

Fragen und Antworten zur Mikrotechnologie

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------|---------------------------------------|----|
| 1 | Beschichtungstechnik | 2 |
| 1.1 | Materialwissenschaften | 2 |
| 1.2 | Vakuum | 3 |
| 1.3 | PVD – Physical Vapour Deposition | 3 |
| 1.4 | CVD – Chemical Vapour Deposition | 6 |
| 1.5 | Charakterisierung von Dünnschichten | 8 |
| 1.6 | Mechanische Eigenschaften | 10 |
| 1.7 | Lithographie | 11 |
| 2 | Mikrotechnologie | 16 |
| 2.1 | Einführung | 16 |
| 2.2 | Vakuum | 16 |
| 2.3 | PVD | 17 |
| 2.4 | CVD | 19 |
| 2.5 | Galvanisches Abscheiden | 21 |
| 2.6 | Ätzverfahren | 22 |
| 2.7 | Dotierung | 24 |
| 2.8 | LIGA | 25 |
| 2.9 | CMP | 25 |
| 2.10 | Nicht-Dünnschichttechnische Verfahren | 26 |
| 2.11 | Reinraum | 26 |
| 2.12 | Reinigung | 26 |
| 3 | Mikrosystemtechnik | 27 |
| 3.1 | Technologischer Aufbau | 27 |
| 3.2 | Sensorik | 27 |
| 3.3 | Aktoren | 34 |
| 3.4 | Mikrofluidik | 35 |
| 3.5 | Automobilanwendungen | 35 |
| 3.6 | Industrieanwendungen | 36 |
| 3.7 | Datentechnik | 36 |
| 3.8 | Kommunikation | 36 |
| 3.9 | Luft und Raumfahrt | 36 |
| 3.10 | Biomedizintechnik | 37 |

1 Beschichtungstechnik

1.1 Materialwissenschaften

1. Wie sieht der Potentialverlauf aus, der den Atom Abstand bestimmt?

Vom Prinzip her ein Lenard Jones Potential. Es ergibt sich ein effektives Potential aus dem anziehende Coulomb Potential und dem abstoßenden Kernpotential.

2. Welche Bindungen in Festkörpern gibt es?

- Metallische Bindung
- Ionenbindung
- Kovalente Bindung
- Van der Waals Bindung

3. Welche Defekte gibt es in Festkörpern?

- Korngrenzen
- Versetzungen (Stufe, Kante)
- Fehlstellen

4. Nennen sie die Grundgleichung für die Freie Energie

$$G = H - TS$$

5. Wie ändert sich die Freie Energie bei einer Reaktion (geben sie dies in Abhängigkeit der Grundgrößen an)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

6. Beschreiben Sie die Änderung der freien Energie für die chemische Gleichung $aA + bB \rightarrow cC$ mit Hilfe der Aktivitäten.

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln \left(\frac{a_c}{a_b a_c} \right)$$

7. Erläutern sie die Variablen im Gibbschen Phasengesetz.

Gibbsche Phasenregel: $F = n + 2 - \psi$

mit n : Anzahl Komponenten (Atomarten), 2 oder 1 : Anzahl Zustandsgrößen (Druck, Temperatur), ψ : Anzahl Phasen (fest, flüssig)

F ist die Anzahl der Freiheitsgrade und gibt an wie viele Zustandsgrößen geändert werden können ohne das sich das System verändert.

1.2 Vakuum

8. Was ist Vakuum

Vakuum ist definiert als luftleerer Raum. In der Realität gibt es jedoch nur ein technisches Vakuum.

9. Geben sie die Vakuumbereiche an

- grob $10^5 - 10^2$ Pa
- fein $10^2 - 10^{-1}$ Pa
- hoch $10^{-1} - 10^{-4}$ Pa
- ultrahoch $10^{-4} - 10^{-7}$ Pa

10. Definieren sie freie Weglänge

$$\Lambda = \frac{1}{n\sigma}$$

11. Wie ändert sich die mittlere freie Weglänge mit dem Druck

$$\Lambda = 5 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \frac{1}{p}$$

12. Geschwindigkeitsverteilung in x-Richtung. Skizze und Gleichung.

$$f(v_x) = \frac{1}{n} \frac{dn_x}{dv_x} = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} e^{-\frac{Mv_x^2}{2RT}}$$

Die Kurve startet bei Null und geht gegen unendlich wieder gegen Null. Ihr Maximum ist abhängig von der Geschwindigkeit, Temperatur (weiter draußen) und der Masse (weiter vorne).

13. Formel für wahrscheinlichste Geschwindigkeit?

$$v_W = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

1.3 PVD – Physical Vapour Deposition

14. Welche Beschichtungsverfahren gibt es

PVD, CVD

15. Welche Reaktionstypen von Verdampfungen gibt es?

- ohne Zersetzung: $MX \rightarrow MX$
- Zerfall: $MX \rightarrow M_{(f)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$
- Zersetzung: $MX \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$
 $MO_2 \rightarrow MO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)}$

16. Wie zündet eine Glimmentladung?

Legt man eine Spannung in eine Röhre mit geringem Druck an erhält man folgenden Strom-Spannungs-Linie

linearer Bereich Am Anfang steigt der Strom linear mit der Spannung. Die Ladungsträger rekombinieren auf der Gesamtstrecke. Je größer die Spannung, desto weniger rekombinieren.

Sättigungs Bereich Die Teilchen haben eine so hohe Geschwindigkeit, dass sie nicht mehr rekombinieren.

Townsend Entladung Die Spannung reicht für Stoßionisation aus, so dass der Strom stark ansteigt.

normale Entladung Gleichgewicht zwischen Ionen und Sekundärelektronen. Spannung geht zurück, Strom steigt an.

Glimmentladung Weitere Erhöhung der Energie

17. Wie sieht der Potentialverlauf der Glimmentladung aus. Zeichnen sie die Beschriftung der Achsen mit ein

Negativ an der Kathode und linear ansteigend. Dann linear bis zu einem leichten Abfall an der Anode

18. Wie kommt die Glimmentladungslichtsäule zustande?

An der Kathode entsteht durch Stoßionisation Sekundärelektronen. Diese regen dicht hinter der Kathode Gasatome. (Kathodenglimmlicht)

Danach gibt es lange keine Anregung mehr (Dark Space) Die langsamen Ionen verringern das Potential gegenüber den schnelleren Elektronen.

In der positiven Säule ist die Ionisierungsrate gleich der Rekombinationsrate.

19. Was ist ein Plasma ? Welche Stoßprozesse finden statt ?

Es finden elastische und inelastische Stoßprozesse statt. Die durch inelastische Stöße ausgelösten Prozesse nennt man Penning Prozesse.

20. Welche Penning-Prozesse gibt es?

| | |
|------------------------------------|--|
| • Ionisation | $e^- + Ar \rightarrow Ar^+ + 2e^-$ |
| • Anregung | $e^- + O_2 \rightarrow O_2^* + e^-$ |
| • Dissoziation | $e^- + CF_4 \rightarrow e^- + CF_3^* + F^*$ |
| • Dissoziative Ionisation | $e^- + CF_4 \rightarrow 2e^- + CF_3^+ + F^*$ |
| • Elektronen Anbindung | $e^- + SF_6 \rightarrow SF_6^-$ |
| • Dissoziative Anbindung | $e^- + N_2 \rightarrow N^+ + N^- + e^-$ |
| • Symmetrische Ladungsübertragung | $A + A^+ \rightarrow A^+ + A$ |
| • Asymmetrische Ladungsübertragung | $A + B^+ \rightarrow A^+ + B$ |
| • Metastabil neutral | $A^* + B \rightarrow B^*A + e^-$ |
| • Metastabil ionisiert | $A^* + A^+ \rightarrow A + A^+e^-$ |

21. Wie setzt sich das Target beim Sputtern von Legierungen zusammen?

Durch Änderung der Zusammensetzung des Targets ist es möglich die Stöchiometrie zu erhalten.

Dazu ist zu Beachten die Targetkonzentration (Anteile), die Sputterausbeute und die Anzahl der eingeschlagenen Gasatome

22. Wie sieht die Schrittfolge bei einer Sputteranlage aus?

- Öffnen der Schleuse, Laden des Substrats
- Schließen der Schleuse
- Abpumpen der Schleuse
- Laden des Substrats auf Substratteller
- Abpumpen auf 10^{-5} Pa
- Positionierung Substrat unter Target
- Argon Gas Zuführung
- Zünden des Plasmas, mit Substrat als Target zur Reinigung
- Abscheiden mit Kathode als Target.

1.4 CVD – Chemical Vapour Deposition

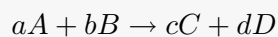
23. Nennen sie CVD Reaktionsprozesse

- Pyrolyse: thermische Zersetzung von Organometallischen Verbindungen
 $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$
- Reduktion: Reduktion mit Wasser als Reduktionsmittel
 $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$
- Oxidation:
 $\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- Karbid/Nitrid Verbindungen
 $\text{SiCl}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{SiC} + 4\text{HCl}$

24. Welche Bedingungen müssen für eine Beschichtung mittels CVD Verfahren erfüllt sein ?

25. Leiten Sie die Gleichgewichtskonstante K her

Reaktionsgleichung



Freie Energie:

$$\Delta G = cG_c + dG_d - (aG_a + bG_b)$$

mit

$$G_i = G_i^0 + RT \ln a_i$$

im Gleichgewicht gilt damit: ($\Delta G = 0$)

$$\Delta G^0 = -RT \ln \left(\frac{a_c a_d}{a_a a_b} \right) = -RT \ln (K)$$

daraus folgt

$$K = \exp \left(-\frac{\Delta G^0}{RT} \right)$$

26. Welche Gastransportmechanismen gibt es?

- Viskosen Fluss: Makroskopischer Gastransport
- Diffusion: Mikroskopische Gastransport

27. Skizzieren sie die Gasflussverteilung beim Einströmen in ein Rohr.

Größer werdende Grenzschicht. Weiter hinten parabelartige Verteilung

28. Geben Sie die Formel für das Hagen-Poiseuille Gesetz an

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta \Delta x}$$

daraus ergibt sich ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil in Röhren

29. Welche Formel Beschreibt Diffusion?

Ficksche Gesetz

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

bei Gasen gilt speziell

$$D = D_0 \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n$$

30. Wovon ist der Filmwachstum abhängig?

- Transport der Reaktionspartner
- Absorption auf dem Substrat
- Oberflächendiffusion, chemische Reaktion
- Transport der Nebenprodukte

31. Anhängigkeit der Wachstumsrate von Temperatur und Konzentration

Die Oberflächenreaktionen sind exponentiell Temperaturabhängig, dagegen der Massentransfer (Diffusion) linear. Damit werden bei höheren Temperaturen schneller Schichten aufgebaut

Der langsamste Prozessschritt bestimmt grundsätzlich die Wachstumsrate

Prozesstemperatur

- niedrig → Oberflächenprozesse begrenzen Wachstum (Exponentieller Anstieg mit Temperatur)
- hoch → Diffusionstransport bestimmt Wachstum (geringe Temperaturabhängigkeit)

Konzentration (Dichte)

- hoch → Oberflächenprozesse begrenzen Wachstum
- niedrig → Diffusionstransport bestimmt Wachstum

1.5 Charakterisierung von Dünnschichten

32. Womit werden Proben beschossen?

- Elektronen
- Ionen
- Photonen
- Röntgenstrahlen
- Neutralteilchen

33. Nenne sie die WW Produkte bei Elektronenbeschuss und Skizzieren sie ihre Entstehungsbereiche.

Wechselwirkungsprodukte

- Primärelektronen
- Rückstreuetelektronen
- Sekundärelektronen
- Auger-Elektronen
- Charakteristische Röntgenstrahlung
- Bremsstrahlung
- Kathodenlumineszenz

Entstehungsbereiche

- Oberflächennah: Kathodenlumineszenz, Augerelektronen
- Tiefer: Sekundärelektronen, Rückstreuetelektronen
- Am weitesten eingedrungen: Charakteristische Röntgenstrahlung, Bremsstrahlung

34. Elektronenstrahlspektroskopieverfahren

- TEM - Transmissionselektronenmikroskop
- REM - Rasterelektronenmikroskop

35. Skizzieren und Erläutern Sie den Aufbau eines TEM

Eine äußerst dünne ($5\mu\text{m}$) und Elektronendurchlässige Probe wird mit Elektronen Rasterförmig abgetastet und dabei die transmittierten Elektronen gemessen. Dabei werden zusätzlich noch die Rückgestreuten Elektronen, die entstandene Röntgenstrahlung sowie transmittierte aber gebeugte Elektronen (Dunkelfeld) aufgezeichnet.

36. Wofür nutzt man ein TEM?

Anwendung in

- Bestimmung von Mikrostrukturen
- chemischen Analysen
- Kristallstruktur Bestimmung

37. Skizzieren und Erläutern Sie den Aufbau eines REM

Die Probe wird rasterförmig mit Elektronen beschossen und die Rückgestreuten- und die Sekundärelektronen gemessen. Die gemessenen Elektronen sind dabei abhängig vom Material und der Topographie der Probe.

38. Nenne Sie Unterschiede zwischen TEM und REM

TEM hat die wesentlich bessere Auflösung (0,1 nm) gegenüber REM (3-100 nm). Dafür benötigt man bei TEM sehr dünne Schichten und hat extrem lange Vorbereitungszeiten. Mit REM kann man nur Oberflächen untersuchen, mit TEM nur Strukturen in dünnen Filmen.

39. Elektronen-Spektroskopieverfahren

- EDX - Röntgenspektroskopie (Elektron → Röntgen)
- AES - Auger Elektronenspektroskopie (Elektron → Elektron)
- XPS - Röntgen Photo-Elektronenspektroskopie (Röntgen → Elektron)

40. Beschreiben Sie die Messprinzipien der Elektronen-Spektroskopieverfahren

EDX - Röntgenspektroskopie Beschuss der Probe mit Elektronen und Messung der Energie der Röntgenstrahlung.

AES - Auger Elektronenspektroskopie Beschuss der Probe mit Elektronen und Messung der Anzahl von Augerelektronen in Abhängigkeit von der Energieselektion.

XPS - Röntgen Photo-Elektronenspektroskopie Beschuss mit Röntgenstrahlung und Energieselektion der herausgelösten Elektronen mit Messung ihrer Anzahl

41. Ionenstrahlwechselwirkungen

- SIMS - Sekundärionen Massenspektroskopie
- RBS - Rutherford Backscattering (Rückstreuungspektroskopie)

42. Beschreiben Sie die Messprinzipien der Ionenstrahl-Messverfahren

SIMS - Sekundärionen Massenspektroskopie Beschuss der Probe mit monoenergetischem Ionenstrahl (Selektion nach der Energie). Die Sekundärionen werden in einem elektrostatisch und magnetischen Energieanalysator selektiert und die Ionen durch Erzeugung von Elektronen und deren Messung in einem Multiplier gemessen.

RBS - Rutherford Backscattering Beschuss der Probe mit monoenergetischen hochbeschleunigtem Ionenstrahl und Messung der Energie der Rückgestreuten Ionen.

43. Nennen Sie Nutzungsbereiche der chemischen Verfahren

- Oberflächenanalyse: AES, XPS, SIMS
- Elementanalyse: AES, XPS, SIMS
- Quantitative chemische Analyse: RBS
- Laterale Auflösung: AES (RBS schlechteste)
- chemische Bindung: XPS

1.6 Mechanische Eigenschaften

44. Nennen Sie 4 Auswirkungen von Spannungen in Dünnschichten.

- Erzeugung von Kristalldefekten
- Einfluss auf Adhäsion
- Beeinflusst Geometrie der Filmoberfläche
- Deformation des Substrats
- In Halbleitern Änderung der Fermienergie
- In Supraleitern Änderung der Übergangstemperatur
- Bei Magneten Änderung der magnetischen Anisotropie

45. Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Kraft und Zug-/Scherspannung .

Zugspannung/Scherspannung

$$\sigma = \tau = \frac{F}{A}$$

46. Wie lautet die Stoney-Formel?

Formel für die Spannung im Film

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_f w} = \frac{1}{6R} \frac{E_s d_s^2}{(1 - \nu_s) d_f}$$

47. Wie beobachtet man die Substratverformung im Prozess?

Durch Interferenz mit einer monochromatischen Quelle. Durch die Interferenzstreifen schließt man auf die Verformung zurück.

48. Wie verhalten sich Metalle und Nichtmetalle bezüglich der Eigenspannung?

Metalle sind bevorzugt unter Zugspannung, wohingegen Nichtmetalle bevorzugt unter Druckspannung sind.

49. Wie hängt die Spannung von der Schichtdicke ab?

Spannungen treten ab Schichtdicken von 10 nm auf und werden bis zu 60 nm größer. Mit weiter wachsender Schicht gibt es keine großen Änderungen der Spannungswerte mehr.

50. Welche Theorien für Eigenspannungen gibt es?

- Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten
- Einschluss von Fremdatomen
- Verschiedene Gitterabstände
- Variation des Atomabstandes mit Kristallgröße
- Rekristallisation
- Leerstellen und Versetzungen
- Phasentransformationen

51. Welche Deformationsmechanismen kennen Sie?

Defektloser Fluss

Bei sehr hohen Spannungen werden Ebenen im Film gegeneinander verschoben

Gleiten von Versetzungen

Plastische Verformungen bei Ausreichender Spannung

Springen von Versetzungen

Versetzungen überspringen Hindernisse. Bei Ausreichend hoher Temperatur

Diffuses Kriechen

Verschieben von Korngrenzen

1.7 Lithographie

52. Was sind die Prozessschritte der Photolithographie

- Reinigen
- Aufbringen von Haftvermittler
- Aufbringen von Photoresist
- Trocknen (Prebake)
- Maske auflegen und Justieren
- Belichten
- Entwickeln
- Ausbacken (Postbake)

53. Wie kann der Wafer nach der Belichtung und Entwicklung des Resist weiterverarbeitet werden?

- Ätzen (Gruben erzeugen)
- Beschichten + Lift-Off (der Beschichtete Resist wird mitentfernt)
- Galvanisches Abformen (am Resist sammelt sich kein Material)

54. Nennen Sie ganzflächige Substratbelichtungsverfahren

Kontaktbelichtung, Proximity Belichtung

55. Geben Sie die Bestandteile einer Projektionsbelichtungsanlage an

- Lampe (Quecksilberdampflampe)
- Farbfilter
- Kondensorlinse
- Maske
- Projektionslinse
- Wafer

56. Geben Sie die Auflösungsgrenze der verschiedenen Belichtungssysteme an

- Kontakt: $2b_{\min} = 3\sqrt{\lambda(s + \frac{1}{2}z)}$
- Proximity: $2b_{\min} = 3\sqrt{\lambda s}$
- Projektion: $b_{\min} = \frac{k\lambda}{NA}$

57. Skizzieren Sie schematisch eine Positiv und Negativresist Strukturierung

Negativ-Resist Aufbringen, Belichten, Entwickeln.

Der Resist polymerisiert beim Belichten.

Zurück bleibt der Belichtete Teil.

Positiv-Resist Aufbringen, Belichten, Entwickeln.

Durch Belichten wird der Inhibitor in Säure umgewandelt

Nach dem Entwickeln bleibt der nichtbelichtete Teil übrig.

58. Skizzieren Sie schematisch eine Umkehrresist Strukturierung

Resist ist derselbe wie beim Positivresist

- Belacken, Trocknen
- Belichten
- Ausbacken
- Flutbelichten
- Entwickeln

Vorteil: Erzeugung einer Kante mit negativen Steigung - ideal für Lift-Off

59. Welchen Nachteil hat ein Negativresist

Das Polymere (der Resist) quillt beim Entwickeln auf.

60. Wie funktioniert Grautonlithographie?

Der Resist hat üblicherweise eine sehr steile Antwortfunktion auf die Belichtung. Dadurch entstehen sehr steile Kanten.

Verwendet man hingegen einen Resist mit linearer Antwortfunktion, so kann man durch abgestufte Intensitäten beim Belichten (Grautöne) schräge Strukturen erzeugen.

61. Wie lautet die allgemeine Linsengleichung?

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_{\text{Obj}}} + \frac{1}{d_{\text{Img}}}$$

62. Wodurch entsteht Beugung?

Wenn Licht in seiner Breite beschnitten wird, treten Beugungseffekte auf. Diese werden beschrieben durch das Heugensche Prinzip – von jedem Punkt der Lichtquelle geht eine Kugelwelle aus. Die Beugungsbilder entstehen dann durch Interferenzen der Teilstrahlen.

63. Wo sind bei Mehrfachspaltblenden in der Abbildung die Hauptmaxima

Die Hauptmaxima treten auf unter den Winkeln

$$\sin \Theta_n = \frac{n\lambda}{d} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

64. Was sagt die Abbesche Beugungstheorie aus?

Das Bild wird durch die Projektionslinse in der Fokusebene Fouriertransformiert. Für eine perfekte Abbildung muss daher jede Ordnung der Fourierzerlegung durch die Linse abgebildet werden. Je mehr Ordnungen man verliert desto geringer wird der Kontrast. Hat man nur noch die ± 1 -te Ordnung so erhält man nur die Periodizität des Bildes.

65. Was wird durch die Numerische Aperatur beschrieben?

Die Numerische Aperatur ist ein Maß für die Anzahl der Beugungsordnungen die eingefangen werden.

$$NA = n \sin(\Theta_{\text{max}})$$

66. Definieren Sie Kohärenzgrad

Der Kohärenzgrad σ ist definiert als das Verhältnis der Numerischen Aperatur (Öffnungswinkel) von Kondensorlinse zu Projektionslinse

$$\sigma = \frac{NA_c}{NA_p}$$

d.h. für volle Kohärenz (Eingangswinkel Null) ist $\sigma = 0$.

67. Skizzieren sie Beugung von kohärenter und Inkohärenter Strahlung. Zeichnen sie die Ordnungen mit ein.

Kohärentes Licht

Ablenkung der Beugungen erster Ordnung symmetrisch zur Abbildungsachse

Inkohärentes Licht

Einfall des Lichtes unter einem Winkel. Bei Einfall der 0-ten Ordnung unter einem Winkel noch Abbildung der 1-ten Ordnung unter einem geringeren Minimalwinkel.

68. Welche Bedingung muss inkohärente Strahlung erfüllen, wie muss der Kohärenzgrad σ aussehen?

Der einfallende Winkel darf nicht größer als der maximale Winkel der Linse sein.

69. Wann wird unter kritischen Bedingungen besser abgebildet ?

Bei vollständig kohärentem Licht bricht die MTF ab einem Winkel kleiner der Beugung der ersten Ordnung komplett ein. Es gibt somit einen minimalen Winkel unter dem kein Bild mehr abgebildet wird.

Bei inkohärentem Licht werden bei gleichem Winkel mehr Beugungsordnungen eingefangen und daher ein besseres Bild abgebildet. somit ist optimiertes inkohärentes Licht besser unter kritischen Bedingungen.

Trägt man die MTF (Anzahl der übertragenen Ordnungen) gegen die Raumfrequenzen (kleiner werdende Spalte) auf so fällt bei $\sigma = 0$ die Kurve steil ab und wird für größere σ immer flacher.

70. Wie lautet die Formel für die Tiefenschärfe?

Bei einem Höhenunterschied von mehr als $\frac{\lambda}{4}$ werden Strahlen ausgelöscht, so dass die Intensität abnimmt. Daraus folgt:

$$\text{DOF - Tiefenschärfe} = \frac{\lambda}{2(NA)^2}$$

Die Numerische Aperatur geht hier quadratisch ein.

71. Wie entsteht Synchrotronstrahlung und weshalb wird diese als Lichtquelle beim LIGA

Verfahren eingesetzt?

Synchrotronstrahlung entsteht in einem Elektronenbeschleuniger (z.B. Bessy) durch radiale Beschleunigung.

Es wird eingesetzt weil die entstehende Röntgenstrahlung sehr hohe Leistungsdichten und geringe Divergenzen aufweist.

72. Welche nichtoptischen Lithographieverfahren kennen Sie?

- Röntgenlithographie (LIGA)
- Elektronenstrahlolithographie (Maskenerstellung)
- Ionenstrahlolithographie

2 Mikrotechnologie

2.1 Einführung

73. Welche Wafertechnologien gibt es ?

Volumen- und Oberflächentechnologie

74. In welcher Größenordnung liegt der Abstand zweier benachbarter Atome im Kristallgitter?

1 nm ??

2.2 Vakuum

75. Welche Vakuum-Meßmethoden kennen Sie?

- Feinvakuum
 - Wärmeleitungsmanometer
 - Pirani Röhre
- Hochvakuum
 - Penning-Röhre (Kaltkathode)
- Ultra-Hochvakuum
 - Byard-Alpert-Röhre (Glühkathode)

76. Vergleichen Sie die Aufgabe einer Vorvakuumpumpe mit der einer Hochvakuumpumpe

Vorvakuumpumpen arbeiten im viskosen Druckbereich, wohingegen Hochvakuumumpumpen im molekularen Druckbereich arbeiten. Die Vorvakuumpumpen dienen daher dazu den Druck auf den Arbeitsbereich der Hochvakuumumpumpen zu reduzieren.

77. Skizzieren Sie eine Drehschieberpumpe

Rad mit federbelastetem beweglichem Schieber das Luft ansaugt, verdichtet und ausstößt.

78. Welche Vorvakuumpumpen gibt es?

- Drehschieber
- Wälzkolben
- Membran

79. Welche Hochvakuumumpumpen gibt es?

- Diffusion
- Turbomolekular
- Turbomolekular-Druck
- Kryo

80. Welche Zusatzvakuumpumpen gibt es?

- Titansublimationsgetterpumpe
- Ionengetterpumpe
- Meißnerfalle

81. Welche Ausgasursachen kennen Sie?

- Rückströmung
- Leckage
- Verdampfen
- Permeation (Gas geht durch die Wand)
- Diffusion (Ausgasen aus einem Festkörper)
- Desorption (Freisetzen von Gasen von der Oberfläche)

2.3 PVD

82. Was sind die wichtigsten PVD Verfahren?

- Aufdampfen
- Epitaxie
- Sputtern (Kathodenzerstäuben)
- Ionenstrahlzerstäuben

83. Woraus besteht eine Aufdampfanlage?

- Vakuunkammer
- Vakuumpumpe
- Substrathalter
- Substratheizung
- Shutter
- Tiegel

84. Skizzieren Sie eine Aufdampfanlage

Elektronenstrahl wird durch Magnetfeld auf Tiegel gelenkt. Der freigesetzte Beschichtungsmaterial diffundiert Richtung Substrat. Dieses wird z.T. extra geheizt.

85. Was sind die Vor- und Nachteile eine Verdampfungsanlage?

Vorteile:

- Hohe Abscheideraten (μ/min)
- alle Stoffe beschichtbar
- geringe thermische Belastung des Substrats

Nachteile:

- geringe Haftung
- Legierungen schwer herstellbar

86. Was versteht man unter Epitaxie

Eine orientierte Kristallabscheidung.

In einem Ultrahochvakuum ($10^{-8} - 10^{-10}$ Pa) beschichtet ein Molekularstrahl aus erhitzten Effusionszellen das Substrat. Die Aufdampftrate beträgt dabei $1\mu\text{m/h}$.

87. Wie funktioniert eine Glimmentladung?

- Beschleunigung eines Gasions
- Herausschlagen von Elektronen und Beschleunigung
- Erneute Ionisation von Gasatomen

88. Wie funktioniert eine Kathodenzerstäubung?

- Ionisation von Gasatomen im Plasma
- Ionenaufschlag auf Target
- Herausschlagen von Targetatomen
- Die Teilchen schlagen auf dem Substrat als Film nieder

Durch hohe Teilchenenergie gute Haftung

89. Skizzieren Sie eine DC-Sputteranlage

Kathoden, Anoden Anordnung mit Gleichspannung..

90. Welche Werkstoffe kann man mit einer DC-Sputteranlage abscheiden?

Man kann nur leitende Werkstoffe abscheiden.

Bei Nichtleitern würden die Positiven Ionen sich an der Kathode ansammeln, da sie nicht neutralisiert werden können. Damit würde der Prozess zum Stillstand kommen.

91. Wie funktioniert eine RF-Sputteranlage?

Im Gegensatz zur DC Anlage hat die RF Anlage eine Unsymmetrische Elektronenanordnung. (Ungleich große Kondensatorplatten).

Die Kathode nimmt durch die kleinere Größe und einen zusätzlich eingebrachten Kondensator in die Spannungsversorgung ein negatives Potential an. Dadurch hohen Ionisation der Kathode.

Durch die Wechselspannung und die hohe Beweglichkeit der Elektronen keine Aufladung der Kathode. Damit sind auch Nichtleitende Materialien möglich.

92. Wie Sputtert man Legierungen?

- Sintertarget: Target mit Materialzusammensetzung
- Co-Sputtern: gleichzeitiges Sputtern zweier Target (rotierender Substratteller)
- Mosaiktarget: Aufkleben kleiner Scheiben auf ein Target

93. Vor- und Nachteile von Ionenstrahlzerstäubung

Vorteile

- Hohe Haftfestigkeit (Lose Teilchen werden sofort wieder entfernt)
- Niedrige Substrattemperaturen
- Erzeugung amorpher Schichten möglich

Nachteile:

- hoher Aufwand
- geringe Beschichtungsrate

2.4 CVD

94. Welche drei Voraussetzungen sind nötig, damit ein CVD Prozess ablaufen kann?

- chemischer Prozess muss existieren
- alle Ausgangsprodukte müssen gasförmig sein
- alle nicht niedergeschlagenen Reaktionsprodukte müssen gasförmig sein.
- der Filmwerkstoff muss nicht-flüchtig sein.

95. Nennen sie mindestens drei Reaktionsarten und jeweils eine Reaktionsgleichung

Reaktionsprozesse:

- Pyrolyse $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$
- Reduktion $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$
- Oxidation $\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- Karbid Verbindung $\text{SiCl}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{SiC} + 4\text{HCl}$

96. Welche Parameter beeinflussen eine kristalline Struktur wesentlich?

- Substrattemperatur
- Wachstumsrate
- Prozessdruck
- Verunreinigungen
- Dotierstoffe
- Thermische Nachbehandlung

97. Wie wird bei thermischen CVD Verfahren die Energie zugeführt?

- Direktheizung
- Strahlungsheizung
- Hochfrequenzinduktion

98. Nennen sie die Transport und Reaktionsprozesse

- Transport der reaktiven Komponenten in Niederschlagsbereich
- Reaktion in der Gasphase. Bildung von Schicht und Nebenprodukten
- Transport zur Oberfläche
- Adsorption der Schichtprodukte an der Oberfläche
- Oberflächendiffusion zur Wachstumszone
- Einbau ins Kristallgitter
- Desorption von Reaktionsprodukten
- Abtransport der Nebenprodukte

99. Wie unterteilt man die CVD Verfahren?

Nach ihrem Arbeitsdruck in AP-CVD (Atmosphärendruck 10^5 Pa) und LP-CVD (Low Pressure, 10^2 Pa).

100. Wie funktioniert ein AP-CVD Reaktor

Die Abscheiderate und Gleichförmigkeit der Beschichtung sind hauptsächlich von den Strömungsverhältnissen abhängig. Durch die Verarmung des Gasgemisches ergibt sich dadurch eine ungleichmäßige Abscheiderate

101. Skizzieren Sie eine LPCVD-Anlage

In einer LP-CVD Anlage sind die zu beschichtenden Plattensenkrecht zur Gasrichtung eingebaut und von Heizungselementen umgeben.

102. Was sind die Eigenschaften eine LPCVD Prozesses

Durch den niedrigen Druck einen hohen Diffusionskoeffizienten. Dadurch keinen Konzentrationsgradienten und einen gute Filmdickengleichheit. Die Wachstumsrate ist dabei durch die Oberflächenprozesse begrenzt

Vorteile:

- bessere Gleichförmigkeit der Schichtdicke
- bessere Kantenbedeckung

Nachteile:

- geringe Abscheideraten

103. Was ist das Prinzip von Plasma induzierter CVD (PECVD)

Das Plasma liefert die Energie für den chemischen Prozess. Das Gas wird durch die Elektronen zu reaktiven Ionen.

Vorteil: geringe mechanische Spannung in Dünnschichten

104. Welche chemisch-physikalischen Beschichtungsverfahren kennen Sie?

- Reaktives Sputtern
- Reaktives Aufdampfen (ARE)

105. Was ist das Prinzip vom Reaktivem Sputtern

Das Produkt entsteht erst durch Reaktion der Targetatome mit einem reaktivem Gas. Die Reaktion kann dabei an der Kathode, im Plasma oder auf dem Substrat stattfinden.

106. Was ist das Prinzip vom Reaktivem Aufdampfen

Ein Metall wird in Anwesenheit eines reaktiven Gases verdampft. Der Vorteil ist hier, dass das Gas nicht thermisch zerlegt werden kann.

107. Was ist das Prinzip vom Aktiviertem Reaktivem Aufdampfen

Zusätzlich zum Reaktivem Aufdampfen ist hier ein Plasma eingebracht. Das verdampfte Metall reagiert hier mit im Plasma aktivierten Gas.

Vor das Substrat ist hier eine positive Elektrode gesetzt, die die Elektronen abfängt.

2.5 Galvanisches Abscheiden

108. Benennen Sie das 1. Faradaysche Gesetz und geben Sie dessen Bestimmungsgleichung an.

Fehlt auf den Folien

109. Benennen Sie das 2. Faradaysche Gesetz und geben Sie dessen Bestimmungsgleichung an.

Die abgeschiedenen Stoffmengen stehen im Verhältnis zu ihren Wertigkeiten:

$$\frac{n_A}{n_B} = \frac{Z_B}{Z_A}$$

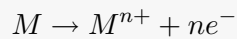
bzw als Gleichung für die Masse

$$m(t) = \frac{MIt}{ZF}$$

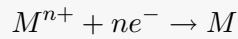
110. Welcher Vorgang läuft an der Anode und der Kathode ab. Wie ist das Substrat

geschaltet?

Anodenreaktion (+)



Kathodenreaktion



Das Substrat ist als Kathode geschaltet.

111. Welche Bedingungen müssen zum Abscheiden von Legierungen erfüllt sein?

- mindestens eins der Metalle muss galvanisch abscheidbar sein
- Die Potentiale müssen nahe beieinander liegen.

112. Welche Parameter beeinflussen den Prozess?

- Stromdichte
- Temperatur
- pH-Wert
- Zusammensetzung

113. Welche Nachteile haben galvanische Prozesse?

- Korrosionsbeständigkeit
- Schichtdickenungleichmäßigkeit (Spitzeneffekt an Kanten)

2.6 Ätzverfahren

114. Definition von Ätzen?

Lösungsvorgang, bei dem durch Ätzmittel Teile der Oberfläche entfernt werden.

115. Mikrotechnologische Anwendung von Ätzen?

- Strukturieren
- Reinigen
- Sichtbarmachen von Oberflächenbesonderheiten

116. Welche Nasschemische Ätzverfahren gibt es ?

- Tauchätzen
- Sprühätzen
- Elektrochemisches Ätzen

117. Was versteht man unter Selektivem Ätzen und wodurch wird dieses erzeugt?

Verschiedene Materialien werden verschieden stark vom Ätzmittel angegriffen. Dadurch selektives Ätzen von Materialien.

Wird erzeugt durch Oberflächenumwandlung von Silizium in SiO_2 oder Si_3N_4 . Das thermische Oxid wird von Flusssäure 60-mal schneller geätzt als Siliziumnitrid. Umgekehrt lässt sich Nitrid selektiv gegenüber dem Oxid trockenätzen.

118. Was versteht man unter Ätzstopp und wodurch wird dieser erzeugt?

Eine vom Ätzmittel nicht angegriffene Schicht begrenzt den Ätzbereich auf dem Wafer.
Erzeugt durch Dotierung mit Bor.

119. Skizzieren Sie die Kristallstruktur von Silizium. Zeichnen Sie die beim anisotropen Ätzen genutzten ätzbegrenzenden Ebenen ein.

Silizium hat eine FCC-Struktur.

Die (111) Ebene ist ätzbegrenzend, da jedes Atom Bindungen zu drei Nachbaratomen hat.

Das Ätzverhältnis der Ebenen (100):(111) beträgt 400:1.

120. Welche Trockenätzverfahren gibt es ?

- physikalische
- physikalisch chemische
- chemische

das sind im Detail:

physikalische

- Sputterätzen (Inverses Sputterätzen)
- Ionenstrahlätzen (IBE)
- Focussed Ion Beam (FIB)

physikalisch chemische

- Reaktive IBE
- Chemical Assited IBE
- Reaktives Ionen Ätzen (RIE)

chemische

- Plasma Ätzen - Barrel Etching

121. Skizzieren Sie den Aufbau einer Kaufmannquelle. In welchen Ätzanlagen kommt diese

zum Einsatz?

Die Kaufmannquelle kommt in physikalischen und physikalisch chemischen Trockenätzanlagen zum Einsatz (IBE, RIBE, CAIBE)

Eine Glühkathode liefert dabei Elektronen die von einem Magnetfeld spiralförmig auf die Anode beschleunigt werden. Durch Stöße mit dem Argon Gas werden dabei Ionen erzeugt. Diese werden durch das Beschleunigungsgitter beschleunigt, welches gleichzeitig Elektronen zurückhält. Durch einen Glühfaden werden die Ionen wieder neutralisiert.

2.7 Dotierung

122. Was versteht man unter Dotierung und welche Arten von Dotierstoffen werden genutzt?

Unter Dotierung versteht man den Einbau von Fremdatomen.
Bei Silizium verwendet man 3 und 5-wertige Atome.

3-wertig/p-dotiert: Ga, Al, In, B

5-wertig/n-dotiert: P, As, Sb

Typische Konzentration: 10^{17} Atome/cm³

123. Wofür nutzt man Dotierung in der Mikrotechnologie?

- Ätzstopps (Tiefenbegrenzung, Membran, Balken)
- Piezoresistive Widerstände

124. Nennen Sie verschiedene Dotierarten

- Diffusion (Durchströmverfahren, Dotierlack)
- Implantation
- Epitaxie

125. Skizzieren Sie eine Ionenimplantationsanlage.

In einem Massenspektrometer werden die Ionen selektiert. Dann mit einer Blende fokussiert und danach beschleunigt. Mit einer Ablenkeinrichtung werden die Ionen auf den Wafer gerichtet.

126. Welcher Schritt ist notwendig um bei einer Ionenimplantationsanlage den Prozess abzuschließen?

Der Kristall wurde durch die Ionen geschädigt und muss ausgeheilt werden. D.h Tempern oder Lasererhitzung

2.8 LIGA

127. Was versteht man unter LIGA-Technik

Herstellung von Teilen mit großen Aspektverhältnissen (Höhe zu Breite).
Die Abkürzung LIGA steht für: LItographie (mit Synchrotronstrahlung), Galvanoabformung und Abformung

128. Beschreiben Sie den LIGA Prozess

Primärstruktur: Maskenerstellung, Lithographie + Entwicklung, Galvanoabformen mit Metall.

Sekundärstruktur: Spritzguss mit Kunststoff

Tertiärstruktur: Keramikschlickerguss + Ausbrennen

129. Nennen Sie die Vor- und Nachteile der LIGA-Technik

Vorteile: Struktur mit sehr hohen Aspektverhältnissen

Nachteile: benötigt Synchrotronquelle, hat sehr lange Bestrahlzeiten (8h) und ist nur an bestimmten Standorten verfügbar.

2.9 CMP

130. Was versteht man unter CMP?

CMP ist ein Prozeß zum Planarisieren und Glätten von Oberflächen.

131. Skizzieren Sie eine CMP-Anlage

Wafer rotiert in einer Halterung (Polierkopf) auf einem großen rotierenden Polierteller mit dem Poliertuch

132. Was versteht man unter Metall-CMP?

Den Abtrag von Metall auf einer Polymeroberfläche.

Chemischer Angriff: Oxidation des Metalls

Mechanischer Angriff: Abrasivpartikel entfernen Metalloxide

133. Was versteht man unter Oxid-CMP?

Den Abtrag von Oxid auf einer Metalloberfläche.

Chemischer Angriff: Hydratisierung. Bildung von SiOH.

Mechanischer Angriff: Abrasivpartikel (Oxide) entfernen SiOH Verbindungen

2.10 Nicht-Dünnschichttechnische Verfahren

134. Nennen Sie Verfahren die nicht auf Dünnschichttechnik beruhen

- Lasermikromaterialbearbeitung
 - Laser CVD
 - Laser Materialabtrag
 - Laser Dotierung
 - Laser Rekristallisation
- Präzisionsschleifen und Fräsen
- Mikrospritzgießen
- Heißprägen
- Mikroerosion

2.11 Reinraum

135. Welche beiden Hauptanforderungen muss ein Reinraum erfüllen

- Schutz des Personals
- Schutz des Produktes

136. Vergleichen Sie die Reinraumklassen nach ISO14644-1 mit FS 209-D

137. Nennen Sie die empfohlenen Betriebsbedingungen eines Reinraumes

- Partikelkontamination
- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Geräuschpegel
- Druck
- Vibration
- Außenluft

2.12 Reinigung

138. Welche Reinigungsverfahren kennen Sie?

- wässrig (Neutralreiniger: Builder + Tenside, Saure Reiniger)
- chemisch
- organisch (Kohlenwasserstoff, Dampffettung)
- mechanisch (Tauch, Spritz, Bürstenreinigung, Ultraschall)
- trocken (Plasma, Abblasen, Trockeneis)

3 Mikrosystemtechnik

3.1 Technologischer Aufbau

139. Definieren Sie PVD und CVD Verfahren

140. Welche Substratwerkstoffe werden verwendet?

- Silizium
- Keramik
- Glas
- Kunststoff

141. Beschreiben Sie Volumen und Oberflächentechnologie

Oberfläche Schichtweiser Aufbau der Bauteile auf der Oberfläche

Volumen Wäferätztechnik, insbesondere durch Anisotropes Ätzen von Silizium.

142. Wann wird Opferschichttechnologie eingesetzt und was sind die Prozessschritte

Eingesetzt zur Erzeugung von 3D Strukturen.

Hergestellt durch Aufbringen einer Opferschicht auf das Substrat, Strukturierung der Opferschicht, Aufbringen der Funktionsschicht, Strukturierung der Funktionsschicht und Entfernen der Opferschicht.

Dadurch Herstellung von freistehenden Strukturen

Opferschicht: SiO_2 oder Phosphorsilicatglas (PSG)

143. Was ist der Unterschied zwischen Modulation und Simulation

Die Modulation stellt des Sachverhalt dar. Z.B als graphisches Modell, Körper Modell oder Rechenmodell.

Die Simulation berechnet das zugrundegelegte Modell.

144. Was sind die wesentlichen Module in einem TCAD Paket

- Prozesssimulation
- Maskenentwurf
- Bauteilesimulation

es stellt somit eine integrierte Entwurfs und Simulationsumgebung zur Verfügung.

3.2 Sensorik

145. Wie teilt man die Sensoren/Aktoren in Gruppen ein?

direkte z.B. Piezo -> Elektrisch

indirekte z.B. Beschleunigung -> Auslenkung -> Elektrisch

146. Welche physikalischen Effekte können für Sensoren genutzt werden?

- mechanische
- thermische
- chemische
- elektrische
- magnetische
- elektromagnetische

147. Nennen Sie mechanisch Sensoreffekte

Mechanisch induzierte Effekte:

- thermisch
 - Reibungseffekte
- elektrisch
 - Piezoelektrisch
 - Piezoresistiv
 - kapazitiv
 - induktiv
- magnetisch
 - magneto-elastisch (Villari-Effekt)
- Strahlung
 - Stressinduzierte Doppelbrechung
 - Interferometer
 - Sagnacffekt
 - Dopplereffekt

148. Nennen Sie thermische Sensoreffekte

Thermisch induzierte Effekte

- mechanisch
 - Thermische Ausdehnung
- elektrisch
 - Seebeck (thermoelektrisch)
 - Thermowiderstand (Joulscher Widerstand)
 - Pyroelektrisch (Änderung von Polarisation und Spannung)
 - Thermisches Rauschen
- Strahlung
 - Thermooptisch ?
 - Strahlungsemission
- chemisch
 - Reaktionsaktivierung

149. Nennen Sie elektrische Sensoreffekte

Elektrisch induzierte Effekte

- mechanisch
 - Piezoelektrisch
 - Amperesche Gesetz
- thermisch
 - Joulsche (resistive) Heizung
 - Peltier Effekt
- elektrisch
 - Longmuir Sonde (Messung der Elektronenenergie im Plasma)
- magnetisch
 - Biot-Savart Gesetz
- elektromagnetisch
 - Kerr-Effekt
 - Pockels-Effekt
 - Elektroluminiszenz
- chemisch
 - Elektrolyse
 - Elektromigration

150. Nennen Sie magnetische Sensoreffekte

Magnetisch induzierte Effekte

- mechanisch
 - Magnetostriktion
- thermisch
 - thermomagnetisch
 - galvanomagnetisch (Ettingshausen Effekt)
- elektrisch
 - Ettingshausen-Nernst Effekt
 - Hall-Effekt
 - Magnetoresistiv
- magnetisch
 - Farraday Effekt
 - Cotton-Mouton Effekt

151. Nennen Sie elektromagnetische Sensoreffekte

Elektromagnetisch induzierte Effekte

- mechanisch
 - Strahlungsdruck
- thermisch
 - Bolometer
 - Thermopile / Thermosäule
- elektrisch
 - Photoelektrisch (Photovoltaik)
- magnetisch
 - Photobeugung
 - optische Bistabilität
- chemisch
 - Photosynthese
 - Dissoziation

152. Nennen Sie chemisch Sensoreffekte

Chemisch induzierte Effekte

- mechanisch
 - Hygrometer (Feuchtigkeitsmesser)
 - Galvanische Abscheidung
- thermisch
 - Kalorimeter (misst Energie von Teilchen)
 - Wärmeleitfähigkeit
- elektrisch
 - Potentiometrie (Bestimmung elektrischer Potentiale)
 - Leitfähigkeit
 - Amperometrie
 - Flammenionisation
 - Voltaeffekt (Elektronenlöcher in Halbleiter)
- magnetisch
 - Kernresonanz
- elektromagnetisch
 - Spektroskopie

153. Welche Sensoreffekte werden in Silizium genutzt?

Strahlung

- Fotoresistiv (Fotowiderstand)
- Fotogrenzflächen (Fotodiode)
- Ionisation (Kernstrahlung)
- Fotokapazitiv

Mechanisch

- Piezoresistiv (Kraft- und Drucksensor)

Thermisch

- Thermoresistiv (Temperatursensor über Widerstand)
- Thermogrenzflächen (Temperatursensor über Diode/Transistor)
- Thermoelektrisch/Seebeck (Thermosäule)
- Pyroelektrisch

Magnetisch

- Magnetoresistiv (AMR, GMR)
- Halleffekt
- Magnetogrenzflächen

154. Zeichnen Sie Energiebänder für Nichtleiter, Leiter und Halbleiter bei Raumtemperatur

Nichtleiter: große Bandlücke. keine Elektronen im Leitungsband

Halbleiter: Bandlücke von ca. 1eV. Bei Raumtemperatur thermisch angeregte Leitung.

Leiter: Leitend, da Valenzband nicht gefüllt oder Valenz und Leitungsband überlappen.

155. Was ist extrinsische Leitung beim Halbleiter

Störstellenleitung durch Gitterfehlstellen oder durch kontrollierten Einbau von Fremdatomen

156. Nennen Sie die Gleichung für die Auslenkung eines beidseitig eingespannten Balkens

Einseitig eingespannt:

$$y(x) = \frac{Fx}{6EI}(3xL - x^2)$$

Beidseitig eingespannt:

$$y(x) = \frac{Fx}{48EI}(3xL - 4x^2)$$

157. Nennen Sie die Gleichung für den Torsionswinkel eines runden Balkens(\ddot{U})

$$\Theta = \frac{ML}{KG}$$

mit M : Moment, L : Länge, G : Schermodul, K : Konstante für Querschnitt

158. Wie funktioniert ein Phototransistor

Der Basisstrom wird durch den von Photonen resultierenden Ladungsträgern erzeugt. Dadurch wird der Strom am Kollektor gesteuert.

159. Beschreiben Sie den thermoelektrischen Effekt

Auch Seebeck Effekt genannt. Entstehung einer thermoelektrischen Spannung zwischen zwei Leitern mit unterschiedlicher Austrittsarbeit aufgrund einer Temperaturdifferenz. (Unterschiedliche Besetzungen)

160. Zeichnen und Beschreiben sie eine magnetische Hysteresekurve

Koerzitivkraft: (Nötige Magnetfeld um Magnetisierung auf Null zu bringen)
Remanenz: Magnetisierung ohne Magnetfeld

161. Beschreiben Sie den AMR Effekt

Interferenz zwischen Leitungselektronen und Valenzelektronen in Abhängigkeit von der Magnetisierungsrichtung. Dadurch bei gleicher Richtung maximaler Widerstand und bei senkrechter Magnetisierung minimaler Widerstand.

162. Wie ist ein GMR Sensor aufgebaut

Streuung eines Elektrons bei Transport von einem ferromagnetischen Material durch einen nichtmagneten in ein anderes ferromagnetisches Material. Geringster Widerstand bei paralleler Magnetisierung, maximal bei antiparalleler Magnetisierung.

Besteht aus einem Antiferromagneten und einem Hartmagneten (pinned Layer). Darauf eine Schicht Kupfer (nichtmagnetisch) gefolgt von einem Weichmagneten. (free Layer)

3.3 Aktoren

163. Nennen sie Aktor Wirkprinzipien

- Elektrische Effekte
 - elektrostatisch
 - ferroelektrisch (elektrische Polarisierung ohne angelegtes Feld)
 - reziproker piezoelektrischer Effekt
- Thermische Effekte
 - bimorph
 - Widerstandsheizung
 - Formgedächtniseffekt
- Magnetische Effekte
 - Magnetische Anziehung
 - Magnetischer Antrieb
 - Magnetostraktion (Volumenänderung bei Magnetfeld)

164. Beispiele für Mikroaktoren

- aktiver Biegebalken
- 3D Aktor - Piezoelektrisch
- Mikromotor
- Ratschenbetrieb
- Magnetischer Reluktanzmotor
- Schwenkplattform
- Linearaktor
- Hybridmotor (Magnetisch)

165. Möglichkeiten der mikrotechnologischen Energiegewinnung

- Piezoelektrisch
- Kapazitiv (Energiespeicherung)
- Mikrobatterien
- Brennstoffzellen
- Mikroturbinen
- Mikrowankelmotor

166. Gleichung für die Kraft eines elektrostatischen Aktors

$$F = \varepsilon \frac{A}{2d^2} U^2 = \varepsilon \frac{A}{2} E^2$$

167. Gleichung für die Kraft eines reziproken piezoelektrischen Aktors

$$F = \varepsilon \frac{A}{d_{ij}x} \Delta U$$

168. Gleichung für elektromagnetischen Aktors

$$F = \frac{\partial W}{\partial \varrho} = \frac{n^2 I^2}{\mu_0 (R_{\text{Kern}} + 2R_{\text{Spalt}})}$$

mit magnetischem Widerstand R , Luftspatlänge ϱ .

169. Was ist die Aufgabe der Tribologie

Die Untersuchung von atomaren Wechselwirkungen zwischen zwei Oberflächen bezüglich

- Adhäsion
- Reibung
- Verschleiß
- Filmschmierung

3.4 Mikrofluidik

170. Nennen Sie verschiedene Strömungssensoren

- | | |
|---------------------------|--|
| • Thermischer Flusssensor | Flussmessung durch Wärmetransport |
| • Scherspannungssensor | Misst Reibung an Flussgrenzfläche |
| • Widerstandssensor | Strömungsmessung über Verbiegung einer Feder |
| • Viskositätssensor | Druckabfall in einem Kanal |
| • Widerstandssensor | Elastische Verformung einer Membran |
| • Auftriebssensor | Kippe misst Strömung |
| • Prandtl Mikrosensor | Messung von Staudruck und statischem Druck |

3.5 Automobilanwendungen

171. Nennen Sie Sensoren im Auto

- Drehzahl
- Drehraten
- Beschleunigung
- Temperatur
- Kompass (Fluxgate)

3.6 Industrieranwendungen

172. Nennen Sie Sensoren in der Industrie

- AMR: Bewegungsmessung
- GMR: Absolute Position
- GMR: Winkelmessung
- GMR: Strommessung
- Strahlungsthermosäule (Temperaturdifferenz)
- Bolometer

3.7 Datentechnik

173. Nennen Sie Nutzungsbereiche in der Datentechnik

- Projektoren: DMD (digital micromirror device)
- Festplatten
- Tintendruckknöpfe

3.8 Kommunikation

174. Nennen Sie Nutzungsbereiche in der Kommunikation

- DWDM: Dense wavelength division multiplexing
- Multiplexer
- Optical Cross Connect (OXC)

3.9 Luft und Raumfahrt

175. Nennen Sie Nutzungsbereiche in der Luftfahrt

- Druck auf Flügel
- Messungen in der Turbine (Druck, Temperatur, Spannung, Vibration)

176. Nennen Sie Nutzungsbereiche in der Raumfahrt

- Mikrosatelliten
- Mikrothruster

3.10 Biomedizintechnik

177. Nennen Sie Nutzungsbereiche in der Biomedizintechnik

- Elektrische Nase (Leitfähigkeit, Piezoelektrisch, Akustische Wellen, Mosfet, Spektrometer)
- DNA-Analyse (Mikroarrays)
- Augensensor (Photosensor)