

Lösungen zu Aufgaben Kapitel 1

1.3.1 Worin unterscheidet sich ein Mikrosystem von einem mikroelektronischen Bauelement?

Mikroelektronisches Bauelement: rein elektronische Funktion, Strukturen quasi zwei-dimensional, hohe Integrationsdichte, Miniaturisierung zur Verbesserung der Funktionalität (Zeitverhalten, Leistungsaufnahme, Betriebsspannung) und zur Kostenreduktion (sehr viele äquivalente Funktionen auf kleinster Fläche)

Mikrosystem: nichtelektronische und elektronische Funktionalität, Integrationsdichte meist sehr gering, Miniaturisierung nicht so ausgeprägt ($> 1 \mu\text{m}$). Häufig dreidimensionale Strukturen.

1.3.2 Was sind die wichtigsten Gemeinsamkeiten von Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik?

Fertigungsverfahren überwiegend identisch. In den meisten Bauelemente wird Silizium als Funktionswerkstoff verwendet.

1.3.3 Welche Funktionen müssen bei einer eng gefassten Begriffsdefinition in einem Mikrosystem vorhanden sein?

Sensorische, aktorische und elektronische Funktionen

1.3.4 In welchen Bereichen sind zukünftig die größten Umsätze für Mikrosysteme zu erwarten?

Informationstechnik, Medizin.

1.3.5 Welche besondere Form von Beschleunigungssensoren kann in einem Seitenairbag-System eingesetzt werden?

Aufgrund der erforderlichen schnelleren Ansprechzeit können Drucksensoren verwendet werden, die die beim Seitenaufprall auftretende Schallwelle aufnehmen.

1.3.6

Welche spezifischen Probleme erschweren KMU den Einstieg in die Mikrosystemtechnik? Wo und wie werden diese Einstiegshürden herabgesetzt?

Fehlende FuE-Kapazität zur Lösung komplexer, interdisziplinärer Entwicklungsaufgaben, Fertigung zu kostspielig. Massnahmen: FuE-Programme für KMU, Foundry-Service. Applikationsanpassung von Standardbauelementen mittels Aufbau- und Verbindungstechnik

Lösungen Kapitel 2

2.5.1 In welcher Kristallform kristallisiert Si? Wie viele Atome bilden bei c-Si üblicherweise die Struktureinheit?

Kfz, 2 Si-Atome

2.5.2 Wie groß ist bei Si der Abstand zweier Si-Atome bezogen auf die Gitterkonstante a ?

$\frac{1}{4} a$

2.5.3 Gesucht werden in einem kubischen Kristallsystem zwei Ebenen aus der Klasse der $\{111\}$ - und der $\{110\}$ -Ebenen, die senkrecht aufeinander stehen.

z.B. (111) und (011) (Unterstrich steht für „quer“, also -1)

2.5.4 Welche Kristallebene besitzt in c-Si die höchste Flächenbesetzungsdichte, wie wirkt sich das aus?

$\{111\}$ -Ebenen, ätzbegrenzend

2.5.5 Welche besonderen mechanischen Eigenschaften von c-Si sind für mechanische Anwendungen zu beachten?

Keine plastische Verformung möglich, bricht spröde, hoher Elastizitätsmodul, kein Ermüdungsverhalten (falls keine Materialfehler vorhanden).

2.5.6 Was versteht man unter "batch orientierter Fertigung"?

Während des Fertigungsablaufs werden mehrere Wafer gemeinsam und oft gleichzeitig prozessiert.

2.5.7 Welche 3 Hauptschritte werden bei der Herstellung von mikrotechnischen Bauelementen ständig verwendet?

Beschichtung (Dünnschicht), Lithographie, Ätzung

2.5.8 Was versteht man unter CVD bzw. PECVD?

CVD: chemical vapor deposition, Gaszersetzung mit chemischen Prozessen.

PECVD: plasma enhanced CVD, die Zersetzungswahrscheinlichkeit von Gasmolekülen wird durch ein Plasma erhöht.

2.5.9 Was sind typische Sputterschichten?

Si_3N_4 , SiO_2 , W, Ni, Au und speziell für die Mikrosystemtechnik Dünnschicht-PZT, Ni-Ti, ZnO_2

2.5.10 Welche Merkmale bestimmen die Qualität eines Lithographieprozesses?

Auflösung, Tiefenschärfe, Ausbeute, Durchsatz

2.5.11

Welches Lithographieverfahren ist in Bezug auf Auflösung, Tiefenschärfe und Ausbeute zu bevorzugen?

Projektionslithographie oder Röntgenstrahlolithographie mit ausreichend großen Abstand zwischen Maske und Wafer.

2.5.12 Warum verwendet man in der Mikroelektronik-Fertigung heute überwiegend Trockenätzverfahren?

Unterätzung beim Nassätzen limitiert die kleinste Struktur, die sicher übertragen werden kann. Zusätzlich kommt es häufig auf wohldefinierte (senkrechte) Strukturkanten an.

2.5.13 Bei einer i-line-Lithographieeinheit sind $NA=0,43$ und $k=0,7$ angegeben. Wie groß ist die minimale Strukturgröße und maximale Tiefenschärfe?

Minimale Strukturgröße $0,594 \mu m$, Tiefenschärfe: $0,592 \mu m$

2.5.14 Welche Ebenen wirken ätzbegrenzend beim anisotropen Ätzen von c-Si?

{111}

2.5.15 Gesucht ist die maximale Tiefe eines in (100)-Si geätzten $50 \mu m$ breiten Steges, dessen Kanten exakt in $\langle 110 \rangle$ -Richtung ausgerichtet sind.

$35,36 \mu m$

2.5.16 Gesucht ist die Breite **und Länge** eines Si-Grabens, die sich durch Ätzung mit einer Maskierungsstruktur von $50 \mu m$ Breite **und $100 \mu m$ Länge** sowie einer Fehljustierung der Maskierungskanten zur $[110]$ -Richtung von 2° in (100)-Si ergibt.

Nach Ätzen: Breite = $53,46 \mu m$, Länge = $101,68 \mu m$

2.5.17

Welche Funktion hat die Opferschicht bei der Oberflächenmikromechanik?

Herstellung freitragender Strukturen: Die Opferschicht wird unter der Funktionsschicht definiert. Durch (isotrope) Ätzung der Opferschicht selektiv zur Funktionsschicht wird letztere partiell vom Substrat getrennt.

2.5.18

Was sind die wesentlichen Unterschiede zwischen Volumen- und Oberflächenmikromechanik?

Volumenmikromechanik: Anisotropes Ätzen geht auch nasschemisch, Bearbeitung meist von zwei Seiten, dadurch können freibewegliche Elemente mit Waferdicke erzeugt werden. Relativ großer Platzbedarf, Funktionsmaterial: meist kristallines Silizium. Oberflächenmikromechanik: Funktionsschicht poly-Si oder Si_3N_4 (Dünnschichten). Prozessschritte meist vollständig in einen CMOS-Prozess integrierbar. Bearbei-

tung nur von der Oberfläche, relativ dünne Schichten an der Oberfläche. Mikroelektronik einfach monolithisch integrierbar. Höhere Packungsdichte möglich.

2.5.19

Welche Rolle spielt die Abformung bei der LIGA-Technik?

Tritt bei mehreren Schritten auf:

- *Galvanische Abformung der durch Röntgenstrahlung erzeugten Lackstruktur*
- *Abformung mit Kunststoff-Abformtechnik des Metallmasters*
- *Galvanische Abformung der „Kunststofftochter“ (1.Abformung vom Master) (2.Metallabform)*
- *Kunststoffabformung der 2. Metallabform.*

2.5.20

Was versteht man unter HARMS?

High Aspect Ratio Micro Systems: Mikrosysteme mit hohen Aspektverhältnissen (Tiefe zu Breite), erfordern nahezu senkrechte Strukturanten.

2.5.21

Welcher Ätzprozess zeigt im Hinblick auf Selektivität und Anisotropie gute Werte?

RIE, DRIE

2.5.22

Wie lassen sich freitragende Strukturen aus kristallinem Silizium mit einer Dicke im Bereich von einem Mikrometer erzeugen?

Epitaktisch aufgebracht auf passender Opferschicht oder über die elektrochemische Bildung von porösem Silizium im p-Si-Substrat, in das n-dotierte Gebiete eingelassen sind.

2.5.23

Welcher Dotierkonzentration ist für n-Si zu wählen, damit es in einem Oberflächenprozess mit porösem Silizium als Opferschicht als freitragende Schicht hergestellt werden kann?

Zwischen $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ und $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Lösungen zu Aufgaben Kapitel 3

Lösungen zu Aufgaben Kapitel 3

3.4.1

In die Oberfläche einer Membran aus n-dotiertem (100)-Si sind p-Si-Widerstände jeweils am Rand der runden Membran parallel oder senkrecht zum Flat (d.h. in $\langle 110 \rangle$ -Richtung) angeordnet und zur Wheatstonschen Brücke verschaltet ($\pi = \pi_L = -\pi_T = 70 \cdot 10^{-11} \cdot \text{Pa}^{-1}$). Der Membranradius beträgt $R=2 \text{ mm}$, die Membrandicke $d=40 \text{ }\mu\text{m}$.

- a) Man berechne die bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 100 \text{ kPa}$ auftretende Brückenspannung U_a bei einer Versorgungsspannung der Brücke von $U_{cc} = 10 \text{ V}$.

Rechne mit $\nu = 0,06$ für diese Richtung, daher $U_a = 1.234 \text{ V}$

- b) Wie groß ist die radiale Dehnung und zugehörige Spannung auf der Membranoberfläche

- am Membranrand ($r=R$)

- in der Mitte der Membran ($r=0$)?

$$\text{Am Rand: } \sigma_r = -1,875 \cdot 10^5 \text{ Pa } \varepsilon_r = -1,11 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Im Zentrum } \sigma_r = 9,9 \cdot 10^4 \text{ Pa } \varepsilon_r = 5,88 \cdot 10^{-4}$$

- c) Man begründe die Anordnung/Ausrichtung der Widerstände.

ergibt symmetrische Vollbrücke und grosses Signal

- d) Der beschriebene Drucksensor liefert bei $T = 0^\circ\text{C}$ bei einer gegebenen Druckdifferenz eine Ausgangsspannung von 5 mV , wie groß ist die Ausgangsspannung bei gleicher Druckdifferenz und -75°C (Dotierkonzentration der Widerstände $N = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)?

Korrekturfaktor $\approx 1,5$, daher ergibt sich $7,5 \text{ mV}$

3.4.2

Ein Beschleunigungssensor ist als Biegebalken mit punktförmiger Zusatzmasse am Balkenende ausgelegt. Die Ausrichtung des Balken erfolgt auf (100)-Si in $\langle 110 \rangle$ -Richtung. Die Auswertung erfolgt mit einem Piezowiderstand (p-Si) am Übergang des Balkes zur festen Aufhängung. Der Widerstand ist ebenfalls in der $\langle 110 \rangle$ -Richtung angeordnet ($\pi_L = 70 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$). Der Sensor soll beim Aufprall eines mit 90 km/h fahrenden PKW's ("Bremszeit" auf $v = 0 \text{ km/h}$ in $t = 1 \text{ s}$) eine relative Widerstandsänderung von 10^{-4} erzeugen.

a) Welche Länge L des Balkens ist notwendig, falls die Zusatzmasse $1 \mu\text{g}$, die Balkenbreite $\mathbf{b} = 50 \mu\text{m}$ und die Balkendicke $d = 5 \mu\text{m}$ beträgt?

Es tritt nur longitudinale Spannung bei reiner Biegebelastung auf, $L = 1,19 \text{ mm}$.

b) Was ist der wesentliche Unterschied im Aufbau des ADXL50 zu diesem Beschleunigungssensor?

Resistive statt kapazitive (ADXL50) Auswertung

Kein Differenzprinzip (Offsetproblematik)

Herstellung Bulkmikromechanik ((ADXL50: Oberflächenmikromechanik)

Baut relativ gross

Beschleunigungsrichtung senkrecht zur Oberfläche (ADXL50: parallel zur Oberfläche)

3.4.3

Man berechne für Silizium:

a) den E-Modul in Richtung [210]

$$1,527 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$$

b) den longitudinalen piezoresistiven Koeffizienten π_L für n-dotiertes Si in [312]-Richtung ($T = 295 \text{ K}$).

$$\pi_L = \pi_{11} - 2 \cdot \pi \cdot F_1$$

$$\pi(n - Si) = -142 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

$$F_1 = \frac{49}{(14^2)}$$

$$-31,2 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

3.4.4

Ein Si-Vibrationssensor wird durch einzelne Beschleunigungssensoren nach dem Biegebalkenprinzip realisiert. Wie groß ist die notwendige Balkenlänge für nachzuweisende Frequenzen von $f = 500 \text{ Hz}$, $f = 100 \text{ Hz}$ und $f = 1000 \text{ Hz}$, falls die punktförmige Zusatzmasse $m = 10^{-4} \text{ g}$ beträgt, die Breite des Balkens mit $b = 20 \mu\text{m}$ und die Dicke des Balkens mit $d = 5 \mu\text{m}$ festgelegt sind. Die Ausrichtung soll auf einen (110)-Wafer in [111]-Richtung erfolgen.

Welche Signalwandlungsprinzipien kommen in Frage?

Für $f = 500 \text{ Hz}$: $L = 492 \mu\text{m}$

Für $f = 100 \text{ Hz}$: $L = 1,43 \text{ mm}$

Für $f = 1000 \text{ Hz}$: $L = 309 \mu\text{m}$

Signalwandlungsprinzipien: piezoresistiv, kapazitiv und piezoelektrisch

3.4.5

Ein Drucksensor soll aus einer runden Si-Membran gefertigt werden, deren Radius aus Gründen der Baugröße mit $R_m = 5 \text{ mm}$ festgelegt ist. Die Signalwandlung soll piezoresistiv mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung erfolgen. Der Sensor ist für einen Nenndruck (maximaler Differenzdruck) von 10^5 Pa auszulegen.

- a) Man wähle zunächst eine geeignete Oberfläche der Si-Membran und eine geeignete Dotierung der piezoresistiven Widerstände aus (große Empfindlichkeit).

z.B. (100)-Oberfläche mit p-dotierten Widerständen

- b) Man zeichne die Anordnung der Widerstände auf der Membran ein. Benennen Sie die Ausrichtung der Widerstände.

Widerstände zeigen in eine $\langle 110 \rangle$ -Richtung (also parallel oder senkrecht zum Flap). Dabei liegen alle Widerstände am Rand (Übergang zur Einspannung).

- c) Man berechne für den gewählten Fall die minimale Membrandicke, falls der Sensor bei einem Druck von 10^5 Pa eine maximale Dehnung von 10^{-4} erfahren soll.

Nehme Richtung mit kleinstem E-Modul auf der (100)-Ebene, daher:

$$d \geq 3,8 \mu\text{m}$$

- d) Wie groß sind die relativen Änderungen der 4 Widerstände bei Nenndruck für die gewählte Anordnung?

Für die in radialer Anordnung liegenden: $\Delta R/R = 4,16 \cdot 10^{-4}$

Für die in tangentialer Anordnung liegenden: $\Delta R/R = -3,02 \cdot 10^{-4}$

3.4.6

Ein Beschleunigungssensor besteht aus einem Biegebalken, der aus (100)-Si in [110]-Richtung gefertigt wurde. Die Länge des Biegebalkens beträgt $L = 2\text{mm}$, die Breite $b = 50 \mu\text{m}$ und die Dicke $d = 10 \mu\text{m}$. An der Balkenspitze ist eine punktförmige Masse von 10^{-6} kg aufgebracht. Die Auswertung erfolgt mit einem in [110]-Richtung orientierten p-dotierten Si-Widerstand, der auf der Biegebalkenoberseite ($z = d/2$) definiert wurde. Der Sensor zeigt eine relative Widerstandsänderung von $\Delta R/R = 10^{-3}$.

- a) Man berechne die wirkende (konstante) Beschleunigung a .

$$0,58 \text{ m/s}^2$$

- b) Wie ist der Sensor zur Beschleunigungsrichtung zu positionieren, was kann man zur Querempfindlichkeit gegenüber Seitenaufprall sagen?

Längsachse senkrecht zur Beschleunigung. Bei Seitenaufprall ergibt sich sehr kleine Durchbiegung, da der Biegebalken relativ breit ist. Zusätzlich heben sich die Torsionskomponenten bei exakter Platzierung des Widerstands in der Mitte des Biegebalkens auf (günstiger ist allerdings, den Widerstand senkrecht zur Längsachse des Biegebalkens zu stellen).

- c) Beim Beschleunigungssensor ADXL50 erfolgt die Auswertung kapazitiv. Auf welche Weise wird bei diesem Sensor erreicht, dass auch bei Beschleunigung praktisch keine Auslenkung aus der Ruhelage auftritt?

Elektrostatistische Rückkopplung, closed-loop-Prinzip

3.4.7

Ein (sehr einfacher!) Drucksensor wird auf (100)-Si durch eine dünne, runde Membran realisiert, auf deren Oberfläche ein p-Si-Widerstand genau in der Mitte der Membran in [110]-Richtung erzeugt wird. Die Membrangeometrien sind: $R_m = 1\text{mm}$ (Membranradius), $d = 50 \mu\text{m}$ (Membrandicke, homogen).

Man berechne die relative Widerstandsänderung $\Delta R/R$ bei einem Differenzdruck zwischen Vor- und Rückseite von $\Delta p = 100 \text{ kPa}$.

$$\Delta R/R = 8,745 \cdot 10^{-4}$$

3.4.8

Ein Vibrationssensor soll bei den beiden Frequenzen $f_1 = 500 \text{ Hz}$ und $f_2 = 2000 \text{ Hz}$ ansprechen. Die Realisierung soll mit einer Si-Zunge erfolgen ((100)-Oberfläche, [110]-Ausrichtung), deren Spitze mit einer idealisiert punktförmigen Masse belastet wird.

Gesucht sind (vernünftige) Geometriedaten eines solchen Sensors.

Bei dieser Aufgabe sollen qualitativ verschiedene Randbedingungen beachtet werden (Grobkonzept).

Zunächst wird eine Beziehung für die punktförmige Masse aus Material- und Prozessüberlegungen gewonnen: Eine solche Zusatzmasse kann durch eine Schwermetallschicht mit einer typischen Dicke von $1 \mu\text{m}$ realisiert werden (z.B. Au, Dichte $1,9 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$). Die Breite der Metallschicht entspricht der Balkenbreite b , die Länge wird wegen der Bedingung „punktförmig“ mit $l/10$ (l : Länge des Biegebalkens) abgeschätzt.

Eine Lösung besteht darin, den Sensor für 500 Hz als 1. Resonanz auszulegen und die 2000 Hz als Oberwelle zu detektieren. Die dazu gehörenden Geometrieauslegungen werden unten dargestellt. In diesem Fall ist die Sensitivität bei den zwei Frequenzen sehr unterschiedlich.

Eine weitere Möglichkeit ist, die zwei Schwingungsachsen eines Biegebalkens zu verwenden, um beide Resonanzen in einem System zu realisieren. Da in diesem Fall alle Parameter gleich sind (nur deren Bedeutung in der Gleichung für die Eigenresonanz bei der senkrechten Schwingungsachse sich entsprechend vertauscht) kommt man direkt zum Ergebnis, dass sich dies durch ein Dicken- zu Breitenverhältnis des Biegebalkens $d/b = 1/4$ realisieren lässt. Wählt man z.B. eine Dicke von $10 \mu\text{m}$ (Bulkmikromechanik), so sind also die resultierenden Werte: $b = 40 \mu\text{m}$, $l = 1,72 \text{ cm}$. Eine solche Länge ist nicht sinnvoll. Wählt man aber $d = 2 \mu\text{m}$ (Oberflächenmikromechanik) so ergeben sich zwar mit $b = 8 \mu\text{m}$ und $l = 5,16 \text{ mm}$ noch sinnvolle Geometriedaten, eine weitere Abschätzung der sich in diesem System ergebenden maximalen Spannung an der Aufhängung zeigt aber, dass dann die maximal zulässige Vibrationsamplitude nur $2,69 \text{ nm}$ sein darf (Kriterium: $1/7$ des theoretischen Festigkeitswerts von $7 \cdot 10^4 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ sollte nicht überschritten werden). Diese Lösung ist also zu bruchempfindlich.

Prozesstechnisch lassen sich unterschiedliche Resonanzen am einfachsten durch unterschiedliche Breiten oder Längen der Biegebalken einstellen. Wählt man von diesen beiden Möglichkeiten die Länge als Variable aus, so kommt man unter der Annahme, dass die seismische Masse durch eine Schwermetallschicht (z.B. Au mit einer Dichte von $1,9 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$) mit einer Dicke um $1 \mu\text{m}$, einer Breite, die der Breite des Biegebalkens entsprechen muss, und mit einer Länge, die maximal $1/10$ der Biegebalkenlänge entspricht (Annahme: punktförmig) zu einer Bestimmungsgleichung für das Verhältnis von Dicke zu Länge des Biegebalkens.

Mit Balkendicken, wie sie gerade noch mit elektrochemischen Ätzstopp sinnvoll sind ($10 \mu\text{m}$) ergibt sich dann:

Für 500 Hz : Länge von $6,89 \text{ mm}$ und für 2000 Hz eine Länge von $3,4 \text{ mm}$.

Mit Balkendicken, wie sie in der Oberflächenmikromechanik typisch sind ($2 \mu\text{m}$) ergibt sich dagegen:

Für 500 Hz : Länge von $2,06 \text{ mm}$ und für 2000 Hz eine Länge von $1,03 \text{ mm}$.

Die Breite kann nun noch so ausgelegt werden, dass das System ausreichend gedämpft wird, damit die Bruchgrenze für die dann sich einstellende Schwingungsamplitude sicher eingehalten wird.

Eine grobe Abschätzung zeigt, dass auch bei dieser Lösung die Bruchgefährdung hoch ist: Bei der Bulklösung darf bei 2000 Hz die Schwingungsamplitude nicht größer als 48 nm sein (Kriterium: maximale Belastung 1/7 Bruchfestigkeit), bei der Oberflächenmikromechanik-Lösung sind es sogar nur 4,2 nm.

3.4.9

Man berechne mit Hilfe der Pseudovektorschreibweise die zugehörigen Spannungen im Werkstoff (Si-Einkristall-Würfel) für den folgenden Verzerrungszustand:

$$\varepsilon_1 = 1 \cdot 10^{-4}, \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -3 \cdot 10^{-5}, \varepsilon_4 = \varepsilon_6 = 0, \varepsilon_5 = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma_1 = 1,274 \cdot 10^7 \text{ Pa}, \sigma_2 = -4,98 \cdot 10^5 \text{ Pa}, \sigma_3 = -3,552 \cdot 10^6 \text{ Pa}, \sigma_4 = \sigma_6 = 0, \sigma_5 = 1,592 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

3.4.10

Ein Si-Drucksensor wird durch den piezoresistiven Effekt mit einer Si-Membran realisiert. Dazu wird ein p-dotierter Si-Widerstand genau in der Mitte der kreisrunden Membran definiert (Membranradius $R_m = 1 \text{ mm}$, Membrandicke $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$). Die Membran hat eine (111)-Oberfläche, der Widerstand liegt in [110]-Richtung ($E = 5,91 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, $\nu = 0,262$, isotrop in dieser Ebene).

a) Man berechne die relative Widerstandsänderung für $\Delta P = 10^4 \text{ Pa}$ und die zugehörige Dehnung an der Oberseite der Membran in der Mitte.

b) Warum ist diese Realisierung ungeeignet? Wie sieht eine übliche Realisierungsform von Si-Drucksensoren an (Verschaltung, Anordnung, Ebene, Ausrichtung, Dotierung, mit Skizze).

Runde Membran lässt sich nicht anisotrop nasschemisch ätzen. Bei Verwendung eines isotropen nasschemischen Ätzprozesses ist der Übergang zwischen Aufhängung und dünner Platte nicht sauber definiert. Bei einem Trockenätzprozess (z.B. DRIE) ist es nicht möglich im kristallinen Silizium einen definierten Ätzstopp zu erhalten. Man wählt daher üblicherweise quadratische Membranen, wobei die Widerstände am Ort höchster mechanischer Spannung, also am Membranrand (Übergang zur festen Einspannung) positioniert werden. Wählt man z.B. eine (100)-Ebene, so kann durch vier parallel angeordnete Widerstände, die alle in [110]-Richtung orientiert sind und aus p-Si gebildet werden, eine nahezu symmetrische Wheatstonsche Vollbrücke erreicht werden.

3.4.11

Auf einem Si-Biegebalken ($l = 500 \text{ }\mu\text{m}$, $b = 100 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$) ist wie skizziert ein Widerstand (p-dotiert) quer zur Längsrichtung des Biegebalkens angebracht. Man berechne die relative Widerstandsänderung bei einer Beschleunigung von $a = 50 \text{ g}$ der punktförmigen Masse $m = 1 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ am Biegebalkenende ($T = 295 \text{ K}$). (Tip: Es handelt sich um eine reine Biegespannung).

- Welche anderen Ausleseprinzipien für Beschleunigungssensoren sind möglich?

$$\Delta R/R = -0,39$$

- überwiegend kapazitiv, piezoelektrische Signalwandlung wird für spezielle Anwendungen ebenfalls genutzt.

3.4.12

Welche anderen Sensortypen gehen wie Beschleunigungssensoren auf Inertialprinzipien zurück?

Neigungssensoren, Vibrationssensoren, Drehratensensoren

3.4.13

Warum eignen sich mikrosystemtechnische Lösungen besonders gut für Mikrofone in Hörgeräten?

Miniaturisierung ermöglicht Einbau in Gehörgang. Integration sensornaher Elektronik zur Filterung und Signal-Rauschbewertung verbessert Nutzungskomfort. Eine mit der konsequenten Nutzung von MST verbundenen Preisreduktion eröffnet Massenmarkt.

3.4.14

Ein Beschleunigungssensor wird durch eine vierfach aufgehängte zentrale seismische Masse, die als bewegliche Elektrode dient, und einer festen Gegenelektrode ausgebildet (s. Bild). Die Aufhängungsbalken haben dabei folgende Geometrie: Länge $l = 300 \mu\text{m}$, Breite $b = 10 \mu\text{m}$, Dicke $d = 2 \mu\text{m}$. Die seismische Masse sei $m = 1 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$. Der Abstand der Elektroden im Ruhezustand sei $5 \mu\text{m}$. **Der E-Modul sei für den gegebenen Belastungsfall $1,69 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$ ([110]-Richtung).** Berechnen Sie die relative Kapazitätsänderung bei einer Beschleunigung von 50 g senkrecht zur seismischen Masse.

$$C/C = w_0/s = -0,39$$

3.4.15

Nach welchen Prinzipien (2) arbeiten Neigungssensoren?

Mikromechanisch: hierbei handelt es sich um Beschleunigungssensoren, die für den Beschleunigungsbereich von $0 - 1 \text{ g}$ ($1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$) optimiert sind.

Thermisch: relativ neues Prinzip durch Ausnutzung von Konvektion

Flüssigkeitspegel: Sensor ist mit geeigneter Flüssigkeit gefüllt. Bei Schrägstellung des Sensors (Neigung) verkippt der Sensor relativ zu der konstant bleibenden Flüssigkeitsoberfläche. Die daraus resultierende Unsymmetrie lässt sich mit verschiedenen Methoden auswerten (resistiv, kapazitiv, optisch).

3.4.16

Ein Drehratensensor (z.B. ADXLRS) ist so aufgebaut, dass die durch die Drehbewegung erzeugte Corioliskraft mit einem Standardbeschleunigungssensor gemessen wird, dessen Auflösung mit 1 mg angegeben wird. Gesucht wird die erforderliche Geschwindigkeit der Primärschwingung, damit der Drehratensensor bei einer seismischen Masse von 10^{-3} g (für Primär- und Sekundärbewegung nehmen) eine Auflösung von $1^\circ/\text{s}$ (Achtung umrechnen in: Einheit rad/s) erzielt.

$$0,281 \text{ m/s}$$

Lösungen zu Aufgaben Kapitel 4

4.3.1

Ein Piezostapel ($d_{\max} = d_{33} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ As/N}$, Dicke einer einzelnen Stapelschicht 1 mm , mit zwischenliegenden Kontakten, Gesamtlänge des Piezos $l = 1 \text{ cm}$) wird mit 800 V betrieben, die Polarität ist so gewählt, dass eine Längung ohne Last auftritt.

- Zu berechnen ist die Dehnung des Gesamtstapels (relativ und absolut)

a) im unbelasteten Fall

b) mit einer äußeren Drucklast von 10000 N/m^2 ($E = 1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$).

- Wie hoch ist die maximale Betriebstemperatur eines PZT-Aktors?
- Was ist bei Betrieb eines Piezostellers für hochgenaue Positionierungen zu beachten?

4.3.2

a) Gesucht ist die nötige Steuerspannung einer elektrostatisch arbeitenden Mikropumpe für eine Druckdifferenz p_{el} von 100 mbar = 10^4 Pa bei dem nachfolgend beschriebenen Aufbau (2 Schichten zwischen Kondensatorplatten: Luft (Index 1) und SiO_2 (Index 2)).

Isolationsschicht aus SiO_2 : $d_2 = 0.1 \mu\text{m}$, $\epsilon_2 = 3.9$, Abstandsschicht $d_1 = 2 \mu\text{m}$, Zwischenraum Luft ($\epsilon_1 = 1$). $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

b) Welche anderen Aktorkonzepte sind für eine solche Mikropumpe möglich?

4.3.3

Man beschreibe und erläutere den Tintenstrahl Druckkopf des HP-Deskjet. Welches Aktorkonzept liegt der Tintenstrahlerzeugung zugrunde?

4.3.4

Ein Piezostab aus PZT mit der Gesamtlänge von $L = 1 \text{ cm}$ Länge und einer Querschnittsfläche von $A = 0.2 \text{ cm}^2$ besteht aus 100 Einzelscheiben (Dicke der Zwischenschichten vernachlässigbar klein). Der Piezostab soll eine Last von $F = 100 \text{ N}$ um $10 \mu\text{m}$ anheben. Man berechne in skalarer Näherung die dazu notwendige Spannung U (Longitudinaleffekt, Spannung an Querschnittsflächen),

falls $d_{\max} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m/V}$, $E = 1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$.

Welche maximalen Wege lassen sich mit Piezostapeln typischerweise erzielen, welche Genauigkeit ist dabei möglich?

4.3.5

Um welches Wandlungsprinzip handelt es sich beim memory-alloy-Aktor?

Die Wirkungsweise ist an einem geeigneten Diagramm zu erläutern. Was ist der typische Arbeitsbereich von NiTi?

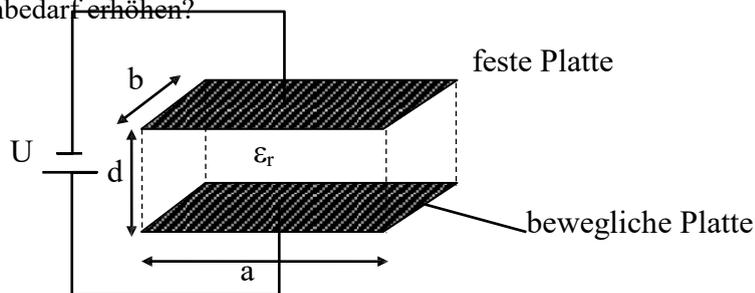
4.3.6

Der gezeichnete elektrostatische Aktor soll in Querrichtung bei $U = 1000\text{V}$ eine Kraft von 2 N erzeugen ($a = b = 1\text{ mm}$).

Man berechne den notwendigen Plattenabstand ($\epsilon_r = 1$).

Was kann man zum sich ergebenden Wert sagen?

Wie kann man die Kraft bei gleichem Abstand, gleicher Spannung und gleichem Flächenbedarf erhöhen?



4.3.7

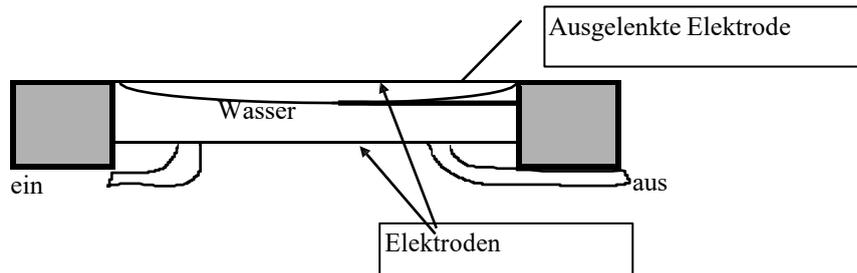
Warum finden elektrostatische Antriebe keine Verwendung in der "Makrowelt"?

4.3.8

Was sind wichtige Merkmale von piezoelektrischen Antrieben (Betriebsdaten, Besonderheiten, Werkstoffe, Anwendungen)?

4.3.9

Die eingezeichnete elektrostatisch arbeitende Membran-Mikropumpe soll bei einer Steuerspannung von 200 V und einer Membranfläche von 10 mm^2 einen Differenzdruck von 1m-Wasseräule aufbringen. Man berechne und bewerte den notwendigen Elektrodenabstand ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, $\epsilon_w = 81$).



4.3.10

Wie erreicht man beim DMD die große Farbtiefe bzw. den großen Grauwertbereich?
Welche Kenngröße ist hierzu zu optimieren?

Welche Größen sind für den Kontrast des DMD entscheidend?

4.3.11

Mit welchen Maßnahmen kann man bei Mikropumpen den Durchfluss erhöhen?

4.3.12

Wie erzeugt man beim „bubble-jet“ Tintendruckkopf den Tintenaustrittsdruck, welche Werte werden typisch erreicht?

Welche physikalische Größe des Tintendruckkopfes bestimmt die Auflösung des Druckergebnisses mit?

4.3.13

Bis zu welcher Geometrie (Maß z.B. des Plattenabstands) sind elektrostatische Antriebe gegenüber elektromagnetischen im Vorteil?

4.3.14

Was versteht man unter ERF oder MRF? Wie realisiert man einen Antrieb mit diesen Fluiden?

4.3.15

Mikromotoren können mit elektrostatischem oder elektromagnetischem Antrieb realisiert werden. Was sind die wichtigsten Merkmale, Vor- und Nachteile dieser Prinzipien beim Antrieb von Mikromotoren?

4.3.16

Was sind geeignete Materialien für die nachfolgenden Aktortypen:

- magnetostruktive Aktoren
- Formgedächtnis-Legierungen
- piezoelektrische Dünnschicht-Aktoren
- mikromechanische kapazitive Aktoren ?

Lösungen Aufgaben Kapitel 5

5.4.1

Wie groß ist der Integrationsgrad bei integriert-optischen Schaltungen im Vergleich zu integrierten Mikroelektronik-Schaltungen?

5.4.2

In einen Lichtwellenleiter aus SiO_2 ($n_f = 1.5$) soll von Luft kommend mit einer Stoßkopplung Licht in die Stirnseite eingekoppelt werden.

Gesucht ist:

- * der notwendige Brechungsindex der umgebende Schicht, damit Licht, das unter einem Öffnungswinkel von $\alpha_{\text{in}} = 10^\circ$ einfällt, im Lichtwellenleiter noch durch Totalreflexion geführt wird.
- * α_{krit} für diese Situation.
- * das evaneszente Feld in einer Entfernung von $1 \mu\text{m}$ von der Grenzfläche bei einem Modenwinkel von 85° ($= 1 \mu\text{m}$)

5.4.3

Was versteht man unter Modenausbildung bei einem Lichtwellenleiter, wie kann man die Moden sichtbar machen?

5.4.4

Gesucht wird das Abklingverhalten des evaneszenten Feldes an einer Grenzfläche n_c/n_f bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1 \mu\text{m}$, einem Modenwinkel von $\alpha = 75^\circ$ und $n_f = 1.6$, $n_c = 1.5$.

5.4.5

Welche Parameter bestimmen bei einem Rippenwellenleiter die lichtführenden Eigenschaften?

5.4.6

Was sind typische Krümmungsradien für integriert-optische Lichtwellenleiter, bei denen sich die Lichtführungseigenschaften noch nicht wesentlich verschlechtern? Durch welche Maßnahmen kann man die Streuverluste an gekrümmten Lichtwellenleitern reduzieren?

5.4.7

An eine gradlinige Lichtwellenleiter-Struktur aus LiNbO_3 ($n_f = 2.29$, $n_c = n_s = n_r = n_l = 2.25$) wird eine elektrische Spannung U angelegt. Wie groß ist die maximal zulässige Spannung, die angelegt werden kann, ohne dass die seitliche Lichtführungseigenschaft der Lichtwellenleiter-Struktur verlorengeht ($r_{\max} = 30 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$, $\lambda = 500 \text{ nm}$, homogenes Feld über n_c , n_f und n_s)?

5.4.8

In einem GaAs-Lichtwellenleiter liegt über eine Strecke L ein elektrisches Feld von $E_{\text{el}} = 10^5 \text{ V/cm}$ an ($r_{41} = r_{\max} = 1.3 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$, $n_0 = n_f = 3.6$, $\lambda = 1 \mu\text{m}$).

Gesucht ist die notwendige Länge L , um einen optischen Gangunterschied von $\lambda/2$ nach Durchlaufen von L durch das elektrische Feld zu erzeugen.

5.4.9

Welche Möglichkeiten gibt es zur Realisierung von integriert-optischen Modulatoren?

5.4.10

Wie ist ein Mach-Zehnder-Interferometer zu konstruieren, das nur aus Richtkopplern und einfachen Lichtwellenleitern aufgebaut ist?

5.4.11

a) Wie ist Aufbau und die Funktion eines integriert-optischen Richtkopplers als Modulator von Licht (Skizze, Aufbau mit typische Geometrien)?

b) Welche Grenzfrequenzen können nach Stand der Technik mit solchen Modulatoren erreicht werden?

c) Aus welchen Materialien kann man solche schaltbaren Richtkoppler fertigen, aus welchem Material werden sie in der Praxis hauptsächlich gefertigt?

5.4.12

Ein Fabry-Perot-Interferometer (Phasenresonator) aus GaAs ($r_{41} = 1.3 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$, $n_0 = n_f = 3.2$) ist so ausgelegt, dass bei einer Länge von $L = 6 \text{ mm}$ konstruktive Interferenz auftritt.

Gesucht ist das notwendige elektrische Feld, das am Filmlichtwellenleiter anliegen muss, damit am Ausgang Auslöschung erreicht wird ($\lambda = 1 \mu\text{m}$). Wie groß sind die entsprechenden elektrische Spannungen für übliche Wellenleiterdicken?

5.4.13

Ein vergrabener integriert-optischer Lichtwellenleiter ($n_f = 1.5$) soll bei einer Einkopplung von Luft eine numerische Apertur von $NA = 0.3$ haben. Gesucht ist der dazu notwendige Brechungsindex der umgebenden Schicht.

5.4.14

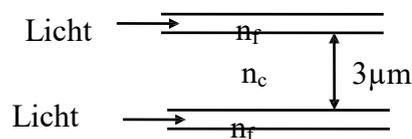
Wie sieht der Aufbau eines Rippenwellenleiters aus, in welchem Bereich wird das Licht geführt?

Wie kommt die seitliche Lichtführung zustande?

5.4.15

Es liegen zwei Streifenwellenleiter mit einem Abstand (Abstand der zugewandten Kanten) von $3 \mu\text{m}$ vor. Gesucht sind die notwendigen Brechungsindizes n_f und n_c , so dass folgende Anforderung erfüllt sind:

- kritischer Führungswinkel $\alpha_{\text{krit}} = 60^\circ$
- das evaneszente Feld des einen Lichtwellenleiter soll am Rand des anderen Lichtwellenleiter für eine Mode, deren Führungswinkel 10° über α_{krit} liegt, auf 10^{-4} abgeklungen sein ($\lambda = 1 \mu\text{m}$).



5.4.16

Bei welchen Funktionskomponenten eines Fasergyroskops ist der Einsatz von integriert-optischen Elementen vorteilhaft?

5.4.17

Wie groß ist die Grenzfrequenz (3 dB) eines 3 mm langen, $5 \mu\text{m}$ breiten und $1 \mu\text{m}$ dicken Lichtwellenleiters ($\epsilon_r = 5$) bei einem Abschlußwiderstand von $R_a = 50 \Omega$?

5.4.18

Gesucht ist die Brennweite einer Fresnellinse mit einem Durchmesser des innersten Rings von $100 \mu\text{m}$ bei einer Wellenlänge von $1 \mu\text{m}$,

5.4.19

Mit welchen Verfahren kann man stufige Profile bei einem Echelettegitter mit Blaze erzeugen?

Lösungen der Aufgaben zu Kapitel 6

6.6.1

Welcher Signalstandard ist in der Automobilindustrie für analoge Signale üblich?

6.6.2

Welche Vorteile haben digitale Schnittstellen?

6.6.3

Welche Vorteile hat die Einbindung von Mikrosystemen in digitalen Netzen?

6.6.4

Welche Merkmale machen den CAN+-Bus zu einem geeigneten Kandidaten für die Einbindung von Mikrosystemen in eine Busarchitektur?

6.6.5

Was unterscheidet den Entwurfsvorgang von Mikrosystemen von dem von „klassischen“ Systemen? Was erschwert den Entwurf von Mikrosystemen?

6.6.6

Was versteht man unter Modellierung von Mikrosystemen? Welche Modellebenen gibt es?

6.6.7

Ein typisches Problem bei der Modellierung von Mikrosystemen ist die bidirektionale Kopplung. Was versteht man darunter (mit Beispiel)?

6.6.8

Welche billigen Methoden zur Chipabdeckung gibt es?

6.6.9

Welche wichtigen analogen Schnittstellenstandards gibt es?

6.6.10

Welche Vorteile hat ein Transducer-Hersteller von der Verwendung des vorgeschlagenen IEE-E-P1451-Standards, wie wird die Anpassung eines Transducers an ein spezifisches Netzwerk bei diesem Vorschlag realisiert?

6.6.11

Wie sieht die Kopplungsmatrix einer ANSYS-Simulation für die Temperaturabhängigkeit des **linear**-elektrooptischen Effekts aus?

6.6.12

Warum ist die Aufbau- und Verbindungstechnik **für die** Realisierung von Mikrosystemen von sehr großer Bedeutung?

6.6.13

Was sind die Vorteile der Hybridintegration?

6.6.14

Gesucht ist die bei einer Verbindung mit Silizium auftretenden mechanischen Spannung bei einem Wärmeausdehnungskoeffizienten des Substrats $\alpha_{\text{substrat}} = 5 \cdot 10^{-6} / \text{K}$, $\alpha_{\text{si}} = 3 \cdot 10^{-6} / \text{K}$, Temperaturdifferenz zwischen Bond- und Bezugstemperatur von 200 °C, E-Modul der Verbindungsschicht von $1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, E-Modul des Substrats von $1 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, Verbindungslänge: 5 mm, Verbindungsschichtdicke 5 μm .

6.6.15

Welche Niedertemperaturverbindungsarten gibt es?

6.6.16

Welche Verbindungsarten eignen sich besonders für hermetisch dichte Verbindungen?

6.6.17

Welche Materialkombinationen kommen für das eutektische Verbinden von Si in Frage?

