

Halbleitersensoren

Prof. Dr.-Ing. Hansch
(TU München)

Kontrollfragen mit Lösung
(SoSe 2005)

aktueller Stand: 28. Januar 2006

Einleitung

Dieses Dokument enthält alle Kontrollfragen, welche Herr Prof. Dr.-Ing. Hansch gegen Ende des Sommersemesters 2005 über das mytum-Portal (<http://www.mytum.de>) als PDF-Datei zum Download bereitgestellt hat. Die Lösung der meisten Fragen kann man direkt dem Skriptum der Vorlesung entnehmen, einige wenige erforderten etwas mehr Nachdenken.

Die Hinweise zur Prüfung im Skript kann man getrost ignorieren – in der Prüfung am 28. Juli 2005 bekamen alle Prüfungsteilnehmer die gleichen Aufgaben: alle Kapitel wurden sehr umfangreich abgeprüft, zusätzlich wurden einige Rechenaufgaben aus der Übung gestellt. Die Prüfungsaufgaben waren (bis auf kleinere Modifikationen) mit den Kontrollfragen identisch. Ausnahme war Kapitel 8 (Feuchtesensoren): Hierzu gab es leider (noch?) keine Kontrollfragen, obwohl im PDF-Dokument behauptet wurde, sie seien in Kapitel 9 integriert worden.

wichtiger Hinweis:

Leider dürfen in der Prüfung keine Hilfsmittel verwendet werden.

Kontakt:

Korrektur- und Verbesserungsvorschläge sind jederzeit herzlich willkommen. Ich bin unter folgender E-Mail-Adresse zu erreichen: *simonblank@gmx.de*

Die jeweils aktuelle Version dieser Formelsammlung und anderes (Formelsammlungen für andere Fächer, Linksammlungen etc.) kann man sich auf meiner Webseite herunterladen: <http://studium.simonblank.de1.cc>

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Überblick zur Halbleitersensorik.....	4
Kapitel 2: Materialgrundlagen	5
Kapitel 3: Technologie	7
Kapitel 4: Kraftsensoren.....	9
Kapitel 5: Temperatursensoren	13
Kapitel 6: Strahlungssensoren	17
Kapitel 7: Magnetfeldsensoren.....	21
Kapitel 9: Chemische Sensoren.....	23
Kapitel 10: Biosensoren	27

Kapitel 1: Überblick zur Halbleitersensorik

1. Wie groß ist der jährliche Weltmarkt in Mrd. € an Sensoren zurzeit?

Ca. 40 Mrd. €.

2. Welchen Anteil daran haben die Halbleitersensoren und wie sind die Prognosen?

Etwa 40% und pro Jahr um etwa 1% wachsend.

3. Welches sind die Vorteile von Halbleitersensoren gegenüber anderen Sensoren bzw. warum werden immer mehr Sensoren in Silizium gefertigt¹?

- HL-Materialien und der Stromtransport in ihnen sind mehr oder weniger auf alle Umwelteffekte sensitiv
- Halbleitersensoren können deutlich kleinere Abmessungen als andere Werkstoffrealisierungen aufweisen
- Kleine Abmessungen und etablierte Siliziumtechnologie erlauben die Herstellung großer Stückzahlen zu geringen Preisen (typisch: cent)
- Unterschiedliche Halbleitersensoren und Elektronik können auf einem Chip integriert werden. Das bietet in der Anwendung den Vorteil extrem kleiner, preiswerter, leistungsfähiger und anwendungsfreundlicher Systeme.

4. Was sind typische Herstellungspreise und Verkaufspreise für Halbleitersensoren? Für welchen Markt sind sie daher besonders geeignet?

- Herstellungspreise: cent bis €
 - Verkaufspreise: €
- ⇒ besonders geeignet für den Massenmarkt

5. Nennen Sie einige typische Anwendungen für Halbleitersensoren ohne auf das Messprinzip einzugehen!

Temperatursensoren, Drucksensoren, Positionssensoren, Beschleunigungssensoren etc.

¹ Siehe Kapitel 3.1.

Kapitel 2: Materialgrundlagen

1. Welches Korngefüge können Materialien ausbilden?

(Ein)-Kristall, Poly-Kristall, amorph

2. Wie werden Ebenen und Richtungen im Kristall beschrieben?

Durch Einführung eines reziproken Gitters und Millerschen Indizes (hkl)

3. Warum bildet sich in Kristallen eine Bandstruktur?

Durch das Zusammenlagern von Atomen müssen sich wegen des Pauli-Prinzips die atomaren Energieniveaus entsprechend der Anzahl der wechselwirkenden Atome trennen. Im Festkörper mit 10^{22} Atomen/cm³ werden aus 10^{22} Energieniveaus kontinuierliche Bänder.

4. Wie wird die Besetzung der Bandstruktur mit Ladungsträgern geregelt?

Das Valenzband wird bis zum Maximum nach dem Pauli-Prinzip aufgefüllt; Elektronen mit ausreichender Energie sitzen im Leitungsbandminimum bei fast gleicher Energie und das an allen Orten im Kristall.

5. Wie unterscheidet man mit Hilfe des Bänderdiagrammes Metalle, Halbleiter und Isolatoren?

Über die Größe der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband:

- Leiter: halbvolles Band oder Bandüberlappung
- Isolator: $E_{\text{gap}} > 2 \text{ eV}$
- Halbleiter: $E_{\text{gap}} < 2 \text{ eV}$

6. Wie kann man die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern verändern und worauf muss man achten?

- Dotierung (p- oder n-Dotierung); Achtung: bei zu hoher Dotierung liegt Entartung vor --> der HL wird zum Leiter
- Temperaturveränderung: Eine Erhöhung der Temperatur bewirkt eine Ionisierung der Dotieratome (:= elektrische Aktivierung) und somit eine höhere Leitfähigkeit; Achtung: ab $T \approx 100 \text{ K}$ sind bereits alle Dotieratome ionisiert, ab $T \approx 500 \text{ K}$ funktioniert die Bauelementstruktur nicht mehr!

7. Welche Möglichkeiten des Ladungsträgertransportes gibt es?

- thermische Bewegung
- Drift
- Diffusion

8. Von welchen Größen hängt die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger ab, welches ist der Maximalwert?

- $v_{\text{Drift}} = \mu \cdot E$ (im linearen Bereich, d.h. für $E < 10^3$ V/cm) --> Anhängigkeit von der Beweglichkeit μ und der Feldstärke E
- Maximalwert: $v_{\text{Drift,max}} \approx 10^7$ cm/s

Kapitel 3: Technologie

1. Welche technologischen Vorteile bietet Silizium als Halbleitermaterial für Sensoren?

- Bandlücke gerade richtig (1,1 eV) --> bei Raumtemperatur ausreichend Elektronen, bei Erwärmung bis 150 °C (z.B. durch hohe Stromdichten) gute Funktionalität
- Sehr häufiges natürliches Vorkommen (Sand = SiO₂, Si ist nach O das zweithäufigste Element in der Erdkruste)
- Ungiftig, bioverträglich
- Keine Alterung
- Leichte Bildung eines sehr stabilen Oxides an der Oberfläche zur Passivierung, wasserunlöslich
- CMOS-Schaltungstechnik

2. Nennen Sie mindestens 6 Grundprozesse der Siliziumtechnologie!

- Herstellung von Siliziumwafern
- Reinigung der Wafer
- Thermische Oxidation
- Strukturübertragung mit Fotolack (Photolithographie)
- Dotieren
- Schichtabscheidung
- Ätzen

3. Wie funktioniert das anisotrope² Nassätzen?

In der Oberfläche und nach unten in den Einkristall und im Einkristall selbst sind die Silizium-Atome in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich stark zueinander gebunden --> Verwendung von Ätzlösungen, deren Ätzkraft auf die Bindungsverhältnisse empfindlich sind, z.B. KOH (3 bis 50%), N₂H₄ (Hydrazin) und Ethylen-Diamon-Pyrocatechol (EDP).

4. Wovon hängt die Ätzrate ab?

- Kristallrichtung des HL-Materials und vom Material selbst
- Temperatur
- Verwendete Ätzlösung und dessen Konzentration

5. Welche Möglichkeiten zur Herstellung dünner Membranen wie sie z.B. für Drucksensoren benötigt werden gibt es?

- Substrat-Mikromechanik (bulk-micromachining)
- Oberflächen-Mikromechanik (surface-micromachining)

² Richtungsabhängig.

6. Was ist der Unterschied zwischen bulk-micromachining und surface-micromachining?

Beim bulk-micromachining werden die Strukturen aus dem Substrat herausgeätzt, beim surface-micromachining als Schichten auf dem Substrat aufgebaut.

7. Welche Probleme können beim surface-micromachining auftreten?

- Die Schichten müssen selektiv gegeneinander ätzbar sein (Problem im Griff)
- Großflächige Strukturen sind nicht gut unterätzbar
- Beim Unterätzen können die freitragenden Strukturen am Substrat kleben bleiben (sticking)
- In Abhängigkeit vom Schichtsystem und den Prozessparametern bauen sich in den Schichten mechanische Verspannungen auf

8. Wie funktioniert der LIGA-Prozeß?

Lithographie + Galvanoformung + Abformung:

1. Auf einer Metallplatte wird Fotolack mit mehreren Millimetern Dicke von Röntgenstrahlung belichtet (geradlinige, tiefe Durchdringung)
2. Mit Galvanik³ wird ein metallischer Negativabdruck der Struktur erstellt, der Fotolack wird herausgelöst.
3. In die Metallform wird jetzt Plastikmaterial eingefüllt, gehärtet und dann ausgelöst

9. Welche Möglichkeiten gibt es zur Integration eines Sensorprozesses mit CMOS?

Es gibt 4 Möglichkeiten:

- Die Mitbenutzung von IC-Schichten (am kostengünstigsten, aber meistens nicht möglich)
- Die Vorfertigung des Sensorteiles, danach die Herstellung der Silizium-Elektronik
- Die Fertigung der Silizium-Elektronik, danach auf freien Flächen die Nachfertigung der Halbleitersensorik
- Die Einbindung der Sensorfertigung an geeigneter Stelle bei der Herstellung der Silizium-Elektronik

10. Welche Grundprozesse beinhaltet das Packaging von Sensoren?

1. Die Chips werden auf Metallstrukturen (lead frames) geklebt oder gebondet.
2. Dann werden die Verbindungsdrähte vom Chip zu den lead frame Kontakten hergestellt.
3. Als letztes wird ein Gehäusedeckel aufgeklebt oder verschmolzen.

³ Z.B. im Kupferbad.

Kapitel 4: Kraftsensoren

1. Mit welchen Messprinzipien kann eine mechanische Kraftwirkung mit Halbleitersensoren nachgewiesen werden?

- Piezoresistiv (Widerstandsänderung durch geometrische Verformung und ggf. Änderung der Materialeigenschaften⁴ des Sensormaterials)
- Piezoelektrisch (Verschiebung innerer Ladungen im Sensorwerkstoff, die als äußere Spannung nachgewiesen wird)
- Kapazitive Messung (die wirkende Kraft erzeugt eine Veränderung des Abstandes oder der Fläche zweier Kondensatorplatten)
- Indirekte Messverfahren (optisch, mechanischer Resonator, magnetisch, induktiv)

Elastizitätstheorie:

2. Welches ist das Grundgesetz der Elastizitätstheorie?

Hooke'sches Gesetz in Tensorschreibweise:

$$\sigma \left[\frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \right] = E \left[\frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \right] \cdot \varepsilon [\]$$

mit σ := Spannung, E := Elastizitätsmodul und ε := Dehnung (Verlängerung pro Länge eines deformierbaren festen Körpers)

3. Welche Elastizitätsmodule gibt es?

- Querkontraktionsmodul
- Kompressionsmodul (allseitige Kompression)
- Scherung (Schubmodul oder Torsionsmodul)

4. Wann ist der Tensorcharakter der Elastizitätsmoduln zu berücksichtigen?

Tensorcharakter ist zu berücksichtigen, wenn eine Kraft (oder Spannung σ) in alleiniger x-Richtung Verformungen (Dehnungen ε) auch in Mischrichtungen der anderen Koordinatenachsen erzeugt.

5. In welcher Größenordnung der Formänderung treten elastische Verformungen auf?

Im Promille-Bereich.

⁴ Änderung der elektrischen Leitfähigkeit.

6. An welchem Punkt eines elastischen Biegebalkens treten die größten mechanischen Verspannungen auf?

Am Einspannpunkt.

Piezoresistiver Effekt:

7. Aus welchen beiden Effekten setzt sich der piezoresistive Effekt zusammen?

Änderung des elektrischen Widerstands aufgrund:

- Geometrieänderung
- Änderung des spezifischen Widerstands bzw. der Materialeigenschaften: Anzahl und Beweglichkeit der Ladungsträger werden durch äußere Kräfte signifikant verändert

8. Welcher der beiden Effekte überwiegt in welchen Materialien?

- Geometrieänderung: in Metallen und Isolatoren (im Promille-Bereich)
- Änderung der Änderung des spezifischen Widerstands bzw. der Materialeigenschaften: in Halbleitern (sehr ausgeprägt)

9. Wie viel piezoresistive Konstanten gibt es für Silizium (kubisches Gitter) und wie kann man sie messen?

- Es gilt 3 Konstanten: π_{11} , π_{12} und π_{44}
- Wir legen ohne mechanische Spannungen σ ein elektrisches Feld E an den Siliziumwürfel und messen den Strom I --> wir berechnen den spezifischen Widerstand ρ_0 . Wir lassen mechanische Spannungen σ_i in verschiedenen Richtungen auf das Siliziumstück einwirken, legen in ausgewählte Richtungen ein elektrisches Feld E_i an und messen den Strom I_i --> wir können aus den 3 Gleichungen die 3 Unbekannten π_{11} , π_{12} und π_{44} berechnen

10. Was ist die Ursache für den großen piezoresistiven Effekt in Halbleitern?

- Veränderung der Ladungsträgerdichte
- Höhere Beweglichkeit der Ladungsträger (durch veränderte effektive Masse, verursacht durch veränderte Bänderkrümmung)

11. Mit welcher elektrischen Anordnung wird aus piezoresistiven Sensoren ein Signal gewonnen?

Verwendung von Messbrücken (z.B. Wheatstone-Brücke oder Viertelbrücke)

12. Welche physikalischen Größen kann man mit einem Dehnungsmessstreifen und welche mit einer Biegebalken-Anordnung messen?

- Dehnungsmessstreifen: Bestimmung von mechanischen Dehnungen
- Biegebalken-Anordnung: Messung praktisch aller mechanischen Größen über ihre Kraftwirkung

13. Beschreiben Sie eine mögliche Ausführung für einen piezoresistiven Drucksensor!

An den Aufhängepunkten einer Membran sind piezoresistive Widerstände aufgebracht, die ihren Widerstand abhängig von der Dehnung der Membran verändern

Piezoelektrischer Effekt:

14. Wodurch entsteht der piezoelektrische Effekt?

Kurzfassung:

Trennung von Ladungsschwerpunkten in Molekülen unter Einwirkung von äußeren mechanischen Kräften

Langfassung:

Die Ursache für die Piezoelektrizität sind unterschiedliche Elastizitätsmodule der kristallinen Untergitter aus positiven und negativen Ionen. Die Verschiebung der Ionen in Kristallen unter Einwirkung von äußeren mechanischen Kräften mit nichtsymmetrischen Einheitszellen verschiebt die Ladungsschwerpunkte von negativer und positiver Ladung relativ zueinander, was zu einer elektrischen Polarisierung führt. Die regelmäßige kristalline Struktur verstärkt diesen Effekt und es resultiert eine deutlich messbare elektrische Potenzialdifferenz zwischen einzelnen Flächen des Kristalls.

15. Für welche Art von Messung eignen sich piezoelektrische Sensoren besonders?

Der piezoelektrische Effekt wird besonders zur Messung von Kraftänderungen eingesetzt.

16. Wie könnte mit piezoelektrischen Materialien ein Halbleitersensor hergestellt werden?

Z.B. Transistor: Eine Kraft erzeugt eine Ladung im piezoelektrischen Gatedielektrikum (ZnO), diese Ladung verändert die Gatespannung, der Transistor ändert seinen Strom.

Kapazitive Sensoren:

17. Nach welchem Prinzip wird in kapazitiven Sensoren ein Kraftsignal erhalten?

Änderung der Kondensatorkapazität durch geometrische Veränderungen (Kondensatorfläche und Plattenabstand)

18. Wie funktioniert ein kapazitiver Drucksensor?

Eine Membran dient als Kondensatorplatte, die gegen eine andere, fest aufgehängte Kondensatorplatte beweglich ist. Durch die Veränderung des Plattenabstandes bei Druckeinwirkung verändert sich die Kapazität.

19. Wie funktioniert ein kapazitiver Flusssensor?

Eine Einschnürung im Flusskanal erzeugt einen Differenzdruck zwischen Eintritts- und Austrittskammer. Der Druckabfall verhält sich quadratisch zur Flussgeschwindigkeit.

20. Wie funktioniert ein kapazitiver Beschleunigungssensorsensor?

Realisierung eines schwingfähigen Systems mit Kondensatoren:

Bei externen Beschleunigungskräften verschiebt sich der Chip,
--> die schwingfähige, träge Masse bleibt erstmal stehen
--> Abstandsänderung im Kondensator
--> es erfolgt eine Rückrechnung auf die auslenkende Kraft

Kapitel 5: Temperatursensoren

1. Welche Bedeutung haben Temperatursensoren wirtschaftlich?

Sehr große Bedeutung: Temperatursensoren haben den größten Marktanteil bei den Sensortypen

2. Warum ist die Temperatur eine wichtige Messgröße?

Da viele Vorgänge temperaturaktiviert sind, ist es wichtig die Temperatur zu messen, zu kontrollieren und ggf. als Störgröße zu kompensieren.

3. Welche Kontakttemperatursensoren sind in Silizium integrierbar?

Thermowiderstände, Temperaturmessung mit Transistoren

Thermo-Widerstände

4. Welche Materialien können für Thermo-Widerstände eingesetzt werden und was sind ihre Vor- und Nachteile?

Metalle (z.B. Platin, Gold, Silber, Kupfer, Eisen,...):

- + In einfacher Ausführung kostengünstige Herstellung
- + Durch Lasertrimmen einfache Kalibrierung
- + Hoher Messbereich (-270°C bis +1000°C)
- + Kennlinie sehr linear
- Der Temperaturkoeffizient ist klein ($\approx 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$)
- Aufgrund des kleinen spezifischen Widerstandes von Metallen ($\mu\Omega$) lassen sich auf kleinem Raum (mm x mm) nur kleine Widerstände realisieren (meist 100 Ω)
 - > der Widerstand der Leitungen muss berücksichtigt werden
 - > 4-Leitertechnik (macht Aufwand und Kosten)

Halbleiter (z.B. Silizium):

- + Halbleiterwiderstände können über die Dotierung in sehr weiten Grenzen in ihrem Wert eingestellt werden (Standard-Wert: 1 k Ω) – für niedrige Dotierungen ist der Temperaturkoeffizient doppelt so groß wie für Metalle.
- Die reproduzierbare Einstellung geringster Dotierungen $< 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ erfordert spezielle Herstellungsverfahren.

Keramik (z.B. ReO₃, CrO₂, FeO):

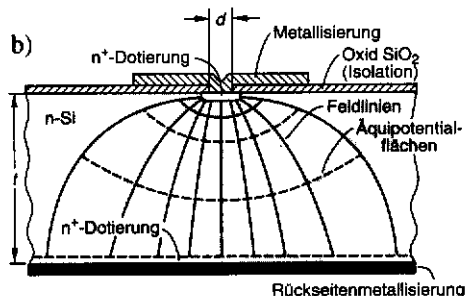
- + Temperatur-Koeffizient α kann (je nach Zusammensetzung) sowohl positiv als auch negativ⁵ sein.
- Keine Integration von Siliziumelektronik aufgrund ihres Herstellungsprozesses möglich

⁵ Wichtig z.B. für Anlauf- oder Ablaufverzögerung bei Maschinen.

5. Wie viel empfindlicher können Silizium-Widerstände gegenüber Metallen sein?

Doppelt so empfindlich.

6. Wie sieht eine praktische Ausführung eines integrierten Si-Thermowiderstandes aus?



7. Welche Möglichkeiten zur Linearisierung der Kennlinie gibt es?

Parallel- oder Serienschaltung des Thermo-Widerstands mit einem nichttemperaturabhängigen Lastwiderstand.

Zusatz:

Weshalb werden Metallwiderstände nicht mit Siliziumelektronik integriert?

- Für extreme Temperaturen $< -50^{\circ}\text{C}$ oder $> 150^{\circ}\text{C}$ arbeitet die Siliziumelektronik sowieso nicht
- Bei Integration wäre aus Platzgründen der Metallwiderstand sehr klein und Kontaktwiderstände ($\approx 0,1$ bis 1Ω) würden dominieren. Damit ginge die Genauigkeit wieder verloren --> hier haben Halbleiterwiderstände deutlich höhere Widerstände ($\text{k}\Omega$)
- Für alle bisherigen Anwendungen (z.B. Überhitzung von Elektronik oder Motoren) reicht eine ungenaue Messung ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) durchaus aus --> wird von Halbleiterwiderständen oder Temperaturdioden / -transistoren einfacher und kostengünstiger erfüllt

Dioden, Transistoren

8. Warum können Halbleiterdioden oder Transistoren als Temperatursensoren benutzt werden?

weil...:

- die Kennlinien eines pn-Übergangs temperaturabhängig sind
- bei konstanter Stromeinprägung in pn- oder pnp-Übergänge die Spannungsänderung proportional zur Temperatur ist

9. Welche Anordnung wählt man warum in der Praxis?

In der Praxis werden immer kurzgeschlossene Transistoren als Dioden eingesetzt, da hier materialbestimmte Größen im Sperrstrom (wie Diffusionslänge L oder Ladungsträgerlebensdauern) durch geometrische Größen wie Basisweite ersetzt werden können, die reproduzierbarer einstellbar sind.

Zur Vermeidung der Fertigungsstreuungen (der Sperrstrom ist immer noch in der Kennlinie) benutzt man benachbarte Transistoren (dort wird nur eine kleine Abweichung vermutet) in Stromspiegelschaltung, dann kürzen sich die (als gleichangenommenen) Sperrströme heraus.

Thermoelemente

10. Erklären Sie qualitativ die Ursache des Seebeck-Effektes!

nach „Taschenbuch der Physik“ (H. Kuchling; 16. Auflage):

Einige der frei beweglichen Elektronen können die Oberfläche eines Metalls verlassen, wenn ihre kinetische Energie mindestens gleich der Austritts- oder Ablösearbeit ist. Da diese materialabhängig ist, treten bei einer innigen Berührung zweier unterschiedlicher Metalloberflächen⁶ einige Elektronen vom Material mit niedrigerer Austrittsarbeit in das andere über. Es entsteht eine *Berührungsspannung*, die temperaturabhängig ist.

Haben die beiden Berührungsstellen dieselbe Temperatur, gleichen sich die beiden Berührungsspannungen aus⁷ – unterscheidet sich die Temperatur der Berührungsstellen, fließt als Folge einer Thermospannung⁸ ein Thermostrom.

lt. Skript:

Die (richtungsabhängige) Bandstruktur der Materialien gibt für die anwesenden Ladungsträger die möglichen Energiezustände und deren Besetzungswahrscheinlichkeiten (Zustandsdichten) vor. Entsprechend der Umgebungstemperatur haben die Ladungsträger eine Energieverteilung und besetzen damit die möglichen Energiezustände. [...] Da das Fermi-Niveau das oberste besetzte Niveau angibt, muss im thermodynamischen Gleichgewicht innerhalb eines Festkörpers *das Fermi-Niveau an allen Orten gleich sein* (sonst würden Elektronen an Orte mit niedrigerem Fermi-Niveau hinwandern, dort freie Zustände besetzen und damit das Fermi-Niveau wieder anheben).

Verändert man die Temperatur des Materials, so können sich die Anzahl der Ladungsträger, die Lage der Energiezustände, Zustandsdichten und die Besetzungswahrscheinlichkeiten ändern, und damit ändert sich auch die Fermi-Energie.

Erhitzt man nun ein Ende eines länglichen Materialstückes, so wird dort das Fermi-Niveau erniedrigt und Elektronen laufen an diese Stelle. Werden die Elektronen nicht abgesaugt, so gleicht sich das Fermi-Niveau wieder aus. allerdings ist jetzt das heiße Ende des Stabes negativ geladen, das kalte Ende positiv (ähnlich wie bei einer Batterie). Werden die beiden Enden kontaktiert, so werden laufend Elektronen nachgeliefert, es fließt ein Strom (elektromotorische Kraft).

⁶ Metalle mit unterschiedlichem Fermi-Niveaus.

⁷ Wiederherstellung des thermodynamischen Gleichgewicht – das Fermi-Niveau muss an allen Orten gleich sein.

⁸ Durch die Erhitzung erniedrigt sich am wärmeren Ende des Materialstückes das Fermi-Niveau, es ist negativ geladen --> es werden laufend Elektronen nachgeliefert.

11. Um wie viel größer ist der Seebeck-Effekt in Halbleitern gegenüber Metallen?

Um mehr als den Faktor 100.

12. Warum werden keine Halbleiterthermoelemente kommerziell hergestellt?

- Da die beiden Kontaktstellen örtlich auf einen Chip beschränkt sind, gleichen sich auf dieser Nähe Temperaturunterschiede sehr schnell aus --> Fehlmessungen
- Halbleiter sind spröde, daher auch im täglichen Umfeld nicht sehr robust
- Eingeschränkter Temperaturbereich

Bisher gibt es zwei Anwendungen:

1. Thermo-Kernreaktoren (Einsatz in Raumsonde)
2. Bolometer (Verwendung als Strahlungssensoren)

Kapitel 6: Strahlungssensoren

1. Welche Gesetze gibt es zur Beschreibung elektromagnetischer Strahlung?

- 1. Kirchhoffsches Strahlungsgesetz: Je besser ein Körper Strahlung absorbieren kann, desto besser kann er auch Strahlung emittieren ($\epsilon / \alpha = \text{konst.}$)
- Die abgestrahlte Gesamtenergie (d.h. über alle Frequenzen ν) eines "Schwarzen Strahlers" ist zur 4. Potenz seiner Temperatur proportional: $P = \epsilon(\nu) \cdot \sigma \cdot T^4$
- Quantelung der Strahlung ($E = h \cdot \nu$) in Vielfache der Konstanten h und Frequenzabhängigkeit der Strahlungsenergie über die Konstante h (Planck'sches Gesetz)

mit $\epsilon :=$ Emissionsvermögen [J/m^2], $\alpha :=$ Absorptionsvermögen [J/m^2], $T :=$ Temperatur [K],

$\nu :=$ Frequenz und $\sigma := 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ Stefan-Boltzmann-Konstante

2. Was ist ein Photon, wie wird es beschrieben?

Ein Photon ist eine Modellbeschreibung elektromagnetischer Strahlung entsprechend dem Teilchenmodell. Ein Teilchen hat die Energie $E = h \cdot \nu$ und kann damit mit Materie wechselwirken.

3. Welche Sensoren gibt es zur Erfassung von elektromagnetischer Strahlung?

- Quantensensoren: Auge, Fotofilm, Fotozelle, Fotowiderstand, Fotodiode, Fototransistor, CCD, CMOS Smart-Color Sensor
- Thermische Strahlungssensoren: Bolometer, Thermoelemente, Pyroelektrische Sensoren

4. Was ist der Unterschied zwischen einem Bolometer und einem Quantensensor?

Bolometer: keine Wellenlängenabhängigkeit, die spektrale Empfindlichkeit ist konstant <--> Quantensensor: das Sensorsignal ist proportional zum Fotostrom und damit zur Wellenlänge.

Bolometer

5. Welcher Kompromiss muss in der Anwendung von Bolometern gefunden werden?

Empfindlichkeit des Sensors <--> Ansprechzeit

6. Wie funktioniert ein pyroelektrischer Sensor?

In allen Materialien, die elektrisch polarisiert (z.B. Ferroelektika oder aufgrund von Kristallanisotropie) oder polarisierbar sind (Dielektrika im elektrischen Feld oder piezoelektrische Materialien unter mechanischen Spannungen) nimmt die Polarisierung mit der Temperatur ab (Wärmeschwingung der Atome bringt die Ausrichtung der Dipole durcheinander).

Im Idealfall ist an den Kristalloberflächen eine Ladung detektierbar, welche eine messbare Spannung am Kondensator erzeugt. In der Realität stellt sich durch Zufuhr externer Ladungen ein nach außen spannungsfreier Zustand ein. Bei Temperaturerhöhung durch Strahlung wird im Inneren die Polarisierung verkleinert, es bleibt eine messbare Spannungsänderung über. Aufgrund von Isolierungsfehlern wird die äußere Ladung der inneren Ladung angeglichen, die Spannung geht auf Null zurück.

7. Was sind typische Werte für einen pyroelektrischen Sensor?

z.B. Passiv-Infrarot-Detektor:

- Ansprechzeit: 300 ms
- Entladezeit: ≈ 1 s
- Reichweite: 7 m
- Ausgangsimpedanz: 1,6 k Ω (bei 4,5 V Betriebsspannung)
- Stromaufnahme: 0,3 mA (bei 4,5 V Betriebsspannung)

Quantensensoren

8. Wie funktioniert ein Photowiderstand? Welches Material wird hauptsächlich dafür verwendet?

Ein homogen dotierter n-Halbleiter wird mit Photonen bestrahlt. Durch die Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren ändert sich die Leitfähigkeit des Halbleiters (innerer Fotoeffekt).

verwendete Materialien:

- Für sichtbares Licht: meist aus CdS (wegen der hohen Detektivität)
- Im IR-Bereich: meist aus PbS, PbSe oder InSb (mit Kühlung, um thermisches Rauschen gering zu halten)

9. Wie funktioniert eine Photodiode?

Bestrahlt man den pn-Übergang einer Diode mit Photonen ausreichender Energie ($E > E_{\text{gap}}$), so werden in der Raumladungszone Elektronen-Loch-Paare generiert. Aufgrund des elektrischen Feldes durch den pn-Übergang laufen die Elektronen in das n-Gebiet und die Löcher in das p-Gebiet. Diese zusätzlichen Ladungsträger neutralisieren damit an den Rändern die Raumladungszone, die Raumladungszone verkleinert sich gegenüber dem strahlungslosen Zustand. Eine verkleinerte Raumladungszone ergibt bei Integration der Poissongleichung aber eine kleinere elektrische Feldstärke über der Raumladungszone, damit eine Verringerung der Barrierenhöhe. Da aber außerhalb der Raumladungszone die Barrierenhöhe durch die Dotierungen festgelegt ist, entsteht über der Raumladungszone eine messbare Spannung (Fotospaltung).

10. Durch welche Maßnahmen kann man eine Photodiode empfindlicher machen?

Die Empfindlichkeit einer Photodiode ist von der Quantenausbeute des verwendeten Materials abhängig. Die Quantenausbeute (und dessen Maximalwert) hängt wiederum von der Wellenlänge des eingestreuerten Lichts ab --> Wahl des Materials mit der größten Quantenausbeute (im gewünschten Wellenlängenbereich) – unter der Voraussetzung, dass die Ansprechzeit des Materials ausreichen gering ist.

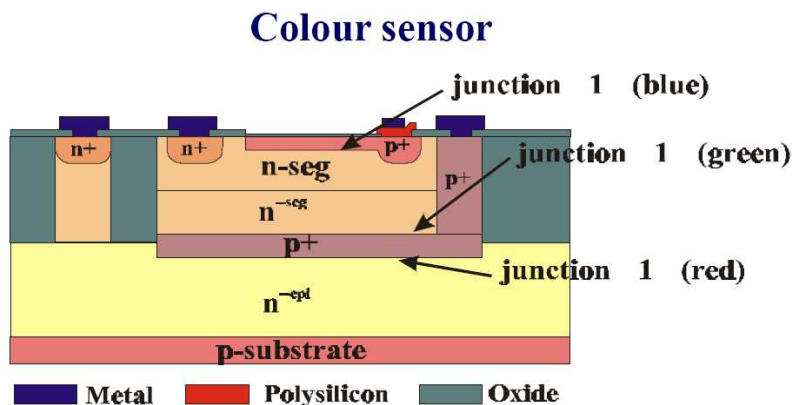
11. Wie kann man eine Photodiode positionsempfindlich machen?

Man kann die Photodiode positionsempfindlich machen, wenn man die obere p-Schicht etwas dicker und niedriger dotiert ausführt. Dann stellt die p-Schicht einen lateralen Widerstand R dar. Mit zwei Elektroden teilt sich der Fotostrom entsprechend dem ortsabhängigen Widerstandsverhältnis auf. Aus dem Verhältnis der Fotostrome kann dann die Position des Strahlungseinfallens bestimmt werden.

12. Wie funktioniert ein CMOS smart-color Sensor? Zeichnung!

Die Eindringtiefe der Photonen ist wellenlängenabhängig: hochenergetische (kurzwellige) Photonen werden sofort absorbiert und niederenergetischere (langwellige) dringen tiefer ein. Hierbei gilt ein Exponentialgesetz: $n = n_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$.

Zur Realisierung: Man baut zuerst eine Photodiode auf. Zur Farberkennung vergleicht man jeweils die Ströme der beiden Dioden mit dem Gesamtstrom und bekommt so die Farbverteilung.



Teilchensensoren

13. Welche Art von Strahlungs-Teilchen gibt es, was sind typische Energien?

Kosmische Strahlung:

- energiereiche Protonen bis 10^{20} eV (aus Supernova-Explosionen, schwarzen Löchern, unbekannter Quelle)

Kernstrahlung:

- α -Teilchen: 5,42 MeV

- β -Teilchen: Maximum bei $\frac{E_{\max}}{3}$ ($E_{\max} :=$ Maximalenergie der Strahlung; ≈ 50 keV für ^{14}C)
- γ -Teilchen: 662 keV

14. Wie wird die Energie eines Teilchens mit einem Halbleitersensor gemessen?

Mit einem Teilchenzähler: Einfallende Partikel erzeugen Elektronen-Loch-Paare (typisch: 1 e / p pro 3 eV). In einem vorgespannten pn-Übergang oder Schottky-Raumladungszone werden die Ladungsträger getrennt und gesammelt.

Zusatz:

Wirkungsprinzipien von Infrarotstrahlungssensoren:

Bauelement	Wirkungsprinzip	Grenzwellenlänge	Zeitkonstante
Fotowiderstand	innerer Fotoeffekt ⁹	200 μm	0,1 bis 800 μs
Fotodiode		16 μm	0,5 bis 500 ns
Fotozelle	äußerer Fotoeffekt ¹⁰	1,2 μm	1 bis 10 ns
Bolometer	Änderung der Gittertemperatur	20 μm	0,1 bis 30 ms
Thermoelement	thermoelektrischer Effekt	20 μm	10 bis 100 ms
pyroelektrischer Sensor	pyroelektrischer Effekt	100 μm	1 bis 100 ms
Golay-Zelle	Druckänderung in Gas	100 μm	5 bis 1000 ms

Nach welchen Kriterien werden die elektromagnetischen Strahlungssensoren ausgewählt?

Die Auswahl erfolgt in der Regel nach den Ansprechzeiten:

- Thermische Sensoren: 0,1 bis 10 Sekunden
- Quantendetektoren: μs bis ns-Bereich (Echtzeit)

⁹ Durch Lichtenergie können Valenzelektronen vom Valenz- ins Leitungsband gehoben werden --> Die Leitfähigkeit ist temperaturabhängig und eine Kühlung ist erforderlich.

¹⁰ Durch Lichtquanten werden Elektronen aus der Oberfläche eines Metalles herausgelöst.

Kapitel 7: Magnetfeldsensoren

1. Wie entsteht ein magnetisches Feld?

Durch rotierende Strahlung q .

2. Was sind typische Werte für Magnetfelder¹¹, z.B. Erdmagnetfeld?

- Erdmagnetfeld: $1 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ bis $6 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
- Haftmagnet (am Kühlschrank): $0,01 \text{ T}$
- Ferromagnet: bis $0,2 \text{ T}$
- stärkstes künstliches Magnetfeld: 40 T
- Magnetar (Neutronenstern): 10^{11} T

Hall-Sensoren

3. Erklären Sie den Hall-Effekt

Aufgrund der Lorentzkraft¹² bewegen sich Elektronen in stromdurchflossenen, bandförmigen (Halb-)Leitern nicht mehr auf geraden Bahnen, sondern werden senkrecht zur angelegten Strom- und Magnetfeldrichtung abgelenkt. In dieser Richtung entsteht als Folge der veränderten Elektronenkonzentration eine Spannung, die als Hallspannung U_H bezeichnet wird.

Die Stärke des Hall-Feldes ist umso größer, je stärker der den Leiter durchfließende Strom und je größer das angelegte Magnetfeld ist. Das Verhältnis von Hall-Spannung zum Strom bezeichnet man als Hall-Widerstand. Das Vorzeichen der Hall-Spannung hängt davon ab, ob der Strom durch die Bewegung positiver oder negativer Ladungen erzeugt wird.

4. Warum ist der Hall-Effekt in Halbleitern um vieles größer als in Metallen?

- Prinzipiell niedrigere Elektronendichte (durch sehr niedrige Dotierung¹³)
- Höhere Beweglichkeit der negativen Ladungsträger in Halbleitern

¹¹ Einheit: Tesla.

¹² Diese wirkt in Magnetfeldern auf bewegte Ladungsteilchen.

¹³ Für extrem kleine Dotierungen ($< 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) sind die Beweglichkeiten dotierungsunabhängig. Leider sind solche Reinheiten nicht herstellbar, bestenfalls 10^{13} cm^{-3} und das mit extrem hohem Aufwand.

5. Von was hängt die Größe des Hall-Effektes in Halbleitern ab?

- Stärke des angelegten Stroms
- Stärke des angelegten Magnetfelds
- Beweglichkeit μ_n der negativen Ladungsträger (je höher desto größer der Effekt)
- Der Dotierung des Halbleiters (je niedriger desto größer der Effekt)

6. Wie kann man das Problem des Offsets lösen?

Eine erste Möglichkeit dafür besteht darin, das Hall-Element quadratisch auszuführen; es wird dann abwechselnd in der einen und in der anderen Diagonalen vom Betriebsstrom durchflossen. An den anderen beiden Anschlüssen wird jeweils das Messsignal abgenommen. Durch geeignete Weiterverarbeitung hebt sich der Offsetanteil weitgehend heraus, und das bereinigte Messsignal bleibt übrig.

Eine andere Möglichkeit ist die Zusammenschaltung zweier gleicher Hall-Sensoren, aber mit Vertauschung der Kontakte. So mitteln sich die Offsets theoretisch heraus.¹⁴

7. Welche typischen Anwendungen für Hall-Sensoren gibt es?

- Strommessung (Starkstrom- und Hochspannungsbereich)
- Positionierung¹⁵ (Annäherung, Verschiebung und Drehung; Annäherungsbereich: 10 μm bis 1 cm)
- ja / nein-Positionsmessung

Zusatz:

Für eine extrem gute Leistungsumsetzung sind Halbleiter mit hohen Beweglichkeiten gut geeignet. Hier eignen sich die Halbleiter InSb, InAs, GaAs und Ge besser als Si.

Die Herstellung hochreiner InSb und InAs-Kristalle ist sehr teuer (keine etablierte Massentechnologie).

Nach Silizium ist GaAs das am kostengünstigsten hergestellte hochreine Material (bis zu 150 mm-wafer zurzeit), das zusätzlich noch mit integrierter Elektronik (MESFETs) versehen werden kann. Außerdem ist GaAs deutlich weniger querempfindlich gegen Temperatur und mechanische Spannungen als Silizium.

¹⁴ Das Ergebnis der Weiterentwicklung des Prinzips der durchgeschalteten Vertauschung ist der „Spinning-Current“-Hall-Sensor.

¹⁵ Mittels Permanentmagnet; typ. Flussdichte: 1 T.

Kapitel 9: Chemische Sensoren

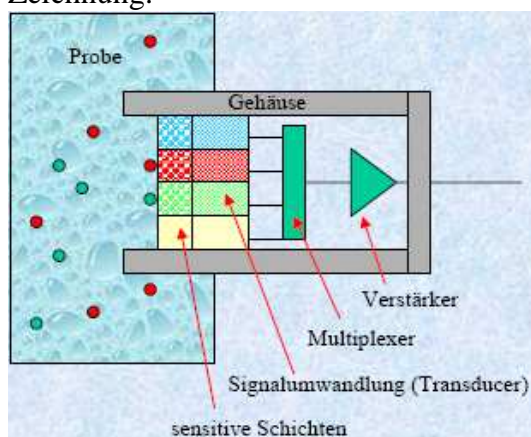
1. In welchen Bereichen werden chemische Sensoren eingesetzt?

- Luftaufbereitung und -trennung
- Petrochemie und Raffinerie
- Turbinengeneratoren
- Kernkraftwerke

2. Erklären Sie den prinzipiellen Aufbau und die Funktion eines chemischen Sensors (mit Zeichnung)!

Eine oder mehrere selektive Schichten¹⁶ werden mit dem zu messenden Stoff in Verbindung gebracht, und die daraus resultierenden Informationen über die Anwesenheit und Konzentration festgelegter chemischer Verbindungen mit einem Transducer¹⁷ in ein elektronisches umgewandelt. Bei Verwendung mehrerer Schichten werden die elektronischen Signale gemuxt. Zuletzt wird das Signal bzw. werden die Signale verstärkt.

Zeichnung:



3. Mit welchen Prinzipien kann man die Selektivität eines chemischen Sensors erhöhen?

- Durch geeignete Wahl des Schichtmaterials und / oder Vorfilter (= Membranen)
- Chemischen Reaktionen: durch Zugabe eines Katalysatormaterials
- Biochemischen Reaktionen: durch Enzyme, die nach dem "Schlüssel-Schloß"-Prinzip (key-lock) arbeiten.

¹⁶ Jede Schicht ist auf ein unterschiedliches stoffliches Element (Atome, Ionen oder Moleküle in Gase, Flüssigkeiten und Festkörpern) sensitiv.

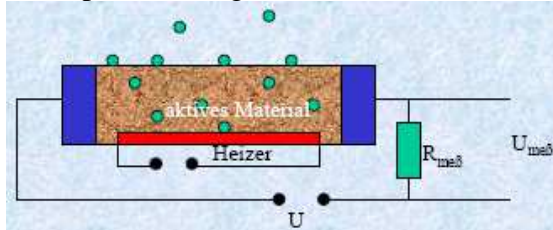
¹⁷ Ein Transducer (wörtlich: Überführer) wandelt allgemein gesehen eine Energieform (mechanische, thermische, elektrische,...) in einer andere Energieform (mechanische, thermische, elektrische,...) um.

Elektrochemische Sensoren

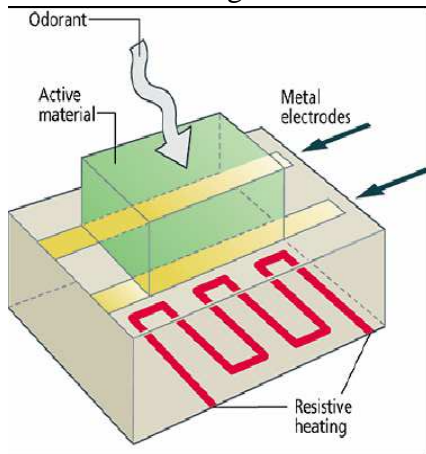
4. Beschreiben Sie Aufbau und Funktion eines Chemoresistors (mit Zeichnung)!

Durch Anlagerung oder Einbau von Fremdatomen wird die Leitfähigkeit einer chemisch aktiven Schicht verändert. Die Reaktionsfreudigkeit der Schicht kann durch eine Heizung beeinflusst werden.

Prinzip-Zeichnung:



Reale Anwendung in Dünnschicht-Technologie:



5. Nach welchem Prinzip verändert sich die Leitfähigkeit von Metalloxiden in Chemoresistoren?

Das Halbleitermaterial liegt in körniger (polykristalliner) Form vor, so dass Gase entlang der Korngrenzen tief in das Material eindiffundieren können.

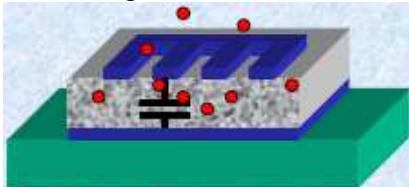
Ist das Grundmaterial nicht perfekt einkristallin, so existieren Gitterleerstellen (vacancies) mit offenen Bindungen, d.h. überflüssigen Elektronen. Bei Anwesenheit von externem Sauerstoff diffundiert dieser Sauerstoff (temperaturabhängig) in die Außenbereiche der Halbleiterkörner und bindet aufgrund seiner starken Elektronegativität dort die freien Elektronen. Es entsteht eine negativ geladene Raumladungszone, die Anzahl der freien Elektronen sei n' . Die Raumladungszone bildet eine Potenzialbarriere zwischen den Halbleiterkörnern und behindert die Leitfähigkeit. Wird der Halbleiter Gasatomen ausgesetzt, die leicht mit Sauerstoff reagieren (alle brennbaren Gase), so werden die Sauerstoffatome durch die Reaktion aus der Halbleiteroberfläche herausgesogen und es verbleiben die wieder frei gewordenen Elektronen in der Konzentration n . Diese Elektronen verringern die Potenzialbarriere zwischen den Körnern und erhöhen die Leitfähigkeit des Materials proportional zum umgesetzten Sauerstoff und damit proportional zur Konzentration des Fremdgases.

6. Beschreiben Sie Aufbau und Funktion eines Chemocapacitors (mit Zeichnung)!

Auf bzw. zwischen die Elektroden wird eine chemisch sensitive Schicht aufgebracht, die bei Anwesenheit von Fremdgasen ihre Dielektrizitätszahl ändert. Die daraus resultierende Kapazitätsänderung wird nachgewiesen.

Typische Kapazitätsänderungen sind im Bereich von pF und stark abhängig von der Betriebsfrequenz und den Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchte).

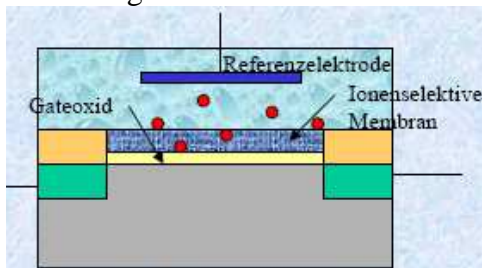
Zeichnung:



7. Beschreiben Sie Aufbau und Funktion eines ISFETs (mit Zeichnung)!

Der ISFET ist ein MOSFET ohne Gate-Metallisierung. Das Gate (nur mit Isolator) wird direkt einem Elektrolyten ausgesetzt, der Ionen enthält. Die Ionenladung wirkt wie eine Gate-Ladung und verschiebt die Einsatzspannung des FETs. Diese Verschiebung führt zu einer Stromänderung, die ein Maß für die Ionenkonzentration ist.

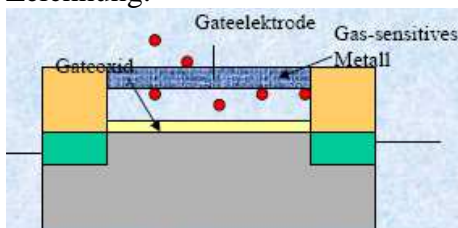
Zeichnung:



8. Beschreiben Sie Aufbau und Funktion eines Suspended-Gate FETs (mit Zeichnung)!

Der Suspended-Gate FET ist ein MOSFET mit einem gassensitiven, *abgehobenen Gate*. Durch die Anlagerung von Gasatomen verändern sich die Austrittsarbeit der Gateelektrode und damit die Einsatzspannung des FET. Die dadurch hervorgerufene Stromänderung ist ein Maß für die Konzentration der Gasatome. Durch das abgehobene Gate werden die Gasatome sofort im Gatefeld aktiv und können zu größeren Verschiebungen der Einsatzspannung führen.

Zeichnung:

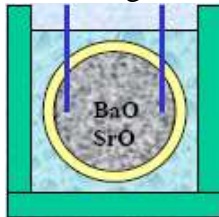


Thermochemische Sensoren

9. Beschreiben Sie Aufbau und Funktion eines Chemo-Thermistors (mit Zeichnung)!

Die klassische Ausführung des Thermistors besteht aus einer gesinterten¹⁸ Keramik (Metalloxid = Halbleiter) mit zwei Kontakten in einer Glashülle. Der Sensor ist klein, billig, chemisch inert. Der Sensor wird in eine bekannte Lösung mit dem Ausgangsstoff A gegeben, dann wird eine unbekannte Konzentration des Stoffes B zugegeben. Die Reaktionswärme erwärmt den Halbleiter, der ändert seine Leitfähigkeit.

Zeichnung:



10. Worauf beruht die hohe Empfindlichkeit eines Chemo-Thermistors?

- Auf der Auswertung mittels der Wheatstone-Brücke
- Auf dem relativ großen Temperaturkoeffizient α ($\approx 4\%/K$)

¹⁸ Heiß- und/oder druckgepresst.

Kapitel 10: Biosensoren

1. In welchen beiden Bereichen werden Biosensoren eingesetzt?

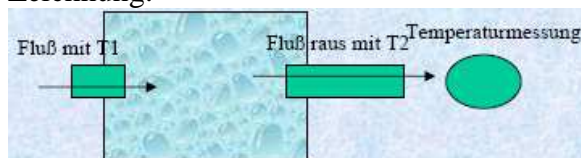
- Analyse (biochemische Sensoren)
- Biologische Anwendungen (biomedizinische Sensoren)

Biochemische Analyse-Sensoren

2. Erklären Sie den prinzipiellen Aufbau und die Funktion eines Enzym-Thermoresistors (mit Zeichnung)!

Im Reaktor befindet sich ein Enzym, das den nachzuweisenden Stoff unter Energieumsetzung umwandelt. Die Energieumsetzung führt zu einer Temperaturänderung der Flüssigkeit, die proportional zu der umgesetzten Stoffmenge ist. Die Temperaturänderung kann leicht mit 2 Brückenwiderständen in einer Wheatstone-Brücke in ein Spannungssignal umgewandelt werden.

Zeichnung:



3. Mit welchen beiden Prinzipien kann man die Reaktion in einem DNS-Sensor nachweisen?

- Fluoreszenzmessung von mit Fluoreszenzmarkern präparierten DNA-Stücken
- Verbiegung von mikromechanischen Fingern bei Ablagerung von komplementären Teilsträngen der DNA

4. Was sind die Unterschiede zwischen einem Enzym-Sensor und einem Immunosensor?

Enzym-Sensor: Ein Stoff wird über ein Enzym unter Energieumsetzung umgewandelt --> Auswertung mittels Temperaturmessung leicht möglich

<--> Immuno-Sensor: Einer unbekannt Menge an bekannten Antigenen wird eine bestimmte Konzentration speziell markierter Antigene¹⁹ zugegeben. Es kommt zu einer spezifisch ablaufenden Reaktion des Antigen-Antikörper-Paares²⁰. Am Ende wird die Probe ausgewertet und die Konzentration der unmarkierten Antikörper berechnet --> keine direkte Anzeige möglich

¹⁹ Markierung z.B. durch Radioaktivität oder ein Enzym.

²⁰ Antikörper lassen sich, im Gegensatz zu Enzymen, seit 1980 in beliebigen Mengen herstellen.

Biomedizinische Sensoren

5. Nennen Sie einige typische Anwendungen für Biomedizinische Sensoren!

- Blutsensoren: Blutdruck und Blutanalyse
- Intelligente Pille
- Mikroimplantate für Sinnesorgane

6. Wie könnte ein Nervenstecker funktionieren?

Mögliche Funktionsweise bei Umgehung einer Nervenblockade (z.B. Querschnittslähmung):

- Der Patient macht eine Willensäußerung (z.B. spricht das Wort „greif“)
- Die Willensäußerung wird in ein elektrisches Signal umgewandelt und nach der Lähmstelle in den Nerv eingekoppelt
- Die Hand bewegt sich
- Der Patient trägt an der gelähmten Hand einen Handschuh mit Sensoren (Position, Kraft), die wiederum Meldungen an eine externe Datenverarbeitung senden. Diese beendet nach vordefinierten Regeln (z.B. Endposition erreicht, Druck zu groß,...) die Nervenreizung

Mögliche Funktionsweise bei Ankopplung einer Prothese an intakten Nerv:

- Dem Patient wurde die Hand amputiert, der Nerv ist bis zur Amputationsstelle intakt
- Der Nerv wird kurz vor der Amputationsstelle aufgetrennt, ein löchriges Mikroelektrodenarray wird eingefügt und vom Nerv durchwachsen
- Die Nervenimpulse vom zentralen Nervensystem (ZNS) über das periphere Nervensystem (PNS) werden vom Array aufgenommen und in elektrische Signale umgewandelt, mit denen die Prothese gesteuert wird
- Sensoren an der Prothese geben Rückmeldung an das Nervensystem, der Patient kontrolliert die Aktion