperrspannung erreichen zu können und dabei hinreichend gute Durchlaßeigenschaften des Bauelementes zu realisieren, wozu gut leitende Kontaktgebiete gehören, wird die psn-Variante, eine der häufigsten Konstruktionsvarianten für Dioden angewendet.

Der Aufbau besteht aus 3 unterschiedlich leitenden Schichten, einer p- einer n- und einer schwach dotierten Schicht (s-Schicht) mit entweder p- oder n-Leitung, je nach Dotierung des Ausgangskristalls (s. Abb. 3.1.1.). Diese Variante beinhaltet mind. 2 Diffusionsschritte.

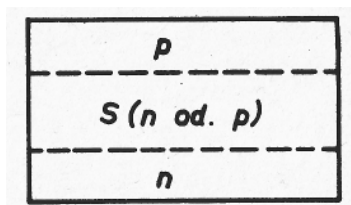


Abb. 3.1.1. psn=Gleichrichter (Schnittdarstellung, des Chips; stark schematisiert)

Die konventionelle Verfahrensweise der Herstellung einer psn-Anordnung besteht darin, daß zunächst ein Dotierstoff beidseitig in die Halbleiterscheibe eingetrieben wird (n- oder p-Leitung erzeugend), daß die Schicht einseitig bis auf das Ausgangsmaterial (s-Schicht) wieder abgetragen wird (meist durch Lappen), wodurch die Breite der s-Schicht festgelegt wird und daß danach auf der Seite des Abtrags der Dotierstoff des entgegengesetzten Leitungstyps eindiffundiert wird.

Von Fragen der Reihenfolge (p- oder n-Schicht zuerst in p- oder n-Silizium der Art der Dotierstoffe, der Zwischenreinigung, des Aufbringens von zusätzlichen Schutzschichten gegen das Eindringen unerwünschter Fremd- oder Dotierungsatome) wird aus Gründen der möglichst einfachen Erklärung des Prinzips abgesehen. Häufig wird die Reihenfolge der Schritte so gewählt, daß die nach dem Zwischenlappen auf der einen Scheibenseite erhalten gebliebene Reaktionsphase als Sperrschicht gegen das Einbringen der Dotierungsatome des entgegen gesetzten Leitungstyps ausgenutzt wird, um die Erscheinung der Kompensation (teilweise oder völlige Verringerung der Leitfähigkeit bis hin zum Umschlagen des Leitungstyps der bereits eindiffundierten Schicht in Nähe Oberfläche) zu vermeiden. Ein Schema charakteristischer Bearbeitungsstufen der Scheibe zeigt Abb. 3.1.2.

Die konventionelle Technologie schließt auch ein, daß aus Gründen der Herstellung flacher Dotierungsgradienten oder strukturell weniger gestörter Gebiete des pn-Übergänge mehrere Diffusanten, die den gleichen Leitungstyp erzeugen, gleichzeitig oder such nacheinander angewendet werden. Relativ häufig wird das Doppelprofil (zwei sich überlagernde Dotierungskonzentrationsprofile) realisiert. Ein Beispiel dafür ist die so genannte GaBoP-Technologie.

Hier wird auf der p-Seite der Diode ein Doppelprofil durch Eindiffusion von Gallium

(1. Schritt: Gasphasen-Diffusion) und Bor

(2. Schritt: BCl_3 -Gasphasen-Diffusion) erzeugt.

Jeder dieser Diffusionsschritte besteht aus einer Vorablagerung, bei der auf dem Si-Kristall eine hochdotierte Reaktionsphase- und im Kristall eine Dotierungszone entsteht und einer nachfolgenden Tiefendiffusion, bei der die Dotierung aus der Diffusionszone oder auch zusätzlich aus der Reaktionsphase erfolgt.

Nach der Diffusion der p-Seite wird die Reaktionsphase in Flußsäure abgelöst, die Scheibe gereinigt und oxidiert. Sodann wird die Rückseite durch Lappen abgetragen und auf dieser Seite Phosphor eindiffundiert (POCl_3 - Trägergas-Diffusionsverfahren).

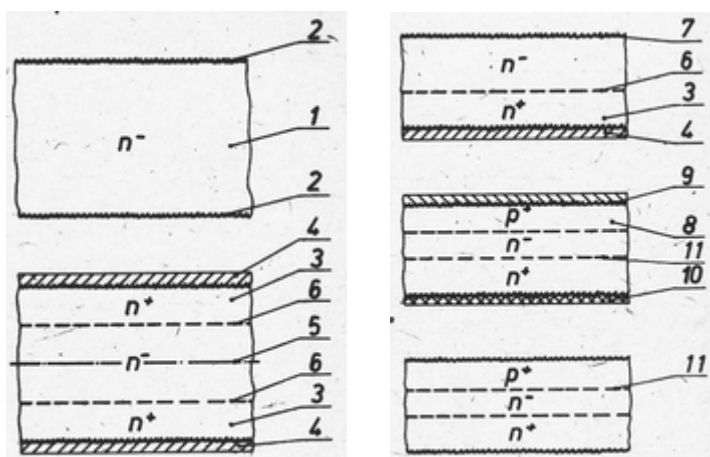


Abb. 3.1.2.

Herstellung einer Si-Scheibe für Diodenchips (ohne Metallisierung) nach konventioneller Technologie (Grobschema charakteristischer Bearbeitungsstufen in Schnittbildern der Scheibe):

- 1 Si-Scheibe
- 2 geläppte Oberflächen,
- 3 eindiffundierte Schicht,
- 4 oxidische Reaktionsphasen,
- 5 Scheibenmitte,
- 6 n^-/n^+ -Übergang,
- 7 Oberfläche nach dem Zwischenläppen,
- 8 p-Diffusionszone,
- 9 und 10 Reaktionsphasen,
- 11 pn-Übergang

Nach dem Entfernen der Reaktionsphase bzw. des Oxids, einem Aufrauen der Kontaktflächen durch z. B. Strahlläppen und nach einer Reinigung folgt die Metallisierung durch Nickel (Vorstufe ist die Bildung von NiSi-Schichten durch Eintempnen von Nickel).

Bei bestimmten Bauelemente-Technologien wird eine dünne Goldschicht über die Ni-Schicht gelegt, um eine gute Lötbarkeit auch nach längeren Zwischenlagerzeiten zu gewährleisten. Für Dioden mit besonders kurzen Schaltzeiten, so genannte schnelle Dioden, müssen kurze Sperrerrholzeiten (t_{rr} ; r, r: reverse, recovery) realisiert werden. Das geschieht durch Eindiffusion von rekombinationsaktiven Stoffen, welche die Ladungsträgerlebensdauer verkürzen, die deshalb von den sonstigen Hochtemperaturprozessen als gefährliche "Vergiftung" unbedingt ferngehalten werden müssen.

Zur Einstellung der Lebensdauer werden hauptsächlich die Schwermetalle Gold und Platin angewendet. Die Schwermetall-Diffusion muß auf separat aufgestellten Anlagen durchgeführt werden. Im Falle der Gold-Diffusion, z. B. wird das Gold chemisch, galvanisch, durch Verdampfen oder Sputtern auf den Si-Scheiben abgeschieden und bei Temperaturen zwischen 1223 K und 1273 K eindiffundiert. Im wesentlichen durch die Höhe der Temperatur und die Abkühlgeschwindigkeit (einige $K \cdot \text{min}^{-1}$) wird die Goldkonzentration im Silizium eingestellt. Der Arbeitsgang der Schwermetall-Diffusion wird so in die technologische Kette der anderen Arbeitsschritte eingepaßt, daß er nach den Hochtemperaturschritten vorgenommen wird, d. h., die Schritte höherer Temperatur vor der Schwermetall-Diffusion liegen und die mit den niedrigeren Temperaturen, z. B. die Metallisierung, danach.

3.1.2: Leistungstransistoren

Die Leistungstransistor-Technologie entstand aus der Verschmelzung der Verfahren zur Herstellung von Hochspannungsdioden mit den Verfahren der Planartechnologie (Kleinleistungs-Planartransistoren, später Schaltungstechnologie).

Die Kollektor-Basis-Seite ähnelt je nach Polungstyp einer der beiden Seiten von Leistungsdioden, die Emitter/Basis-Seite ist, planar aufgebaut, d. h., der Emitter muß in eine eben polierte Oberfläche eindiffundiert werden. Emitter und Basis werden als Fingerstrukturen durch Anwendung von Fotolithografie-Verfahren ausgebildet.

Die durch die elektrische Funktion des Bauelementes notwendige Si-Scheibendicke liegt, abhängig von der jeweiligen Bauelement-Type, im Bereich von 100 ... 180µm (im wesentlichen wird die Dicke von der angezielten Sperrspannung bestimmt). Die Herstellung und weitere Verarbeitung einseitig polierter Si-Scheiben in diesem Dickenbereich ist mit einem so hohen Bruchausschuß verbunden, daß die Wirtschaftlichkeit nicht gewährleistet ist.

Aus diesem Grund wird bei den Leistungstransistoren zu Beginn der Verfahrenskette eine Schicht diffundiert, welche die Funktion der mechanischen Stabilisierung der Scheibe (Verdickung) übernehmen soll, ohne die elektrischen Eigenschaften wesentlich zu beeinflussen (Bahnwiderstand soll möglichst gering sein). Dadurch ist diese Schicht im allgemeinen stark dotiert. Der Bauelemente-Konstruktion entsprechend befindet sich diese Schicht auf der Kollektorseite. Sie wird als "tiefer Kollektor" (TK) bezeichnet, der Diffusionsschritt zur Herstellung dieser Schicht wird abgekürzt als TK-Diffusion bezeichnet.

Auf konventionelle Weise wird die TK-Schicht so hergestellt, daß wie bei den Dioden Fremdatome in eine dicke doppelseitig geläppte Si-Scheibe von beiden Hauptflächen her gleichzeitig eindiffundiert werden, so daß tiefe Diffusionsschichten entstehen. Sodann wird die Diffusionsschicht an der einen Hauptfläche durch Lappen abgetragen, worauf ein Hochglanzpoliervorgang folgt. So entstehen je nach Art des Dotierungs-Fremdatoms Scheiben der Typen n- auf n+- oder p- auf p+-Schicht (vorrangig wird n auf n+ angewendet). Solche Scheiben werden als OSL-Scheiben bezeichnet (One Side Lapping-einseitig geläppt).

Es gibt auch Verfahren, welche die hohe Fremdstoff-Konzentration beidseitig nur bis zu einer anteiligen Tiefe des späteren TK eindiffundieren, zwischendurch auf der einen Seite die Schicht entfernen, diese Seite mit Schutzschichten belegen und danach den TK fertig diffundieren. Vor der Weiterverarbeitung werden die Schutzschichten wieder entfernt.

Ohne Zwischenabtrag von Siliziumschichten kommen Verfahren aus, bei denen die niedrig dotierte Hauptfläche (unterhalb der die Dotierung dem Kollektorbahngebiet entspricht), von der aus später das Basisgebiet eindiffundiert wird, durch Mehrfachschichten gegen das Eindringen von Dotierungsatomen der starken Dotierung der Gegenseite und von Fremdatomen geschützt wird.

Der Verfahrensablauf zur weiteren Bearbeitung der OSL-Scheibe ist bei allen konventionellen Technologien grob betrachtet gleich. Es läuft in etwa folgende Folge von Stationen ab (Reinigungsschritte sind nicht mit angegeben):

0. OSL-Scheibe

1. Basis-Diffusion (gekoppelt mit der weiteren Vertiefung des TK als Quasi-Simultan-Variante)
2. Oxidation zur Herstellung des Passivierungsoxids der Basis
3. Fotolithografie zur Öffnung der Emitter-Diffusionsflächen
4. Emitter-Diffusion
5. Fotolithografie zur Öffnung der Kontaktgebiete für Emitter und Basis
6. Herstellung einer Schutzschicht auf der Emitter/Basis-Seite, welche die Metallisierungschemikalien fernhält
7. Aufrauen der Kollektorseite
8. Vernicklung der Kollektorfläche (chemisches Verfahren)
9. Schutzmaske ablösen
10. Nickel eintempnen (NiSi-Bildung auf der Kollektorfläche)
11. Aufbringen von Aluminium auf die Emitter/Basis-Seite (durch Aufdampfen oder Sputtern)
12. Fotolithografie zur Strukturierung der Kontakte auf Emitter und Basis
13. Tempern des Aluminiums (Kontaktwiderstand verbessern)
14. Herstellung einer Schutzschicht wie bei Nr. 6
15. Vernickelung der Kollektorfläche (2. Vernickelung)
16. Vergoldung der Kollektorfläche (galvanische Vergoldung z.Z. für konventionelle Passivierung der Einzelchips mit Silikongummi nach dem Vereinzeln der Scheiben - Ätzschutz der Kollektorseite bei Ätzung des pn-Übergangs, s. Lehrbrief Nr. 3).

Hiernach erfolgt die Übergabe der Scheiben zum Zyklus II.

Einen groben Ablauf zur OSL-Variante zeigt Abb. 3.1.3.

Abwandlungen dieser Technologie existieren in folgenden Varianten:

- Ersatz der naßchemischen Metallisierungsverfahren (Ni, Au) durch physikalische Verfahren (Aufdampfen/Sputtern). Die Schutzschichten werden überflüssig.

- Anwendung von anorganischen Schutzschichten bei thermischer Metallisierung, z. B. Schichtkombinationen von SiO_2 und Phosphorsilikatglas/PSG, die mit dem CVD-Verfahren hergestellt werden.

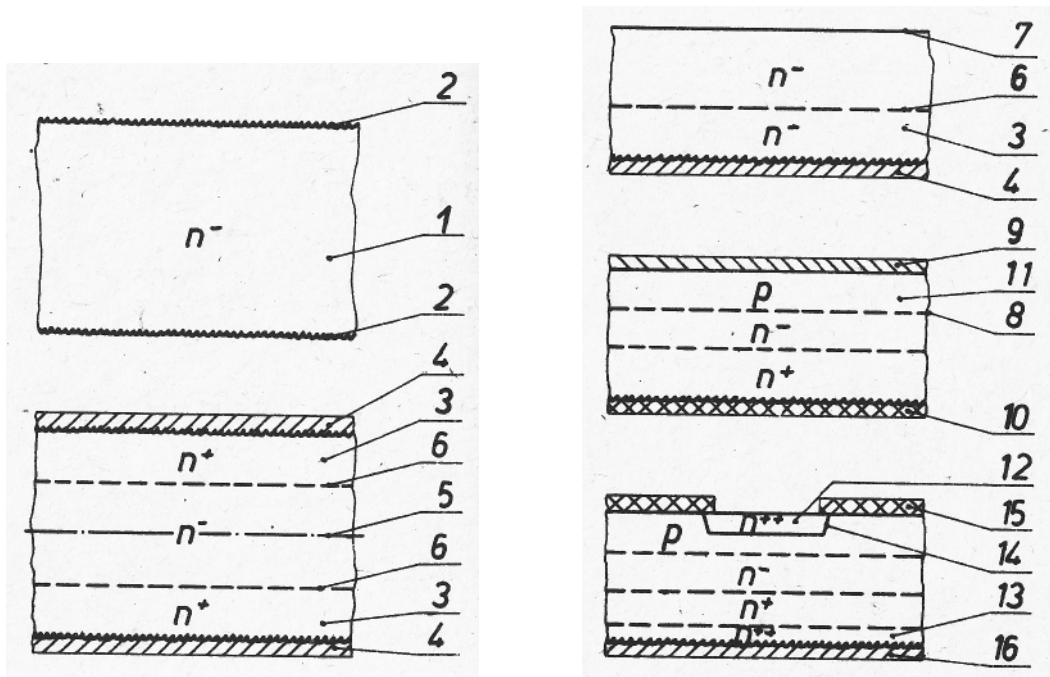


Abb. 3.1.3: Herstellung eines Transistors nach der OSL-Technologie (Grobschema charakteristischer Bearbeitungsstufen in Schnittbildern der Scheibe)

- 1 Si-Scheibe
- 2 geläppte Oberflächen
- 3 Diffusionsschichten (n-leitend)
- 4 oxidische Reaktionsphase
- 5 Scheibenmitte
- 6 n/n⁺-Übergang
- 7 polierte Oberfläche nach dem einseitigen Abläppen
- 8 pn-Übergang Basis/Kollektor
- 9/10 oxidische Reaktionsphasen
- 11 Diffusionsschicht (p-leitend)
- 12 Emitter-Diffusionsschicht (stark dotiert, n-leitend)
- 13 Kollektor-Diffusionsschicht wie 12
- 14 pn-Übergang Emitter/Basis
- 15 Planaroxid
- 16 oxidische Reaktionsphase

3.2. Simultanverfahren der Diffusion

3.2.1. Dioden

Rationell hinsichtlich der Kosten (Energie-, Silizium- und Arbeitszeiteinsparung) sind Verfahren, bei denen die bauelemente-konstruktiv notwendige Si-Scheibendicke schon zu Beginn der Arbeitsschritte des Zyklus I vorliegt und die hochdotierten p- und n-Schichten gleichzeitig, d.h. simultan, eindiffundiert werden. An derartige Verfahren sind bestimmte Anforderungen zu stellen. Diese bestehen im wesentlichen darin, dafür zu sorgen, daß keine wechselseitige Kompensation der Dotanden erfolgt, d.h., zu verhindern, daß die p-dotierenden Atome auf die n-Seite gelangen und umgekehrt.. Entscheidend ist hier die Art der Belegung der Hauptflächen mit den Dotanden. Mehrere Möglichkeiten sind geboten:

1. Ionenimplantation .

(Hochstromimplantation) und anschließendes Versiegeln der Flächen durch Deckschichten, z. H. SiO_2 , welche die Ausdiffusion verhindern.

2. Anwendung von flüssigen Dotierstofflösungen

Diese müssen so zusammengesetzt sein, daß bei einem Sintervorgang vor Beginn der eigentlichen Diffusion eine Phase entsteht, aus welcher nur ein relativ geringes Abdampfen möglich ist und die andererseits für den Dotanden der Gegenseite undurchlässig ist. Dotierstofflösungen sind Lösungen von chemischen Verbindungen, die das Dotierelement enthalten, wobei anorganische als auch organische Verbindungen möglich sind, bei denen das Lösungsmittel auf die Dotierungskomponente abgestimmt ist. Es gibt Lösungen, die eine Siliziumverbindung enthalten, welche beim Ausheizen Glasbildung bewirkt.

3. Dotierung aus festen Phasen

z. B. mittels CVD (Chemical Vapor Deposition) aufgetragenen PSG-Schichten (Phosphor-Silikat-Glas-Schichten)

4. Diffusion aus S102-Schichten, in welche die Dotanden nachträglich eingeschossen wurden, z.B. durch Ionenimplantation

Metallisierung, Vereinzelung und Oberflächenpassivierung geschehen in prinzipiell der gleichen Weise wie bei den konventionellen Dioden-Technologien. Abb. 3.2.1. zeigt schematisch die wesentlichen Schritte der Simultanvariante.

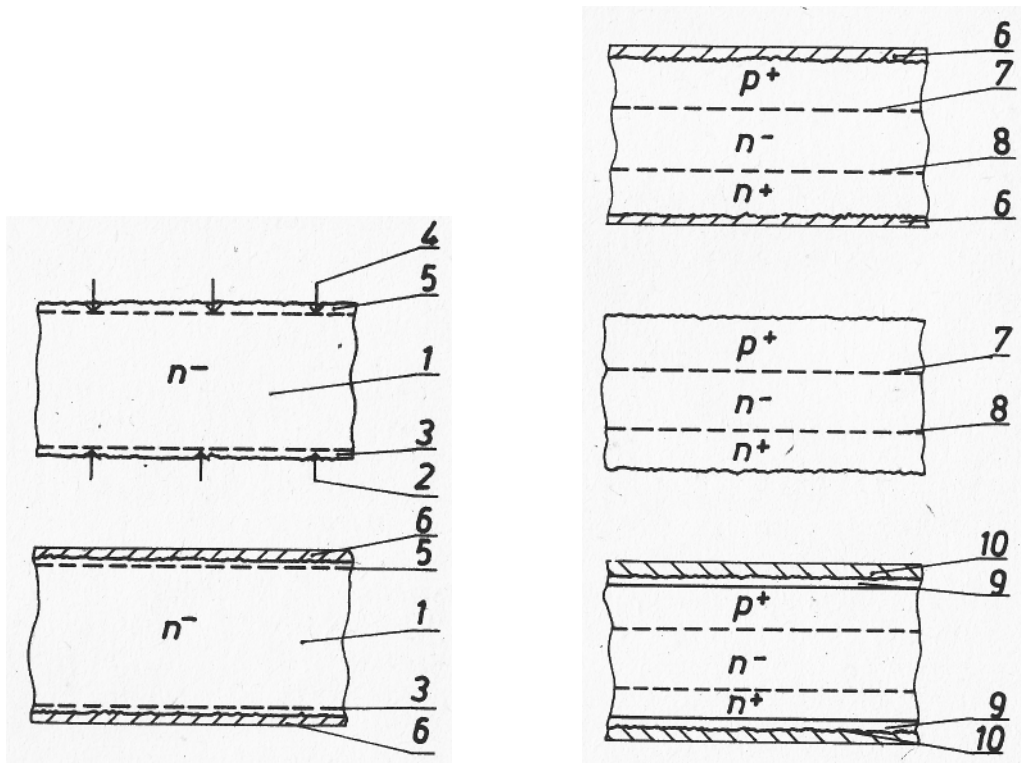


Abb. 3.2.1. Herstellung einer Diode nach der-Simultan-Diffusionstechnologie
(Grobchema charakteristischer Bearbeitungsstufen in Schnittbildern der Scheibe)

- 1 Si-Scheibe
2. Implantation des n-Dotanden
- 3 implantierte n-Schicht
- 4 Implantation des p-Dotanden
- 5 implantierte p-Schicht
- 6 Oxidschicht
- 7 pn-Übergang nach Simultan-Diffusion
- 8 n^-/n^+ -Übergang nach Simultan-Diffusion
- 9 NiSi-Schicht
- 10 Metallschicht

Es entspricht dem gegenwärtigen internationalen Stand, die Oberflächenpassivierung des pn-Überganges bereits im Scheibenverband vorzunehmen und nicht das Einzelbauelement, sondern den Bauelementeverband auf der Scheibe elektrisch auszumessen. Das kann dann z.B. mit automatisch arbeitenden Scheibentastern, gekoppelt mit rechnergestützten Testern, erfolgen. Eine gebräuchliche Variante hierfür ist die Glaspasivierung (siehe Abschnitt 4.5.2.).

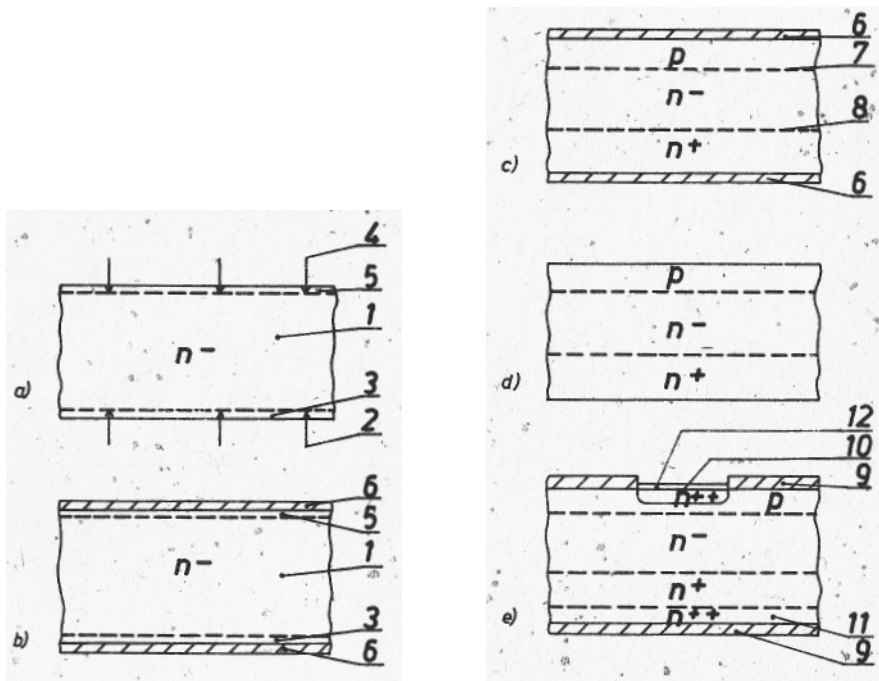
Charakteristische Merkmale der Scheibenpassivierung sind:

- Passivierungsarbeitsgänge liegen im Zyklus I.
- Höhere Temperaturen sind notwendig, da das Glas einzuschmelzen ist. Die Schmelztemperatur der Gläser für Hochspannungsdioden liegt im allgemeinen über der eutektischen Temperatur des Systems Al-Si, wodurch das Glaseinschmelzen z. B. vor dem Arbeitsgang der Al-Kontaktierung liegen muß.
- Die Eigenschaften des Glases sind bei den nachfolgenden Arbeitsgängen zu berücksichtigen.
- Vor dem Einbringen des Glases sind so genannte Passivierungsgräben herzustellen. Durch die Gräben werden die pn-Übergänge durchschnitten. Form und Oberflächenbehandlung der Gräben haben Einfluß auf die Sperrspannung der Bauelemente.

3.2.2. Transistoren

Simultandiffusion bezieht sich bei Transistoren auf die gleichzeitige Herstellung des tiefen Kollektors und der Basis. Die Dotanden können auch hier auf verschiedene Weise eingebracht werden.

Erschwerend gegenüber den Dioden-Technologien kommt hinzu, daß die Oberflächeneigenschaften der beiden Scheibenseiten unterschiedliche Bearbeitungszustände aufweisen und die Oberflächenkonzentrationen von TK und Basis um ca. 2 Größenordnungen unterschiedlich sind.



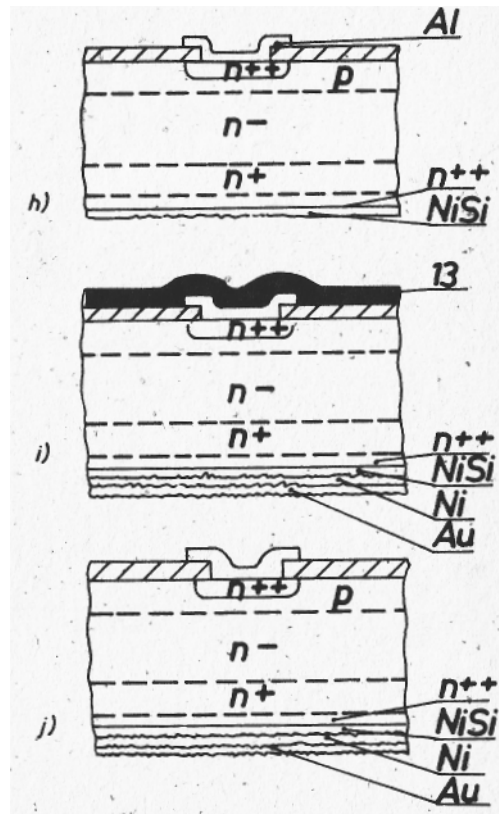
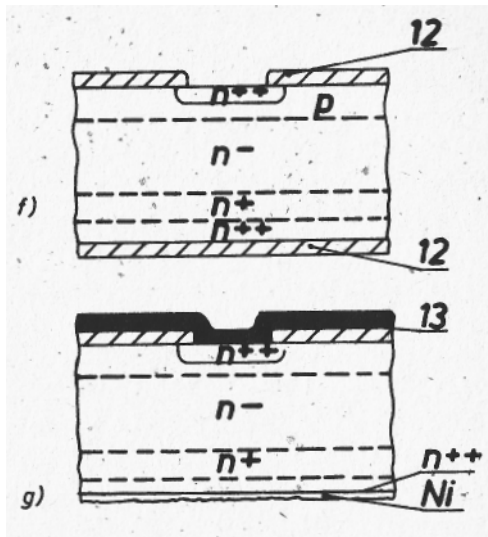


Abb. 3.2.2. Herstellung eines Transistors nach der Simultan-Diffusionstechnologie
(Grobschema charakteristischer Bearbeitungsstufen in Schnittbildern der Scheibe)

a) Implantation der Dotanden

- 1 Si-Scheibe
- 2 n-Dotand
- 3 implantierte n-Schicht
- 4 p-Dotand
- 5 implantierte p-Schicht

b) Herstellung des Schutzoxids

- 1 Si-Scheibe
- 3 implantierte n-Schicht
- 5 p-Dotand
- 6 Schutzoxid

c) nach Simultan-Diffusion

- 6 Schutzoxid
- 7 pn-Übergang
- 8 n⁻/n⁺-Übergang

- d) Oxidschicht abgelöst (Reinigungsschritt)
- e) nach erneuter Oxidation, Fotolithografie und Emitterdiffusion
 - 9 Oxidschicht
 - 10 n^+ -Emitterschicht
 - 11 n^{++} -Kollektorschicht (identisch Emitter)
 - 12 PSG-Schicht
- f)-Kontaktfenster geöffnet
- g) Planarseite durch Maske geschützt nach Vernicklung des Kollektors
- h) nach Entfernung der Lackmaske, Al-Aufbringen und Strukturierung auf Planarseite und Temperung
- i) Planarseite durch Maske geschützt, Ni und Au auf Kollektor aufgebracht
- j) Schutzmaske abgelöst

Als teilsimultan sind hier auch die in der Hochspannungstransistor-Technologie gebräuchlichen Diffusionsschritte mit Gasphasen-Dotierung zu nennen. Der tiefe Kollektor wird stets vordiffundiert und bei der nachfolgenden Basis-Diffusion, z. B. Gallium-Diffusion, auf die notwendige Tiefe gebracht (ebenso wird der Schritt der dann folgenden Emitter-Diffusion eingerechnet).

Oxidschichten vermögen Gallium nicht zurückzuhalten, wodurch Gallium leicht an die Oberfläche diffundiert und abdampft. Zum Ausgleich dieser Verluste, z. B. infolge der nach der Basis-Diffusion folgenden Oxidation und der Emitter-Diffusion, wird Gallium während der Emitter-Diffusion mit dem gleichen Verfahren simultan eindiffundiert (Entstehung eines Doppel-Basis-Profils bei der so genannten Galliumpeak-Diffusion). Die bei einem weiteren Oxidationsschritt stattfindende Ausdiffusion des Galliums wird schließlich durch eine Bor-Ionenimplantation ausgeglichen.

In Abb. 3.2.2. sind schematisch die wesentlichen Stadien der Schichtherstellung bei Transistoren nach der Simultan-Variante dargestellt. Die Arbeitsgangfolge der Hochspannungs-Transistor-Technologie ist grob in Abb. 3.2.3. wiedergegeben.

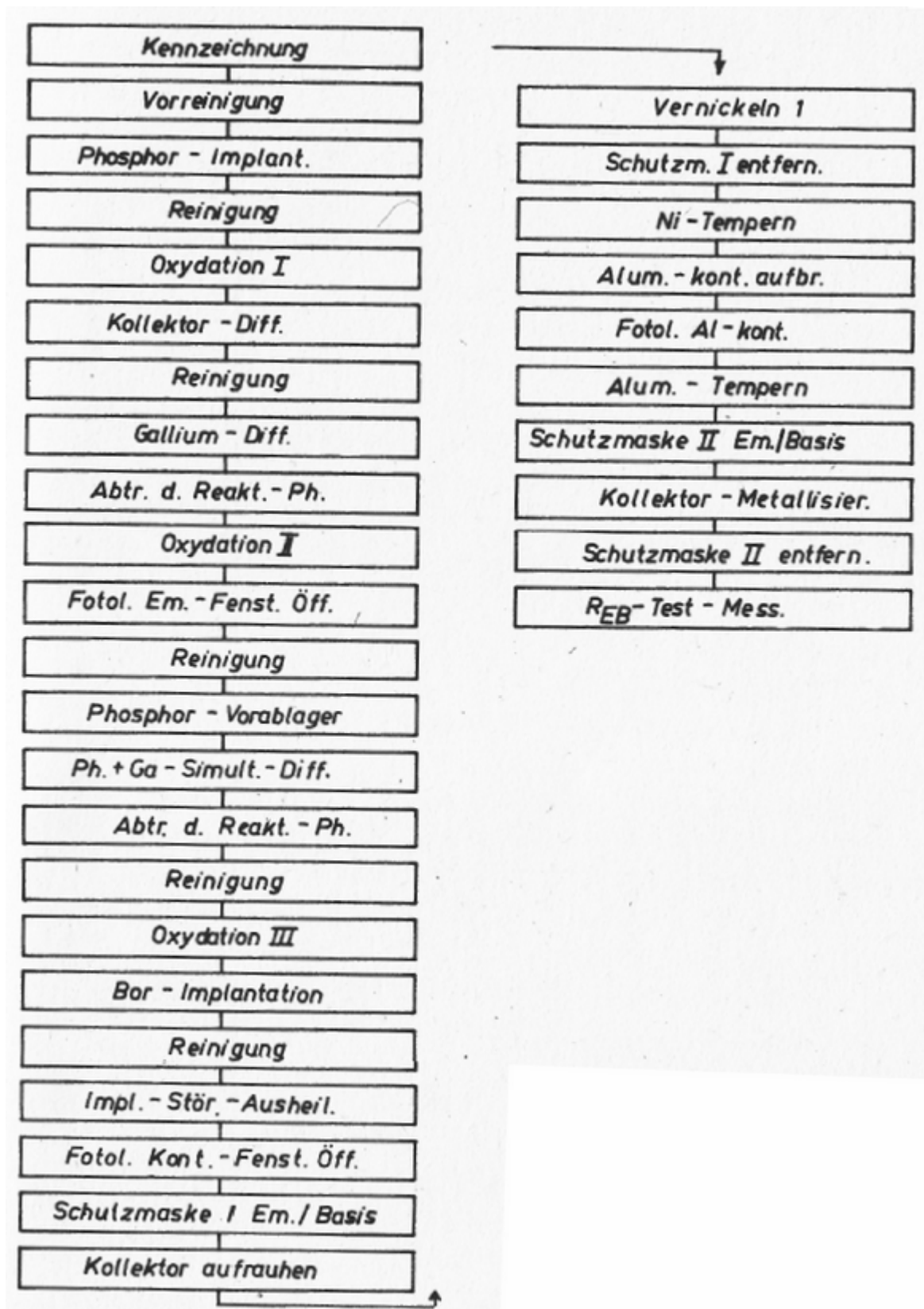


Abb. 3.2.3. Arbeitsgangfolge Zyklus I (grob) zur Herstellung eines Hochspannungstransistors in konventioneller Herstellungstechnologie

3.3. Epitaxie-Verfahren

Die Möglichkeit der sehr gleichmäßigen Schichtdotierung und der Herstellung abrupter Übergänge sowohl zwischen Schichten gleichen Leitungstyps als auch bei pn-Übergängen durch Epitaxie eröffnet günstige konstruktive Varianten für die verschiedensten Bauelementetypen. Der Hauptvorteil bei der Erzeugung hochohmiger Epitaxieschichten besteht darin, daß die für die elektrische Funktion des Bauelementes notwendige aktive Schichtdicke des die Höhe der Sperrspannung bestimmenden Bereiches minimiert werden kann, wodurch günstige Eigenschaften in Durchlaßrichtung des elektrischen Stromes entstehen (Verringerung des Bahnwiderstandes). Es reduzieren sich die Übergangsschichten von niedriger zu hoher Dotierung und es entfällt die Herstellung von Schichten zur mechanischen Stabilisierung der Scheiben im Zyklus I, z.B. wie bei der TK-Diffusion (s. Abschnitt 3.1.2. Diffusion). Die hochdotierte Substratscheibe übernimmt diese Funktion. Das bedeutet gleichzeitig Übergang auf eine Silizium-Scheibe anderer Züchtungsart. Statt FZ-Silizium wird als hochdotiertes Substratmaterial CZ-Silizium eingesetzt.

3.3.1. Dioden

Eine gebräuchliche Technologie bei Dioden besteht darin, eine niedrig dotierte n-Schicht (n^-) auf einem hochdotierten n-Substrat, z. B. As-dotiert., $d = 3 - 4 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$, abzuscheiden und den pn-Übergang durch Ionenimplantation von z. B. Bor-Ionen und anschließende Tiefendiffusion herzustellen. Der pn-Übergang selbst kann auch durch Epitaxie oder durch ein anderes Dotierverfahren erzeugt werden. Über die Art des anzuwendenden Verfahrens entscheidet letztlich die Gesamtökonomie der Herstellungstechnologie.

3.3.2. Mehrschichten-Epitaxie-Technologie (MET) für Transistoren

Der grundsätzliche konstruktive Aufbau von Mehrschichten-Epitaxie-Transistoren ist der gleiche wie bei Transistoren, die nach der Mehrfach-Diffusions-Technologie hergestellt werden. Die verschiedenen Schichten im Siliziumkristall werden wie folgt erzeugt

(Beispiel npn-Transistor):

- | | |
|---------------------|--|
| 1. Substrat | CZ-Kristall, n-leitend
$d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ bis } 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ |
| 2. Pufferschicht | Epitaxie; n-leitend
$N_D = 10^{15} \text{ bis } 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ |
| 3. Kollektorschicht | Epitaxie; n-leitend
$N_D \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ |
| 4. Basisschicht 1 | Epitaxie; p-leitend
$N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ |

- | | |
|-------------------|--|
| 5. Basisschicht 2 | Epitaxie; p-leitend
$N_A \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ |
| 6. Emitter | Gasphasen-Diffusion; n-leitend
$N_0 \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ |

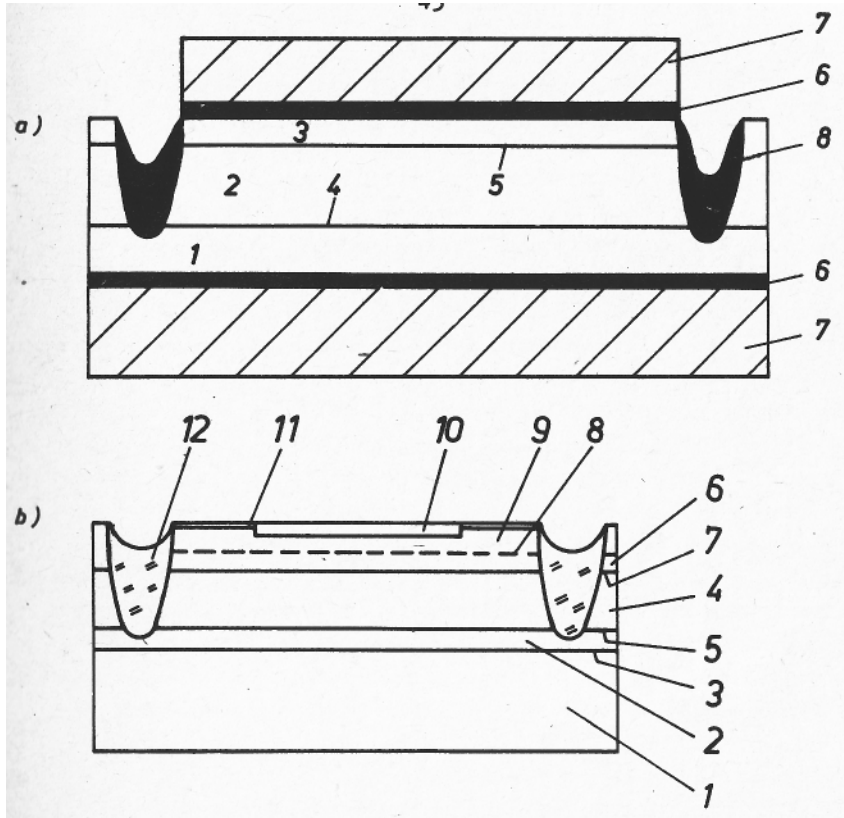


Abb. 3.3.1.

a) MET-Diode (Schnitt schematisch)

- 1 Si-Substrat n^+ -Dot.;
- 2 Epitaxleschicht n-Dot.;
- 3 Epitaxieschicht p-Dot.;
- 4 n/n^+ -Übergang;
- 5 pn-Übergang;
- 6 Metallisierung;
- 7 Elektroden;
- 8 Passivierung des pn-Überganges (Glas)

b) MET-Transistor (Schnitt durch Chip - schematisch)

- 1 Si-Substrat n^+ -Dot. Kollektor;
- 2 Epitaxie-Schicht n-Dot.;

- 3 Übergang Substrat/Pufferschicht;
- 4 Epitaxieschicht n-Dot.;
- 5 n/n^+ -Übergang;
- 6/9 Epitaxieschicht p-Dot. Basis;
- 7 pn-Übergang;
- 8 p/p_- -Übergang, z. B. durch Ionenimplantation und Diffusion erzeugt;
- 10 Emitterschicht, diffundiert n-Dot.;
- 11 p-Schicht, zur Vermeidung von Inversionsschichten an der Oberfläche;
- 12 Glas

Die Schicht 5 kann auch durch Diffusion hergestellt werden, z. B. in Verbindung mit einer Vorablagerung des Diffusanten (z.B. Bor) durch Ionenimplantation. Bei einem pnp-Transistor in MET würde sich der Leitungstyp der jeweiligen Schicht umkehren, was an der Herstellungstechnologie im Prinzip nichts ändert. Die Mehrschichten-Epitaxie-Technologie ist mit einer Reihe von Vorteilen verknüpft, die noch einmal zusammenfassend dargestellt werden sollen.

1. Durch die gleichmäßige und annähernd gleiche Dotierung von Kollektor- und Basis 1-Gebiet dehnt sich die Raumladungszone bei angelegter Sperrspannung in beiden Gebieten aus. Es werden geringere Dicken des Kollektorgebietes nötig, was letztlich bedeutet, daß für gleiche U_{CBO} -Werte gleich hohe Ströme bei verringerten Chipflächen gegenüber diffundierten Transistoren möglich werden.
2. Durch 1. ist eine günstigere Feldstärkeverteilung gegeben, welche die Anwendung von senkrechten bzw. leicht negativen Anstrahlungswinkeln für die pn-Oberfläche des hochsperrenden Kollektor/Basis-Überganges möglich macht - eine Voraussetzung für die Anwendung der Graben-Technik, z. B. bei Glaspasivierung.
3. Fortfall der aufwendigen TK-Diffusion
4. Hohe Variabilität beim Übergang zu anderen Bauelemente-Typen und Si-Scheibendurchmessern (hierzu siehe Abschnitt 5).

In Abb. 3.3.1. ist das Schema des Aufbaus von MET-Bauelementen dargestellt. Den technologischen Ablauf der Arbeitsgänge für einen Transistor im Zyklus I enthält Abb. 3.3.2.



Abb. 3.3.2. Arbeitsgangfolge (grob) zur Herstellung eines Transistors-in Mehrschritt-Epitaxie-Technologie (MET)

Moderne Epitaxieanlagen sind so leistungsfähig, daß die gesamte Schichtenfolge in einem Arbeitsgang nacheinander automatisch gesteuert hergestellt werden kann. Man spricht dann von Einschritt-Technologie. Eine Alternative dazu ist die Mehrschicht-Technologie, welche die ungünstigeren Bedingungen für die Herstellung hochsperrender Epitaxie-pn-Übergänge bietet. (Das Aus- und Wiedereinschleusen der Si-Scheiben führt zu störenden Verunreinigungen.) Ein Zwang zur Mehrschritt-Technologie kann durch Extremunterschiede in den Schichtdotierungen bestehen.

In gewisser Weise kommt es bei der Herstellung hochdotierter Schichten zu einer "Verunreinigung" der Apparatur mit dem Dotanden, wodurch Schwierigkeiten bei der Herstellung niedrig dotierter hochohmiger Schichten auf der gleichen Anlage resultieren.

4. Hauptverfahrensabschnitte

4.1. Silizium-Scheibenreinigung

Die Scheibenreinigung dient der Herstellung sauberer, definierter Si-Oberflächen im Zusammenhang mit anderen notwendigen Präparationsschritten. Es sollen damit Verunreinigungen molekularer Art (Reste organischer Substanzen wie Lacke, Öle, Wachse) ionischer bzw. atomarer Art (Schwermetalle, Alkaliionen) und makroskopische bzw. mikroskopische Verunreinigungen (Quarz- und Si-Staub, Partikel aus Lösungen, Säuren, Wasser) von den Si-Scheibenoberflächen entfernt werden.

In der Leistungselektronik erfolgt die Reinigung im allgemeinen durch naßchemische Prozesse. Die eingesetzten Chemikalien sind Säuren, Laugen, Lösungsmittel, Netzmittel und Wasser. Die Reinigung wird beeinflußt bzw. unterstützt durch die Art der Behandlung der Scheiben mit den Chemikalien (Tauchen, Sprühen, Spülen), durch die Wahl der Badtemperaturen und durch mechanische Bearbeitungen (Ultraschall, Bürsten, Walzen, Stempeln). Die notwendige abschließende Wasserspülung und der Trocknungsvorgang (durch Abschleudern, Trockenblasen, Trocknen mit Lösungsmitteln) haben ebenfalls einen entscheidenden Einfluß auf das Reinigungsergebnis.

Reinigung mit organischen Lösungsmitteln:

Diese Reinigung wird meist allen anderen Reinigungen vorangestellt. Sie dient u. a. der Entfernung organischer Verunreinigungen vom Ausgangsscheibenmaterial oder zur Beseitigung von Klebmittelresten nach mechanischen Bearbeitungsschritten. Dazu werden die Scheiben in üblichen Lösungsmitteln wie Tetra, Tri, Aceton, Alkohol bei Raumtemperatur oder höheren Temperaturen

gespült und die Verunreinigungen dabei gelöst. Die Reinigung ist unvollständig. Es schließen sich daran deshalb sehr unterschiedliche Reinigungsätzungen an.

Zwei sehr häufig angewendete Verfahren sind nachfolgend beschrieben:

1. Ätzende Reinigung

- Reinigung Teil I zur Entfettung in $\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OH}$, 353 K, 5 ... 15 min
- Spülen in deionisiertem Wasser
- Reinigung Teil II zur Abreicherung von Metallen in $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HCl}$, 353 K, 5 ... 15 min
- Spülen in deionisiertem Wasser
- Intensivspülung in fließendem, deionisiertem Wasser
- Trockenschleudern 1500 U/min, 3 ... 10 min

2. Netzmittelreinigung

- Tauchen in einer niedrigprozentigen Mischlösung aus Netzmittel und NaOH, 5 ... 30 min
- Spülen in fließendem, deionisiertem Wasser, 3 ... 15 min
- Spülen in fließendem, heißem, deionisiertem Wasser, 3 ... 15 min
- Spülen in fließendem, deionisiertem Wasser, 3 ... 15 min
- Tauchen in niedrigprozentiger HF, 1 ... 15 min
- Spülen in fließendem, deionisiertem Wasser, 3 ... 15 min
- Tauchen in hochreinem Aceton
- Trocknen in hochreinem, heißem N_2 -Strom, 5 ... 30 min

(Die Spülungen in deionisiertem Wasser können mit einer Ultraschallbehandlung kombiniert sein.)

Zur Ätzung von Siliziumoxiden und Reaktionsphasen auf den Siliziumscheiben wird ca. 50%ige HF eingesetzt. Bei Raumtemperatur gelten Ätzzeiten von 30 s bis 5 min. Die Effektivität der dargestellten Verfahren wird durch folgende Faktoren wesentlich beeinflusst:

- die Sauberkeit der Chemikalien
- die Art der Aufbringung der Chemikalien (Gegenüber dem Tauchen ist z. B. das Besprühen der Scheiben effektiver.)
- die Sauberkeit des Wassers,
- der Einsatz von mechanischen Hilfsmitteln wie Bürsten und Walzen; besonders Partikelzahlen werden damit verringert,
- der Trocknungsvorgang (Das Wasser muß so schnell wie möglich und rückstandsfrei von den Scheiben entfernt werden. Als Verfahren werden das Zentrifugieren, das Tauchen in Aceton mit

anschließendem Trocknen in warmem Stickstoffstrom und die Trocknung mit Freon angewendet).

Die angewendeten Reinigungsverfahren müssen außer der reinigenden Wirkung auf die Si-Scheiben noch anderen Forderungen genügen, sie sollten:

- geringe Giftigkeit aufweisen,
- die Reaktions- und Abprodukte sollten auch nur gering giftig sein und leicht vernichtet werden können,
- die Chemikalien sollten beständig sein und reproduzierbare Reinigungsergebnisse liefern,
- die Badausnutzung sollte hoch bzw. der Chemikalienverbrauch gering sein.

Aus diesen Gründen werden solche Chemikalien wie Königswasser, Schwefelsäure u.. a. nur ungern zur Reinigung eingesetzt, obwohl ihre reinigende Wirkung sehr gut ist. Die Kosten für die Ausrüstungen und Sicherheitsvorkehrungen steigen bei dem Einsatz dieser Chemikalien stark an.

4.2. Herstellungsverfahren für pn-Übergänge

4.2.1. Diffusion

Die Diffusion von Fremdstoffatomen im Kristallgitter erfolgt nach den Fickschen Gesetzen. Zwei spezielle Lösungen dieses Gesetzes, die in der Leistungselektronik häufig angewendet werden, sind folgende:

- Eindiffusion bei konstanter Oberflächenkonzentration

Dann gelten die Randbedingungen $N(x > 0, t = 0) = 0$; $N(x = 0, t = 0) = N_0$, wobei x der senkrechte Abstand einer Fläche im Volumen des Kristalls von der Oberfläche, t die Diffusionszeit, N die Konzentration des Fremdstoffes und N_0 die über die Zeit konstante Oberflächenkonzentration ist. Dann bestimmt sich die Fremdstoffkonzentration am beliebigen Ort im Kristall zu einem beliebigen Zeitpunkt nach der komplementären Fehlerfunktion (erfc).

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

D ist dabei der konstante Diffusionskoeffizient des Fremdstoffes.

Bei Vorhandensein einer homogenen Ausgangsfremdstoffkonzentration, im Kristall von N_b ergibt sich für die im allgemeinen interessierende Eindringtiefe x_j , bei der die Konzentration des diffundierenden Fremdstoffes $N = N_b$ ist.

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_b}{N_0} \right)$$

Die Funktion erfc bzw. erfc^{-1} liegt in Fachbüchern tabelliert vor, so daß $N(x, t)$ oder x_j nach obigen Gleichungen bestimmt werden können. Ein weiterer häufig vorkommender Fall ist die

Eindiffusion aus einer dünnen Quellschicht an der Oberfläche mit begrenzter, endlicher Fremdstoffmenge. Dabei gelten folgende Anfangsbedingungen:

$$N(x=0, t=0) = N_0; N(x=\infty, t \neq 0) = 0.$$

Dann ist die Lösung die Gaußsche Verteilungsfunktion

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right),$$

wobei Q die Gesamtmenge der Ladungsträger ist, die sich von Anfang an im Kristall befindet.

Die konkret im Kristallgitter ablaufenden Diffusionsmechanismen sollen am Beispiel des Siliziums, dem Material, das z. Zt. am häufigsten in der Leistungselektronik eingesetzt wird, dargelegt werden.

Es treten verschiedene Mechanismen auf. Leichte Elemente wie H, Li sowie Na, K diffundieren über Zwischengitterplätze und haben einen hohen Diffusionskoeffizienten.

Viele Metalle wie Au, Ni, Fe treten sowohl auf Gitterplätzen als auch auf Zwischengitterplätzen auf. Letzterer Anteil führt ebenfalls zu hohen Diffusionskoeffizienten. Die Dotanden der 3. und 5. Hauptgruppe (z. B. H, Ga, Al, P, As, Sb) sowie die Atome der 4. Hauptgruppe (Si, C, Ge) rechnen als langsame Diffusanten. Der Unterschied zu den schnellen beträgt Größenordnungen. Die Atome befinden sich hauptsächlich auf Gitterplätzen; es wird für die Diffusion ein Leerstellenmechanismus angenommen.

Element	D (1137 K) cm ² s ⁻¹	D (1473 K) cm ² s ⁻¹
H	1 x 10 ⁻⁴	
Li	6 x 10 ⁻⁶	
Na	2 x 10 ⁻⁶	
K	1 x 10 ⁻⁶	
Au	6 x 10 ⁻⁷	
Ni	4 x 10 ⁻⁸	
Al)		1,3 x 10 ⁻¹¹
Ga)		3 x 10 ⁻¹²
B)	bei Konzentrationen	1,6 x 10 ⁻¹²
P)	≤ 10 ¹⁸ cm ⁻³	1 x 10 ⁻¹²
In)		7 x 10 ⁻¹³
As)		3 x 10 ⁻¹³
Sb)		1,7 x 10 ⁻¹²

Tabelle 4.2.1. Diffusionskoeffizienten verschiedener Elemente in Si

Der prinzipielle Aufbau eines Diffusionssystems ist für alle Diffusionsverfahren gleich:

- Diffusionsofen
- Diffusionsrohr mit Scheibenmagazin
- Gasversorgungsteil
- Chargierbox.

Alle Diffusionsverfahren für Silizium stellen Hochtemperaturverfahren dar. Zur Erreichung der Prozeßtemperaturen von 723 bis 1573 K werden elektrische widerstandsbeheizte Rohröfen genutzt. Sie garantieren über eine Länge von 600 mm ... 800 mm und einem effektiven Durchmesser von 100 ... 150 mm eine räumliche Temperaturkonstanz von etwa 0,5 K.

Zur Aufnahme der Siliziumscheiben werden in diese Rohröfen Reaktionsgefäße eingeschoben. Diese bestehen aus Quarz-, Silizium- oder Siliziumkarbidrohr. Diese sind mit entsprechenden Öffnungen für die Chargierung der Siliziumscheiben und für den Gasein- und -auslaß versehen. Die Magazine zur Halterung der Siliziumscheiben bestehen meist aus den gleichen Materialien wie die Reaktoren.

Sie garantieren eine definierte Stellung der Scheiben im Rohr während des Prozesses, um gleiche Temperatur und gleiches Quellenangebot zu garantieren. Im Gasversorgungsteil werden die Gase N, O₂, H₂, HCl und Dotiergase in Reinigungseinheiten gereinigt, gefiltert und mit Hilfe von Reduzierventilen, Strömungsmessern bzw. AFC's (Automatische Gasmengenregler) dosiert. Sie können in thermostatierten Bädern mit H₂O oder Quellflüssigkeiten beladen werden, bevor sie in das Reaktionsrohr eingeleitet werden.

An dem dem Gasversorgungsteil gegenüberliegenden Teil der Diffusionsanlage befindet sich eine Laminarbox. Sie sorgt für eine staubfreie (Staubklasse = 100) Laboratmosphäre vor dem Scheibeneinlaß ins Reaktionsrohr. Die zu bearbeitenden Prozeßscheiben werden von hier per Hand oder per Chargierautomatik mit Quarzstäben in die konstante Zone des Ofens transportiert.

Es gibt grundsätzlich zwei Diffusionsabläufe in der Leistungselektronik:

1. Herstellung einer dotierten dünnen Silikatglasschicht auf der Siliziumscheibe und Eintreiben dieser Dotanden bei hohen Temperaturen über lange Zeiten ins Silizium,
2. Herstellung einer dünnen hochdotierten Oberflächenschicht im Silizium und Eintreiben der Dotanden bei hohen Temperaturen über lange Zeiten in tiefere Gebiete der Siliziumscheiben.

Die in der Leistungselektronik heute hauptsächlich angewendeten Verfahren finden im offenen Diffusionssystem statt. Es findet ein ständiger, gleichmäßiger Gasaustausch durch Einlaß und Auslaß der Reaktions- und Trägergase statt.

4.2.1.1. Trägergas-Diffusion

Das Gemeinsame der unter diesem Begriff zusammengefaßten Verfahren besteht in der Anwendung eines Transportgases (= Trägergas) zur Durchmischung und gleichmäßigen Verteilung des Quellgases im Reaktionsraum. Die Herstellung des Quellgases, das den zur Dotierung benötigten Fremdstoff enthält, erfolgt auf unterschiedliche Weise je nach Aggregatzustand des Quellmaterials.

Feste Quelle

Als Beispiel soll hier das Galliumdiffusionsverfahren dienen, das zur Herstellung tiefliegender (20 ... 100µm) p-leitender Schichten angewendet wird. Das Gaslaufschema ist in Abb. 4.2.1. dargestellt.

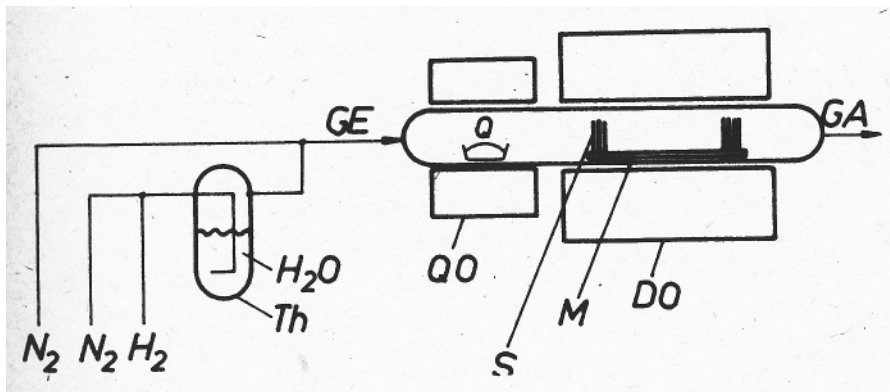


Abb. 4.2.1. Diffusionsanordnung bei fester Quelle (Ga_2O_3)

Th - Thermostat, Q - Quellenmaterial (Ga_2O_3), QO - Quellenofen,
DO - Diffusionsofen, GE - Gaseingang, GA - Gasausgang,
M - Scheibenträger, S - Si-Scheiben

Die Quelle besteht im allgemeinen aus einem Quarzschiffchen, das mit Galliumtrioxid gefüllt ist. Zur Temperierung muß ein zusätzlicher Ofen benutzt werden, da für die Diffusion Temperaturen von ca. 1273 K benötigt werden.

Selbst bei dieser Temperatur hat das Oxid einen sehr geringen Dampfdruck. Durch Reaktion mit Wasserstoff wird ein Suboxid (GaO oder Ga_2O) gebildet, das genügend Dampfdruck besitzt, um in ausreichender Menge abzukochen.

Es wird mit dem Wasserstoff- und Stickstoffstrom über die Siliziumscheiben geleitet, wo es ein mit Galliumoxid hoch angereichertes Silikatglas bildet und gleichzeitig Ga ins Silizium eindringt.

Da Siliziumoxid keine Barriere für das Gallium darstellt, kann dieser Prozeß so lange erfolgen, bis die erwünschte Eindringtiefe im Silizium erreicht ist. Die Quelle ist unerschöpflich; das Diffusionsprofil kann also mit einer erfc-Funktion beschrieben werden.

Die Steuerung der erwünschten Oberflächenkonzentration erfolgt durch die Temperatur des Quellenofens und durch den Wasserstoffpartialdruck.

Eine weitere Beeinflussung kann durch Zugabe von Wasser (Durchleiten der Trägergase durch ein thermostatisiertes Wasserbad) erfolgen. Damit wird die Reduktion des Ga_2O_3 gebremst. Zur Steuerung der Eindringtiefe dienen bei festgelegter Oberflächenkonzentration die Diffusionszeit und -temperatur. Für das Verfahren sind Schichtwerttoleranzen von 2 bis 10 % üblich.

Flüssige Quelle

Als Beispiel soll hier die POCl_3 -Diffusion beschrieben werden. Damit werden in der Leistungselektronik im allgemeinen tiefliegende (10 ... 150 μm) n-leitende Schichten hergestellt. Das Gaslaufschema ist in Abb. 4.2.2. dargestellt.

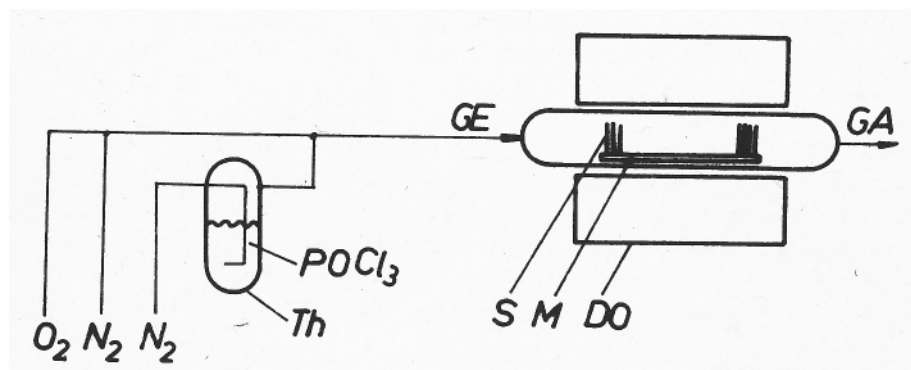


Abb. 4.2.2. Diffusionsanordnung bei flüssiger Quelle (POCl_3)

Th - Thermostat, DO - Diffusionsofen, GE - Gaseingang,

GA - Gasausgang, M - Scheibenträger, S - Si-Scheiben

POCl_3 ist zwischen 275 und 378 K eine farblose Flüssigkeit. Diese wird in einem Quellengefäß auf 293 ... 313 K thermostatiert. Je nach Temperatur nimmt ein durch die Quelle geleitetes Gas - Sauerstoff oder Stickstoff - eine dem Dampfdruck der Flüssigkeit entsprechende Menge gasförmiges POCl_3 auf. Dieses Gasgemisch wird sofort hinter der Quelle in den Hauptgasstrom (im allgemeinen N_2 oder N_2/O_2 -Gemisch) eingeleitet. Damit wird eine Homogenisierung erreicht und die Gefahr des Abscheidens von flüssigem POCl_3 in der Gasleitung vermieden.

Im Reaktionsraum reagiert unter Anwesenheit von O_2 bei den Diffusionstemperaturen von 973 - 1473 K das $POCl_3$ und es lagert sich auf den Scheiben ein SiO_2 - P_2O_5 -Glasgemisch ab. An der Grenzfläche dieses Glases zum Silizium bildet sich dann atomarer Phosphor, der in die Si-Scheibe eindiffundiert.

Aufgrund der selbstmaskierenden Wirkung des sich bildenden Phosphorglases gelangt immer weniger Phosphor mit zunehmender Abscheidezeit an die Siliziumoberfläche. Aus diesem Grund wird vielfach ein gesonderter Tiefendiffusionsschritt angeschlossen. Dieser läuft im allgemeinen unter Inertgasatmosphäre bei Temperaturen von 1173 bis 1523 K ab. Als Quelle dient dann entweder das P_2O_5 , das im abgeschiedenen Phosphorglas vorhanden ist und der bereits im Silizium vorhandene Phosphor oder nach Ablösen der so genannten Reaktionsphase (Phosphorglas) nur der im Silizium vorhandene Phosphor.

Zur Steuerung der Oberflächenkonzentration dient hauptsächlich der Vorablagerungsschritt. Dabei sind Verdampfer Temperatur, Gasdurchsatz durch den Verdampfer, O_2/N_2 - Partialdrücke und Temperatur im Reaktor ausschlaggebend. Die Quelle ist bei der Vorablagerung als unerschöpflich anzusehen.

Die Eindringtiefe x_j wird im wesentlichen durch den Tiefendiffusionsschritt festgelegt. Dabei sind bei gegebener Oberflächenkonzentration die Temperatur und die Zeit bestimmende Faktoren. Aufgrund der Erschöpflichkeit des Phosphors an der Oberfläche der Scheibe (speziell beim Ablösen der Reaktionsphase) reduziert sich aber die Oberflächenkonzentration während der Tiefendiffusion ständig. Die Diffusion erfolgt also mit zunehmender Diffusionszeit immer langsamer. Der Profilverlauf kann durch eine Gaußsche Verteilungsfunktion beschrieben werden. Für das Verfahren sind Schichtwerttoleranzen von 5 bis 10 % üblich.

Als Beispiel soll hier die BCl_3 -Diffusion beschrieben werden. Es werden damit p-Schichten von 20 bis 60 μm erzeugt. Das Gaslaufschema ist in Abb. 4.2.3. dargestellt.

BCl_3 ist bei Raumtemperatur und Normaldruck gasförmig. Es kann aber unter Druck verflüssigt werden. In Druckgasbehältern steht es als Quelle in ausreichender Menge verflüssigt zur Verfügung. Das im Gasmischsystem gasförmig vorliegende BCl_3 kann einfach mit Hilfe von Druckreglern und Strömungsmessern dosiert in den Reaktionsraum abgegeben werden. Zur Einstellung des Partialdruckes und zur besseren Durchmischung können reduzierende (H_2/N_2) oder oxidierende (O_2/N_2)-Trärgase zugemischt werden. Bei Bildung von B_2O_5 auf der Siliziumscheibe unter oxidierenden Bedingungen werden bessere Schichtwerthomogenitäten auf der

Scheibe erreicht. Da Bor ähnlich wie Phosphor durch SiO_2 maskiert wird, gilt zum Profilverlauf das beim Phosphor Gesagte. Der Prozeß wird ebenfalls im allgemeinen in zwei Schritten (Vorablagerung und Tiefendiffusion) ausgeführt. Die einfache Einstellung der Oberflächenkonzentration des Fremdstoffes im Silizium durch Regelung des Partialdruckes des Dotiergases ist ein wesentliches Merkmal aller Trärgasdiffusionen mit gasförmiger Quelle.

Die für das Verfahren üblichen Schichtwerttoleranzen liegen zwischen 5 und 10 %.

Nachteile sind die Schwierigkeiten, die durch die hygroskopischen Eigenschaften vieler Dotiergase, z. B. auch des BCl_3 entstehen. Meist entstehen schon im Leitungssystem und in den Mengenreglern Oxide des Dotierstoffes, die zu Fehlmessungen und Verstopfungen führen. Andererseits sind viele dieser Gase stark toxisch, so daß erhöhte Sicherheitsanforderungen erfüllt werden müssen.

Gasförmige Dotierquellen werden heutzutage hauptsächlich zur Dotierung von CVD-Gläsern benutzt. Eine umfassende Darstellung siehe deshalb im Abschnitt 4.2.1.4.

4.2.1.2. Flüssigdotierphasen-Diffusion

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Herstellung der dotierten Gläser auf den Siliziumscheiben, die als Quelle zur Dotierung dienen, erfolgt bei Diffusionstemperaturen von 973 bis 1473 K.

Da sämtliche Dotierungsatome, die später im Silizium vorhanden sein sollen, in dieser Glasschicht vorhanden sein müßten, kommt es zu einem Überschuß bei der gegebenen Temperatur und damit zu mechanischen Verspannungen auch in der Siliziumscheibe. Vielfach wird deswegen ein naßchemischer Auftrag von Glaslösungen auf die Scheiben bei Raumtemperatur angewendet.

Es ergibt sich folgender Arbeitsablauf:

1. Beschichten der Si-Scheibe mit dem Flüssigdotierstoff

- durch Aufpinseln (große Filmschichtdicken erreichbar; aber sehr inhomogene Schichten, Schwankungen von 10 ... 100 %)
- durch Aufschmieren mittels großer Stempel oder Drucken (ähnlich große Filmschichtdicken erreichbar, Homogenität besser als beim Aufpinseln; das Benetzen des Randes der Scheiben-Gegenseite wird weitestgehend vermieden)
- durch Aufschleudern mittels Zentrifuge (die erreichbaren Filmschichtdicken sind sehr gering; die Homogenität entspricht höchsten Ansprüchen, übliche Toleranzen liegen bei 5 ... 10 %)

2. Trocknen der Filmschicht

- durch Trocknung im Trockenschrank bei 423 - 523 K
- durch O_2 -Trocknung im Diffusionsofen bei 873 - 1273 K (hierbei wird am schnellsten eine Silikatschicht gebildet, die das Abdampfen von Bor weitestgehend verhindert)

- bei der Beschichtung mittels Zentrifuge kann nach dem Auftropfen durch Erhöhung der Schleuderdrehzahl eine Vortrocknung der Schicht bei Raumtemperatur erzielt werden

3. Tiefendiffusion

Dieser Schritt kann entweder in zwei Etappen - Vorablagerung und Tiefendiffusion - oder nur in einem Schritt ausgeführt werden. Nach der Vorablagerung wird die Reaktionsphase abgelöst und bei der Tiefendiffusion nur der Dotierstoff im Si genutzt. Zur Einstellung der Oberflächenkonzentration dienen die Temperatur, die Zeit der Vorablagerung und Tiefendiffusion und der Gasstrom, der sich aus O_2/N_2 zusammensetzt. Das Gasmischsystem hat also einen einfachen, störunanfälligen Aufbau. Die Tiefendiffusion erfolgt oftmals bei Stapelung der Scheiben. Damit können gleichzeitig sehr viele Scheiben diffundiert und die Oberflächenkonzentration hoch eingestellt ($10^{18} \dots 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) werden. Scheiben mit polierten Oberflächen oder fotolithografisch strukturierte Scheiben müssen einzeln in Magazinen diffundiert werden (kein Stapeln möglich).

Neuere Dotierlösungen basieren hauptsächlich auf Silanbasis, durch die eine gute Homogenität der Parameter erreicht wird und aufgrund der geringen Abdampfrate eine hohe Quellenergiebigkeit gewährleistet ist. Das ist besonders bei der Herstellung von Leistungsbauelementen von Interesse. Das Silan dient also der Verfestigung der Schicht und der Verhinderung des Abdampfens des Dotierstoffes bei Temperaturen = 523 K.

Die Dotierstoffe (hauptsächlich Bor und Phosphor) werden in Form ihrer Säuren, Oxide oder Salze zugesetzt.

Zusätzlich wird noch ein Lösungsmittel benötigt, das eine homogene Verteilung des Dotierstoffes in der Schicht bis 523 K garantiert. Das Lösungsmittel ist je nach Hersteller und Anwendungsfall sehr unterschiedlich. So werden an die Dotierlösungen für geläppte und polierte (meistens auch fotolithografisch strukturierte) Scheiben unterschiedliche Anforderungen gestellt. In der Leistungselektronik müssen die Schichten bei hohen Konzentrationen große Eindringtiefen aufweisen, sehr homogen sein und struktur-fehlerarm; dabei soll die Technologie mit einfachen Mitteln sichergestellt und ein hoher Durchsatz gesichert sein.

Einige Dotierlösungen und technologische Verfahren sind heute bereits dazu in der Lage.

4.2.1.3. Diffusion aus Quellscheiben

Quellscheiben sind hoch mit Dotierstoffen angereicherte Silizium- oder Keramikscheiben. Sie geben bei einem Dotierprozeß, dessen Schema in Abb. 4.2.4. dargestellt ist, die Dotierstoffe bei Temperaturen von 1173 ... 1473 K an die Siliziumprozeßscheiben ab.

Die Quellscheiben müssen bei diesen hohen Temperaturen formbeständig und mehrfach einsetzbar, ohne Verminderung der Ergiebigkeit an Dotanden sein. Ihr Vorteil liegt in der einfachen unkritischen Handhabung des Hochtemperaturprozesses. Es ist lediglich die dosierte Zugabe eines N_2/O_2 -Gemisches erforderlich.

Söhwierigkeiten treten bei der Magazinierung der Quell- und Si-Prozeßscheiben auf. Der Abstand der Scheiben zueinander muß sehr genau eingehalten werden; die Scheiben müssen genau parallel zueinander ausgerichtet sein. Optimal kann das nur mit Si- und SiC-Magazinen realisiert werden. Außerdem erfordern die unterschiedlichen Dicken von Quell- und Prozeßscheiben (Si-Scheiben 200 ... 500µm, Quellscheiben 1000 ... 3000µm) unterschiedlich breite Schlitzte.

Die Prozeßscheibenzahl, die gleichzeitig diffundiert werden kann, ist im Vergleich zu allen anderen Verfahren am geringsten. Da der Diffusionsschritt aber meistens ebenfalls in eine kurzzeitige Vorablagerung mit Quellscheiben und langzeitige Tiefendiffusion bei erhöhten Temperaturen geteilt wird, ist im allgemeinen eine ausreichende Ökonomie erzielbar.

Die Fertigung der Scheiben ist Herstellergeheimnis. Im wesentlichen sind Bornitrid-, Boroxid- und Phosphoroxidscheiben im Angebot. Die Nitridscheiben wurden als erste entwickelt. Da sie u. a. einen zusätzlichen Formierungsschritt vor jeder neuen Vorablagerung bedürfen, werden heute vorwiegend oxidische Keramikscheiben angewendet.

Die genannten hochdotierten Si-Scheiben werden mit unterschiedlichen Dotierverfahren (Trärgas-, Flüssigdotierung) im allgemeinen mit Bor und Phosphor hergestellt. Diese Dotierung erfolgt aus der Sättigung und braucht keine Rücksicht auf die Kristallbaufehler zu nehmen.

Die Umdotierung auf die Prozeßscheiben erfolgt dann mit dem unkomplizierten Dotierscheibenverfahren, genau dosiert und störungsarm. Die erzielbaren Toleranzen für Reproduzierbarkeit und Homogenität liegen zwischen 2 und 10 %.

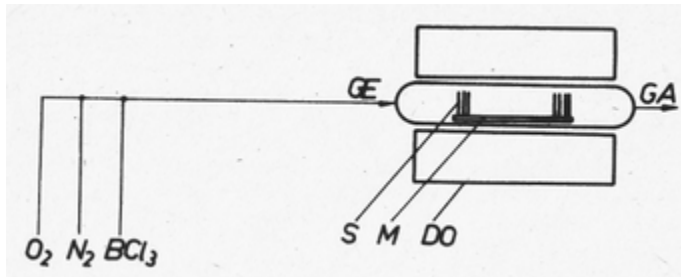


Abb. 4.2.3. Diffusionsanordnung bei gasförmiger Quelle (BCl_3)

DO Diffusionsofen, GE Gaseingang,

GA Gasausgang, M Scheibenträger, S Si-Scheiben

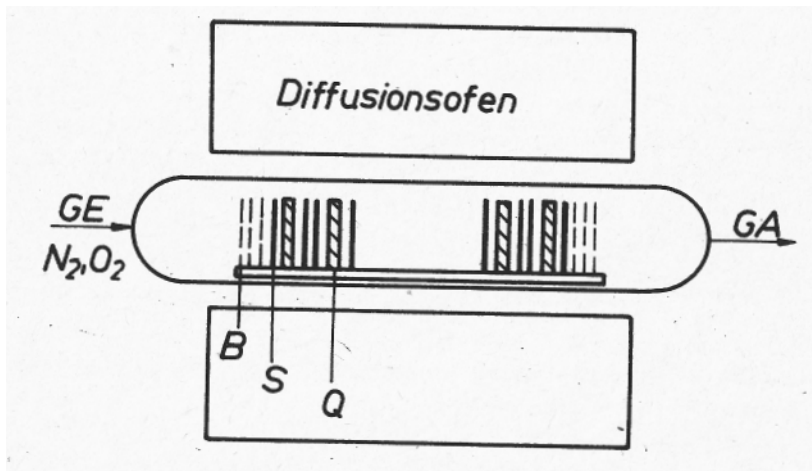


Abb. 4.2.4. Diffusionsanordnung für Quellscheiben

B Blindscheiben, S Si-Scheiben, Q Quellscheiben

4.2.1.4. Diffusion aus festen Dotierphasen (CVD-dotierte Oxide)

Ein weiteres Verfahren, bei dem die Aufbringung der dotierten Glasschicht störungsarm bei niedrigen Temperaturen erfolgt, ist die Abscheidung aus der Gasphase.

Die Temperaturen liegen dabei zwischen 573 und 773 K. Grundchemikalien sind dabei Silan (SiH_4) als Oxidbildner und PH_3 (Phosphin) bzw. Diboran (B_2H_6) als Dotierungsgase. Diese Substanzen zerfallen bei Anwesenheit von Sauerstoff unter den genannten Temperaturen zu SiO_2 , P_2O_5 und B_2O_3 sowie H_2O . Die Oxide scheiden sich auf den temperierten Scheiben als Gemisch (Phosphor- bzw. Borglas) amorph ab. Zur Abscheidung werden heute zwei grundsätzlich unterschiedliche Anlagentypen angewendet.

1. Normaldruck-CVD-Anlage

Der Gasdruck im Reaktionsraum entspricht dem Umgebungsluftdruck. Phosphin bzw. Diboran liegt mit N_2 oder H_2 gemischt niedrig konzentriert vor. Der Gesamtgasdurchsatz ist hoch. Die Prozeßscheiben liegen auf einer dunklen Platte (Suszeptor oder Heizer genannt); diese besteht

aus mit Si oder SiC beschichtetem Graphit oder anders modifiziertem Kohlenstoff.

Das System wird mit Lampen, die einen hohen Infrarotanteil haben, bestrahlt. Dabei heizt sich im wesentlichen nur die dunkle Platte mit den Scheiben auf die Prozeßtemperatur auf. Der Quarzreaktor, in dem die Gasreaktion abläuft, bleibt weitaus kühler (Kaltwandreaktor). Damit wird die Abscheidung des Glases auf die Si-Scheiben garantiert. Nachteile des Verfahrens bestehen im hohen Gasverbrauch und der geringen, nur liegend bearbeitbaren Anzahl von Si-Scheiben. Die Homogenität und Reproduzierbarkeit der erreichbaren Schichtdicken und Fremdstoffkonzentrationen liegt bei 10 ... 20 %.

2.-Niedrigdruck-CVD-Anlage (low pressure CVD : LPCVD)

Diese Anlage arbeitet bei nahezu evakuierten Reaktor bei gleichen Temperaturen wie die Normaldruckanlage. Die gleichen Gase werden in weitaus geringerem Maße durchgesetzt.

Aufgrund der genannten Bedingungen kann ein normaler elektrischer Diffusionsofen benutzt werden (Heißwandreaktor). Die Abscheidung erfolgt fast nur auf den heißen Si-Scheiben. Diese können genau so wie im Diffusionsofen in Magazinen hintereinander stehend angeordnet werden. Damit ist eine große Anzahl von Scheiben gleichzeitig bearbeitbar. Die Homogenität der erzielten Schichten ist u. a. aufgrund der geringen Gasströmungsgeschwindigkeit ebenfalls besser als bei der Normaldruckanlage (5 ... 10 %). Nachteil dieser Anlagen ist die Notwendigkeit der ständigen Evakuierung des Reaktors. Dazu bedarf es Spezialpumpen, die die Störanfälligkeit des Verfahrens im wesentlichen bestimmen.

Die hergestellten Gläser dienen dann in einfachen Tiefendiffusionsprozessen als Quelle, wie bei den bereits beschriebenen Verfahren (ebenfalls in Vorablagerung, Ablösung der Reaktionsphase und Tiefendiffusion unterteilbar).

Die im allgemeinen hohe Giftigkeit der verwendeten Dotiergase und die leichte Selbstentzündung des Silans an Luft erschwert die Anwendbarkeit des Verfahrens. Es stehen aber bereits heute Anlagen zur Verfügung, die ein sicheres Arbeiten garantieren.

Die Dotierbestandteile, die nicht im Reaktor reagieren, werden aus der Abluft ausgewaschen und in nichtlösliche, ungiftige Verbindungen überführt; das Silan wird verbrannt. Warnsysteme signalisieren Prozeßunregelmäßigkeiten bzw. -Gasaustritt. Im allgemeinen wird die Anlage dann bereits automatisch abgeschaltet, und ungiftige Inertgase werden eingeleitet.

4.2.1.5. Ionenimplantation und Tiefendiffusion

Eine sehr genau vorausberechenbare Konzentration von Dotierelementen kann mit Hilfe der Ionenimplantation in oberflächennahe Schichten des Siliziums eingebracht werden, d.h. es entstehen sehr homogene, gut reproduzierbare Vorbelegungsschichten. (Übliche Toleranzen liegen bei $\approx 1\%$.) Dazu werden entsprechende Ionen elektrisch beschleunigt - durch Massentrennung wird eine hohe Reinheit dieses Ionenstrahls garantiert – und auf die Siliziumscheibe aufgeschossen. Die elektrische Aktivierung der eingeschossenen Dotanden und die Ausheilung der beim Beschuß entstandenen mechanischen Strukturdefekte erfolgt in einem sich anschließenden Hochtemperaturausheilprozeß. In der Leistungselektronik muß sich daran ein Tiefendiffusionsschritt bei höheren Temperaturen anschließen, um die geforderten Eindringtiefen zu erreichen.

(Ausheil- und Tiefendiffusionsschritt können miteinander verbunden sein.) Es werden vorwiegend Hochstromimplanter eingesetzt, um die geforderten dotierten Schichten im Silizium zu erhalten. Derartige Geräte haben folgenden prinzipiellen Aufbau:

- Ionenquelle
 - Extraktions- und Fokussierelektroden
 - magnetischer Massentrenner
 - Linearbeschleuniger.
 - Linsenkammer mit Linsen und Ablenkeinheit
 - Probenkammer.

Als Ionenquellen dienen im allgemeinen Gasentladungsenquellen. Dazu werden zwischen Katode und Anode Elektronen mit Hilfe eines elektrischen Feldes beschleunigt. Auf ihrem Weg wechselwirken sie mit dem vorhandenen Dotiergas oder Dampf, so daß sich ein Plasma herausbildet. Mit Hilfe von Absaugelektroden können nun die interessierenden Dotierungsen abgesaugt werden. Substanzen, die nicht gasförmig vorliegen, müssen mit Hilfe eines Verdampfers in den gasförmigen Zustand gebracht werden (z. B. violetter Phosphor).

Um diesen Problem zu umgehen, werden heute bereits gasförmige Verbindungen der Dotierelemente eingesetzt (z.B. BF_3 , PH_3 , AsH_3). Der Nachteil dieser Substanzen ist ihre hohe Giftigkeit.

Mit Hilfe von Fokussierelektroden wird ein gebündelter Strahl in den Massenanalysator eingeleitet. Der magnetische Massentrenner arbeitet auf der Grundlage des Prinzips, daß Ionen unterschiedlicher Masse M und der Ladung q , die mit der Spannung U beschleunigt wurden, im homogenen Magnetfeld H unterschiedliche Kreisbahnen der Radien

$$r = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2MU}{q}}$$

beschreiben. Ionen verschiedener Masse, aber mit gleicher Energie verlassen das Magnetfeld, bei gleichem Eintrittsort, an verschiedenen Stellen. Durch Blenden wird sichergestellt, daß nur die interessierenden Ionen in den Linearbeschleuniger gelangen, wo sie die gewünschte Energie erhalten. Im allgemeinen erfolgt das elektrostatisch durch eine größere Anzahl zylinderförmiger Elektroden. In der Linsenkommer wird der Ionenstrahl mit Hilfe von elektrostatischen oder magnetischen Linsen weiter fokussiert. Zum Scannen des Strahls über die Siliziumscheibe, um eine homogene Dotierung zu erzielen, dienen ebenfalls elektrostatische Linsen, die von einem Wobbelgenerator gesteuert werden. Das Prinzip ist analog dem zur Erzeugung des Fernsehbildes. Dieser so behandelte Strahl wird in die Probenkammer eingeleitet, in der sich die Siliziumscheiben befinden. Diese Kammer sollte sich durch die Möglichkeit zur schnellen Beschickung mit Siliziumscheiben auszeichnen. Dazu gehört eine schnelle Evakuierungsmöglichkeit.

Zur Realisierung der vorgegebenen Dotierung des Siliziums wird während der Implantation der Ionenstrom bei fest eingestellter Implantationsenergie gemessen. Es wird u. a. damit eine hohe Reproduzierbarkeit des Verfahrens garantiert. Die Dosis bestimmt sich aus dem Ionenstrom durch eine konstante Fläche (Ionen/cm²) und der Implantationszeit.

Die Eindringtiefe der Ionen ins Silizium wird durch die Implantationsenergie (Beschleunigungsspannung) bestimmt. Die im Volumen eingebrachte Ionenmenge hängt bei konstanter Ionenstromdichte nur noch von der Implantationszeit ab.

Der Vorteil des Implantationsverfahrens liegt in der bereits genannten sehr guten Homogenität und Reproduzierbarkeit des Verfahrens. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit der einseitigen Dotierung der Siliziumscheiben. Da die Dotanden in atomarer Form in oberflächennahe Schichten des Siliziums eingebaut werden, ist eine verringerte Ausdiffusion des Dotanden aus dem Silizium zu beobachten. Um bei der anschließenden Tiefendiffusion ein Umdampfen auf die Gegenseite zu vermeiden, ist zum Beispiel beim Phosphor kein bzw. nur ein sehr dünnes Maskierungsoxid (= 0,1µm) notwendig. Bei einer P₂O₅-Glasschicht auf dem Silizium ist bei Langzeitdiffusionen eine Umdotierung nicht zu vermeiden.

Nachteile des Implantationsverfahrens bestehen einmal in den hohen Anschaffungskosten des Implanters. Die bei der Implantation entstehenden mechanischen Strukturdefekte können bei unsachgemäßer nachfolgender Temperaturbehandlung zu Störungen im künftigen Bauelement führen. Die mit der Implantation im vertretbaren ökonomischen Aufwand realisierbaren Schichtleitwerte bei großen Eindringtiefen sind im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren gering.

Eine Kontamination mit unerwünschten Elementen durch Streustrahlung bzw. Sekundärstrahlung und durch Rückstoßimplantation ist nicht auszuschließen. Das kann zu schwer ätzbaren, störenden Oberflächenschichten führen. Bei der anschließenden Tiefendiffusion kann es auch zur Verunreinigung des Volumens der Siliziumscheibe kommen, was u. a. zu einer Verringerung der Minoritätsladungsträgerlebensdauer führt.

4.2.2. Epitaxie

Unter Epitaxie in der Halbleitertechnik ist das gesetzmäßige Aufwachsen von einkristallinen Schichten auf einkristallinen Unterlagen (Substraten) zu verstehen.

Das Gebiet der Epitaxie von Halbleitern ist so umfangreich, daß im Rahmen dieses kurzen Lehrbriefes nur ein ganz eng begrenzter Einblick zum Verständnis der Begriffe und Probleme der Epitaxie-Praxis auf dem Gebiet der Leistungselektronik gegeben werden kann.

Technische Bedeutung hat in diesem Zusammenhang die Silizium-Epitaxie auf Silizium-Substraten mit annähernd (111)-Oberflächen, für Dioden und Transistoren sowie auf (100)-Oberflächen für Druckwandler- bzw. Drucksensorbauelemente-Anordnungen. Hier soll eine Einschränkung auf (111)-Epitaxie erfolgen, da sie für die Leistungselektronik typisch ist.

4.2.2.1. Zum Epitaxieverfahren

Die Epitaxieverfahren beruhen auf der chemischen Zersetzung einer Chlor-, bzw. Monosilan-Verbindung $\text{SiH}_x \text{Cl}_{4-x}$ ($x = 0, 1, 2, 4$) unter Wasserstoffatmosphäre in einem Temperaturbereich von 1273 ... 1523 K bei Normaldruck. Die Si-Quellen sind gasförmig, ihr Chlorgehalt bestimmt das Reaktionsverhalten und damit die speziellen Eigenschaften. Mit abnehmendem Chlorgehalt sind das gemäß einer Zusammenstellung bei [6]:

- die Erhöhung der Aufwachsgeschwindigkeit
- die Erniedrigung der Epitaxietemperatur
- die Erweiterung des Temperaturbereiches, in dem die Aufwachsgeschwindigkeit von der Temperatur unabhängig wird
- die Vereinfachung der Prozeßführung und der Handhabetechnik und damit die Erhöhung der Prozeßsicherheit
- die Forderung nach Erhöhung der Reinheit der Apparatur bezüglich O_2 -Verunreinigungen
- die Erhöhung der Neigung zur Si-Freisetzung bereits in der Gasphase (Homogenreaktion) verbunden mit der Verschlechterung der Schichtperfektion bei Erhöhung der Aufwachsgeschwindigkeit (SiH_4).

In Tabelle 4.2.2. sind Quellenmaterialien und typische Werte spezifischer Merkmale derselben angegeben.

Für die DDR hat aus Gründen des Materialaufkommens die SiCl₄-Variante die größte Bedeutung.

Die während des Epitaxieprozesses ablaufende chemische Reaktion wird durch die folgende Reaktionsgleichung beschrieben:



Si-Quellen-Materialien	Aufwuchsrate µm*min/ ⁻¹	Epitaxie-Temp. /K/	Aggr.-Zustand bei RT	Intrinsic- Widerstand /Ohm*cm/
SiCl ₄	1,8	1423 - 1523	flüssig	150
SiHCl ₃	2,0	1373 - 1473	flüssig	100
SiH ₂ Cl ₃	5,0	1323 - 1423	gasförmig	50
SiH ₄	0,3	1273 - 1373	gasförmig	100
SiH ₄ /HCl	10,0	1273 - 1373	gasförmig	100

Tabelle 4.2.2. Epitaxie-Quellenmaterialien und typische Werte spezifischer Merkmale nach /6/

Die Leistungselektronik stellt an die Epitaxieverfahren hohe Anforderungen, die sich aus den relativ dicken Schichten, den niedrigen Dotierungskonzentrationen bei hoher Dotierungsgenauigkeit und Homogenität in lateraler und vertikaler Richtung ergeben. Dazu kommt die Verhinderung von Verunreinigungen, welche die Ladungsträger-Lebensdauer beeinflussen. Hieraus leiten sich an die Apparaturen spezifische Ansprüche ab. Die Apparaturen sind in den Reaktionsgas und Dotiergas führenden Teilen aus nicht chemisch reagierenden Materialien gasdicht aufzubauen.

Die Zusammensetzung im Verhältnis Reaktionsgas zu Dotiergas ist bei niedrigen Dotiergasmengen mit hoher Genauigkeit einzustellen und während des Wachstumsprozesses einer Schicht exakt konstant zu halten. Hierzu werden Geräte, so genannte MFC (mass-flow controller), eingesetzt.

Die verwendeten Dotiergase sind Gifte der Abteilung 1. Beim Umgang sind die einschlägigen gesetzlichen Bestimmungen und die betrieblichen Festlegungen (ASAO) einzuhalten!

Moderne Epitaxie-Anlagen verfügen über spezielle Einrichtungen, die eine möglichst gleichmäßige (laminare) Strömung den Reaktionsgasen, d. h. die gleichmäßige anteilige Versorgung aller Halbleiterscheiben einer Charge mit unverbrauchtem und die ebenso gleichmäßige Abführung von verbrauchtem Reaktionsgas, gewährleisten, die ferner beim Umschalten auf einen anderen

Dotanden, insbesondere bei Wechsel der Leitfähigkeit, einen restlosen und möglichst raschen Wechsel den Reaktionsgas/Dotiergas-Gemisches garantieren.

Die Dotierung erfolgt durch Gasphasendotierung unter Verwendung von so genannten Dotiergas-Gemischen (PH_3/H_2 -Gemische für n-Dotierung, bzw. $\text{B}_2\text{H}_6/\text{H}_2$ -Gemische für p-Dotierung).

Für den bei Leistungsbaulementen in Frage kommenden Dotierungsbereich von $7 \cdot 10^{13}$ bis 10^{16} cm^{-3} liegen die PH_3/H_2 - bzw. $\text{B}_2\text{H}_6/\text{H}_2$ -Konzentrationen zwischen 10 und 100 ppm.

Ein wesentliches Problem der Epitaxie besteht in der Absenkung des Gehaltes von Strukturbaufehlern in den Epitaxieschichten. Dieses Problem ist um so bedeutender, je größer die Chip-Fläche eines Bauelementes ist. Vom Standpunkt der Leistungselektronik aus ist eine Einteilung der Defekte in zwei Gruppen zweckmäßig:

Gruppe 1: Defekte, welche die normale Funktion eines Bauelementes zerstören.

Gruppe 2: Defekte, welche bedingte Störungen verursachen, die bis zu einer bestimmten Dichte im Bauelement zugelassen sind.

Folgende signifikanten Defektarten sind zu nennen:

- Gruppe 1:
1. Polykristalline Einschlüsse
 2. Tripyramiden
 3. Große bzw. Vierfachstapelfehler

Sofern die Fehler mit einem Herauswachsen aus der makroskopischen Scheibenoberfläche verbunden sind, werden sie auch als "Spikes" bezeichnet.

- Gruppe 2:
4. Stapelfehler (verschiedene Formen)
 5. Linienförmige Einsenkungen (mikroskopisch klein, bisher nur als geometrische Profilstörung der Epitaxieschichtoberfläche identifiziert)
 6. Versetzungen
 7. Mikrodefekte (beim Anätzen punktförmig, bisher unidentifiziert)

4.2.2.2. Einfluß des Substrate

1. Definierte Fehlorientierung der Substratscheiben

Die Oberflächen der Substratscheiben verlaufen nicht genau parallel zu den (111)-Ebenen. Sie weisen eine so genannte definierte Fehlorientierung auf (siehe Abschnitt 2.1.1.).

Die Verschwenkung beträgt als Zielgröße 3 Grad in $\langle 110 \rangle$ -Richtung (siehe Abb. 2.1.1.).

Derartig definiert fehlorientierte Oberflächen haben positive Wirkungen gegenüber der exakt parallel einer kristallographischen Hauptebene orientierten Oberfläche hinsichtlich folgender Parameter:

- Optimale Wachstumsgeschwindigkeit
- Vermeidung von Strukturbaufehlern
- Homogenität der Dotierung
- Flächenhomogene Wachstumsrate

Silizium-Substratscheiben werden gewöhnlich aus versetzungsfreien, hochdotierten Czochralski-Kristallen hergestellt.

2. Eigenschaften, welche die Perfektion der Epitaxieschicht beeinflussen

Die Substrate haben einen erheblichen Einfluß auf die Güte der aufwachsenden Epitaxieschichten. Das gilt sowohl für die strukturelle Perfektion als auch für Dotierungseinflüsse (Verunreinigungen und Wechselwirkungsphänomene zwischen chemischen und strukturellen Baufehlern eingeschlossen). Die strukturelle Perfektion wird beeinflusst durch:

- Strukturbaufehler im Substrat

Gewöhnlich setzen sich die Strukturbaufehler, die an die Oberfläche des Substrates stoßen, in der Epitaxieschicht fort oder bilden den Ausgangspunkt für andersartige Kristallbaufehler.

- Güte der Oberfläche des Substrates

Hierzu zählen:

Oberflächendeformationen, die bei einem prozeßbedingten Aufheizen zur Bildung von Kristalldefekten führen können.

Geometrische Gestaltungsabweichungen (eingeschlossen solche, welche durch annähernd amorphe Schichten beim Polieren "zugeschmiert" sein können und erst während und durch den Epitaxieprozeß wieder ausgebildet werden), die für die Kristallisationskeimbildung andere Verhältnisse anbieten als die reguläre Oberfläche.

Verunreinigungen des Substrates, die im Substrat selbst vorkommen und durch die Oberflächenbehandlung freigelegt werden, z. B. Ausscheidungen (SiO_2 -cluster, SiC-cluster).

Verunreinigungen der Oberfläche. Hierunter sollen all die Rückstände verstanden werden, die von der Oberflächenbehandlung selbst oder von Nachbehandlungsschritten zurück-

bleiben (Läppmittelreste und Si-Splitter, die auch in die Oberfläche eingedrückt sein können, Rückstände von Läpp- und Polierunterlagen, von Polier- und Reinigungsmitteln, speziell Rückstände aus Lösungsmitteln). Letztlich zählt zu dieser Kategorie auch der sich auf der Oberfläche absetzende Staub.

3. Eigenschaften, welche die Dotierung der Epitaxieschicht beeinflussen

Dotierungseinflüsse können von hochdotierten Substraten ausgehen, wenn infolge des prozeßbedingten Aufheizens das Dotierungselement ausdampft und so eine ungewollte Dotierung der aufwachsenden Epitaxieschicht über die Gasphase erfolgt (meist inhomogen und nicht steuerbar). Das gilt insbesondere bei As-dotierten Substraten ($3 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$), wenn darauf hochohmige Schichten von $> 1 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ abgeschieden werden sollen.

Bei p-Schichten kann es dabei zu Kompensation, d. h. zu "unecht" hohen Widerstandswerten kommen.

Substrate müssen ferner frei von solchen Verunreinigungen sein, welche die Lebensdauer der Ladungsträger beeinflussen, da diese durch Diffusion direkt oder indirekt durch Ausdampfen und anschließende Eindiffusion in die Epitaxieschicht gelangen können.

Frei von Verunreinigungen bedeutet stets, daß die Konzentrationen unterhalb der störenden Größenordnung liegen müssen (Gehalte in Silizium siehe auch Tabelle 2.2.).

4.2.2.3. Einfluß der Reaktions- und Dotiergase

Die Reaktions- und Dotiergase unterliegen strengen Reinheitsvorschriften, die in TLA-Unterlagen festgelegt sind. Die Überprüfung der Qualität erfolgt durch Testabscheidungen und Herstellung von Testanordnungen zum Messen elektrischer Kenngrößen wie

- spezifischer elektrischer Widerstand (an der Schicht),
- Trägerlebensdauer (an bauelementeähnlichen Testanordnungen),
- Sperrspannungen (an bauelementeähnlichen Testanordnungen).

4.3. Oxidation

Die Bildung von SiO_2 an der Oberfläche der Siliziumscheibe wird aus verschiedenen Gründen angestrebt. Hauptanwendungsfälle sind die Maskierung und Passivierung.

Bei der Maskierung macht man sich die Eigenschaft vieler Dotanden zunutze, durch Siliziumdioxid

sehr viel langsamer zu diffundieren als durch Silizium. Speziell gegenüber B und P ist diese Maskenwirkung sehr deutlich.

Dieses Maskierungsoxid kann in einem anschließenden fotolithografischen Strukturierungsprozeß teilweise geöffnet werden, so daß sich bei der nachfolgenden Bor- oder Phosphordiffusion dotierte Gebiete auf der Oberfläche mit nicht dotierten ablösen.

Bei der genannten Passivierung durch Oxidation versteht man den Schutz von pn-Übergängen, die an der Oberfläche der Siliziumscheibe durchstoßen. In der Leistungselektronik handelt es sich dabei hauptsächlich um die Passivierung des Emitter-Basis-Überganges. Nur bei reinen Planarbauelementen wird auch der sperrende Basis-Kollektor-Übergang derartig passiviert.

Die Realisierung der genannten Oxide kann ähnlich vielfältig wie die Diffusion ausgeführt werden. Hauptmedien dafür sind O_2 , H_2O und SiH_4 . Man unterscheidet im wesentlichen die

- thermische Oxidation und die
- chemische Dampfphasenabscheidung (CVD).

Das Merkmal des thermischen Oxidation ist die Bildung des Oxids auf den Scheiben bei Hochtemperaturprozessen zwischen 1173 und 1473 K unter Anwesenheit von O_2 oder H_2O . Bei diesen Temperaturen reagieren der Sauerstoff bzw. die OH-Ionen des Wassers mit dem Silizium und bilden ein sehr ätzresistentes, dichtes und fehlerfreies Oxid. Das Schichtwachstum bei Oxiddicken $= 20$ nm gehorcht in guter Näherung folgender Gleichung

$$d_{ox}^2 = B \cdot t \quad \text{bei großen Werten für } t, \quad (8)$$

wobei d_{ox} die Oxiddicke, t die Oxidationszeit und B die parabolische Konstante ist (in der Leistungselektronik sind diese großen Werte für t auf Grund der erforderlichen Oxiddicken im allgemeinen garantiert). Die Oxidation wird in einem Diffusionsofen ausgeführt. Das Gaslaufschema ist in Abb. 4.3.1. dargestellt.

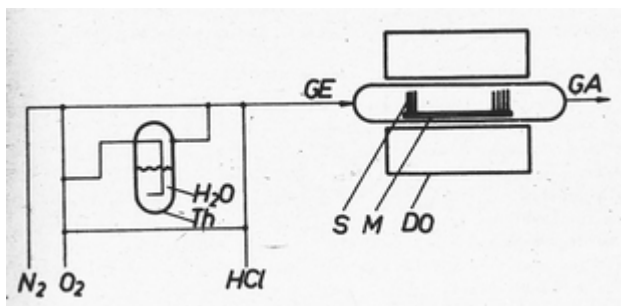


Abb. 4.3.1. Oxidationsanordnung

Th / Thermostat DO / Diffusionsofen GE / Gaseingang, GA / Gasausgang
M / Scheibenträger S / S1-Scheiben

Bei der thermischen Oxidation unterscheidet man die folgenden Verfahren:

4.3.1. Trockenoxidation

Die Oxidation wird nur unter Sauerstoff mit einem Feuchtegehalt, der einem Taupunkt von 203 K (- 70 °C) entspricht, ausgeführt. Die Aufwachsrate ist von allen Oxidationsverfahren am geringsten (siehe Tabelle 4.3.1.). ,

Das Oxid zeigt die größte Dichte und hat die geringste Löcherdichte, die Grenzflächeneigenschaften sind sehr gut.

Das Oxidationsverfahren wird deshalb dort eingesetzt, wo fehlerfreie, dichte Oxide erforderlich sind mit Oxiddicken bis zu 0,2 µm. Dafür sind bei 1273.K bereits 6 h Oxidationszeit erforderlich.

Wesentlichen Einfluß auf die erzielbaren Schichtdickenwerte und Schichthomogenitäten haben die Temperatur, der Sauerstoffpartialdruck und die Restfeuchte im Gas. Diese macht sich speziell bei sehr geringen Oxiddicken bemerkbar (< 50 nm). Die Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck wird heute bereits bei Hochdruck-Oxidation ausgenutzt. Man strebt dabei entweder niedrigere Oxidationstemperaturen an, oder man möchte bei üblichen Oxidationstemperaturen größere Schichtdicken in der gleichen Zeit erreichen.

Trocken				feucht	
T/K/	B/nm ²	min ⁻¹ /	ρ/g*cm ⁻³ /	B/nm ²	min ⁻¹ / ρ/g*cm ⁻³ /
1173	25			3,4*10 ³	
1273	110 ... 195	2,27		4,8*10 ³	2,18
1373	450			8,5*10 ³	
1473	670 ... 720	2,15		12*10 ³	2,21

Tabelle 4.3.1. Oxid-Dichte bei trockener und feuchter Oxidation

4.3.2. Feuchtoxidation

Bei dieser Oxidationsvariante wird Sauerstoff oder ein Inertgas durch einen temperierten Befeuchter geleitet. Das Gas belädt sich dann je nach Wasserbadtemperatur (353 ... 368 K) mit Wasser. Die Oxidation in diesem Wasserdampfstrom erfolgt weitaus schneller (siehe Tabelle 4.3.1.) als bei der Trockenoxidation. Die Dichte des Oxids ist aber geringer, die Löcherdichte höher und auch die Grenzflächeneigenschaften schlechter als beim Trockenoxid. Sein Einsatzgebiet ist aber in der Leistungselektronik sehr groß. Die erforderlichen Schichtdicken zwischen 0,3 bis 1,4 µm erfordern das im allgemeinen. Außerdem sind die Oxideigenschaften ausreichend.

Die Steuerung erfolgt über die Badtemperatur, Scheibentemperatur und Oxidationszeit; sie ist damit sehr unkompliziert. Eine weite Verbesserung des Verfahrens stellt die definierte Herstellung von Wasser im Reaktionsrohr durch Einleiten von O_2 und H_2 dar. Die Gase können sehr gut gereinigt werden. Die Wassermenge wird genau definiert und einfach geregelt durch Steuerung der Gasströme mittels automatischer Gasmengenregler. Damit kann das Verfahren vollautomatisiert werden.

Zur Verbesserung der Oxideigenschaften erfolgt bei der thermischen Oxidation oftmals der Zusatz von HCl. HCl bindet bzw. eliminiert bewegliche Ionen wie K oder Na im Oxid. Diese Ionen sind bereits bei Raumtemperatur im Oxid beweglich und verschlechtern speziell die Passivierungseigenschaften der Oxide über pn-Übergängen.

Außerdem erreicht man mit dem HCl eine Abreicherung von Schwermetallen, die hauptsächlich als Rekombinationszentrum wirksam werden können, und damit zur Verschlechterung der Minoritätsträgerlebensdauer beitragen.

Um ein Verätzen der Siliziumoberfläche zu vermeiden, darf der HCl-Zusatz zum Sauerstoffstrom höchstens ca. 5 ... 10 % betragen. Bei Feuchtoxidationsprozessen werden Trockenoxidationen mit HCl z. B. nach dem Schema trocken-feucht-trocken eingefügt.

Die CVD-Oxidationsverfahren basieren auf den Grundlagen, die in Abschnitt 4.2.1.4. dargestellt sind. Zur reinen SiO_2 -Bildung wird dabei nur Silan (SiH_4) und O_2 eingesetzt. Der Vorteil der CVD-Gläser besteht in der niedrigen Herstellungstemperatur von 573 - 773 K. Diese Oxide haben aber nur eine geringe Dichte und eine verhältnismäßig hohe Löcherdichte. Eine Verbesserung dieser Eigenschaften erzielt man durch Temperungen bei höheren Temperaturen (773 ... 1273 K). Man nähert sich z. B. der Dichte und Ätzrate des feuchten Oxids.

Mit P_2O_5 versetzte CVD-Gläser werden als das Bauelement nach den Hochtemperaturschritten oberflächlich passivierende Schichten verwendet. Undotierte CVD-Schichten dienen u. a. als Ätzmasken bei Metallisierungs- und Passivierungsschritten.

4.4. Fotolithografie

Unter dem technologischen Oberbegriff Fotolithografie ist ein Komplex von einzelnen Arbeitsgängen zusammengefaßt, die in der Folge der Arbeitsgänge des Zyklus I mehrfach wiederholt eingeordnet sind und der Ausbildung der lateralen Bauelementestruktur

auf der planaren Seite dienen. In Sonderfällen ist eine zueinander ausgerichtete Fotolithografie beider Scheibenoberflächen erforderlich. Hierzu zählen insbesondere die Herstellung von SiO_2 (Hilfs-)Masken für die Eindiffusion oder auch Implantation von höher dotierten Kristallgebieten, z. B. von Emittergebieten, die Öffnung von Kontaktflächen des Si-Kristallmaterials mit den Leitbahnen in zumeist SiO_2 -Oberflächen und Ausbildung der Leitbahnsysteme aus einer auf die Scheibenoberfläche abgeschiedenen zusammenhängenden metallischen Schicht aus Aluminium oder Al-Legierungen. Auch die Ätzmaske zum naßchemischen Ausbilden von Grabenanordnungen im Si-Kristall wird fotolithografisch erzeugt. Je nach Anzahl der horizontal und vertikal im und auf dem Kristall angeordneten chemisch unterschiedlichen zusammengesetzten Gebiete ist die Anzahl der in einer Zyklus-I-Technologie integrierten aufeinander folgenden Fotolithografiekomplexe gering (bei einfachen Dioden) oder groß (bei integrierten Schaltkreisen). Die Fotolithografie für Leistungstransistoren umfaßt zwischen 3 und 6 aufeinander folgende Komplexe. Bei Dioden sind bis zu drei Komplexe erforderlich.

Bei der Gliederung einer Ausführung zum Thema Fotolithografie sind unterschiedliche Ordnungsprinzipien möglich, z. B. eine Unterteilung in Kontakt- oder Projektionslithografie, in Positiv- oder Negativlacktechnologie oder nach Hauptarbeitsgängen. Letztere Gliederung soll hier Verwendung finden, wobei selbstverständlich im Verlaufe des Textes auf die Varianten eingegangen wird. Noch ein Wort zu dem oftmals nicht richtig anstelle von Fotolithografie verwendeten Begriff "Fotochemie". Unter Fotochemie ist eine Disziplin der Chemie zu verstehen, bei der chemische Reaktionen unter Anregung durch Photonen ablaufen. Dieses trifft streng genommen nur auf den Arbeitsgang Belichten zu, beschreibt aber nicht den wesentlichen technologischen Inhalt; deswegen halten wir uns hier an den international üblichen Begriff Fotolithografie.

Als Überblick und gleichzeitig als Gliederung soll nachstehend die typische Hauptarbeitsgangfolge eines fotolithografischen Komplexes dargestellt werden.

Die technologische Hauptlinie ist fett gedruckt dargestellt. Aus dem technologischen Flußschema der Hauptarbeitsgänge (Abb. 4.4.1.) ist eine der ökonomischen Optimierungsaufgaben direkt abzuleiten:

Verminderung den Arbeitszeitaufwandes (der Kosten) bei Stabilisierung oder Erhöhung der Bauelementeausbeute.

Dieses ist möglich, indem Einzelarbeitsgänge, wie z.B. "2" oder auch "5" eingespart oder reduziert werden, wobei bei "2" gleichzeitig eine Materialeinsparung auftritt. Die mögliche Einsparung

von "1" und "8" bringt lediglich eine Reduzierung der Durchlaufzeit, Energieeinsparung und Minderung des Flächenbedarfs. Die z. Z. noch sehr arbeitszeitaufwendigen Arbeitsgänge "2", "3", "5" und "6" können durch Automatisierung kostengünstiger gestaltet werden.

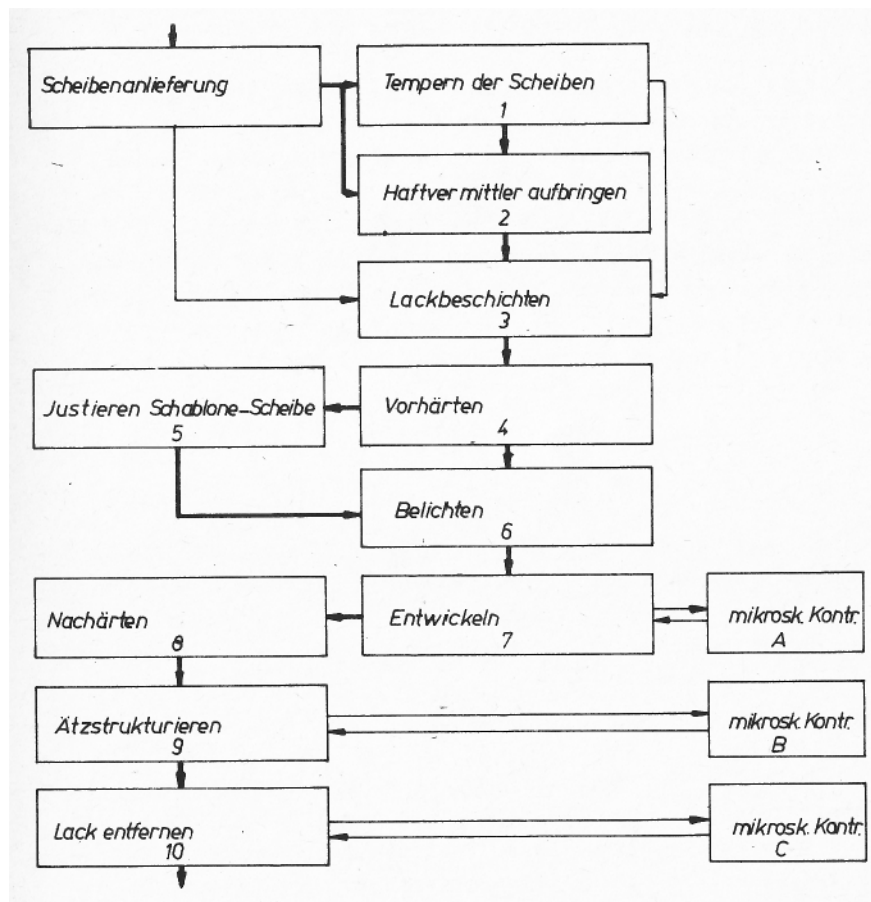


Abb. 4.4.1. Flußschema der Hauptarbeitsgänge Fotolithografie

4.4.1. Zur Chemie der fotolithografischen Hilfsmaterialien

Fotolacke

Negativfotolacke verändern durch Vernetzung der belichteten Gebiete ihre Löslichkeit in einem geeigneten organischen Lösungsmittel.

Positivfotolacke verändern in den belichteten Gebieten ihren chemischen Zustand.

Bei Negativlacken besteht die Ätzmaske aus den belichteten Gebieten, bei Positivlacken bilden die unbelichteten Flächen die Ätzmaske.

Grundsätzlich sind Fotolacke aus den 3 Hauptkomponenten Polymer, Sensibilisator und Lösungsmittel aufgebaut. Der Sensibilisator erhöht die Lichtempfindlichkeit des organischen Systems im energiereichen Gebiet des Lichtspektrums, also im blauen, violetten und UV-Gebiet.

Negativfotolacke vernetzen nach Energieabgabe vom angeregten Sensibilisator auf das Polymerelement. Die neuen stark vernetzten Polymerelemente sind im Lackentwickler, organisches

Lösungsmittelgemisch, z. B. auf Xylen-Basis, fast unlöslich. Eine große Gruppe der Negativfotolacke hat als lichtempfindliches Polymer ein Derivat der Zimtsäure, z. B. Polyvinylchinnamat.

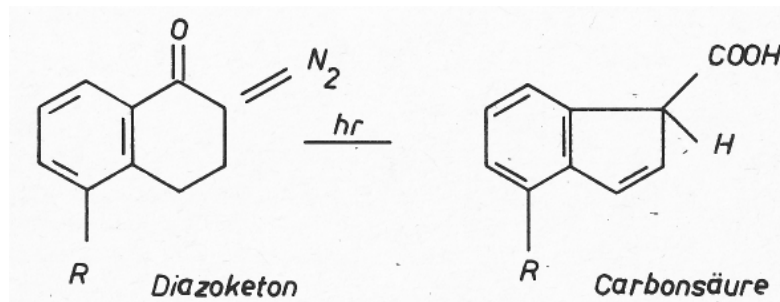


Abb. 4.4.2. Umwandlung des Diazoketons im Positivlack bei Belichtung

Positivfotolacke enthalten als photosensitive Komponente z. B. Diazoketon; dieses gibt bei Absorption von Licht Stickstoff ab und zerfällt als Molekül schließlich zu Karbonsäure. Nach dem Entwickeln in einem basischen Entwickler (Neutralisation) verbleibt im Gegensatz zu Negativlack das unbelichtete Lackgebiet als Ätzmaske stehen. Im unbelichteten Teil bilden sich während der Entwicklung feste Azoverbindungen.

Für die meisten Technologien der Mikro- und Leistungselektronik fällt heute die Einsatzentscheidung zugunsten der Positivlacke aus; Vorteile der Positivfotolacks gegenüber dem Negativlack sind:

1. Einsatz aller lichtoptischen Belichtungsverfahren möglich
(Projektions-, Abstands- und Kontaktbelichtung),
bei Negativlack ist Projektionsbelichtung nicht möglich
2. Höheres Auflösungsvermögen
3. Nachbelichtungen sind möglich
4. Keine Empfindlichkeit gegenüber Sauerstoff
5. Längere Lagerzeiten
6. Reduzierung des Anfalls leicht brennbarer und teilweise giftiger Hilfsmaterialien
7. Reduzierung notwendiger Arbeitsgänge, das Stoppen des Entwicklungsvorganges in einem gesonderten Bad entfällt
8. Leichteres Fotolackstrippen

Als deutlicher Nachteil des Positivlackes ist seine geringe Resistenz in hochkonzentrierten anorganischen Säuregemischen, wie z. B. HF/HNO₃-Ätzgemischen, zu nennen.

Haftvermittler

Haftvermittler dienen der Verbesserung der Lackbenetzung und Haftung auf SiO₂-Oberflächen. Als erfolgreich in der Positivlacktechnologie hat sich eine Lösung von Diphenylsilandiol in Azeton erwiesen. Die Wirkung besteht in einer Veränderung der Oberflächenbindungen der SiO₂-Schicht zum Fotolack.

Entwickler

Für Negativlacke wird ein geeignetes Lösungsmittel für das unvernetzte Polymer z. B. Xylen, n-Heptan u. a. auch ein Lösungsmittelgemisch verwendet. Für Positivlacke sind anorganische oder organische alkalisch wirkende Bäder zu verwenden, z. B. als einfachster Fall schwache Natronlauge.

Besser und auch erprobt sind gepufferte Entwickler, wie z. B. wässrige Lösungen von Trinatriumphosphat und Natriummetasilikat oder von Natriumtetraborat und Natronlauge. Der Vorteil dieser gepufferten Lösungen ist die zeitliche Stabilität des pH-Wertes.

Verdüner

Das für jeden Lack spezifische Lösungsmittel ist dann als Verdünner im Einsatz, wenn hochviskose Fotolacke auf niedrigere Viskositäten eingestellt werden müssen (Schichtdickenproblem).

Fotolackentferner (auch technologisch oft als “Stripper“ bezeichnet)

Fotolackentferner sind anorganische oder organische Flüssigkeiten, die die nicht mehr benötigte Lackschicht ohne Beeinflussung der Unterlage chemisch zersetzen oder auflösen. Als anorganische Stripper eignen sich Chromschwefelsäure oder ein Gemisch aus H₂SO₄ und H₂O im frischen Ansatz. Die Palette der organischen Stripper reicht von Azeton und Dimethylformamid über siedendes Diäthanolamin bis zu Gemischen von chlorierten Kohlenwasserstoffen mit Alkylbenzensulfonsäuren. Negativlackschichten erfordern erfahrungsgemäß einen höheren materiellen Aufwand zum Entfernen als Positivlackschichten. Positivlackschichten können auch durch flächiges Nachbelichten und Anwenden des Entwicklers von der Unterlage entfernt werden.

4.4.2. Die Hauptarbeitsgänge des Komplexes Fotolithografie

Die Beschreibung folgt hier der in 4.4.0. dargestellten Hauptarbeitsgangfolge. Wesentliche Unterschiede zwischen Positiv- und Negativtechnologie werden herausgearbeitet.

Tempern der Scheiben zur Entfernung flüchtiger, auf den Scheibenoberflächen kondensierter, der Lackbenetzung und -haftung entgegenwirkender dünner Filme.

Diese Temperung erfolgt in strömendem Reinstickstoff bei 473 K über eine Zeit von 20 ... 30 Minuten. Die Behandlung entfällt bei frischem, unmittelbar aus den Beschichtungsarbeitsgängen übernommenen Scheiben; dieses stellt die technologische Optimalvariante dar!

In der Fertigungspraxis stellen derartige Übergaben hohe Anforderungen an die zeitliche Steuerung der Prozesse und des Scheibentransports. Bei Überschreitung der höchstzulässigen Lagerzeit wird die Temperung durchgeführt. Vor dem Arbeitsgang "Haftvermittler aufbringen" bzw.

"Lackbeschichten" ist jede Lagerung unzulässig.

Am empfindlichsten von allen Substraten sind thermische SiO₂-Schichten, insbesondere PSG-Schichten. Hier reichen Behandlungstemperaturen von 473 K nicht aus, es müssen Temperungen im Bereich der Oxidationstemperaturen gewählt werden! Werden hier Fehler gemacht, dann sind Benetzungsfehler beim Lackbeschichten noch das geringere Übel. Kritischer sind dann wegen unzureichender Lackhaftung die starken Unterätzungen zu werten.

Haftvermittler aufbringen

Die Haftvermittlerflüssigkeit wird auf die rotierende Scheibe (Lackbeschichter) aufgetropft und über die Oberfläche verteilt. Nach dem Antrocknen werden die Scheiben dann bei 473 K unter strömendem Stickstoff getempert. Dieser Arbeitsgang entfällt bei Metallsubstraten und bei groben großflächigen Strukturen mit großen zulässigen Toleranzen der Lateralmaße, z. B. bei Dioden. Aus der Erfahrung der Entwicklung heraus muß entschieden werden, wann in der Technologie der SiO₂-Strukturierung Haftvermittler eingesetzt werden müssen.

Lackbeschichten

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist die Schleuderbeschichtung. Die auf einem rotationssymmetrischen Teller durch Vakuum angesaugte Scheibe wird mittels Pipette mit einer bestimmten Fotolackmenge betropft. Dieses kann sowohl auf die ruhende, als auch auf die rotierende Scheibe erfolgen und ergibt sich aus der Verfahrensoptimierung.

Bei Positivlack wird meist auf die rotierende Scheibe aufgetropft.

Negativfotolacke neigen mit steigender Viskosität zum "Verspinnen", d. h. es bilden sich Fäden, die sich dann netzartig über die Lackschichtoberfläche legen. Deswegen ist es bei Negativfotolack angezeigt, den Lack auf die ruhende Scheibe aufzutropfen und auch niedrige Schleuderdrehzahlen zu wählen.

Die Lackschichtdicke, die durch das Schleudern erreicht werden soll, ist eine Funktion aus Viskosität und Schleuderdrehzahl. Da die Viskosität temperaturabhängig ist, ist auf eine den

jeweiligen Erfordernissen der Schichtdickenreproduzierbarkeit angepaßte Temperaturstabilisierung zu achten.

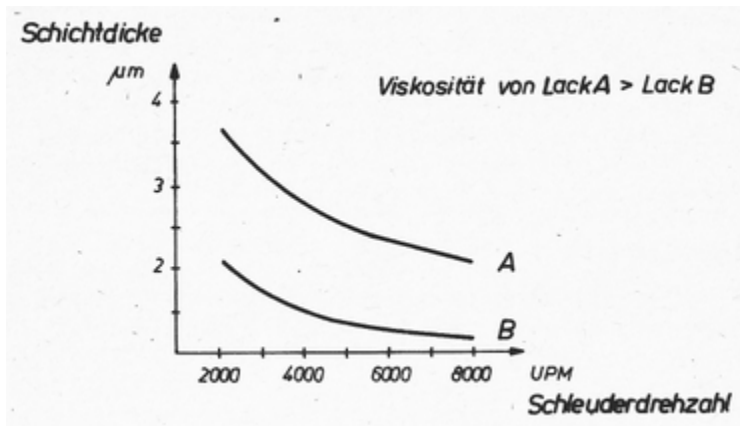


Abb. 4.4.3. Abhängigkeit der Lackschichtdicke von der Schleuderdrehzahl

Eine gleichmäßige Schichtdicke, die für viele fotolithografische Zwecke erreicht werden soll, wird erst nach einer bestimmten Aufschleuderzeit des Lackes erreicht, auch diese Zeit ist wieder von der Zähigkeit abhängig und steigt mit zunehmender Viskosität. Erkennbar ist die Mindestschleuderzeit an einer homogenen, sich nicht mehr sichtbar ändernden Farbe der Lackoberfläche. Dennoch treten im Bereich zwischen 10 und 100 nm radiale Streifungen auf, die abhängig von der Lackqualität sind und nur mit erhöhtem technologischen Aufwand (Erhalten der Fließ- und Benetzungsfähigkeit des Lackes über längere Zeiten, z. B: durch Einflußnahme auf die Lösungsmittelverdunstung und Oberflächenspannung) reduziert werden können. Für Oberflächen mit starkem Relief, z.B. Graben durchzogene Scheibenoberflächen, ist bei gleichem Qualitätsanspruch an die Lackschicht die Schleuderbeschichtung ungeeignet. Hier deutet sich z. Z. die Tendenz an, eine kombinierte Schleuderfließbeschichtung einzusetzen. Durch ein kurzzeitiges Anschleudern (Dauer < 10s bei Drehzahlen < 1000 UPM) wird der Fotolack über die Scheibenoberfläche verteilt, und danach verläuft er über die waagrecht ausgerichtete ruhende Scheibe. Zusätze geeigneter Lösungsmittel -und Tenside ermöglichen eine Stabilisierung des Fließverhaltens über einen optimalen Zeitraum und eine gute Benetzung vor allem im Bereich der Scheibenkanten, wobei insbesondere die Zugabe des Tensids bewirkt, daß die Oberflächenspannung mit steigender Viskosität sich nicht ändert. Die Kantenbedeckung ist abhängig vom "Krümmungsdruck"

$$P_K = \frac{2\sigma}{r_K} (\sigma: \text{Oberflächenspannung, } r_K: \text{Krümmungsradius der Kante})$$

Oberflächenspannung, r_K : Krümmungsradius der Kante

Die Sicherheit der Kantenabdeckung wird mit sinkendem Krümmungsdruck größer, also muß die Oberflächenspannung bei konstruktiv vorgegebenem Kantenprofil so klein wie möglich gehalten werden.

Vorhärten

Die Lackschicht wird nun vorgehärtet, d. h. das noch im Lack enthaltene Lösungsmittel wird verdampft. Dieser Prozeß dient im wesentlichen dazu, eine feste Oberfläche zu erhalten, damit bei den folgenden Arbeitsgängen diese Schicht nicht mechanisch zerstört wird. Hierbei ist zu beachten, daß die angewendeten Temperaturen unterhalb eines lacktypischen Grenzwertes bleiben. Wird dieser überschritten, dann wird die Sensibilität den Lacken in bezug auf die nachfolgende Belichtung eingeschränkt. Bei Negativlacken findet zusätzlich noch eine unerwünschte Polymerisation statt, die die Entwicklungsfähigkeit einschränkt. Diese Temperaturgrenze liegt etwa bei 373 K, Vorhärtungstemperaturen zwischen 353 K und 363 K sind üblich. Bei Negativlacken sollte dieser Prozeß unter strömendem Stickstoff erfolgen.

Justieren und Belichten

Dieses sind zwei miteinander durch die verwendete Einrichtung gekoppelte Arbeitsgänge. Bei der Erstbelichtung - einer noch nicht strukturierten Scheibe - entfällt das Justieren. Beim Komplex "Justieren/Belichten" wird der Informationsinhalt der Schablone, dargestellt durch gedeckte und transparente Flächen mit hohem Kontrast auf einer Glasplatte, mittels optischer Verfahren in der Ebene der Lackschicht auf der Scheibe abgebildet. Bei den hier nur zur Diskussion stehenden lichtoptischen Verfahren wird nach Kontakt-, Abstands- und Projektionsverfahren unterschieden, wobei der Abstand Schablone-Lackschicht beim Arbeitsgang "Belichten" betrachtet wird.

Je nach Andruckverfahren bei der Kontaktbelichtung wird auch noch zwischen Hart- und Weichkontakt unterschieden.

Beim Arbeitsgang "Justieren" wird die auf der Siliziumscheibe sichtbare Struktur des vorhergehenden Fotolithografiekomplexes zu der Schablonenstruktur des beginnenden neuen Fotolithografiekomplexes ausgerichtet. Hierzu wird ein Mikroskop benutzt, welches Bestandteil der Justier- und Belichtungs-Einrichtung ist. Zur Erleichterung dieses viel Übung und gutes Sehvermögen der Arbeitskraft erfordernden Vorganges sind kleine Justiermarken (Positionierhilfen) regelmäßig auf der Schablone vorgesehen, die dann mit ihrem "Gegenüber" auf der Scheibe zur Deckung gebracht werden müssen. Mittels einer Manipuliermechanik werden die Scheiben unter der Schablone, zu dieser flächenparallel ausgerichtet, gedreht und in x- und y-Richtung so lange verschoben, bis Überdeckung beider Strukturen gegeben ist. Hierbei dürfen Scheibe und Schablone

keinen Kontakt haben! Es sind auch Justier- und Belichtungs-Einrichtungen mit automatischer Justierung im Einsatz, auf Schablonen und Scheiben müssen dann geeignete Marken gesetzt sein, die die notwendigen Informationen für die optisch-elektronische Steuerung der Scheibenbewegung geben.

Nach erfolgter Justierung werden die Lackschichten belichtet. Hierzu wird die Quecksilber-hochdruckentladung benutzt, deren spektrale Intensitätsverteilung dem Empfindlichkeitsverlauf des Fotolacks gut angepaßt ist. Die beiden Linien bei 406 nm und 436 nm liegen im Grenzbereich des sichtbaren Lichtes zum UV. Fotolacke sind auch mit kurzwelligerer Strahlung zu belichten, dieses setzt jedoch Spezialeinrichtungen voraus.

Es werden 3 Hauptrichtungen der Belichtungstechnologie unterschieden:

1. Kontaktbelichtung
2. Abstandsbelichtung
3. Projektionsbelichtung.

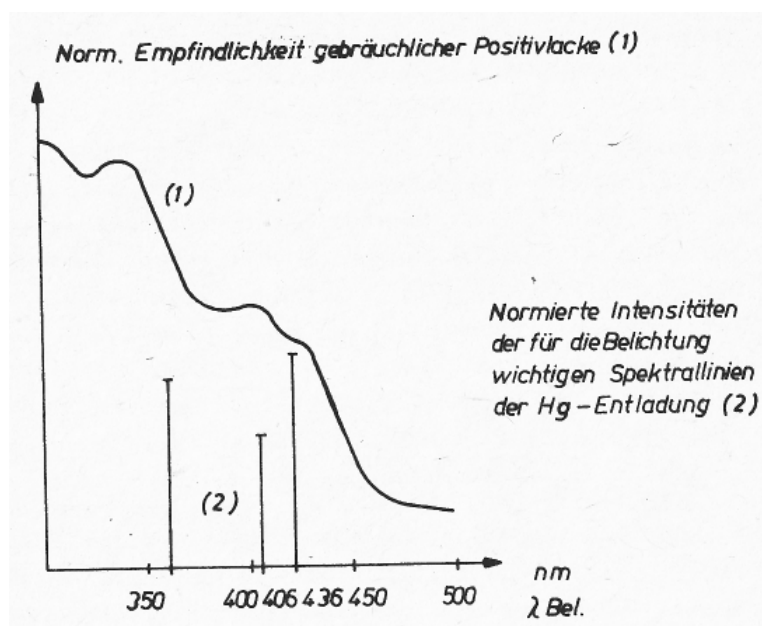


Abb. 4.4.4. Normierte Intensitäten der für die Belichtung wichtigen Spektrallinien der Hg-Entladung

Die Kontaktbelichtung ist das ursprüngliche Verfahren der Fotolithografie und läßt sich gleichermaßen gut für Positiv- und Negativlackschichten einsetzen. Der Abstand zwischen Lackschicht und Schablonenschicht ist Null, eine Beugung an Kanten ist infolge dessen nicht relevant, es wird ein flächen- und winkel-getreues Lackbild mit scharfen Kanten erzeugt.

Das technologische Auflösungsvermögen ist groß und wird nur durch das Lackauf-

lösungsvermögen begrenzt. Lackanklebung an der Schablone und Kratzer in der Schablonenschicht führen jedoch zu einer Zunahme von sich übertragenden Defekten mit steigender Anzahl der Belichtungen/Schablone. Dieses führt zu einer Begrenzung der Schablonenstandzeit, die je nach Anforderungen zwischen 5 und 50 Belichtungen/Schablone liegen wird. Im Bereich der Leistungstransistortechnologien sind 20 Belichtungen/Schablone ein erprobter Wert. Diese Schablonenstandzeiten führen zu hohem Kostenaufwand.

Eine Entschärfung dieses Problems bildet der Einsatz der Abstandsbelichtung. Hierbei besteht zwischen Schablone und Lackschicht ein definierter Abstand, der meist im Bereich von 10 ... 15 µm liegt. Aufgrund dieses Abstandes nehmen Beugungserscheinungen an den Kanten die Kontrastschärfe der Kontaktbelichtung und führen zu flacheren Lackböschungen, indem in dem eigentlichen geometrischen Schattengebiet der Schablone Beugungsstreifen parallel zur Schattengrenze entstehen. Dadurch wird das technologische Auflösungsvermögen mit steigendem Abstand immer kleiner. Interferenzen im Schnittgebiet von Beugungsstreifen führen dort zu dem Schablonenbild nicht ähnlichen Flächen. Je nach Abstand kann die Schablonenstandzeit jedoch auf die 3- bis 4-fache der Kontaktbelichtung angehoben werden. Eine Gegenüberstellung defektbezogener Präparationsausbeuten sieht die Abstandsbelichtung eindeutig im Vorteil gegenüber der Kontaktbelichtung.

Eine wesentliche Reduzierung der Defekte, die durch den lithografischen Prozeß entstehen, erfolgt durch den Einsatz der Projektionsbelichtung, da Scheibe und Schablone örtlich getrennt sind. Durch ein sehr gut korrigiertes Objektiv erfolgt die nur noch beugungsbegrenzte Abbildung der Schabloneninformation in die Lackebene. Um chromatische Bildfehler auszuschalten, erfolgt die Abbildung mit monochromatischem Licht, wobei bei den meisten Anlagen eine der beiden Hauptlinien des Hg-Entladungsspektrums 406 bzw. 436 nm verwendet wird. Die Justierung erfolgt, bedingt durch die Sensibilisierung des Positivfotolackes im kurzwelligen Bereich des Lichtspektrums, mit einer Wellenlänge von 589 nm (bei PM 80).

Wenn Justierung und Belichtung über ein Objektiv erfolgen, muß dieses für diese beiden Wellenlängen korrigiert sein, dieses ist der Fall bei der Anlage PM 80 von CZJ.

Das Auflösungsvermögen einer optischen Abbildung ist immer proportional der verwendeten Lichtwellenlänge und liegt bei einer numerischen Apertur des Objektivs von 0,1 bei 2,6 µm, technologisch wird diese jedoch nicht erreicht (Fotolack, periphere Arbeitsgänge).

Bei der Anlage PM 80 erfolgt die Abbildung mit dem Maßstab 1 : 1.

Bedingt durch die monochromatische Belichtung entstehen in der Lack- und SiO₂-Schicht Interferenzen infolge der Lichtreflexion an den Grenzschichten. Diese führen zu stehenden Wellen in diesen Schichten, und zwischen Minimum und Maximum schwankt die Lichtintensität um etwa den Faktor 10. Lack- und SiO₂-Dickenschwankungen führen zu ortsabhängigen Änderungen der Belichtung, was sich in der lokalen Änderung der entwickelten Lateralstruktur zeigt.

Aufgrund dieser Tatsache sind Negativlacke für die Projektionsbelichtung ungeeignet, denn eine sichere Belichtung und damit Vernetzung an der Substrat-Lackgrenzfläche ist nicht gegeben und kann dann zu Problemen der Lackhaftung beim Ätzen führen. Dazu kommt die im UV-Bereich des Spektrums bei vielen Negativlacken liegende langwellige Absorptionskante.

Stehende Wellen sind eine Fehlerquelle in der Projektionslithografie, Temperaturschwankungen an der Anlage eine weitere. Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten, insbesondere im Bereich des Objektivs, führen bei Temperaturschwankungen zur Änderung des Abbildungsmaßstabes. Kleine Temperaturschwankungen können mit Referenzplatten ausgeglichen werden. Bereits Schwankungen von 5 K führen z. B. bei der Anlage PM 80 zur Änderung den Bildfelddurchmessers um etwa 5 µm, womit eine entsprechende Änderung aller Lateralmaße verbunden ist. Entsprechend muß die Raumklimatisierung funktionieren., d. h. je nach Anforderung ausgelegt sein. Eine Temperaturkonstanz von ± 1 K entspricht bei der PN 80 den Forderungen des Anlagenherstellers.

Mit der Projektionsbelichtung lassen sich nun theoretisch unendlich große Standzeiten der Schablonen erreichen. Die Standzeiten werden nur durch Staubeinwirkung und Handling begrenzt. Es rentiert sich, Originalschablonen einzusetzen. Die Defektdichten gehen auf etwa ein Drittel derjenigen bei Kontaktbelichtung zurück.

Entwickeln des belichteten Lackes

Entsprechend den Ausführungen in 4.4.1. erfolgt beim Arbeitsgang "Entwickeln" beim Positivlack ein Entfernen des beim "Belichten" umgesetzten Fotolackes und beim Negativlack ein Lösen der nicht vernetzten - weil nicht belichteten - Lacken.

In beiden Fällen liegt nach dem Abstoppen dieses Prozesses - Positivlack in Wasser, Negativlack z. B. in Alkohol - die durch den Wechsel von Lack- und Substratoberfläche ausgezeichnete Lateralstruktur - Ätzmaske vor.

Zur Einhaltung der vorgegebenen Maße ist zu beachten, daß die Entwicklungsrate eine Funktion von Belichtung, Temperatur des Entwicklers und bei alkalischem Entwickler der Konzentration desselben ist. Nach dem Abstoppen werden die Seheiben in deionisiertem Wasser gespült.

Nachhärten der Lackmaske

Um eine genügende Haftung, insbesondere an den Kanten, herzustellen und die Resistenz der Lackmaske gegen das Ätzmedium zu erreichen, werden die Lackschichten im Bereich zwischen 100°C und 120°C nachgehärtet.

Ätzstrukturieren

Die zu strukturierenden Schichten, z. B. SiO₂- oder Al-Schichten, werden durch geeignete Ätzmittel naßchemisch oder in besonderen Ätzgasgemischen plasmachemisch entfernt. Dabei muß dieses ätzende Medium so gewählt werden, daß die Reaktionsgeschwindigkeit (die Abtragungsrate) mit dem SiO₂ bzw. Al sehr groß mit dem Fotolack und dem unter der zu strukturierenden Schicht liegenden Substrat sehr klein ist. Hierfür sind Standardätzgemische üblich, für SiO₂ naßchemisch auf Flußsäurebasis, für Al naßchemisch auf Phosphorsäurebasis und plasmachemisch auf CCl₄-Basis. In der Leistungselektronik dominieren derzeit die naßchemischen Verfahren, bei Schaltungstechnologien werden in größerem Umfang Plasmaverfahren neben naßchemischen Verfahren eingesetzt.

Bei naßchemischen Verfahren ist eine Bewegung der Scheiben relativ zum Bad erforderlich, stoßweises Eintauchen, Hin- und Herschwenken und dergleichen, um den Materialaustausch im Reaktionsgebiet zu erzwingen, der für eine gleichmäßig verlaufende Reaktion erforderlich ist. Insbesondere gilt das auch zur Entfernung an der Oberfläche haftender Gasbläschen (Wasserstoff).

Vorteilhaft sind Verfahren, bei denen das Ätzmittel auf die Scheibenoberflächen aufgesprüht wird (Sprühschleudertechnik). Die Abtragungsrate ist eine Funktion der Badtemperatur und Konzentration. Beide Größen müssen stabilisiert werden. Die Steuerung der Kantenverschiebung erfolgt über die Ätzdauer. Der Prozeß wird durch Abstoppen in Wasser beendet. Anschließend werden die Scheiben meist durch Zentrifugieren getrocknet.

Damit ungelöste Partikel, die sich aus dem Ätzbad auf der Scheibenoberfläche absetzen können, nicht die Ätzreaktion lokal verhindern und damit zu Defekten in der Schichtausbildung führen, werden die Badflüssigkeiten nach Möglichkeit durch Pumpen ständig ausgetauscht und mit geeigneten Filtern gereinigt.

Lackentfernen

Durch organische oder anorganische Stripper (siehe 4.4.1.) oder durch einen oxidierenden

Reinigungsprozeß muß dann die Lackschicht entfernt werden. Abschließend wird gespült und getrocknet. Der Aufwand der Abschlußbehandlung ist wegen der notwendigen Oberflächen sauberkeit sehr hoch.

Damit liegen die Scheiben zur Weitergabe an Oxidations-, Dotierungs- oder Beschichtungsprozesse fertig vor.

4.4.3. Fotolithografische Sichtkontrollen

Die mikroskopischen Kontrollen sind die wichtigsten Verfahren zur Beschreibung der Qualität der präparierten Scheiben. Sie werden als Übersichtskontrollen zur groben Einschätzung des Bearbeitungszustandes durchgeführt oder als Detailuntersuchungen mit einem Meßprogramm zur quantitativen Beschreibung der Qualität.

Insbesondere die Übersichtskontrollen weisen noch einen hohen subjektiven Fehler auf, hier werden sich durch Weiterentwicklung der optischen Meßtechnik Möglichkeiten der Objektivierung in der Perspektive ergeben.

Übersichtskontrollen werden im Rahmen der fotolithografischen Bearbeitungskomplexe (4.4.0.) nach den Arbeitsgängen *Entwickeln* (auf Vollständigkeit des Entwicklungsprozesses), *Ätzstrukturieren* (zur Kontrolle auf nicht durchgeätzte Schichten) und *Lackentfernen* (auf möglicherweise noch vorhandene Restlackschichten) durchgeführt.

Es werden Auflichtmikroskope mit Hell- und Dunkelfeldeinrichtung eingesetzt. Günstig ist ein gelber Interferenzfilter, um auch in monochromatischer Beleuchtung beobachten zu können.

Diese Übersichtskontrollen werden mit Gesamtvergrößerungen im Bereich 50fach bis 150fach durchgeführt. Nach dem Entwickeln wird grundsätzlich mit Gelb- oder Grüngelbfilter gearbeitet. Im Hellfeld sind stehengebliebene Lackschichten als Hell-Dunkel-Gegensatz erkennbar, im Dunkelfeld leuchten die Ränder dieser Schichten. Nach dem Ätzstrukturieren kann ohne Filter gearbeitet werden.

Bei Al-Schichten heben sich die geätzten Strukturen einwandfrei vom Untergrund ab. Bei SiO₂-Schichten kann in weißem Licht nur der Farbeindruck weiterhelfen, bei monochromatischem Gelblicht (z. B. = 574 nm), wie es durch ein Metallinterferenzfilter erzeugt wird, ergeben sich bei unterschiedlichen SiO₂-Schichtdicken Helligkeitsunterschiede infolge der Überlagerung der an der SiO₂-Oberfläche bzw. an den SiO₂-Si-Grenzflächen reflektierten Wellenzüge.

Die SiO₂-Ätzkontrolle ist sehr subjektiv und bedarf großer Erfahrung. Eine objektive Qualitätsbeschreibung ist durch das Messen der Kantenverschiebungen möglich und notwendig.

Als Bezugsmaß gilt grundsätzlich das im Arbeitsgang vorher erzeugte Maß.

Die Lack-Kantenverschiebung, durch Lichtbeugung beim Belichten an den Strukturkanten der Schablone verursacht, wird als halbe Differenz der Lacköffnung zur entsprechenden Schablonenöffnung gemessen, entsprechend umgekehrt bei Stegen, z. B. Leitbahnen. Die Ätzkantenverschiebung ist bedingt durch die Isotropie der chemischen Verfahren, wobei ein Unterätzen der Lackstrukturränder erfolgt. Die Ätzkantenverschiebung wird auf das Lackstrukturmaß bezogen. Die Gesamtkantenverschiebung ist die Summe beider Maße:

$$KV = KV_L + KV_A, \text{ siehe Abb. 4.4.5.}$$

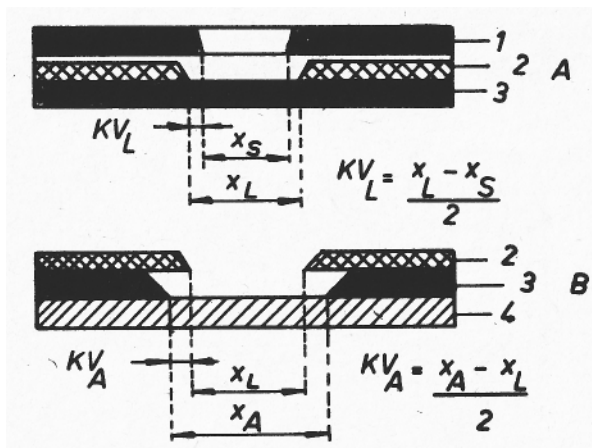


Abb. 4.4.5. Kantenverschiebung

- . A - des Lackbildes KV_L
- B - der geätzten Struktur KV_A
- 1 Schablone mit transparentem Bildelement,
- 2 entwickelte Lackstruktur (Fenster),
- 3 SiO₂-Schicht, in B nach dem Ätzen,
- 4 Siliziumscheibe

Das Ziel der fotolithografischen Bearbeitung heißt $KV = 0$.

Weitere Kontrollverfahren sind die Lackschichtdickenmessung, die Kontrolle der Benetzung bei Si/SiO₂-Strukturen und die Bestimmung von Defektdichten, wie z. B. Löcher in nicht geätzten Schichten oder Schichtreste in geätzten Fenstern.

4.5. Verfahren der Passivierung von pn-Übergängen

4.5.1. Planartechnik - Passivierung

Zur Herstellung von Schwachstrom-BE werden in der Planartechnik anorganische Deckschichten als Passivierungsmaterial genutzt. Die wichtigsten Vertreter dieser Stoffgruppe sind das SiO_2 und seine Abkömmlinge Phosphor- und Borsilikatglas, Si_3N_4 und Al_2O_3 .

Dominierend aber ist nach wie vor das durch thermische Oxidation erzeugte SiO_2 , das gleichzeitig als Diffusionsmaske und Isolator dienen kann. Als Passivierungsmaterial hat es vornehmlich die Aufgabe, den in Sperrrichtung betriebenen pn-Übergang, beim Transistor also den Kollektor/Basis-Übergang, stabil gegen Umwelteinflüsse, vorzugsweise gegen Feuchtigkeit abzuschirmen. Bei den geringen Spannungsanforderungen der Schwachstromelektronik wird dieser -Anspruch von SiO_2 ausgezeichnet erfüllt. Beim Erzeugen bzw. Auftragen der Passivierungsschicht wird für den Halbleiter jedoch eine neue Umgebung geschaffen, die ebenfalls nicht ohne Einfluß auf die Halbleiteroberfläche ist. Insbesondere ist es dabei die Grenzschicht SiO_2/Si , die auf die Stabilität des abgedeckten pn-Übergänge wirkt.

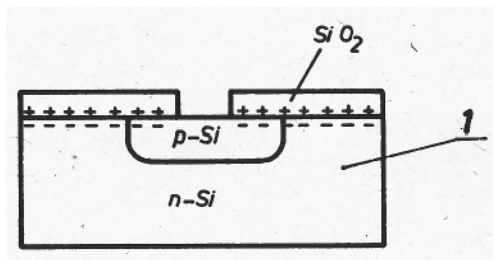


Abb. 4.5.1. Planardiode /1 hochohmiges n-Si

Signifikant wird das Verhalten der Grenzschicht durch das Auftreten von festen und beweglichen Ladungen im SiO_2 bestimmt. Aufgrund von beweglichen positiven Ladungen, z. B. von Na^+ -Ionen, kommt es an der Grenzschicht zur Ausbildung einer dielektrischen Doppelschicht (Abb. 4.5.1.), die im Falle von n-Si zu Anreicherungsrandschichten und bei p-Si zu Verarmungs- bzw. Inversions-schichten führt. Ist n-Si im Bauelement das hochohmige Material (1), so sind Sperrspannungs-verluste die Folge, weil die Raumladungszone an der Oberfläche eingeschnürt wird.

Bei p-Si kommt es durch Kanalbildung zu erhöhten Restströmen. Durch Oxidation der Si-Oberfläche in chlorhaltigen Medien oder durch Auftragen von Phosphorsilikatglas als Zusatzschicht gelingt es, die positiven Ladungen im SiO_2 zu reduzieren bzw. zu gettern.

Planartechnik und Planarpassivierung mit SiO_2 gibt es bei Hochvolttransistoren nur in Verbindung mit der Erzeugung den Emitter/Basis-Übergangs, der in Flußrichtung betrieben, keine besonderen

Ansprüche an die Oberflächenpassivierung stellt. Für die Passivierung des hoch sperrenden Kollektor/Basis-Übergangs sind jedoch keine ausreichend dicken SiO_2 -Schichten in rißfreier Qualität realisierbar. Dagegen ist es möglich, Niederspannungs-Bauelemente der Leistungselektronik, die bis zu etwa 600 V sperren, auch in Planar Ausführung mit SiO_2 als Passivierungsmaterial aufzubauen.

4.5.2. Glaspassivierung

Im Unterschied zur Verwendung von organischen Abdeckstoffen als Passivierungsmaterial führen die hochwertigen Stoffeigenschaften von Gläsern zu zahlreichen Vorteilen, die sich am hoch sperrenden pn-Übergang durch erhöhte Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität auszeichnen und im Produktionsprozeß durch eine verbesserte ökonomische Effektivität.

Vorzüge der Glaspassivierung im Vergleich zur individuellen Chippassivierung mit einem organischen Abdeckstoff:

- Konstanz der Stoffeigenschaften des Passivierungsmaterials,
- hermetischer Abschluß der Halbleiteroberfläche gegen Luftfeuchte,
- Erhöhung der Sperrschichttemperatur von 398 K auf bis zu 473 K
- Übergang von der individuellen zur kollektiven Chippassivierung (Passivierung im Scheibenverband)
- Elektrische Selektierbarkeit der Chips nach Abschluß von Z I
- Automatisierbarkeit der Chipmessung
- Verbesserte Kontrollfähigkeit der Produktionsprozesse

Schematische Arbeitsschrittfolge der Glaspassivierung:

1. Grabenstrukturieren

1.1. Maskieren

Vorder- und Rückseite der Si-Scheiben werden mit einer ätzfesten Schicht (1), z. B. durch Schleudern, Pinseln, Sprühen oder Tauchen maskiert (Abb. 4.5.2.a). Übliche Abdeckstoffe sind Picein, Asphalt, Harze, Wachse, Lacke (u. a. Abzieh- und Fotolacke)

1.2. Strukturieren der Maskierung

1.2.1. Mechanisches Strukturieren

Mit einer Hochgeschwindigkeitssäge werden Gräben in die Si-Scheiben eingesägt (Abb. 4.5.2.b)

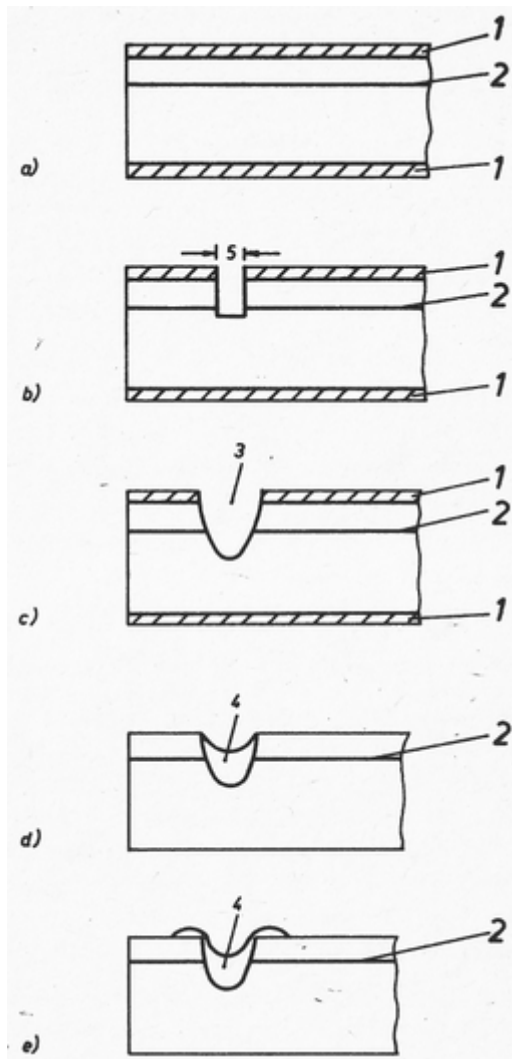


Abb. 4.5.2. Glaspassivierung (Grobschema charakteristischer Bearbeitungsstufen in Schnittbildern des Chips⁵⁾)

a) bis e): 1 ätzfeste Schicht, 2 pn-Übergang,
3 geätzter Graben, 4 Glas, 5 Schnittbreite

Schnittbreite (5): 100 - 200 μm

Schnitttiefe: pn-Übergangtiefe

Anwendung nur für Chips mit gerader Kantenbegrenzung.

1.2.2. Fotolithografisches Strukturieren

Fotolacke sind bei der Si-Strukturierung nur bedingt ätzresistent. Für Grabentiefen $> 30\mu\text{m}$ sind daher Nachhärtprozesse oder Zusatzmasken aus SiO_2 , Si_3N_4 oder Al vorzusehen.

Universelle Anwendung für alle Elementgeometrien mit durchlaufenden und unterbrochenen (Darlingtontransistoren) Grabenstrukturen.

1.3. Grabenätzen

1.3.1. Kristallstörungsätzen

Abätzen der durch den Sägeprozeß (1.2.1.) mechanisch gestörten Kristallbereiche.

Tiefe der Störungszone: $< 10 \mu\text{m}$

Größere Abtragungen sind erforderlich, um einzelne, tiefer in das Volumen vorgedrungene Störungen zu entfernen.

1.3.2. Grabenätzen

Ätzung den Passivierungsgrabens (3) nach 1.2.2. Verwendung von Ätzmitteln aus HNO_3 und HF , mit oder ohne Zusatz von H_3PO_4 wie bei 1.3.1. Die Grabensohle wird stets so angelegt, daß man in jedem Fall den pn-Übergang durchtrennt (siehe Abb. 4.5.2. c)) und in etwa das Gebiet erreicht, bis an dem sich die Raumladungszone unter dem Einfluß der halben maximalen Volumensperrspannung ausdehnen kann.

1.4. Maskierungsablösen

Entfernen der Ätzmasken durch Behandeln mit geeigneten Agenzien.

2. Konditionieren

Beim Konditionieren wird die Halbleiteroberfläche im Passivierungsgraben intensiv gereinigt und auf ein optimales Sperrverhalten eingestellt.

2.1. Kernreinigung

- alkalische Spülung auf der Basis von $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2$
- saure Spülung auf der Basis von $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$

2.2. Oxidation

Auskleiden des Si-Grabens mit einem sehr dünnen Si-Oxid ($< 30 \text{ nm}$).

Ziel:

- Verbesserte Benetzbarkeit der Si-Oberfläche beim Glaspastenauftrag
- Getterung von Verunreinigungen .

Erzeugung durch

- Kochen in konzentrierter oder rauchender HNO_3
- Abscheiden von CVD- SiO_2

3. Passivieren

Beim Passivieren werden die im Arbeitsschritt "Konditionieren" eingestellten Oberflächeneigenschaften gegen Umwelteinflüsse konserviert.

Die Passivierungsgläser können aus folgenden Hauptkomponenten bestehen:

PbO, ZnO, B₂O₃, Al₂O₃, SiO₂.

Als Zusatzstoffe werden u. a. CeO₂, Sb₂O₃, Bi₂O₃ hinzugefügt.

Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Passivierungsgläsern liegen je nach ihrer Zusammensetzung zwischen 4 bis $8 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ und weichen daher z. T. erheblich von

$$\alpha_{\text{Si}} \sim 3,3 \cdot 10^{-6} / \text{K} \text{ ab.}$$

Bei zu starker Fehlanpassung werden die Scheiben gebogen und es entstehen Risse im Glas. Durch Begrenzen der Glasschichtdicke, gesteuerten Austempnern und angepaßte Behandlung bei den Nachfolgeprozessen (Vermeidung von mechanischer, thermischer und chemischer Belastung) ist Rissbildung vermeidbar.

3.1. Glasaufragen

3.1.1. Schaben

Verarbeitung der Gläser in Pastenform. Herstellung von Suspensionen aus feinkörnigen Glaspulvern in organischen Bindern. Durch manuellen Einschaben mit einer Rakel wird die Glaspaste in die Passivierungsgräben transportiert.

3.1.2. Siebdruck

Die Glaspaste wird durch Siebdruck gezielt in die Gräben gefüllt, wobei Kanten-Überdruck erwünscht ist.

3.2. Glasschmelzen .

Temperatur/Zeit-Diagramm (Abb. 4.5.3.)

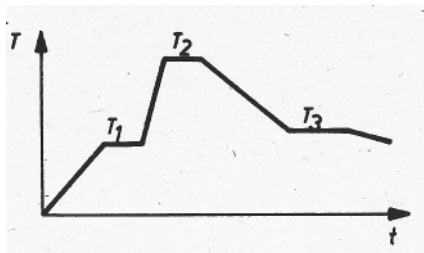


Abb. 4.5.3. Temperatur/Zeit-Diagramm des Glaseinbrennens

T1, T2, T3 Temperaturen

T1 - Ausbrennen den organischen Binders

T2 - Glasschmelzen

T3 - Austempem (~ 5 K/min.)

Die Schmelztemperaturen liegen je nach Glassorte zwischen 773 und 1173 K. Es werden Glasschichtdicken nach Erfordernis zwischen 2 - 50µm eingestellt.

Abb. 4.5.2. zeigt verglaste Passivierungsgräben (4), die durch Schaben (d) oder Siebdruck (e) hergestellt worden sind.

4. Vereinzeln

Vereinzeln der Chips aus der Scheibe durch Sägen mit Trennschnitten von etwa 50µm.

4.1. Doppelgrabenstrukturen

Bei Doppelgrabenstrukturen zwischen den Gräben. Abstand der Grabenkanten von Chip zu Chip etwa 300µm. Grabenbreiten nach dem Ätzen in Abhängigkeit vom Bauelementetyp 150 – 250µm.

4.2. Breitgrabenstrukturen

Bei Breit- oder Einzelgräben im Graben. Grabenbreite etwa 400 – 700µm. Glasauftrag nicht durch Schaben, da eine glasfreie Spur in der Grabenmitte gewährleistet werden muß.

4.6. Metallisierung von Emitter-/Basis- und Kollektorkontaktflächen

Unter Metallisierung von Dioden und Transistoren versteht man Verfahrensschritte, die das Aufbringen von Metallschichten zum Zwecke der ohmschen Kontaktierung der aktiven Bereiche (Emitter, Basis, Kollektor) zur Erzielung der guten Löt- und Bondfähigkeit und zuweilen zum Zwecke des Schutzes vor Ätzmitteln bei eventuellen pn-Übergangsätzungen beinhalten.

Kontaktmetallschichten müssen haftfest und für eventuelle fotolithografische Strukturierungsprozesse geeignet sein, das heißt, ihre Schichtdickengleichmäßigkeit muß hoch und ihr Reflexionsvermögen muß dem angewendeten Projektionsverfahren angepaßt sein.

Sperrfreie, ohmsche Kontakte lassen sich nicht immer durch eine einzige Metallisierungsschicht erreichen. Bei Leistungsbaulementen müssen Kontaktschichten wegen der hohen Stromdichten (etwa 10^6 A*cm^2) ganz besonders optimiert werden hinsichtlich ihren Kontaktwiderstandes

gegenüber dem Halbleiter (Wärmeverluste) und bezüglich ihrer Langzeitstabilität der elektrischen Eigenschaften.

In der Halbleitertechnologie kommen zwei verschiedene Metallisierungsverfahren zur Anwendung. Das ist einmal die Metallabscheidung aus wässrigen Lösungen (naßchemische Verfahren) und zum anderen die Metallabscheidung aus der dampfförmigen bzw. festen Phase (physikalische Verfahren).

4.6.1. Naßchemische Verfahren

Mit der Entwicklung der Technologie zur Herstellung von Halbleiter-Leistungsbau-elementen aus Si wurden seit langem bekannte so genannte stromlose Metallisierungsbäder weiterentwickelt und bei der Metallisierung großer Stückzahlen von Si-Scheiben kostengünstig eingesetzt. Als Kontaktmetall in der Leistungs-Halbleiterbau-elemente-Fertigung eignet sich besonders Nickel. Es verhält sich gegenüber unterschiedlich hoch dotierten Si-Oberflächen elektrisch weitestgehend neutral und gestattet nach einem entsprechenden Temperprozeß eine sehr gute Homogenisierung seines Übergangswiderstandes zum Si durch Ausbildung einer stabilen, thermisch hoch belastbaren Nickel-Silicid-Phase.

Der Mechanismus der Metallabscheidung aus wässrigen Lösungen basiert auf dem unterschiedlichen elektrochemischen Potential des in-Lösung befindlichen Metalls (Ion) und dem mit diesem Metall zu beschichtenden Silizium- Es muß in jedem Falle das abzuscheidende Metall durch Reduktion (Elektronenaufnahme) zum Abscheiden auf dem elektronegativeren Si veranlaßt werden. Diesen Vorgang der Metallabscheidung kann man beschleunigen und reproduzierbarer gestalten, wenn man die Lieferung der Elektronen für das abzuscheidende Metall durch eine chemische Reaktion eines Reduktionsmittels, das dabei selbst oxidiert (Elektronenabgabe) wird, steuert. Das Potential des Reduktionsmittels muß also elektronegativer als das Potential des auf dem Si abzuscheidenden Metall sein. Durch die Zugabe des Reduktionsmittels wird die freie Ionenkonzentration des Metalls erhöht. Das jedoch kann leicht zu einer sehr schnellen, unkontrollierten Metallabscheidung führen. Durch Zugabe von Komplexbildnern für das Metall wird die Dissoziation des gelösten Metallsalzes gebremst und damit die Metallabscheidung gut steuerbar. Die Metallabscheidung wird weiterhin durch die Badtemperatur und den pH-Wert des Bades, für den in der Regel der Anteil der Komplexbildner verantwortlich ist, beeinflußt. Das Metallisierungsbad verarmt mit zunehmendem Gebrauch an Metall und muß oft erneuert werden. Die Bestandteile eines typischen Vernicklungsbades nach dem Reduktionsverfahren sind:

- Nickelchlorid ($\text{NiCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$)

- Natriumhypophosphit ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) -> Reduktionsmittel
- Ammoniumcitrat ($[(\text{NH}_4)_2 \text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7]$))
- Ammoniumchlorid (NH_4Cl)) -> Komplexbildner

Das Bad wird auf alkalisch eingestellt, Badtemperatur 365 K,
Ni-Abscheidungsrate etwa $0,1\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ (Abb. 4.6.1.).

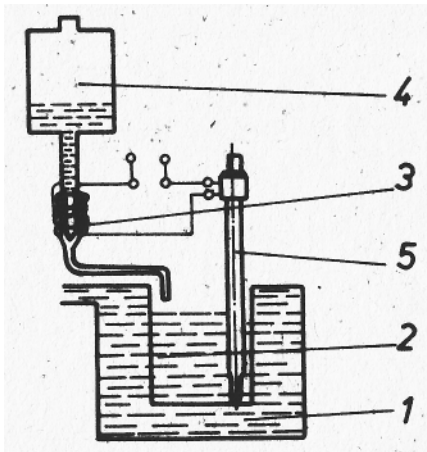


Abb. 4.6.1. Regeleinrichtung für Badtemperatur und pH-Wert bei der Vernickelung (schematisch)

- 1 Heizbad, 2 Nickelbad, 3 Magnetventil,
4 Ammoniakbehälter, 5 Kontaktthermometer

Die Ni-Schichten sind phosphorhaltig, da das Natriumhypophosphit sich in Anwesenheit von Wasserstoff zersetzt und dabei Phosphor frei wird, der sich in die Ni-Schichten einbaut.

Vorteilhaft für eine gute Haftfestigkeit und brauchbare Schichthomogenität ist das Aufräumen der zu vernickelnden Si-Oberflächen durch Lappen oder Überstrahlen. Die nicht zu vernickelnden Si-Oberflächen müssen durch eine dichte Schutzschicht (Lackmaske) geschützt werden.

Zum Abscheiden von Goldschichten auf vorher vernickelten Si-Scheiben werden in der Regel wegen ihrer hohen Stabilität, zyanidische Goldbäder angewandt. Nachteilig ist bei ihnen der Abscheidungsmechanismus (Ionenaustausch) und die hohe Giftigkeit. Infolge des Ionenaustausches geht während der Goldabscheidung Ni in Lösung, so daß das Verfahren schichtdickenbegrenzt (ca. $0,9\mu\text{m}$) ist und poröse Goldschichten liefert. Zur Herstellung dickerer Goldschichten ($= 1\mu\text{m}$) sind galvanische Verfahren auf der Basis zyanidischer Au-Bäder üblich. Hauptnachteil dabei ist die elektrische Kontaktierung aller zu metallisierenden Flächen und die schlechte Badausnutzung. Vorteilhafter ist in bestimmten Anwendungsfällen die Verwendung sulfitischer Goldbäder, die ungiftig sind, chemisch reduktiv arbeiten und einen äußerst sparsamen Edelmetalleinsatz gestatten.

Auf Grund der geringen Abscheidungs geschwindigkeit lassen sich jedoch nur Au-Schichtdicken bis $0,1\mu\text{m}$ realisieren. Bestandteile dieser Bäder sind:

- ein Alkalisulfitaurat als Goldlieferant ($\text{Na}_3[\text{Au}(\text{SO}_3)_2]$),
- Formaldehyd (HCHO) als Reduktionsmittel,
- organische Komplexbildner zur Begrenzung der Goldionenkonzentration sowie
- Stabilisatoren und Beschleuniger.

Bei einem pH-Wert von 12 und einer Badtemperatur von 355 K erreicht man Abscheidungs raten von $0,01\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$.

Naßchemische Metallisierungsprozesse sind umweltunfreundlich, da man trotz chemischer Neutralisation der Abprodukte die Ionenbelastung der Abwässer erhöht (z. H. Ni-Ionen).

4.6.2. Physikalische Metallisierung

Mit der Entwicklung der Vakuumtechnik ging die Entwicklung der physikalischen Beschichtungs- technik einher. Unter physikalischer Metallisierung versteht man die Metallabscheidung auf Substraten aus der Gasphase im Vakuum. Das Vakuum ($p < 10^{-2}\text{ Pa}$) ist notwendig, um den Teilchenstrom von der Quelle zum Substrat nicht durch Gasmoleküle zu behindern bzw. um unerwünschte chemische Reaktionen der Metallteilchen mit dem Restgas zu vermeiden.

Das Abscheiden von Metallschichten aus der Gasphase bezeichnet man als direkte Verfahren, da hier das Quellenmaterial den Schichtwerkstoff in kompakter Form darstellt.

Man unterscheidet das BEDAMPFEN und das KATODENZERSTÄUBEN (in inerter Atmosphäre).

Im Gegensatz dazu gibt es noch indirekte Verfahren, bei denen der Schichtwerkstoff erst auf dem Weg der Teilchen aus dem Quellenmaterial oder direkt auf dem Substrat entsteht.

Man spricht dann von reaktivem Bedampfen oder Aufstäuben.

4.6.2.1. Bedampfen

Beim Bedampfen muß durch Erhitzen des Schichtwerkstoffes der Teilchenstrom (Dampfstrom) erzeugt werden, bevor durch Kondensation der Dampfteilchen auf den Substraten die Metallschicht entsteht. Ausbreitung und Kondensation der Dampfteilchen werden durch ihre thermische Energie (mittlere kinetische Energie beim Auftreffen auf dem Substrat etwa $0,1\text{ eV/Teilchen}$) bestimmt.

Um verwertbare Dampfstromdichten zu erreichen, müssen die meisten Schichtwerkstoffe über ihren Schmelzpunkt erwärmt werden. Nur wenige Metalle, wie Mg, Cr, Zn verdampfen schon merklich aus der festen Phase (Sublimation).

Das Aufschmelzen des Schichtwerkstoffes geschieht im so genannten Verdampfer (Quelle). Aufbau und Form des Verdampfens hängen von der Energiezufuhr ab. In jedem Falle muß der Dampfdruck des Verdampfermaterials um Größenordnungen kleiner sein als der des Schichtmaterials bzw. er muß durch geeignete Kühlung klein gehalten werden, damit nur Teilchen des dampfenden Schichtwerkstoffes auf den Substraten kondensieren.

Die Tabelle 4.6.1. zeigt die in der Halbleitertechnologie z. Z. üblichen Verdampfer:

Beheizungsart	Heizerform/-material	Wärmequelle
direkte Heizung	1. Draht/W Ta Wendel	Widerstandsheizung
	2. Formblech/W, Mo, Ta (Schiffchen)	"
	3. Block/Graphit, Titanborid Bornitrid	"
indirekte Heizung	1. Tiegel /Al ₂ O ₃	induktive Erwärmung und
	2. Pfannen / Al ₂ O ₃	Widerstandsheizung
	3. Blöcke / Al ₂ O ₃	
direkte Beheizung der verdampfenden Oberfläche	1. Cu-Tiegel-kalt	Elektronenstrahlheizung
	2. tiegelfrei vom Block	Laserstrahlheizung

Tabelle 4.6.1. Zusammenstellung verschiedener Verdampfer

In der Bedampfungstechnik hat sich mehr und mehr der Elektronenstrahlverdampfer (SSV) durchgesetzt, da mit dieser Wärmequelle Temperaturen von ca. 3773 K an der Oberfläche der verdampfenden Substanz erreicht werden (im Gegensatz zu direkt geheizten W-Verdampfern mit ca. 1773 K). Das bedeutet wesentlich höhere Verdampfungsraten (und damit Kondensationsraten) als bei allen anderen Quellenformen. Da in der Halbleitertechnologie mit Chargenanlagen gearbeitet wird und für die abzuscheidenden Metallschichtdicken (= 5µm) nur Elektronenstrahlerzeuger kleinerer Leistung (bis 15 kW) in Frage kommen, sind als ESV durchweg solche vom Transverse-Typ im Einsatz. Sie bestehen aus einer Glühkatode und einem e-Strahlführungssystem zur Fokussierung, Beschleunigung und Ablenkung des e-Strahles, wobei dieser in der Regel um 270° abgelenkt wird. Dadurch ist das Strahlerzeugungssystem vor dem Dampfstrom des Schichtmaterials sehr gut abgeschirmt, und die Quelle selbst hat relativ geringe Abmessungen (Abb. 4.6.2.).

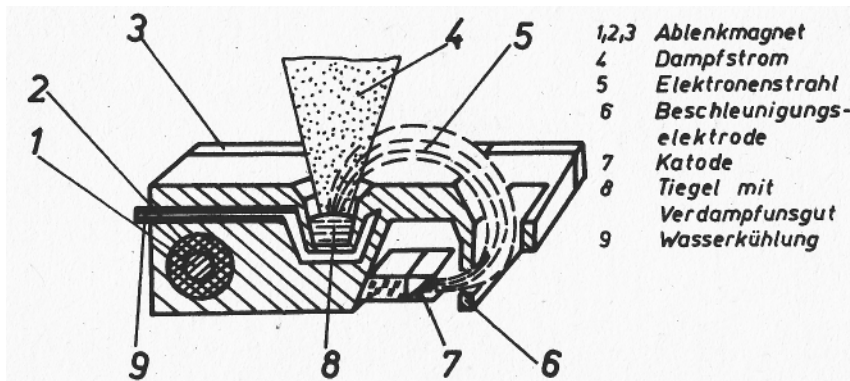


Abb. 4.6.2. Schnitt durch einen ESV (Transversetyp, 270°-Ablenkung)

Der technische Aufwand (Kosten) für eine ESV-Anlage ist hoch. Legierungen lassen sich nur mit komplizierter Prozeßführung auf den Substraten stöchiometrisch fehlerfrei abscheiden.

Mehrschichtfolgen in einem Bedampfungsverfahren sind durch Mehrfachtiegel (Drehtiegel- oder Springstrahlverfahren) leicht herzustellen. Der Verdampfungsverfahren selbst läßt sich gut steuern, indem man die Ionen, die der e-Strahl selbst im Dampfstrom erzeugt, absaugt und zur Rate- bzw. Emmissionsregelung umsetzt. Sekundärelektronen und Röntgenstrahlen belasten die Substrate und beeinträchtigen die Schicht- und Grenzflächeneigenschaften. Diese Eigenschaften, wie Korngröße, Gaseinbau, mechanische Spannungen in der Schicht, Kantenbedeckung, Haftfestigkeit hängen weiterhin von der Substrattemperatur und dem Restgasdruck ab. Für die in der Halbleitertechnologie typische Al-Verdampfung mit ESV gelten folgende typischen Parameter:

$$p = 3 - 5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}, \quad T_{\text{Substr.}} = 523 \text{ K}$$

$$ar = 200 - 600 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Gute Schichtdickenverteilung auf den Substraten erhält man durch Relativbewegung der Substrate zur Dampf abgebenden Fläche (Quelle), wie z. B. durch Planetensysteme (bis zu $\pm 2\%$).

4.6.2.2. Katodenzerstäuben

Obwohl als Phänomen viel länger bekannt als das Bedampfen, ist das Katodenzerstäuben (Sputtern) für den Einsatz als Beschichtungsverfahren ein der Massenproduktion von Halbleiterbauelementen erst seit Ende der 1970er Jahre durch die Entwicklung des Hochratezerstäubens interessant geworden.

Unter Katodenzerstäubung versteht man die Emission von Teilchen von der Oberfläche einer festen Phase (Target) infolge Beschuß mit schnellen Ionen. Im Gegensatz zum Bedampfen spricht man hier vom so genannten "kalten" Verfahren, da sowohl das Target (Katode) als auch die Substrate (bei Diodenanordnungen die Anode) auf relativ niedriger Temperatur gehalten werden können (durch Kühlung). Die Arbeitsdrücke liegen zwischen

$$p_{\text{Ar}} = 10^{-2} \text{ bis } 10 \text{ Pa.}$$

Der auf den Substraten kondensierende Teilchenstrom ist weitgehend gerichtet. Man unterscheidet noch

- Ionenstrahlzerstäubung und
- Plasmaszerstäubung.

Bei der ersteren werden die zum Targetbeschuß notwendigen Ionen aus einer gesonderten, an die Beschichtungskammer angeschlossenen Quelle heraus beschleunigt und gerichtet auf das Target geschossen. Dadurch kann im Zerstäubungsraum mit sehr niedrigem Druck ($p < 10^{-4} \text{ Pa}$) gearbeitet werden, jedoch ist die Ionenstromdichte und damit die Zerstäubungsrate relativ gering.

Bei der Plasmazerstäubung, die apparativ wesentlich einfacher ist, sind Ionenerzeugung und Beschichtung vakuum- bzw. raummäßig nicht von einander getrennt. Hier erfordert die Aufrechterhaltung der Gasentladung einen relativ hohen Arbeitsgasdruck. Durch zusätzliche Ionisation, wie z. B. durch zusätzliche inhomogene starke Magnetfelder, sind die Arbeitsgasdrücke bis etwa 0,5 Pa herabsetzbar bei gleichzeitiger enormer Steigerung der Abscheidungsraten.

Alle elektrisch leitenden Materialien lassen sich sowohl mit Gleich- als auch mit Hochfrequenzspannung arbeitenden Systemen zerstäuben, wobei die letzteren Systeme bei Frequenzen zwischen 2 MHz und 30 MHz auch das Zerstäuben von Isolatoren erlauben. Als Arbeitsgas wird in der Regel Argon (sauerstofffrei) verwendet. Enthält das Arbeitsgas reaktive Komponenten (O_2 , N_2), dann spricht man von reaktivem Sputtern.

Auf den Substraten scheiden sich die Oxide bzw. Nitride des Targetstoffes ab. Legt man zusätzlich noch ein festes Gleichspannungspotential während des Zerstäubens an die Substrate (so genanntes BIAS-Sputtern), dann können die Schichteigenschaften zusätzlich noch während des Schichtwachstums variiert werden (bei negativem Potential - zusätzlicher Ionenstrom auf das Substrat).

Man kann feststellen, daß beim Katodenzerstäuben, besonders beim Hochratezerstäuben, die Substrate nicht durch Elektronenbeschuß belastet werden (im Gegensatz zum Bedampfen mit ESV!). Das Hochratezerstäuben wurde möglich durch die Entwicklung von Ringspaltentladungsquellen (Plasmatron, Magnatron), bei denen hinter dem Target (Katode) ein starker Ringspaltmagnet so angeordnet ist, daß sein inhomogenes Magnetfeld sich nach Betrag und Richtung über der Targetoberfläche ändert. Dadurch werden die Sekundärelektronen auf lange, zyklidenförmige Bahnen über bestimmten Bereichen der Targetoberfläche gezwungen und erhöhen in diesem Bereich die Ionisationswahrscheinlichkeit derart, daß ein Plasma höherer Trägerdichte entsteht und die Abstäubraten in diesem Bereich des Targets in die Größenordnung von Verdampfungsraten ähnlich leistungsstarker ESV kommen (Abb. 4.6.3., Abb. 4.6.4.):

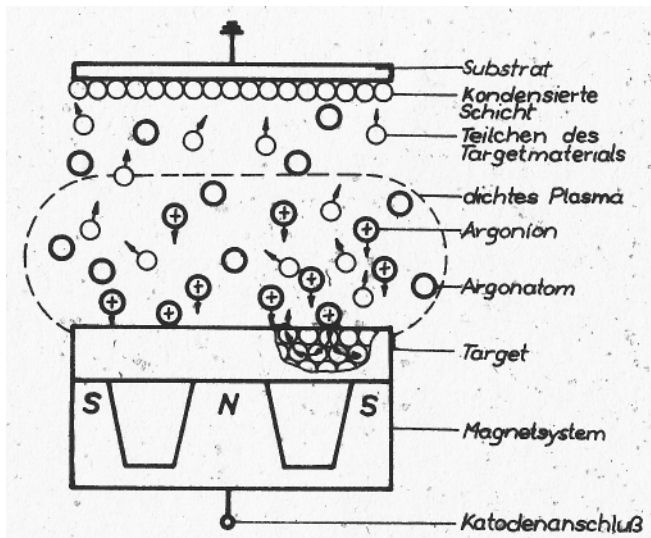


Abb.: 4.6.3. Elementarprozeß des Hochratesputterns

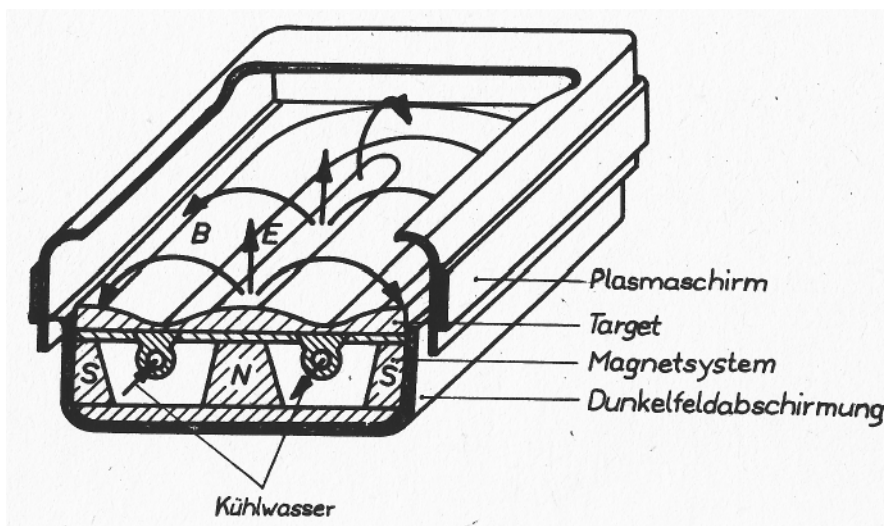


Abb. 4.6.4. Planar-Plasmatron-Sputterquelle

Wegen der einfachen Prozeßführung beim Sputtern mit Plamatrons ist der Aufbau hochleistungsfähiger Durchlaufanlagen zum Beschichten von Hochleistungs-Substraten ökonomisch geworden. Diese Anlagen können erweitert werden durch eine Ätzstation, in der entweder eine Hochfrequenzdiode zum Ionenätzen der Substrate oder eine Plasmaätzeinrichtung zum plasma-chemischen Ätzen mittels CF_4 arbeitet.

Vor dem Beschichten ist ein Ausheizen der Substrate oft von Vorteil, so daß dem Ätzbaustein noch ein Ausheizbaustein nachgestellt werden kann. In der Beschichtungskammer können mehrere (auch mit verschiedenen Metallen bestückte) Plamatrons zum Beschichten angeordnet werden. Fügt man nach der Beschichtungskammer noch eine Abkühlstation und eine automatische Paletten- bzw. Substratrückführung an, dann benötigt man lediglich eine kleine Reinraumfläche an der Eingabestation einer solchen Durchlaufanlage (Abb. 4.6.5.).

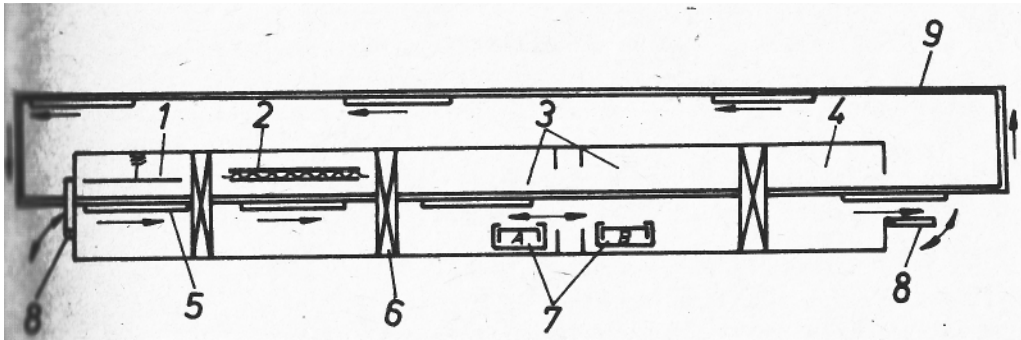


Abb. 4.6.5. Schema einer Durchlaufanlage zum Hochratezerstäuben, Typ HZS-02 .

- 1 Eingabeschleuse (Feinvakuum) mit Plasmaätzer (HZR-02),
- 2 Heizerkammer (Hochvakuum), 3 Beschichtungskammer (Hochvakuum),
- 4 Ausgabeschleuse (Feinvakuum),
- 5 Substratpalette mit Palettentransport, 6 Kammerventile,
- 7 Planarplasmatrone (25 kW) z. B. A für Al, B für Ni,
- 8 Ein- bzw. Ausgabeklappe, 9 automatische Palettenrückführung (HZB-02)

Ähnliches gilt auch für Chargenanlagen. Auch bei ihnen werden die Beschichtungskammern nicht belüftet beim Substratwechsel, da sie mit einer Schleuse zum diskontinuierlichen (chargenweisen) Beschicken ausgerüstet sind. In Durchlaufanlagen mit 25 kW-Plasmatronquellen erreicht man bei 20 kW für Al Abscheidungsraten von $0,2\mu\text{m}/\text{min}$ bei Targetstandzeiten von 700 kWh.

Für Targets aus magnetischen Werkstoffen (z. B. Ni) ergeben sich bei 15 kW Plasmatronleistung Abscheidungsraten von $0,13\mu\text{m}/\text{min}$ bei Targetstandzeiten von 500 kWh.

Da bei Planarplasmatronen (z. B. PPS-25) zum Erreichen hoher Schichtdickengleichmäßigkeit eine Relativbewegung der Substrate gegenüber der Quelle notwendig ist, führen in Durchlaufanlagen die Substrate während der Beschichtung eine Pendelbewegung über der Quelle aus.

In Chargenanlagen rotieren die Substrate über der Quelle.

Die Hochratezerstäubungsquellen haben gegenüber den Diodensystemen den Vorteil einer höheren Abscheiderate, wesentlich geringere Elektroden Spannungen, keine Wärmebelastung der Substrate durch e-Beschuß, Erreichung hoher Ionenstromdichten am Substrat schon bei kleinen Substratvorspannungen und ein weiches Einsetzen der Entladung.

Die Zerstäubungsraten sind u. a. abhängig von der Masse der Targetatome, d. h. die Stoßausbeute für Ar^+ ist eine Funktion der Ordnungszahl der Elemente (was beim Zerstäuben von Legierungen eine Rolle spielen kann). So hat z. B. Gold eine 2,3-fach höhere Zerstäubungsrate als Al, Nickel

eine 1,4-fach höhere und Titan eine 0,5-fache Zerstäubungsrate als Al bei gleichen Zerstäubungsbedingungen.

Für Beschichtungen mit Al mit einer 25 kW-Quelle PPS-25 in einer Durchlaufanlage (HZS-02) sind folgende Parameter üblich:

Startdruck	$p_a = 10^{-4} \text{ Pa}$
Arbeitsdruck	$p_{Ar} = 0,5 \text{ Pa}$
Entladungsleistung	$P_E = 20 \text{ kW}$
Abscheiderate	$a_r = 0,2 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

nutzbare Beschichtungsfläche (pendelnd) 400 x 400 mm².

Das bedeutet für den Durchsatz an Si-Scheiben z. B. bei 5µm Al-Schichten auf 51mm Scheiben ca. 100 Scheiben/Stunde. Die Vorteile der Beschichtung durch Hochratezerstäuben gegenüber der Beschichtung durch Elektronenstrahlverdampfen sind:

- höhere Haftfestigkeit der Schichten,
- Hillockfreie Schichten (bei Al z. B. durch "Interruptsputtering"),
- bessere Kantenbedeckung,
- exaktere Ätzkanten,
- Legierungen (auch Lote) lassen sich stöchiometrisch abscheiden,
- in situ-Behandlung der Substrate möglich (Ionenätzen, Plasmachemischen Ätzen),
- Anwendung hochproduktiver, mikroprozessorgesteuerter Durchlaufanlagen möglich,
- einfache Steuerung der Zerstäubungsprozesse.

Dem gegenüber steht eigentlich nur ein Nachteil, nämlich die geringe Targetausbeute von maximal 50%. Der Rest der Targets jedoch kann dem Targethersteller in reiner Form zum Recycling zugeführt werden.

4.7. Mechanische Bearbeitung von Prozeßscheiben

4.7.1. Abdünnen der Prozeßscheiben durch Zwischenläppen

4.7.1.1. Zielstellung

Das Ziel des Abdünnens der Prozeßscheiben durch Lappen ist, die durch Eindiffusion an beiden Stirnseiten der Prozeßscheibe entstandene Diffusionsschicht auf der einen Scheibenseite abzutragen und dabei die Prozeßscheibe auf eine gewünschte Enddicke abzdünnen. Der Materialabtrag muß über die Scheibenfläche gleichmäßig erfolgen, d. h. die abgedünnte Scheibe darf nur geringfügige

Dickendifferenzen ($< 4\mu\text{m}$) aufweisen. Zur Erleichterung der Bearbeitungsschritte, denen die Prozeßscheibe nach dem Zwischenläppen unterworfen wird, ist eine Nachpolitur der durch den Läppvorgang aufgerauten Scheibenfläche erforderlich.

4.7.1.2. Verfahren und Ausrüstungen

Beim Läppen erfolgt der Materialangriff durch das ungebundene Korn (Läpppulver), dessen Härte größer als die des Siliziums sein muß. Das Läppmittel wird in Form einer Aufschlämmung auf eine rotierende Läppplatte gegeben, gegen welche die Siliziumscheiben gedrückt werden. Diese sind dabei mit der zweiten Scheibenseite auf so genannte Träger- oder Läuferplatten aufgeklebt (aufgekittet). Man spricht deshalb im Unterschied zu anderen Läppverfahren (z. B. Käfigläppen) auch vom Klebeläppen.

Man kann das Zwischenläppen an Läppmaschinen entsprechend der optischen Poliertechnik oder an produktiven Einscheibenläppmaschinen durchführen (vergleiche Abb. 4.7.1.).

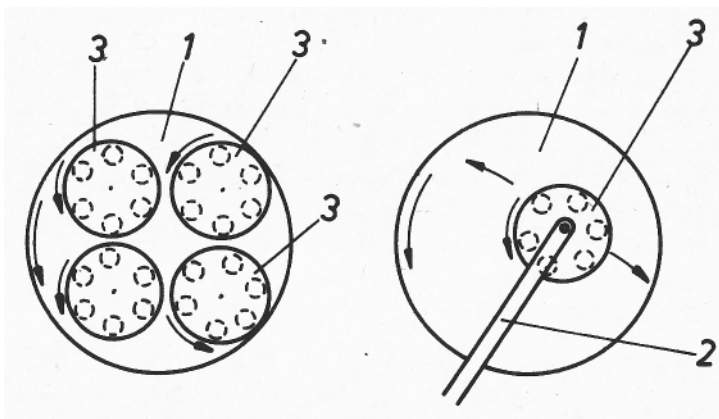


Abb. 4.7.1. Einscheibenläppmaschine (links) und optische Läppmaschine (rechts); Prinzipskizzen

- 1 Trägerplatte, 2 Antriebshebel für Schwenkbewegung,
3 Trägerplatten mit aufgeklebten Si-Scheiben

- bei den Läppmaschinen entsprechend der optischen Poliertechnik wird die Trägerplatte durch einen hin und her schwenkenden Arm exzentrisch über die Läppplatte bewegt. Die Trägerplatte wird gleichzeitig durch die rotierende Läppplatte infolge der Haftreibung zu einer Rotation veranlaßt.
- bei den produktiven Einscheibenläppmaschinen werden mehrere stationär angeordnete Trägerplatten durch die Reibungskopplung zu einer Rotationsbewegung, gleichsinnig zur Rotation der Läppplatte veranlaßt.

Produktive Einscheibenlappmaschinen, die gleichzeitig eine Vielzahl von Siliziumscheiben zu bearbeiten gestatten (in Abhängigkeit vom Durchmesser 50 bis 100 Stück), werden in der Großserienfertigung angewendet. Optische Lappmaschinen kommen bei Laborserien zur Anwendung.

Für den anschließenden Polierprozeß, bei dem man die Wischpoliertechnik anwendet (Abb. 4.7.2.), bedient man sich ebenfalls Maschinen nach den beiden oben beschriebenen Grundprinzipien:

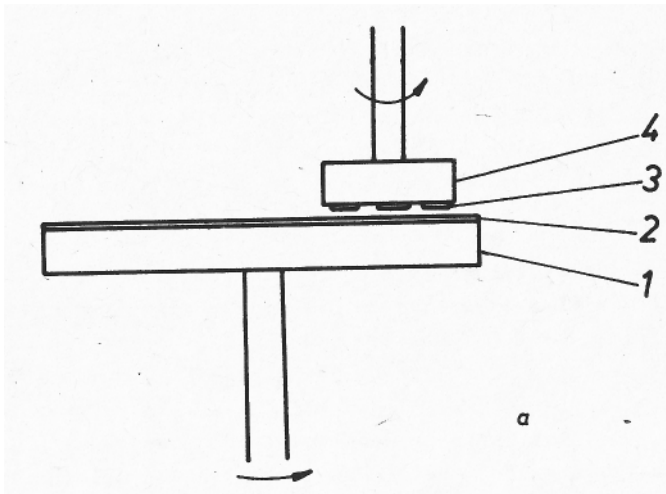


Abb. 4.7.2. Wischpolieranordnung (Schema)

1 Polierplatte, 2 Polierunterlage, 3 Si-Scheiben, 4 Trägerplatte

- produktive Poliermaschinen mit stationär angeordneten Läuferplatten und
- optische Poliermaschinen; bei denen die Trägerplatten neben der Rotationsbewegung einer exzentrischen Transversalbewegung unterliegen.

Anstatt der Lappplatte enthalten diese Poliermaschinen eine Poliergrundplatte, die mit einer saugfähigen Polierunterlage (Poliertuch) beklebt oder bespannt wird. Anstatt des Lappmittels wird kontinuierlich ein Poliermittel auf die Polierplatte gegeben. Das Poliermittel besteht aus einer mechanisch und aus einer chemisch polierend wirkenden Komponente. Eine solche Kombination führt zu einer zufrieden stellenden Planparallelität der polierten Scheiben ($< 10\mu\text{m}$) bei einer gleichzeitig guten Oberflächenqualität.

Sowohl beim Lapp- als auch beim Poliervorgang kann der Materialabtrag über den Lapp- bzw. Polierdruck beeinflusst werden. In Abhängigkeit vom Maschinentyp kann man diesen Druck durch Beschweren der Läuferplatten oder aber pneumatisch an der Maschine einstellen.

Die Läpp-, vor allem aber die Polierarbeitsgänge müssen in sauberen staubarmen Räumen durchgeführt werden. Verunreinigungspartikel aus der Umgebung (Luftstaub, Korrosionsprodukte) können während der Bearbeitungsprozesse die polierten bzw. geläppten Flächen zerkratzen.

4.7.1.3. Materialien

An die Materialien der Läppplatten (meist aus Läppguß), Polierplatten (Metall, Glas), vor allem aber an die der Trägerplatten müssen hohe Anforderungen gestellt werden, wenn nach dem Abdünnen Prozeßscheiben mit hoher Planparallelität vorliegen sollen. Man verwendet Trägerplatten aus Metall (z. B. Stahl, Aluminium), aus Glas, Quarz oder Graphit.

Zum Aufkleben der Siliziumscheiben auf die Trägerplatten werden thermoplastische Kleber verwendet, die bei den Arbeitstemperaturen (Lappen, Polieren) von 293 bis 323 K die Siliziumscheiben fest an die Trägerplatte kitten, oberhalb der Klebetemperaturen (353 bis 373 K) aber schmelzen müssen. Geeignete Kleber mit solchen Schmelzintervallen, die sich darin in handelsüblichen Lösungsmitteln leicht lösen, sind z. B. Paraffin oder Bienenwachs-Kolophoniumgemische. Die Kunst des Klebens besteht darin, die Siliziumscheiben mittels einen dünnen und gleichmäßigen Klebefilme (1 ... 2µm) an die Trägerplatte zu kitten.

Als Läppmittel werden meist Siliziumkarbidpulver verwendet. Entscheidend ist, daß die Läppkörner eine gleichmäßige Korngröße aufweisen. Man verwendet Körnungen von z. B. 7µm, 9µm oder 13µm. Je größer das Läppkorn, um so schneller erfolgt der Materialabtrag beim Läppen, um so rauher ist aber auch die geläppte Fläche. Besondere schädlich sind "Überkörner", d. h. Beimengungen im Läpppulver mit einem deutlich größeren Partikeldurchmesser. Sie führen beim Läppprozeß zu Kratzern auf der geläppten Fläche, ja sogar zu Rissen und zum Scheibenbruch. Das Läppmittel wird als wäßrige Aufschlämmung oder in Öl suspendiert auf die Läppplatte gegeben. Die Zugabe von Glycerin in wäßrigen Läppsuspensionen (höhere Viskosität) mildert den Angriff des Läppkorns auf die Siliziumscheibe.

Als Poliermittel werden meist schwach alkalische Aufschlämmungen (pH ~ 10) von SiO₂-Teilchen mit einer Korngröße < 0,1µm verwendet (auch in Form von Kieselsoleen).

4.7.1.4. Kontrollverfahren

Zur Sicherung des Läpp- und Polierschritten ist die ständige Messung der bearbeiteten Siliziumscheiben sowie die gelegentliche Kontrolle der Arbeitsmittel und Materialien erforderlich:

- Die geläppten bzw. polierten Scheiben werden im noch aufgeklebten Zustand sowie nach dem Ablösen von den Trägerplatten auf Dicke, Planparallelitätsabweichung und Durchbiegung

kontrolliert (pneumatische Dickenmeßgeräte, elektronische Feinzeiger, optische Interferenzmesser).

- gelegentlich werden Oberflächenprofile von den geläppten oder polierten Flächen aufgenommen (Tastschnittgerät ME 10).
- Bei Verwendung neuer Läpp- oder Poliermittelposten sind Korngrößenbestimmungen (mittleres Korn, Überkörner) erforderlich.
- Polierplatten müssen gelegentlich, Läpp- und Trägerplatten häufig mit geeigneten Meßmitteln (z. B. Haarlineal) auf Maßhaltigkeit kontrolliert werden.

4.7.2. Mechanische Bearbeitung der Siliziumscheiben nach dem Epitaxieprozeß

Nach dem Epitaxieprozeß weisen die Siliziumscheiben in mehr oder weniger starkem Maße Fehler auf, die vor den nachfolgenden Bearbeitungsschritten mechanisch beseitigt werden müssen. Es handelt sich um die epitaktisch entstandenen Randwülste sowie um polykristalline Aufwachsungen auf der vorher polierten Scheibenseite. Die Randwulst läßt sich beseitigen, indem man entlang des Randes der rotierenden Siliziumscheibe, die durch Vakuumansaugung gehalten wird, ein Diamantschleifgewebe führt und dabei an den Rand der Scheibe eine Facette anschleift.

Die polykristallinen Aufwachsungen (spikes) werden mit einer rotierenden Schleifspitze, die durch einen Technikmotor angetrieben wird (ähnlich dem Zahnbohrer), weggebohrt. Es genügt dabei, die größeren "spikes" ($> 150\mu\text{m Dmr}$) zu beseitigen, die später die fotolithografische Bearbeitung stören würden.

4.7.3. Grabenherstellung durch Sägen

Die für die Glaspasivierung erforderlichen Gräben müssen in das Silizium durch Ätzprozesse eingebracht werden. Zum Schutz der strukturierten Gebiete ist dabei deren Abdeckung mit einer ätzbeständigen Schutzschicht erforderlich.

Zur Erleichterung der Grabenausbildung durch Ätzen können die Gräben mechanisch vorgesägt und danach durch chemische Bearbeitung auf die endgültige Form gebracht werden. Für dieses "Vorsägen" können Hochgeschwindigkeitssägen zur Anwendung kommen (vgl. Heft 3, Punkt 4.1.2.). Entsprechend der gewünschten Dimensionierung der Passivierungsgräben müssen die Sägeblattstärken ausgewählt und die Grabentiefe eingestellt werden.

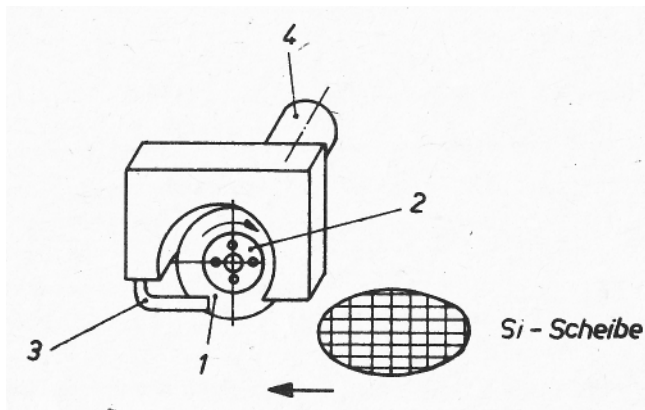


Abb. 4.7.3. Prinzip der Hochgeschwindigkeitssäge
1 Sägeblatt, 2 Flansch, 3 Spritzwasserzufuhr

5. Das Problem der Einheitstechnologie, insbesondere für vergrößerte Scheibendurchmesser

Auf der Basis von CZ-Kristallen ist die Schaltungstechnologie relativ rasch zu immer größeren Kristallscheibendurchmessern übergegangen, so daß international bereits Scheibendurchmesser von 200 mm aktuell sind.

Wie bereits erwähnt, kann im Gegensatz zu den Schaltungstechnologien die Dicke der Si-Scheiben mit steigendem Scheibendurchmesser bei den konventionellen leistungselektronischen Verfahren im Zyklus I nicht ohne weiteres angepaßt werden, um dann erst gegen Ende des Zyklus I durch Abdünnen auf das Bauelemente-funktionsgemäß notwendige Maß gebracht zu werden, wie es bei den Schaltkreisen üblich ist. Für die Simultanverfahren gelten ähnliche Einschränkungen.

Prinzipiell ist, zumindest nach dem ersten wesentlichen Diffusionsschritt, der TK-Diffusion, für jede Bauelementetype eine andere Scheibendicke erforderlich und hinsichtlich der Bruchgefahr ist man unter ökonomisch vertretbarem Aufwand für Langzeit-Diffusionsschritte sehr bald an der Scheibendurchmessergrenze, die für die bisher gängigen Hochspannungs- und Leistungstransistortypen bei 76 mm Kristallscheibendurchmesser liegen dürfte, d. h. bei Dicken des tiefen Kollektors im Bereich von 150 ... 200µm.

Eine Ausnahme hiervon bildet die Mehrschicht-Epitaxie-Technologie (MET). Die hochdotierte Substratscheibe, welche die Funktion des tiefen Kollektors übernimmt, kann im Prozeßablauf Zyklus I prinzipiell im Rahmen des erforderlichen mechanischen Stabilisierungseffektes beliebig dick gemacht werden. Sofern erforderlich, dann das Abdünnen gegen Ende den Zyklus I erfolgen. Auf dem Substrat können im Rahmen des Notwendigen beliebig dicke und in einem weiten

Bereich des spezifisch elektrischen Widerstandes variierende Schichten der beiden Leitungstypen abgeschieden werden. Es ist eine Frage der Zeit, in welchem Maß die MET zu dickeren, elektrisch und strukturell homogenen und höher perfekten Schichten entwickelt werden kann, um nahezu alle bekannten leistungselektronischen Bauelementetypen damit herstellen zu können.

Die MET beinhaltet s. B. bei Transistoren weitere Vorteile gegenüber der Dreifach-Diffusions-Technologie (DDT). So sind dies

- die gleichmäßige Dotierung (vor allen Dingen dickerer Schichten),
- die relativ leichte Herstellung von abrupten pn-Übergängen,
- einheitliche Si-Scheiben für den Prozeßbeginn Zyklus I für ein breites Spektrum von Bauelementetypen
- keine erkennbare prinzipielle Durchmesserbegrenzung der Si-Scheiben
- nahezu beliebig variierbare Schichtfolgene sowohl hinsichtlich Leitungstyp als auch Dotierungskonzentration
- weitestgehend Versetzungsfreiheit der Schichten.

6. Kontrollmessungen im Zyklus I

Die Kontrollmessungen im Zyklus I haben folgende Funktionen:

- Qualitätskontrolle,
- frühzeitigen Erkennen von fehlpräparierten Chargen bzw. Scheiben.

Qualitätskontrolle heißt Überwachung der jeweiligen Verfahrensparameter, d. h. Kontrolle der Einhaltung der vorgegebenen Parameter-Toleranzbereiche. Die gemessenen Ergebnisse werden mit den festgeschriebenen Warn- und Stoppgrenzwerten verglichen. Bei Überschreitung des Stopp-Grenzwertbereiches wird die Charge bzw. Scheibe zum Ausschluß am Arbeitsgang. Je nach Fehlerart gibt es zwei Entscheidungsmöglichkeiten, die technologisch gemäß Fehlerschlüssel festgeschrieben sind:

- Totalausschuß (TA) oder
- Nacharbeit (NA).

Je früher ein Fertigungsfehler im Zyklus I entdeckt wird, um so weniger teuer wird das Wegwerfen (sofern keine Nacharbeit möglich ist). Kontrollmessungen sichern so auch die Ökonomie einer Bauelementefertigung.

Aufwand für Kontrollmessungen und Nutzen müssen sorgfältig gegeneinander abgewogen werden.

、 ..

Es wird daher stets nach dem Prinzip verfahren:

Kontrollmessungen so oft und so genau wie nötig und nicht wie möglich.

Die Messungen erfolgen z. T. an den Prozeßscheiben direkt, teilweise werden weniger teure Kontrollscheiben bei einzelnen Arbeitsgängen oder ganzen Arbeitsabschnitten (Testscheiben) zu den Prozeßscheiben zugestellt und ausschließlich zur Messung wieder entnommen. Extra-Meßscheiben werden aus folgenden Gründen angewendet:

- Einsparen von meist teureren Prozeßscheiben bei zerstörenden Messungen,
- Vermeidung von Verunreinigungen an Prozeßscheiben durch die Messungen,
- Objektbeleg für spätere Nachmessungen zur Identifizierung bzw. Ortung von verdeckten Fehlern, wie z. B. Degradation der Ladungsträgerlebensdauer. .

Eine effektive Methode ist die messende Kontrolle unter Benutzung von speziellen Testfeldern. Bei leistungselektronischen Technologien lassen sich im allgemeinen über Testfeldstrukturen nicht so viele Parameter kontrollieren wie in der Mikroelektronik. Das liegt in den semiplanaren Strukturen der Leistungselektronik begründet (siehe Abschnitt 2.). Allgemein könnte man grob sagen, daß der Emitter/Basis-Bereich über Testfelder kontrollierbar ist, der Kollektor/Basis-Bereich nicht. Es kommt also auf eine sinnvolle Kombination von Messungen an Prozeßscheiben, an Kontrollscheiben und an Testfeldern an.

Für das Testfeld geht im allgemeinen ein Bauelemente-Chip pro Scheibe verloren. Es ist normalerweise im Zentrum der Silizium-Scheibe angeordnet. Eine besondere Schwierigkeit in der Leistungselektronik-Technologie stellen hinsichtlich der fotolithografischen Präparation die aus Platzgründen sehr klein gehaltenen Abmessungen der Strukturen des Testfeldes im Verhältnis zu den wesentlich groberen der Bauelemente-Chips dar. Das gilt insbesondere für die Ätzung der vergleichsweise dickeren Metallisierungsbahnen. Einen Überblick über die wichtigsten Kontrollparameter des Zyklus I gewährt Tabelle 6.1.

Die für die Kontrollmessungen eingesetzten Meßmethoden sind die folgenden:

- Partikeldichte: Anwendung von Auflichtmikroskopen;
Auszählung durch Kontrollkraft (Automatische Sichtkontrollplätze sind enorm teuer und leisten nicht das, was zusätzlich zur Partikeldichte an sonstigen, möglichen Unregelmäßigkeiten von der Kontrollkraft erfaßt werden kann.)
- Oxid-Schichtdicke: Es wird eine keilförmige Stufe geätzt, und es werden die sich an dieser Stufe ausbildenden Interferenzerscheinungen ausgewertet (Auszählung der

Perioden und Farbvergleich mit einer dickengeeichten Interferenzfarbentafel).

Genauere Messungen werden mit einem Interferenzspektrometer im ultravioletten, sichtbaren und auch infraroten Spektralbereich oder mittels Polarisationspektrometer vorgenommen.

- Schichtdicke von Reaktionsphasen: Wie bei Oxid-Schichtdickenbestimmung, vorzugsweise mit dem Polarisationspektrometer
- Epitaxie-Schichtdicke: Die Schichtdicke kann zerstörungsfrei aus der Reflektivität gegenüber Infrarotstrahlung unter Anwendung eines entsprechenden Infrarot-Spektralphotometers gemessen werden.
Ferner besteht die Möglichkeit der Schichtdickenbestimmung bei Vorhandensein von Stapelfehlern (die in bestimmten Scheibenbereichen gezielt erzeugt werden können) durch Ausmessen der linearen Ausdehnung der Stapelfehler auf der Oberfläche der Scheibe.
Zerstörend kann die Schichtdicke auch über den elektrischen Widerstand mit Hilfe des Spreading-resistance-Verfahrens gemessen werden.
Dabei ist ein Schrägschliff nötig, der die gesamte Schicht erfaßt.
- Kompensationsspannung: Hierbei handelt es sich um die an den 2 inneren Spitzen gemessene Spannung bei einem durch die äußeren Meßspitzen fließenden bestimmten Strom der 4-Spitzenanordnung (Vierspitzenmethode).
- Schichtwiderstand: Dieser wird mit der Vierspitzenmethode bestimmt.
Berechnung aus den Werten der Kompensationsspannung des Stromes (und des Spitzenabstandes)
- Oberflächenkonzentration des Dotanden: Hier gibt es mehrere Möglichkeiten.
Die chemische Konzentration kann z. B. durch IR-Absorption (IR-Spektrometer) oder durch physikalische Sondenverfahren, z. B. mit SIMS (Sekundär-Ionen-Massen-Spektrometer), bestimmt werden.
Der zur Leitfähigkeit beitragende Anteil der chemischen Konzentration kann physikalisch durch Berechnung aus dem Schichtleitwert und der Eindringtiefe oder etwas aufwendiger mit der Spreading-resistance-Methode gemessen werden.
- Eindringtiefe: Sie kann mit metallografischen Methoden (Schräg- bzw. Querschliff und Anätzen bzw. Anfärben nach dem so genannten 'Plating'-Verfahren) und Spreading-resistance-Messungen bestimmt werden.

- geometrische Konturen: wie Maßdifferenzen Schablone/Struktur;
 Grabentiefe, -breite etc. werden mit dem Auflichtmikroskop
 (ausgerüstet mit Okularmikrometer) gemessen.

- Metallschichtdicken: Man kann unterscheiden nach zerstörungsfreien (integral messenden)
 und zerstörenden (partiell messenden) Schichtdickenmeßmethoden.
 Zerstörungsfreie Methoden sind:
 - a) Wägung (Dichte der Schicht bekannt)
 - b) Wirbelstrommeßverfahren (Änderung der Güte eines Parallelschwingkreises infolge Dämpfung durch zu messende Metallschicht)
 - c) Vierspitzen-Messung
 - d) Betastrahlenrückstreuung an Metallschichten
 - e) in-situ-Messung durch Quarzmonitor.
 Zerstörende Methoden (Strukturierung) sind:
 - a) Tastschnittgerät
 - b) Lichtschnittgerät
 - c) Ätzgeschwindigkeit als Funktion von d_s (bei konstanter Ätzrate und Ätzfläche)
 - d) Interferenzmikroskop (zur Eichung der meisten anderen Methoden).

<u>Arbeitsgang</u>	<u>Kontrollparameter</u>	<u>Kontrollobjekt</u>
Reinigung	Partikel/Gesichtsfeld im Mikroskop	P
Oxidation	Oxid-Schichtdicke	K
Implantation	Dosis	ohne
Epitaxie	Schichtdicke	K
	spez. elektr. Widerstand	K
Strukturdefekte	P	
Diffusion	- Kompensationsspannung	T
	- Schichtwiderstand	T, TF
	- Oberflächenkonzentration	T
	- Eindringtiefe des Diffusanten	T
	- Dicke der Reaktionsphase	K, T
Fotolithografie	- Maßdifferenzen	
	Schablone: Struktur auf der Scheibe	P
Glaspassivierung des	- Grabentiefe, -breite	P
pn-Überganges	- geometrische Störungen der pn-Fläche	P
	- Glasdicke	P
Metallisierung	- Schichtdicke	K
	- Kontaktwiderstand	TF
	- Oberflächenfehler	P
Mechanische Bearbeitung	- Schichtdicke	P
	- Parallelitätsabweichung	P
	- Durchbiegung	P

P - Prozeßscheibe

K - Kontrollscheibe

T - Testscheibe

TF - Testfeld

Tabelle 6.1. Kontrollparameter des Zyklus I

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Mohr Probleme der kristallographischen Orientierung in der Halbleiterpraxis, Dissertation B
Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Juli 1978
- /2/ Wolf Untersuchungen zu Natur und Entstehungsbedingungen wasserstoffinduzierter anomaler Defekte in versetzungsfreien, tiegelfrei gezüchteten Silizium-Einkristallen, Dissertation A
Akademie der Wissenschaften der DDR zu Berlin, Forschungsbereich Pkw, Mai 1984
- /3/ Standard VEB Kombinat Mikroelektronik Erfurt Nr. KME S013, Seite 37
- /4/ Hadamovsky Halbleiterwerkstoffe
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1972
- /5/ Gottbehüt DD-WP 151 386
Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen
- /6/ Wienhold V1-Bericht Silizium-Epitaxie für Mehrschicht-Epitaxie-Transistoren
GWS Stahnsdorf, 1982
- /7/ Schade Halbleitertechnologie, Band 1
Verlag Technik, Berlin 1981
- /8/ Schade Halbleitertechnologie, Band 2
Verlag Technik, Berlin 1983
- /9/ Bürger/ Donoran Fundamentale of silicon integrated device technology,
Nol. 1, Englewood Cliffs, 1967
- /10/ Kern/ Puotinen Reinigungslösungen auf Wasserstoffperoxidbasis für die Anwendung in der Siliziumhalbleitertechnologie
RCA-Review, 31 (1970) 6, Seite 187 - 206
- /11/ Ruge Halbleitertechnologie
Springerverlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1974
- /12/ Bischoff Lehrbrief Nr. 5
GWS Stahnsdorf, 1969
- /13/ Schiller/ Heisig Bedampfungstechnik
Berlin 1975
- /14/ Köhl DE-OS 15 64 255
Halbleiterbauelemente
- /15/ Müller, G. Physikalische Meßverfahren zur Prozeßkontrolle -
MET, V2-Berichte des Themas V510 - 119 vom 25. 1. 1984

8. Angewendete Kurzzeichen

A	Fläche	mm ²
a _r	Abscheiderate	nm min ⁻¹
B	parabolische Konstante	nm ² min ⁻¹
b	Schnittbreite	µm
CLA	Mittenrauhwert	nm; µm
D	Diffusionskoeffizient	cm ² sec ⁻¹
d	Si-Scheibendurchmesser	mm
d _{ox}	Oxid-Dicke	nm; µm
epd	Ätzgrubendichte	cm ⁻²
H	magnetische Feldstärke	A · m ⁻¹
I _F	Fließstrom	A
K _Z	Keimzahl	l ⁻¹
M	Ionenmasse	g
N _A	Akzeptorenkonzentration	cm ⁻³
N _B	homogene Ausgangsfremdstoffkonzentration im Kristall	cm ⁻³
N _D	Donatorenkonzentration	cm ⁻³
N _o	Oberflächenkonzentration (bezogen auf einen infinitesimal kleinen Volumenbereich)	cm ⁻³
N (x, t)	Konzentration der Fremdstoffe an bestimmten Orten zu bestimmter Zeit im Kristall	cm ⁻³
P _E	Entladungsleistung	kW
P _K	Krümmungsdruck	pa
P	Restdruck	pa
P _{Ar}	Arbeitsdruck	pa
P _S	Startdruck	pa
Q	Gesamtmenge der Ladungsträger, die sich von Anfang an im Kristall befinden	Anzahl
q	Ionenladung	As; C
RT	Raumtemperatur	°C; K
R _t	Rauhtiefe	nm; µm
r	Radius der Ionen im Magnetfeld	cm
r _K	Krümmungsradius	µm; dm
T	Temperatur	°C; K

T_x	Temperaturen der verschiedenen Verfahrensstufen, charakterisiert durch die Stufe x	$^{\circ}\text{C}; \text{K}$
t	Zeit	h
t_{rr}	Sperrerholzeit	$\text{ns}; \mu\text{s}$
U	Beschleunigungsspannung	V
UPM	Umdrehungszahl n	min^{-1}
U_{sp}	Sperrspannung	V
x	Senkrechter Abstand einer Fläche im Volumen des Kristalls von der Oberfläche	μm
x_j	Eindringtiefe, bei der die Fremdstoffkonzentration $N = N_b$	μm
α_x	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	K^{-1}
ΔX_u	Kantenverschiebungen (Differenz von gleichen Konturkanten bezogen auf Schichten, die zwei verschiedenen Bearbeitungsstadien der Fotolithografie entsprechen) u = frei wählbares Symbol	μm
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand	Ohm cm
ρ_o	Dichte des Oxides	g cm^{-3}
δ	Oberflächenspannung	dyn cm^{-1}
τ	Ladungsträgerlebensdauer	μs

Autoren

Dr. sc. nat. U. Mohr

Kapitel 1., 2., 3., 5., 6., Abschnitt 4.2.2.

Dipl.-Phys. A. Gottbehüt

Abschnitte 4.1., 4.2., 4.3.

HS-Phys. G. Förstner

Abschnitt 4.4.

Dipl.-Ing. W. Storch

Abschnitt 4.9.

Dipl.-Ing. P. Creutzburg

Abschnitt 4.6.

Dr. rer. nat. D. Zach

Abschnitt 4.7.

Bisher sind in der Schriftenreihe folgende Hefte erschienen:

Heft 1 - Technologie der Leistungselektronik Zyklus I

Spezielle Merkmale der Si-Leistungsbaulemente-Technologie, verschiedene Grundtechnologien, Hauptverfahrensabschnitte, Probleme der Einheitstechnologie, Kontrollmessung Zyklus I

Heft 2 - Technologische Spezialausrüstungen für Zyklus I

TSA zur naßchemischen Bearbeitung, TSA zur Herstellung von pn-Übergängen, TSA zur Metallisierung, TSA zur Fotolithografie, TSA zur mechanischen Oberflächenbearbeitung, Reine Räume

Heft 3 - Technologie der Leistungselektronik Zyklus II

Aufgaben des Zyklus II, Darstellung der angewendeten Grundtechnologien, Gehäuse für leistungselektronische Bauelemente, technologische Hauptschritte (Vereinzeln, Passivieren, Kontaktieren, Zweitabdeckung, Verschluß), Weiterentwicklung

Heft 4 - Technologische Spezialausrüstungen für Zyklus II und III

TSA zum Vereinzeln, TSA zur Oberflächenpassivierung (ohne Glaspasivierung), Ausrüstungen zur Chipkontaktierung, Ausrüstungen für Bauelementeverschuß, Ausrüstungen für die Endfertigung (ohne Meßtechnik) einschließlich Verpackung

Heft 5 - Meßtechnik für leistungselektronische Bauelemente

(Transistoren und Gleichrichterioden) Aufgaben der Meßtechnik, Standardisierung, Kennwerte und Meßverfahren, Prüftechnologie und Qualitätssicherung, meßtechnische Geräte und Ausrüstungen

Heft 6 - Überwachung des Produktionsprozesses

Produktionsprozeß als Teil des betrieblichen erweiterten Reproduktionsprozesses, Qualität und Qualitätssicherungssystem, Prozeßkontrolle und -analyse, mathematisch-statistische Grundlagen, statistische Hilfsmittel, Prozeßinformationen, Weiterentwicklung zur rechnergestützten Produktion