

Mikrosystemtechnik Zusammenfassung

Verfasst von Franz Ludwig Kosteletzky - auf Grundlage der von Professor Zengerle gehaltenen Vorlesung (Einführung in die Mikrosystemtechnik) im Wintersemester 2018 (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg) und unter Verwendung der betreffenden Vorlesungsfolien.

EINFÜHRUNG IN DIE MIKROSYSTEMTECHNIK	5
Definition der Mikrosystemtechnik	5
Elektronenmikroskop	5
Transistor	5
Moore	5
Feynman	5
SILIZIUM	5
Silizium als hervorragendes Material für Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik	5
Chemische Eigenschaften	6
Millersche Indices – Kristallebenen	6
Physikalische Eigenschaften	6
Fermi-Niveau	6
Bändermodell – Leitungs- und Valenzband	6
Dotierung	7
Waferfehler	7
BAUELEMENTE UND PROZESSFAMILIEN	7
Oberflächen- und Volumenkräfte	7
Oberflächen- und Volumendiffusion	7
Plattenkondensator	7
Kamm-Aktuator	7
Dioden und pn-Übergang	7
BULK Mikromechanik	7
Oberflächenmikromechanik	8
CMOS Technologie	8

Ablative und additive Mikrobearbeitung	8
Zwei Photonen Absorption	8
REINRAUMTECHNIK	8
Ausbeutebetrachtung	8
Reinraumklassen	8
Aufbau eines Reinraums	9
Luftströmungen	9
Laminar-Flow	9
Fluent-Flow	9
VAKUUMTECHNIK	9
Vakuumdruckbereiche	9
Mittlere freie Weglänge	9
Krönig-Modell	9
Sorption	10
Physiosorption	10
Chemisorption	10
Vakuumpumpenarten	10
DÜNNE SCHICHTEN	10
Morphologie	10
Thornton-Modell	11
Kantendeckung	11
Mechanische Spannungen	11
THERMISCHE OXIDATION	11
Prozessablauf	11
LOCOS	11
DOTIERUNG	12
Definition Dotierung	12
Dotierverfahren	12
Dotieren aus erschöpflicher Quelle	12

Ionenimplantation	12
PHYSICAL VAPOR DEPOSITION	13
Aufdampfen	13
Sputtern	13
CHEMICAL VAPOR DEPOSITION	14
Heterogenes CVD	14
Energiezugabe bei CVD Prozessen	14
LPCVD	14
APCVD	14
ALD	14
FOTOLITHOGRAFIE	14
Resist	14
Image Reversal	15
Liftoff Prozess	15
Spin coating	15
Wellenlängen für Fotolithografie	15
Masken	15
Lithografie Methoden	15
Proximity Belichtung	15
Immersionolithografie	15
EUV – Extreme ultraviolet Lithography	15
Röntgenlithografie	15
Mehrfachstrukturierung	16
LIGA Technik	16
Elektronen- und Ionenstrahlolithografie	16
Nano Imprint Lithography	16
ÄTZEN	16
Definition	16
Selektivität	16

Nasschemisches und trockenchemisches Ätzen	16
Plasmaätzen	17
Sputterätzen – Fehler	17
ALE	17
DRIE und FIB/SEM	17
OBERFLÄCHENMIKROMECHANIK	17
Opferschichten	17
Herausforderungen der OMM	17
Silicon on Insulator	17
SIMOX	18
BESOI	18
SCREAM	18
BULK MIKROMECHANIK	18
Ätzen in KOH	18
Ätzstoppmechanismen	18
Ätzstopp auf Zeit	18
P ⁺ Ätzstopp	19
Elektrochemischer Ätzstopp	19
Ätzen konvexer Ecken	19
Poröses Silizium	19
Bosch APSM Prozess	19
AUFBAU UND VERBINDUNGSTECHNIK	19
Full Wafer Bonding	19
Wafer sägen	19
Anisotropes Leitleben	19
COB und SMD	19
Drahtbonding	19
Ball-Wedge	19
Wedge-Wedge	19

Einführung in die Mikrosystemtechnik

Definition der Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik erstellt Subsysteme, deren Strukturen Abmessungen im Mikro-Bereich haben. Die Mikrosystemtechnik kombiniert Mikroelektronik, Mikrooptik, Mikromechanik, Mikrofluidik aber auch Informatik und Biologie.

Elektronenmikroskop

Emittierte Elektronen aus einem Elektronenemitter werden durch magnetische Spulen gebündelt und durch eine weitere magnetische Spule gezielt auf einen Bereich des Substrates beschleunigt. Die auftreffenden Elektronen schlagen Sekundärelektronen aus dem Substrat heraus, die von einem Sensor erfasst werden. Der Prozess muss im Vakuum stattfinden und das Substrat muss elektrisch leitend sein.

Transistor

Ein Transistor kann mit einem kleinen Stromfluss einen größeren steuern. Dabei wird dotiertes Material verwendet. (vgl. Source, Gate & Drain).

Moore

Moore, ein Mitbegründer von Intel, brachte das „Moore's law“ in den Umlauf, das besagt, dass sich die Komplexität der Schaltkreise alle 18 Monate verdoppeln würde. Dieses Gesetz erwies sich als wahr.

Feynman

In den 50er Jahren sagte R. Feynman einige zukünftige Anwendungen in der Mikrosystemtechnik voraus. Darunter:

- 24 Bände der Encyclopedia Britannica passen auf einen Stecknadelkopf
- Mikro-U-Boote im menschlichen Körper
- Speicherkapazitäten können massiv erhöht werden (50 Atome pro Bit)

Silizium

Silizium als hervorragendes Material für Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik

Silizium hat hervorragende Eigenschaften um den Anforderungen der Mikrosystemtechnik zu genügen. Ein Überblick soll nachfolgende Liste liefern:

- Chemisch
 - Struktur - kubisch flächenzentriert
 - Beständigkeit – Ätzeigenschaften
- Mechanisch
 - Bruchfestigkeit
 - Elastizität
- Thermisch
 - Wärme verteilt sich im gesamten Kristall – Wärmeabfuhr
 - Isolation
- Optisch
 - Absorption
 - Transmission
 - Dämpfung
- Wandlereigenschaften

- Aktorik
 - Piezoresistivität: Mechanische Spannung verursacht Änderung des Widerstandes
- Sensorik
- Elektrisch
- Magnetisch
- Herstellung
 - Silizium kann aus Sand, einem zur genüge vorhandenem Material, hergestellt werden.

Chemische Eigenschaften

Silizium ist in der vierten Hauptgruppe und in der 3. Periode des Periodensystems. Der Schmelzpunkt von Silizium liegt bei ungefähr 1410°C, der Siedepunkt bei circa 3260°C. Silizium hat eine Atomordnungszahl von 14 und drei freie Valenzelektronen.

Millersche Indices – Kristallebenen

Durch die Millerschen Indices können Ebenen in der Kristallstruktur eindeutig definiert werden. Hier sind die Bildungsregeln der Indices vernachlässigt. Von besonderer Bedeutung sind folgende Ebenen:

- {100} - „Standard – Ebene“: In der {100} Ebene werden viele Standardprozesse durchgeführt. Vgl. BULK-Mikromechanik, Pyramiden(stümpfe).
- {110} - „Steile Seitenwände, Schräge Stirnwände“
- {111} - „Ätzstoppebene“

Der Schnittwinkel zwischen den Ebenen {111} und {100} beträgt 54,74°.

Physikalische Eigenschaften

Das Element Silizium besitzt den thermoelektrischen Effekt: Umsetzung und gegenseitige Beeinflussung von Temperatur und Elektrizität. Darunter verstehen sich folgende Effekte:

- Seebeck Effekt
 - Durch eine Temperaturdifferenz an einem elektrischen Leiter entsteht eine Spannung.
- Peltier Effekt (inverser Seebeck Effekt)
 - Temperaturdifferenz durch eine elektrische Spannung an einem Leiter.

Silizium hat auch die optische Eigenschaft Infrarotstrahlung zu absorbieren. Je dicker ein Silizium Wafer ist desto mehr ändert sich die durchscheinende Farbe von Licht von Gelb zu Dunkelrot.

Fermi-Niveau

Das Fermi-Niveau beschreibt das Energieniveau bis zu dem beim absoluten Nullpunkt alle Energiezustände besetzt sind.

Bändermodell – Leitungs- und Valenzband

Das Bändermodell beschreibt die Energiezustände von Elektronen. Am absoluten Temperatur-Nullpunkt eines Halbleiters ist das Valenzband das

höchste vollständig besetzte Energieband. Das energetisch darüber liegende Band nennt man Leitungsband, in ihm sind leitende Elektronen Majoritätsladungsträger bei entsprechender Dotierung.

Dotierung

Siliziumkristalle können dotiert, beziehungsweise verunreinigt werden. Der genaue Prozess wird in einem nachfolgenden Kapitel beschrieben. Grundsätzlich gibt es zwei Arten Silizium zu dotieren: Die „Addition“ (n-Dotierung, Prozess beispielsweise mit Bor) und die „Subtraktion“ (p-Dotierung, Prozess beispielsweise mit Phosphor) eines Elektrons.

Waferfehler

Bei der Herstellung von Wafern können Fehler auftreten und zu einer schlechten Qualität des Wafers führen. Dabei seien folgende häufig vorkommende Fehler erwähnt:

- Parallelitätsabweichung
- Durchbiegung
- Verwerfung
- Welligkeit
- Fehlorientierung der Flats

Kombinationen aus allen Fehlern sind teilgebietig möglich.

Bauelemente und Prozessfamilien

Oberflächen- und Volumenkräfte

Dem Namen nach greifen Oberflächenkräfte nur an der Oberfläche, Volumenkräfte aber im gesamten Volumen eines Körpers an.

Oberflächen- und Volumendiffusion

Atome können auf und in einem Stoff diffundieren. Bei der Abscheidung von Schichten ist die Oberflächendiffusion, bei der Atome sich adhäsiv auf der Oberfläche bewegen können, von Bedeutung. Ein Beispiel für Volumendiffusion ist H₂O (s. Nassoxidation), das sich in Silizium bewegen kann.

Plattenkondensator

Der Plattenkondensator eignet sich gut zum Auslesen von Messwerten. Er ist einfach zu fertigen und seine Funktionsweise beruht auf dem Oberflächeneffekt. In der modernen Mikrosystemtechnik sind kleinste Plattenabstände realisierbar. Er vereinbart Sensorik (Auslesen von Abständen) und Aktorik (Antrieb von Mikromotoren, s. Kamm-Aktuator).

Kamm-Aktuator

Ein Kamm-Aktuator ist ein Antrieb in der Mikrosystemtechnik. Er besteht aus zwei ineinander verzahnten „Kämmen“, von denen eine Seite befestigt, die andere beweglich ist. Legt man nun eine zyklische Spannung an, fängt die Aktorik an, sich zu bewegen. Diese Art von Aktorik wird häufig in Drehratensensoren verwendet.

Dioden und pn-Übergang

Eine Diode besteht aus einem Übergang zwischen p-dotiertem Material und n-dotiertem Material. Dieser Übergang lässt Strom aufgrund der sich ausbildenden Raumladungszonen nur in pn-Richtung fließen.

BULK Mikromechanik

In der BULK-Mikromechanik werden (klassischerweise in KOH-Lösung) Strukturen aus einem Silizium-Wafer herausgeätzt. Dabei werden die „Ätzstoppebenen“ {111} ausgenutzt. Diese erlauben Geometrien mit einem Winkel von 54,74°, welche die Freiheit in der Chip-Gestaltung einschränken. Einige prominente Beispiele der BULK-Mikromechanik:

- Nanopumpe
- Membran
- Beschleunigungssensor

Oberflächenmikromechanik

In der Oberflächenmikromechanik werden Strukturen in Schichten aufgebaut oder in den Wafer, durch fortgeschrittene Methoden (DRIE Prozess), gefertigt. Dabei spielt die Opferschichttechnologie eine wichtige Rolle. Einige prominente Beispiele aus der Oberflächenmikromechanik:

- Drehratensensor
- MOSFET, ISFET
- Beschleunigungssensor
- Mikrofon

CMOS Technologie

„Complementary metal oxide semiconductor“ – Ein Halbleiterprozess zur Realisierung von Integrierten Schaltkreisen. Dabei werden zwei Transistoren verwendet.

Ablative und additive Mikrobearbeitung

Es können Strukturen additiv (aufbauend) gefertigt werden (3D-Druck, Laser laminated manufacturing) oder im Gegenteil ablativ (abtragend) (Laserstrahlschneiden, Wasserstrahlschneiden, Ionenstrahlschneiden).

Zwei Photonen Absorption

Eine Sonderform der additiven Mikrobearbeitung kann durch zwei Photonen Absorption erreicht werden. Durch diese Art der Photonenabsorption können Strukturen im Mikrometerbereich gefertigt werden, da das Licht sich in einem sehr kleinen Voxel bündelt, der präzise in seiner Position gesteuert werden kann.

Reinraumtechnik

Bei der Herstellung von Chips ist größte Reinheit gefordert, jede Art von Verunreinigung führt zu einem Fehler in der Funktionsfähigkeit eines gefertigten Chips.

Ausbeutebetrachtung

Um die resultierende Ausbeute in einer Produktionslinie zu berechnen werden Daten zu jedem einzelnen Produktionsschritt erhoben, die besagen mit welcher Wahrscheinlichkeit der Prozess erfolgreich war. Die Gesamtheit der erfolgreich produzierten Chips lässt sich wie folgt berechnen:

$$Y_{ges} = \prod_{i=1}^n Y_{si}$$

Mit n: Anzahl der Produktionsschritte, Y_{si}: positive Wahrscheinlichkeit des einzelnen Prozesses.

Reinraumklassen

Folgende Parameter sind von Bedeutung in einem Reinraum:

- Druck
 - Luftpartikel
- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Zusammensetzung des Lichts

Es existieren bereits einige Normen für die „Reinheit“ eines Reinraumes. Folgende Normen-Klassen seien erwähnt:

- ISO
- US
- VDI
- DIN

Standardbedingungen eines Reinraums der ISO Klasse 5-6 sind: 22°C, 45% Luftfeuchtigkeit

Aufbau eines Reinraums

Den vollen Aufbau eines Reinraumes ist wohl nur in einem Schnitt zu sehen, den Sie in den Vorlesungsfolien nachsehen können. Folgende Stichworte verleihen einen groben Überblick:

- Grauraum
- Weißraum
- Schleusen
- Doppelter Boden
- Luftabfuhr und Reinigung

Luftströmungen

Laminar-Flow

Laminar-Flow beschreibt eine gezielte Richtung, in die die Luft laminar getragen wird. Es entstehen keine Turbulenzen. Laminar-Flow kann Partikel gezielt zu Boden tragen oder einen Luftvorhang bilden.

Fluent-Flow

Fluent-Flow beschreibt die Luftströmung, bei der keine gezielte Richtung der Gesamtmasse der Luft vorliegt. In ihr werden Partikel chaotisch durch die Luft geweht.

Vakuumtechnik

Vakuumdruckbereiche

Es existieren Klassifizierungen der Druckbereiche im Vakuum:

- Grobvakuum
- Feinvakuum
- Hochvakuum
- Ultrahochvakuum

Als Referenzwerte: im Grobvakuum entsteht eine Monolayer in circa 3,6 Sekunden, im Ultrahochvakuum „erst“ in 36 Sekunden.

Mittlere freie Weglänge

Die mittlere freie Weglänge λ beschreibt den Betrag des Weges, den ein Atom sich ohne Hindernis fortbewegen kann.

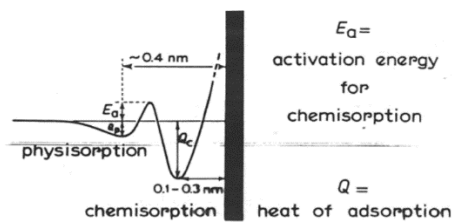
Krönig-Modell

Das Modell von Krönig beschreibt wie viele Atome eine bestimmte Fläche in gewisser Zeit treffen. Dabei hat er vereinfacht nur 6 (x, y, z, -x, -y, -z) Raumrichtungen in denen Atome sich bewegen können zugelassen. Es zeigt, dass die Geschwindigkeit der Teilchen in einem Gas von der Temperatur abhängt:

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m(a)}}$$

Sorption

Sorption beschreibt die Anziehungskraft, die ein Atom an einem Substrat hält.



Physisorption

Bei der Physisorption ist die Energie für eine Chemisorption nicht ausreichend gewesen. Es entstehen Van-der-Vaals Kräfte – Anziehungskräfte zwischen Molekülen.

Chemisorption

Die Energie des Atoms war groß genug für die Chemisorption, es entstehen kovalente Bindungen (Teilung von Valenzelektronen).

Vakuumpumpenarten

Folgende Vakuumpumpen sollten Ihnen im Begriff sein:

- Öldiffusionspumpe
- Turbomolekularpumpe
- Kryopumpe

Dünne Schichten

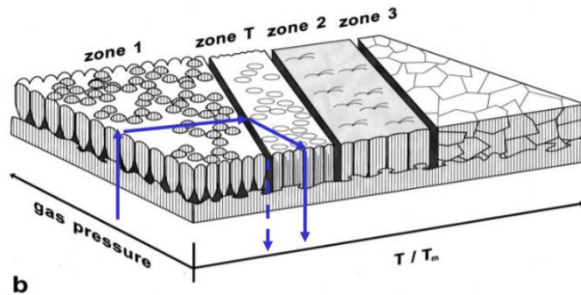
Ein großes Teilgebiet der Mikrosystemtechnik befasst sich mit der Abscheidung von dünnen Schichten. Diese haben viele Funktionen: Opferschichten, Funktionsschichten, Beschichtungen, Isolation, Abdichtung, etc.

Morphologie

Unter Morphologie einer dünnen Schicht versteht man die Entwicklung und Veränderung bei der Entstehung einer dünnen Schicht. Hilfreich dabei ist das Modell von Thornton.

Thornton-Modell

Das Thornton Modell lässt sich am besten mit folgendem Bild beschreiben. Es beschreibt die Morphologie dünner Schichten (Prozess: Sputtern) bei veränderten Prozessparametern Druck und Temperatur.



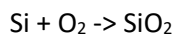
Kantendeckung

Die Qualität der Kantenbedeckung verändert sich bei der Veränderung der Prozessparameter. Bei einem zu großen Druck treffen Atome aus jeglichen Richtungen auf das Substrat auf - die Beschichtung in tieferen Strukturen ist kaum vorhanden. Bei einem zu niedrigen Druck treffen Atome spärlich auf, die Kantenbedeckung weist in tiefen Strukturen ebenso Unregelmäßigkeiten auf.

Mechanische Spannungen

Spannungen in Schichten können beim Abscheiden entstehen. Diese sind oftmals auf eine zu hohe Temperatur bei der Abscheidung zurückzuführen (Verspannungen beim Abkühlen). Ebenso können intrinsische Spannungen entstehen aufgrund des Wachstumsprozesses der entstehenden Schicht. In Abhängigkeit des abzuscheidenden Materials kann es auch zu einer Volumenzunahme bei der Abscheidung kommen.

Thermische Oxidation



Prozessablauf

In einem Reaktor werden die Produkte vereint: Silizium und Sauerstoff. Der Reaktor wird erhitzt und die Sauerstoffatome diffundieren an das Substrat und reagieren an der Grenzschicht zwischen Si und SiO₂. Dabei muss nach einiger Zeit der Sauerstoff durch das entstandene Siliziumoxid durchdiffundieren.

Es kann zwischen Trockenoxidation (s. beschriebener Prozess oben) und Feuchtoxidation unterschieden werden:

Die Feuchtoxidation zeichnet sich dadurch aus, dass das Sauerstoff-enhaltende Reaktionsprodukt mit Wasserstoff angereichert ist: H₂O. Dieses Molekül ist kleiner und kann leichter durch das bereits entstandene Siliziumoxid durchdiffundieren, somit sind dickere Schichten realisierbar. Der Prozess ist aber langsamer und enthält als Produkt H₂.

LOCOS

„Local oxidation of silicon“ – Lokale Oxidation wird durch eine Maskierschicht erreicht, die für das Sauerstoff-enhaltende Reaktionsprodukt undurchlässig ist.

Dotierung

Definition Dotierung

Dotierung bedeutet das bewusste Verunreinigen eines Mediums um einen bestimmten Zweck zu erreichen. Im Falle der Dotierung von Silizium ist die immense Steigerung der Leitfähigkeit das Resultat.

Dotierverfahren

Folgende Dotierverfahren sollten Ihnen ein Begriff sein:

- Dotierung beim Kristallziehen
 - Zugabe des Dotierstoffes als Gas in den Reaktor beim Kristallziehen.
- Epitaxie
- Ionenimplantation (s. folgender Abschnitt)
- Dotierung durch Legierung
 - Abscheidung / Aufschmelzen eines Metalls
- Dotierung durch thermische Diffusion
 - Erhitzung, sodass ein Dotierstoff in den Kristall diffundiert

Dotieren aus erschöpflicher Quelle

Die Konzentration eines Dotierstoffes im dotierten Material nimmt mit der Tiefe im Substrat ab und verteilt sich gaußförmig. Die Verteilung aus erschöpflicher Quelle kann wie folgt berechnet werden:

$$l = \sqrt{Dt}$$

Ionenimplantation

Die Ionenimplantation ist mittlerweile zur Standardmethode der Dotierung in der Mikrosystemtechnik geworden. Der Prozess gestaltet sich wie folgt:

1. Ionisierung des Dotierstoffes
2. Beschleunigen des Ions
3. Filtern durch Blende und Neutralstrahlfalle
4. Auftreffen und Einschießen in den Kristall
5. Annealing – Einbau des Ions in das Kristallgitter

Die Tiefe, die eingeschossene Ionen im Substrat erhalten beträgt circa $1\mu m$. Die Ionen verteilen sich statistisch nach einer Gaußglocke.

Beim Einschießen der Ionen in den Kristall muss der Effekt des „Tunneling“ in der {110} Ebene beachtet werden. Wenn der Auftreffwinkel des Ions zwischen 3° und 7° liegt, kann es sein, dass sich das Ion durch Atomlagen sehr weit fortbewegen kann. Methoden das zu verhindern sind folgende:

- Einschießen des Ions in einem Winkel über 7°
- Abscheidung einer amorphen Diffusor-Schicht
- Zerstörung der obersten Schichten -> Entstehung amorpher Strukturen

Am Ende wird ein Annealing (Tempern bei hohen Temperaturen) Schritt benötigt, um die Ionen in das Kristallgitter komplett einzubauen.

Physical Vapor Deposition

Aufdampfen

Unter Aufdampfen versteht man thermisches Verdampfen von Material unter hohen Temperaturen. Dabei werden die Teilchen erst zum Substrat transferiert und kondensieren am Substrat.

Sputtern

Der Prozess des Sputterns vollzieht sich wie folgt:

1. Erzeugung von Plasma
2. Beschleunigung der Ionen zur Kathode (Abzuscheidendes Material)
3. Aufprall der Ionen an der Kathode / Target -> Herausschlagen von Target Atomen
4. Herausgeschlagene Teilchen besitzen eine hohe Energie und bewegen sich zum Substrat hin
5. Die herausgeschlagenen Target-Atome schlagen am Substrat auf

Folgende Prozessvarianten des Sputterns sollten Sie verinnerlicht haben:

- DC Sputtern
 - Wie oben beschrieben – funktioniert nur bei leitendem Target
- AC Sputtern
 - Sputtern unter Wechselstrom – funktioniert auch bei nicht-leitendem Target
 - Kleine Kathodenflächen und Große Anodenflächen -> Bei Wechselstrom starke Änderung der Spannung der Kathode, schwache Änderung der Spannung an der Anode.
 - Durch die Trägheit großer Ionen, werden sie zur Kathode hinbewegt
 - Nachfolgender Prozess wie oben
- Sputterätzen
 - Umgekehrte Polarität -> Ionen schlagen auf Substrat ein und tragen dort Material ab.
 - Reinigung der Substratoberfläche
- Reaktives Sputtern
 - Abscheiden von Schichten möglich durch Hinzugabe von reaktivem Gas in den Reaktor.
- Magnetron Sputtern
 - Durch Erzeugung eines Magnetfeldes am Target werden Elektronen in eine Spiralbahn gezwungen. Resultierend werden im Bereich vor dem Target mehr Ionen generiert.
 - Es wird mehr Material abgeschieden.
- Bias Sputtern
 - Überlagerung der AC Spannung mit einer zusätzlichen DC Spannung.
 - Kombination aus „normalem“ Sputtern und Sputterätzen.
 - Resultierend: Höhere Dichten und bessere Kantenbedeckung

Mit dem Prozess des Sputterns erhält die Abscheidungstechnologie eine neue Form der Kontrollierbarkeit. Mithilfe des Sputterätzens ist sogar eine integrierte Reinigung des Substrates möglich. Es können auch durch AC Sputtern alle denkbaren Materialien abgeschieden werden. Durch reaktives Sputtern ist das Abscheiden von Legierungen möglich gemacht worden. Schlussendlich kann die Qualität der Schicht durch Bias Sputtern erhöht werden.

Nachteilig sind höhere Prozessdrücke, die das Risiko von Gaseinschlüssen erhöhen. Die Herstellung der Anlagen und Targets sind über dem teuer.

Chemical Vapor Deposition

Heterogenes CVD

Der standardmäßige CVD Prozess spielt sich wie folgt ab:

1. Transport der Reaktanten in die Region in die abgeschieden werden soll
2. Diffusion der Reaktanten an die Substratoberfläche
3. Adsorption an die Oberfläche
4. Oberflächenreaktion: Einbau der Radikalen in den Festkörperverband
5. Desorption der flüchtigen Reaktionsprodukte
6. Diffusion der Produkte aus der Grenzschicht
7. Abtransport

Energiezugabe bei CVD Prozessen

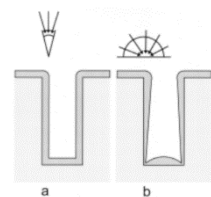
Energie kann durch zwei Methoden hinzugeführt werden:

- Thermische Energie – durch Erhitzung
- Elektrische Energie – durch Plasma / Ionen

LPCVD

„Low Pressure Chemical Vapor Deposition“

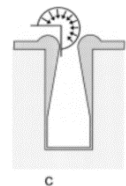
Die Wafer können im Reaktor sehr dicht beieinander angeordnet werden – die Produkte diffundieren überall. Das hat aufgrund der hohen Diffusionskonstante keinen Einfluss auf das Schichtwachstum.



APCVD

„Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition“

Die Wafer müssen in den Reaktor so angeordnet werden, dass das Schichtwachstum auf allen Wafern gleich ist.



ALD

„Atomic Layer Deposition“

Zyklische Änderung des Prozessgases (Folgende Materialien: Substrat, A, B):

1. A bindet nur mit Substrat
2. B bindet mit A
3. A₂ bindet mit B

So ist ein atomlagen genauer Schichtaufbau möglich. Die Schichten sind optimal

Fotolithografie

Resist

Ein Resist ist ein strahlungsempfindliches Polymer. Man unterscheidet zwischen positiv-Resist (Belichtetes Material wird auswaschbar) und negativ-Resist (Belichtetes Material wird fest).

Chemische Funktionsweise:

- Positiv-Resist: Bestrahlung wandelt aktive Gruppen von einer hydrophoben Form in eine hydrophile (COOH)-Gruppe um.

- Negativ-Resist: Bestrahlung vernetzt Polymere -> Mol Gewicht steigt

Image Reversal

„Umkehr des Kantenprofils“

1. Lithografie mit Maske -> Erstellen einer löslichen Schicht A
2. Tempern -> Lösliche Schicht A wird unlöslich durch Quervernetzung
3. Flutbelichtung -> Rest aus A wird löslich
4. Auswaschen

Liftoff Prozess

Der Prozess des Liftoff macht das Kreieren von Funktionsschichten überhaupt erst möglich oder sinnvoll. Er beschreibt das Strukturieren von Funktionsschichten ohne Ätzung.

Es wird durch Image Reversal ein starker Überhang generiert, sodass beim Abscheiden von Material keine Verbindung zwischen Material auf dem Resist und Material auf dem Substrat entsteht.

Spin coating

Aufbringen von flüssigem Resist, der durch starke Drehung auf dem gesamten Wafer verteilt wird.

Alternativen: Spray coating, Trockenresist

Wellenlängen für Fotolithografie

- 13,5nm durch Zinkverdampfung
- 436nm Quecksilberdampflampe
- 248nm KrF Laser
- 193nm ArF Laser

Masken

Folgende Begriffe sollten bekannt sein:

- Light-Field / Dark-Field
- Phasenverschiebende Masken

Lithografie Methoden

Proximity Belichtung

Zwischen Maske und Substrat ist ein kleiner Abstand, der die Auflösung der Maske reduziert. Interferenzen verschlechtern zudem das Abbild. Alternativen sind beispielsweise die Kontaktbelichtung und die abbildende Projektion.

Immersionolithografie

Befüllen des Bereiches zwischen Linse und Substrat mit Immersionsflüssigkeit. Die Limitierung dieses Verfahrens ist gegeben durch Brechungswinkel zwischen Linse und Immersionsflüssigkeit.

EUV – Extreme ultraviolet Lithography

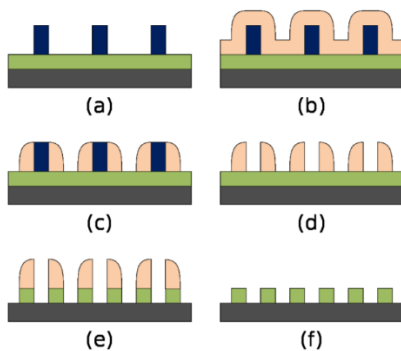
Analog zur Vorlesung

Röntgenlithografie

Röntgenlithografie ist unüblich wegen der punktförmigen Strahlenquelle und der extremen Wärmeentwicklung am Substrat. Des Weiteren sind Masken für die Röntgenlithografie teuer und schwer herzustellen.

Mehrfachstrukturierung

Mehrfachstrukturierung wird angewandt um aus einer großen Struktur eine (vierfach) kleinere Struktur herzustellen. Der Prozess ist denkbar trivial:



LIGA Technik

„Lithografie, Galvanik und Abformung“

Ein Resist wird belichtet und ausgewaschen, um eine negative Form (beispielsweise eines Zahnrades) herzustellen. In den entstandenen Hohlraum wird ein galvanisiert, sodass der restliche Resist geätzt werden kann. Zurück bleibt nur das Galvanisierte.

Elektronen- und Ionenstrahlolithografie

Bei diesen Arten von Lithografie werden Bereiche rechteckig, direkt ohne Maske mit Strahlung belichtet. Die Auflösung ist limitiert durch die Aufteilbarkeit der gewollten Struktur in Rechtecke. Diese Prozesse sind sehr schnell.

Nano Imprint Lithography

Erstellung eines Stempels, mit dem Material auf ein Substrat unter Druck und/oder Temperatur aufgedrückt wird.

Ätzen

Definition

Ätzen beschreibt die Abtragung der Oberfläche eines Festkörpers. Es existieren chemische (Flüssigkeit, Gas) und physikalische (Ionen) Ätzverfahren.

Selektivität

Die Selektivität beschreibt wie stark ein Ätzverfahren zwischen zwei verschiedenen Medien unterscheidet. Sie ist abhängig von Materialeigenschaften, Konzentration und Temperatur des Ätzmediums.

Beispielsweise sind chemische Ätzverfahren in der Regel sehr selektiv, physikalische sind gegenteilig.

Nasschemisches und trockenchemisches Ätzen

Unter nasschemischen Ätzen versteht man das Ätzverfahren, bei dem das Ätzmedium eine Flüssigkeit ist, bei trockenchemischen Ätzen ist das Ätzmedium ein Gas.

Im Allgemeinen sieht ein chemischer Ätzprozess wie folgt aus:

1. Diffusion des Ätzmediums an das Substrat
2. Chemische Reaktion am Substrat, dabei Überführung des zu ätzenden Stoffes in eine lösliche Verbindung

3. Diffusion der Produkte in die Umgebung
4. Abtransport

Plasmaätzen

In einem Reaktor, der ähnlich wie ein DC-Sputter-Reaktor aufgebaut ist, werden Ionen erzeugt, dazu wird noch ein gasförmiges Ätzmedium hinzugefügt, das sich durch Elektronenstöße in Radikale wandelt. So entsteht ein starker Angriff durch die Radikale und ein schwächerer durch die Ionen.

Sputterätzen – Fehler

Folgende Fehler treten beim Sputterätzen auf:

- Redeposition
- Erosionsgräben
- Absputtern der Maske
- Faceting
- Ionenimplantation

ALE

„Atomic Layer Etching“

Der Prozess sieht wie folgt aus und kann zyklisch wiederholt werden:

1. Chemische Abscheidung einer Monolayer
2. Zugabe eines Ätzmediums, das nur den chemisch veränderten Stoff abträgt

DRIE und FIB/SEM

Diese Arten des Ätzens sollten bekannt sein.

Oberflächenmikromechanik

Opferschichten

Opferschichten dienen als Distanzschicht und definieren den Abstand zwischen Funktionsschicht und Substrat. Sie wird temporär aufgetragen und wieder entfernt. Meistens besteht sie aus SiO_2 .

Eine Opferschicht muss folgende Kriterien erfüllen:

- Isotrope Ätzbarkeit
- Selektive Ätzbarkeit
- Prozesskompatibilität

Herausforderungen der OMM

Folgende Herausforderungen gelten als die typischen Herausforderungen bei der Oberflächenmikromechanik:

- Herausätzen von Opferschichten nur möglich bei kleinen zusammenhängenden Flächen -> Perforierung
- Geringe Steifigkeit in z-Richtung durch geringe Dicke der Strukturen
- Interne Spannungen bei langen, dünnen Strukturen
- Sticking

Silicon on Insulator

Die SOI Technik bezeichnet das Integrieren einer Siliziumoxidschicht. Mit dieser Technik ergeben sich folgende Vorteile:

- Integrierte Opferschicht
- Strukturen in einkristallinem Silizium realisierbar
- Integrierte Ätzstoppebene beim DRIE Prozess
- Isoliertes Aufbringen der Elektronik auf der Rückseite möglich
- Höhere Steifigkeit beweglicher Strukturen

Es existieren zwei Verfahren zur Herstellung dieser integrierten Schicht:

SIMOX

„Separation by ion implantation of oxygen“

In einen Wafer werden Oxidionen eingeschossen. Die nachfolgenden Schritte sind Annealing und Epitaxie zur Fortsetzung der kristallinen Struktur.

BESOI

„Back etched silicon on insulator“

Zwei Wafer, von denen einer auf einer Seite oxidiert wurde, werden aneinander gebondet.

SCREAM

„Single crystal reactive etching and metallization“

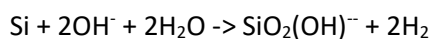
Bei dem SCREAM Prozess wird wie folgt verfahren:

1. Generieren einer Maske
2. Anisotropes Übertragen der Maske in das Substrat
3. Abscheidung einer Seitenwandpassivierung
4. Entfernen der lateralen Passivierung
5. Weitere anisotrope Übertragung der Maskenstruktur
6. Isotropes unterätzen eines so entstehenden Bereiches

Mit dieser Methode können beispielsweise freitragende Balken einfach hergestellt werden.

BULK Mikromechanik

Ätzen in KOH



Die Ätzung erfolgt in drei Teilschritten:

1. Oxidation
Isolation des Si Komplexes. Aufgrund seiner positiven Ladung ist er noch am Substrat adsorbiert.
2. Reduktion
Reduktion der überschüssigen Elektronen mit Wassermolekülen. Das verhindert den Aufbau negativer Ladungen im Si Komplex.
3. Folgereaktion
Si Komplex reagiert mit OH⁻ Ionen weiter. Neu entstandene negativ geladene Si Komplexe werden vom Substrat abgestoßen.

Ätzstoppmechanismen

Ätzstopp auf Zeit

Nach einer bestimmten Zeit wird das Substrat aus dem Ätzbecken entfernt. Diese Methode ist sehr ungenau.

P⁺ Ätzstopp

Entfernen von Elektronen durch Dotierung. Elektronen stehen nun nicht mehr für die Reaktion zur Verfügung.

Elektrochemischer Ätzstopp

Entziehung der Elektronen durch Anlegen einer äußeren Spannung. Diese Methode ist dennoch ungenau, da man nicht unbedingt weiß, wann die Spannung anzulegen ist.

Ätzen konvexer Ecken

Konvexe Ecken werden aufgrund ihrer weniger Bindungen schneller geätzt als konkave Ecken. Um eine Kante/Ecke zu ätzen, an einem vorbestimmten Ort, werden Vorhaltestrukturen benötigt.

Es existiert eine Reihe solcher Strukturen, zwischen denen auch Kombinationen möglich sind:

- Beam
- Square
- Band
- Triangle

Poröses Silizium

Poröses Silizium zeichnet sich durch ein hohes Volumen/Oberflächen Verhältnis aus.

Bosch APSM Prozess

Aufbau und Verbindungstechnik

Full Wafer Bonding

Wafer sägen

Anisotropes Leitleben

COB und SMD

Drahtbonding

Ball-Wedge

Wedge-Wedge