

4 Sensor- und Aktoreffekte

Die Komponenten eines Mikrosystems lassen sich unter Anwendung der Prozesse der Halbleitertechnologie, teilweise ergänzt um spezielle Bearbeitungsschritte, entweder gemeinsam auf einem Substrat oder unabhängig voneinander mit jeweils optimierten Prozessen herstellen. Damit diese einzelnen Funktionsgruppen jedoch als System zusammenwirken können, müssen Schnittstellen zum Informationsaustausch zwischen den Gruppen vorgesehen werden.

Insbesondere ist die Erfassung von Umweltgrößen über einen Sensor als Eingangssignal für ein Mikrosystem unerlässlich. Die zu messende Größe sollte möglichst ohne Zeitverzögerung mit hoher Empfindlichkeit erfasst werden. Jedoch bewirkt erst die Ausgabe in Form einer zur Verfügung gestellten elektrischen oder mechanischen Leistung eine vollständige Systemfunktion.

Die Erfassung einer in integrierten Schaltungen verarbeitbaren Information erfolgt über Sensoren oder Transducer. Sie wandeln die über einen physikalischen oder chemischen Effekt gemessene Umweltgröße in ein elektrisches Signal, z. B. in eine Widerstandsänderung oder in ein Strom- oder Spannungssignal. Im Gegensatz zu den Sensoren, die eine Umweltgröße mithilfe einer Hilfsenergie in eine elektrisch messbare Größe umsetzen, wandeln Transducer eine zugeführte Energieform in eine andere, zumeist elektrische Energieform um. Am Ende der Signalerfassung steht davon unabhängig jeweils ein elektrisch verwertbares Signal zur Verfügung.

Zur Signalverarbeitung, d. h. zur Verstärkung, Filterung, digitalen Umsetzung, logischen Entscheidung oder temporären Speicherung, werden heute nahezu ausschließlich mikroelektronische Schaltungen genutzt. Der übliche Aufbau beinhaltet eine Verstärkung des Sensorsignals, eine analog/digital-Umsetzung des Signals und eine logische Verarbeitung der aufgenommenen Information. Optische oder magnetische Systeme unterstützen häufig die Signalerfassung oder Speicherung. Sie liefern am Ausgang in der Regel ein elektrisches Steuersignal bzw. ihr nichtelek-

trisches Ausgangssignal wird zur Weiterverarbeitung in ein elektrisches Signal umgesetzt.

Die Aktorik besteht bei vielen Mikrosystemen aus einem integrierten oder externen Leistungstransistor, der zur Steuerung eines mechanischen Elementes dient. Alternativ lassen sich auch über thermoelektrische oder elektrostatische Kräfte bewegliche mikromechanische Komponenten direkt auf einem Chip ansteuern. Jedoch ist bislang die Zahl der sinnvollen Anwendungen für integrierte mechanische Aktoren wegen der relativ geringen zur Verfügung stehenden Leistungen begrenzt.

4.1 Sensoreffekte

Um eine Information aus der Umwelt zu erfassen oder eine Prozessgröße zu ermitteln, muss die Wirkung dieses externen Einflusses auf das zur Signalerfassung eingesetzte Wirkprinzip des Sensors festgestellt werden. Die nachzuweisenden Informationen sind im allgemeinen Umweltgrößen: Druck, Temperatur, Drehrate, Beschleunigung, Strömungsgeschwindigkeit, Feldstärke etc..

Über spezielle physikalische Effekte lassen sich diese Größen in ein elektrisches Signal umsetzen. Im Folgenden werden wichtige physikalische Effekte, die sich für eine Integration als Sensor in einem Mikrosystem eignen, vorgestellt.

4.1.1 Thermische Effekte

Die Temperatur eines Materials beeinflusst den elektrischen Widerstand durch eine Änderung der Ladungsträgerdichte (NTC-Widerstand) oder der Ladungsträgerbeweglichkeit bzw. der Ladungsträgerstreuung am Kristallgitter (PTC). Für Metalle mit einer hohen Zahl an freien Ladungsträgern wirken sich in einem weiten Temperaturbereich die Gitterschwingungen auf die Bewegung der Elektronen aus, sodass mit wachsender Temperatur die Streuung der Ladungsträger zunimmt und damit der Widerstand einer Metallbahn steigt.

Der bekannteste Metallwiderstandssensor zur Temperaturmessung ist der Pt100-Messwiderstand mit einem Widerstand von $100\ \Omega$ bei 0°C . Er lässt sich in der Mikrosystemtechnik in Form von gesputterten Platinleiterbahnen integrieren, allerdings wirkt Platin als Verunreinigung in pn-Übergängen als Rekombinations-/Generationszentrum, sodass z. B. in mikroelektronischen Verstärkerschaltungen erhöhte Diodenleckströme auftreten können.

Die Widerstandszunahme infolge der wachsenden Streuung der Ladungsträger an den mit der Temperatur zunehmenden Gitterschwingungen lässt sich im Bereich von 0°C - 900°C durch Gleichung (4.1) annähern:

$$R(T[^\circ\text{C}]) = R_0 [1 + 3,908 \times 10^{-3} T - 5,802 \times 10^{-7} T^2] \quad (4.1)$$

Aufgrund des geringen Einflusses des quadratischen Terms lässt sich zwischen 0°C und 100°C ein Temperaturkoeffizient β_{Pt} angeben:

$$\beta_{Pt} = 3,85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (4.2)$$

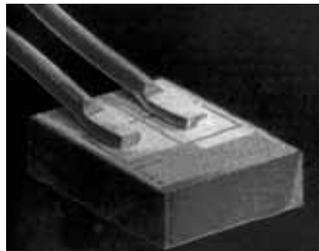


Bild 4.1: Integrierter Pt-100 Messwiderstand zur Temperaturerfassung [27/

Im Vergleich zum Metallwiderstandssensor treten im Halbleiter zwei entgegengesetzt wirkende Effekte auf. Eine Temperaturerhöhung kann zu einer Anhebung der Ladungsträgerdichte führen, gleichzeitig nimmt aber auch die Ladungsträgerbeweglichkeit durch Streuung am Kristallgitter ab. Entscheidend für die tatsächliche Widerstandsänderung des Halb-

leitematerials ist die Energiedifferenz der Bandlücke in Relation zur Temperatur. Bild 4.2 zeigt die Ladungsträgerkonzentration in Silizium in Abhängigkeit von der Temperatur zur Verdeutlichung des Effektes.

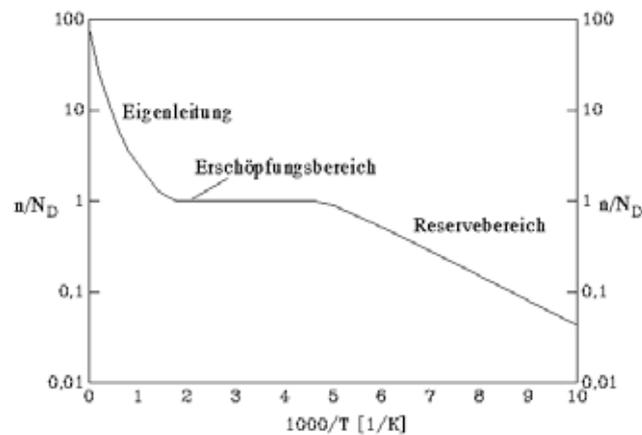


Bild 4.2: Temperaturabhängigkeit der in Relation zur Dotierstoffkonzentration aufgetragenen Ladungsträgerdichte in Silizium

Die Kurve lässt sich in 3 Bereiche einteilen:

- Reservebereich: Die thermische Energie reicht bei niedriger Temperatur nicht zur Ionisierung aller Dotierstoffatome aus, sodass die Anzahl der freien Ladungsträger kleiner ist als die vorhandene Dotierstoffkonzentration.
- Erschöpfungsbereich: Aufgrund der thermischen Aktivierung sind alle Dotierstoffatome ionisiert, folglich entspricht die Dichte der Ladungsträger im Leitungsband der Dotierstoffdichte.
- Eigenleitungsbereich: Ladungsträger aus dem Valenzband gelangen bei hohen Temperaturen durch thermische Aktivierung ins Leitungsband, sodass die Ladungsträgerdichte mit der Temperatur exponentiell zunimmt.

Im Temperaturbereich zwischen ca. -50°C und 150°C befindet sich der Siliziumkristall im Erschöpfungsbereich, sodass nur die Beweglichkeit

μ_n der Ladungsträger als temperaturabhängige Größe die Leitfähigkeit σ des Materials bestimmt. Für n-leitendes Silizium gilt:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e n \mu_n \quad (4.3)$$

Folglich wächst der spezifische Widerstand ρ des Halbleiters mit steigender Temperatur, da die Beweglichkeit μ_n sinkt (Bild 4.3).

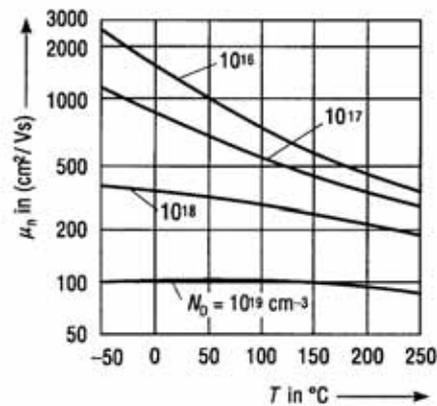


Bild 4.3: Elektronenbeweglichkeit in Silizium in Abhängigkeit von der Temperatur und der Dotierstoffkonzentration [28/

Für den Ausbreitungswiderstand eines beidseitig ganzflächig kontaktierten Stück Halbleitermaterials der Länge l mit dem Querschnitt A gilt bei einer Dotierung N_D in Abhängigkeit von der Temperatur T :

$$R(T) = \rho(T) \frac{l}{A} = \frac{1}{N_D e \mu_n(T)} \frac{l}{A} \quad (4.4)$$

Im Fall einer integrierten Schaltung lässt sich der Widerstand zwischen einer kleinflächigen Kontaktöffnung und einer halbkugelförmigen Gegenelektrode berechnen. Es gilt mit der Nomenklatur aus Bild 4.4 für die Widerstandsänderung dR im Abstand r bei einer Radiusänderung dr :

$$dR = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (4.5)$$

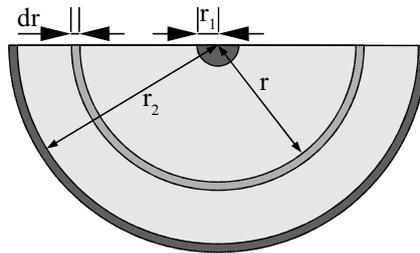


Bild 4.4: Modell zur Berechnung des Ausbreitungswiderstandes bei einer fast punktförmigen Kontaktfläche

Daraus folgt durch Integration:

$$R = \rho \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.6)$$

Mit $r_1 \ll r_2$ folgt:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_1} \quad (4.7)$$

Für eine reale Geometrie mit planarer Scheibenrückseite im Abstand D vom Kontakt mit dem Durchmesser d folgt mit $d \ll D$ als Ergebnis:

$$R = \frac{\rho}{2d} = \frac{1}{2en\mu_n(T)d} \quad (4.8)$$

Wird die Temperatur eines Halbleiters über den Erschöpfungsbereich hinaus gesteigert, so geht das Material in den eigenleitenden Zustand über. Die Ladungsträgerkonzentration n_i steigt exponentiell, entsprechend nimmt die Leitfähigkeit des Siliziums zu.

$$n_i = \text{const.} \cdot T^{3/2} e^{\frac{-\Delta W}{2k_B T}} \quad (4.9)$$

Das Bauelement zeigt eine NTC-Charakteristik (Negative Temperature Coefficient), die zwar grundsätzlich zur Temperaturmessung geeignet ist, allerdings oberhalb des zulässigen Arbeitsbereichs mikroelektronischer Schaltungen liegt. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur lässt sich in diesem Fall durch die Funktion:

$$R(T) = A e^{\frac{B}{T}} \quad (4.10)$$

Ein Temperatursensor mit einem weiten Erfassungsbereich ist das Thermoelement. Der thermoelektrische Effekt, auch Seebeck-Effekt genannt, nutzt die thermische Beeinflussung des elektrischen Kontaktpotenzials zweier Metalle zur Temperaturmessung. Herrscht in einem homogenen Leiter ein Temperaturgradient, so reichern sich die Elektronen am kalten Ende des Materials an. Dabei hängt der Grad der Anreicherung vom Seebeck-Koeffizienten des Materials ab, sodass an der Berührungsstelle zweier verschiedener Metalle eine Potentialdifferenz entsteht.

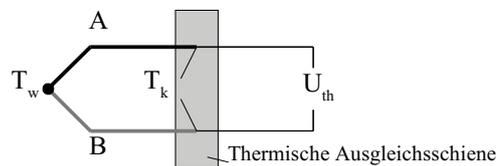


Bild 4.5: Thermoelement zur Erfassung der Temperatur T_w in Relation zur Referenztemperatur T_k

Um diese Differenz messen zu können, müssen die Anschlusskontaktstellen auf definierter Temperatur liegen. Die messbaren Spannungen betragen, je nach Materialpaarung, einige Mikrovolt pro Kelvin. An der Berührungsstelle der Materialien A und B mit den Seebeck-Koeffizienten ε_A und ε_B tritt bei einer Temperaturdifferenz $T_w - T_k$ eine Thermospannung U_{th} auf: