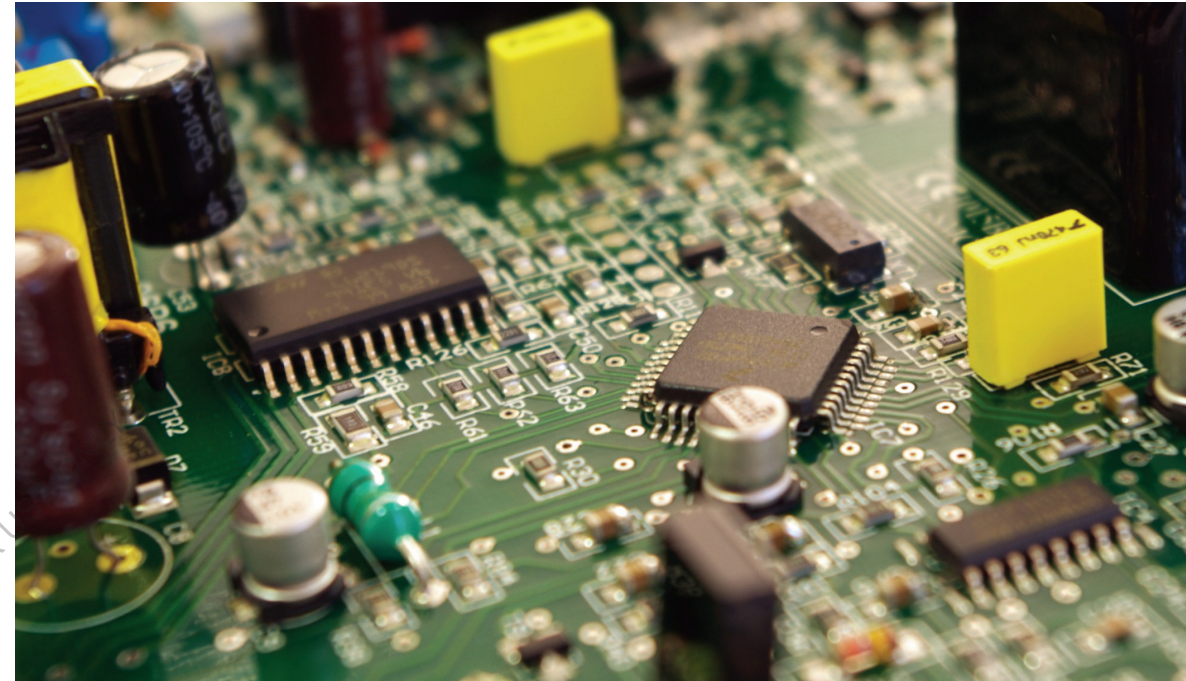


# ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN

Fragen der Struktur und der Eigenschaften von Materialien, die in elektrischen und elektronischen Geräten verwendet werden, werden umrissen. Es werden elektrophysikalische Effekte und Phänomene in Leitern, Dielektrika, Halbleitern und magnetischen Materialien betrachtet. Besondere Aufmerksamkeit wird den kinetischen Effekten in Halbleitern, den Eigenschaften von Halbleitergrundstoffen, Metallen und Nanomaterialien gewidmet. Es werden Beispiele für die praktische Anwendung der betrachteten Materialien gegeben. Für Studenten der technischen Hochschulen der Fachrichtungen Elektrotechnik, Elektronik, Automatisierungstechnik und Funktechnik.

Mykola Gorbachuk hat einen Dokortitel in Physik und Mathematik mit Spezialisierung auf Halbleiter- und dielektrische Physik. Er arbeitet in der Abteilung für Angewandte Physik und Höhere Mathematik an der Nationalen Universität für Technologie und Design Kiew, Ukraine.



**Mykola Gorbachuk**

# ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN

*Tutorial*



**Mykola Gorbachuk**

**ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN**

FOR AUTHOR USE ONLY

**Mykola Gorbachuk**

# **ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN**

**Tutorial**

FOR AUTHOR USE ONLY

**ScieniaScripts**

## **Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

This book is a translation from the original published under ISBN 978-620-3-46212-8.

Publisher:

Scientia Scripts

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova, Europe

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-7-18613-6**

Copyright © Mykola Gorbachuk

Copyright © 2024 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

## **Einführung**

### **Elektrotechnische Materialien - aktueller Stand, Entwicklungsperspektiven**

Der moderne wissenschaftliche und technologische Fortschritt ist eng mit der Entwicklung und Beherrschung neuer Werkstoffe verbunden. Die Werkstoffe sind zu einem wichtigen Bindeglied geworden, das den Erfolg vieler technischer Lösungen bei der Entwicklung von elektrischen und elektronischen Geräten bestimmt. Daher wird der Werkstoffkunde ein wichtiger Platz eingeräumt.

Die intensive Entwicklung von Wissenschaft und Technik ist nicht möglich, ohne das Problem der Verbesserung der Qualität und der Kosteneffizienz von Materialien, der materiellen Grundlage eines jeden Produkts, zu lösen. Neue Materialien sind das Ergebnis einer eingehenden Untersuchung der wirtschaftlichen, funktionellen und verbraucherrelevanten Eigenschaften verschiedener Stoffe sowie der Technologie ihrer Herstellung und Verarbeitung.

Die Praxis stellt ständig vielfältige und immer strengere Anforderungen an die Eigenschaften und die Kombination von Eigenschaften von Werkstoffen. Dementsprechend wächst die Anzahl und Bandbreite der Werkstoffe. Heute geht die Zahl der in der Elektrotechnik für verschiedene Zwecke verwendeten Werkstoffe in die Zehntausende.

# Kapitel 1. Allgemeine Informationen über elektrische Materialien

## 1.1. Klassifizierung von elektrischen Materialien

Elektrische Werkstoffe sind Materialien, die sich durch bestimmte Eigenschaften in Bezug auf das elektromagnetische Feld auszeichnen und in der auf diesen Eigenschaften basierenden Technik verwendet werden. Die verschiedenen Eigenschaften von Materialien werden durch elektrische oder magnetische Felder einzeln oder in Kombination beeinflusst.

Je nach ihrem Verhalten in einem Magnetfeld werden elektrische Materialien in stark magnetische (Magnete) und schwach magnetische unterteilt. Erstere werden aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften besonders häufig in der Technik eingesetzt.

Je nach ihrem Verhalten in einem elektrischen Feld werden die Materialien in Leiter, Halbleiter und Dielektrika unterteilt. Die meisten elektrischen Materialien können als schwach magnetisch oder praktisch nicht magnetisch eingestuft werden. Aber auch bei den Magneten sollte zwischen Leitern, Halbleitern und praktisch Nichtleitern unterschieden werden.

Leiter sind Materialien, deren wichtigste elektrische Eigenschaft die starke elektrische Leitfähigkeit ist. Ihre Verwendung in der Technik ist hauptsächlich auf diese Eigenschaft zurückzuführen, die die hohe spezifische elektrische Leitfähigkeit bei Normaltemperatur bestimmt. Halbleiter sind Materialien, die in Bezug auf die Leitfähigkeit zwischen leitenden und dielektrischen Materialien liegen. Dielektrika sind Materialien, deren wichtigste elektrische Eigenschaft die Fähigkeit ist, sich zu polarisieren und in denen ein elektrostatisches Feld existieren kann. Üblicherweise werden Materialien mit einem spezifischen Widerstand von  $\rho < 10^{-5}$  Ohm·m als Leiter und Materialien mit einem spezifischen Widerstand von  $\rho > 10^8$  Ohm·m als Dielektrika bezeichnet. Abhängig von der Struktur und Zusammensetzung der Materialien sowie von ihren Betriebsbedingungen kann der spezifische Widerstand von Halbleitern im Bereich von  $10^{-10}$  -  $10^{28}$  Ohm·m variieren. Metalle sind gute Leiter des elektrischen Stroms. Es ist schwierig, eine klare Linie zwischen den Widerstandswerten verschiedener Materialien zu ziehen. Zum Beispiel verhalten sich viele Halbleiter bei niedrigen Temperaturen wie Dielektrika. Gleichzeitig können Dielektrika die Eigenschaften von Halbleitern aufweisen, wenn sie auf hohe Temperaturen erhitzt werden. Der qualitative Unterschied besteht darin, dass der leitende Zustand bei Metallen der Grundzustand ist, während er bei Halbleitern und Dielektrika der angeregte Zustand ist.

Aus Sicht der Bandtheorie gelten Metalle als Materialien ohne Bandlücke ( $E_g = 0$ ), Halbleiter mit  $E_g = 0-2$  eV und Dielektrika mit  $E_g \geq 2$  eV.

Ein reales Dielektrikum kommt dem idealen Dielektrikum umso näher, je geringer seine spezifische Leitfähigkeit und je weniger ausgeprägt seine langsamen Polarisationsmechanismen sind, die mit der Ableitung von elektrischer Energie und der Wärmeerzeugung verbunden sind.

In der Technik werden sowohl passive als auch aktive Eigenschaften von Dielektrika genutzt. Die passiven Eigenschaften dielektrischer Materialien werden genutzt, wenn sie als elektrische Isoliermaterialien und als Dielektrika für herkömmliche Kondensatoren verwendet werden. Elektroisierstoffe sind Dielektrika, die das Entweichen elektrischer Ladungen verhindern, d. h. sie werden verwendet, um Stromkreise voneinander oder leitende Teile von Geräten, Instrumenten und Apparaten von leitenden Teilen zu trennen. In diesen Fällen spielt die Dielektrizitätskonstante des Materials keine besondere Rolle. Wird ein Material als Dielektrikum für einen Kondensator mit einer bestimmten Kapazität und kleinsten Abmessungen verwendet, so ist es unter sonst gleichen Bedingungen wünschenswert, dass dieses Material eine hohe Dielektrizitätskonstante hat.

Zu den aktiven Dielektrika gehören Ferroelektrika, Piezoelektrika, Pyroelektrika, Elektrolumineszenzmaterialien, Materialien für Emitter und Gates in der Lasertechnik sowie Elektrete.

Die Entwicklung der Funktechnik hat zur Schaffung von Materialien geführt, die spezifische Hochfrequenzeigenschaften mit den erforderlichen physikalischen und mechanischen Parametern verbinden. Solche Materialien werden als Hochfrequenzwerkstoffe bezeichnet.

Um die elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen sowie die Ursachen ihrer Alterung zu verstehen, sind Kenntnisse über ihre chemische und Phasenzusammensetzung, atomare Struktur und strukturelle Defekte erforderlich.

## **1.2. Arten von chemischen Bindungen in Stoffen**

Ein Molekül ist ein Elementarteilchen, das die Eigenschaften des einen oder anderen Stoffes besitzt. Ein Molekül besteht aus Atomen. Die wichtigsten Elementarteilchen, aus denen alle bekannten Stoffe (ihre Moleküle, Atome) aufgebaut sind, sind wiederum Protonen, Neutronen und Elektronen. Protonen und Neutronen bilden die Atomkerne; Elektronen füllen die Schalen des Atoms und gleichen die positive Ladung des Kerns aus.

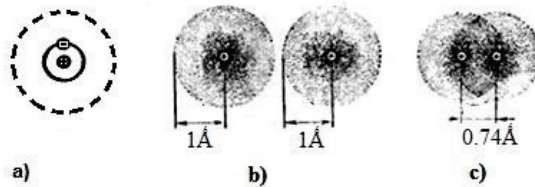


Abb. 1.1. Struktur des Wasserstoffatoms und des Moleküls  $H_2$ .

Ein Wasserstoffatom zum Beispiel besteht aus einem Proton und einem Elektron. In einem einfachen Planetenmodell des Atoms umkreist dieses Elektron den Kern des Atoms (Abb. 1.1, a). In der Quantenmechanik wird die Bewegung des Elektrons durch eine Wellenfunktion beschrieben, die in einem isolierten Wasserstoffatom kugelsymmetrisch ist, so dass die Elektronenladung verteilt ist und eine unscharfe Wolke bildet (Abb. 1.1, b).

Es gibt mehrere Arten von chemischen Bindungen zwischen Atomen.

**Homöopolare (kovalente) Bindung.** Bei dieser Bindung wird die Vereinigung von Atomen zu einem Molekül durch Elektronen erreicht, die den Atompaaren gemeinsam werden. Die Dichte der negativ geladenen Elektronenwolke zwischen den positiv geladenen Kernen ist dann am höchsten.

Ein Beispiel für eine homöopolare oder kovalente Bindung ist das Molekül  $H_2$  (Abb. 1.1, c). Die Überlappung der Elektronenwolken, die zur Elektronenverdrängung führt, geht mit einer erheblichen Umverteilung der Elektronendichte und einer Änderung der Energie des Systems einher. Wenn Elektronen vergesellschaftet werden, werden Elektronenwolken in den Raum zwischen den Kernen gezogen. Das Entstehen eines Zustands mit erhöhter Elektronenladungsdichte im Kernzwischenraum führt zum Auftreten von Anziehungskräften.

Die homöopolare Bindung beruht auf einer Austauschwechselwirkung oder einem Austauscheffekt, der durch den Austausch von Elektronen zwischen Atomen verursacht wird und rein quantenmechanischer Natur ist. Die Kräfte einer solchen Wechselwirkung werden als Austauschkräfte bezeichnet, und ihre Energie wird als Austauschenergie bezeichnet. Das wichtigste Merkmal der Austauschkräfte ist ihre starke Abhängigkeit von der Richtung der Elektronenspins, die die Bindung zwischen den wechselwirkenden Atomen herstellen. Die Bindung ist nur dann stark, wenn die Spins antiparallel sind. Homöopolare Bindungen sind in einer bestimmten Weise im Raum ausgerichtet und werden nur zwischen den nächsten Nachbaratomen gebildet.



Moleküle mit homöopolaren Bindungen können unipolar oder polar (dipolar) sein, mit symmetrischer oder asymmetrischer Struktur. Moleküle, bei denen die Zentren der positiven und negativen Ladungen zusammenfallen, werden als unipolar bezeichnet. Wenn die Zentren der Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen nicht zusammenfallen und sich in einiger Entfernung voneinander befinden, werden solche Moleküle als polar oder dipolar bezeichnet. Beispiele für unpolare und polare Moleküle sind in Abb. 1.2 dargestellt.

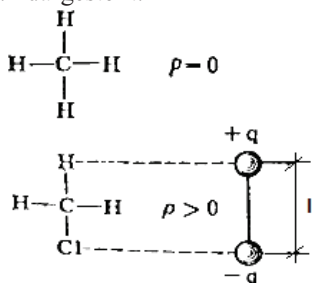


Abb. 1.2. Polare ( $p > 0$ ) und unpolare ( $p = 0$ ) Moleküle ( $p$  ist das Dipolmoment).

Die homöopolare Bindung ist typisch für organische Moleküle. Sie kann jedoch auch in Festkörpern anorganischen Ursprungs beobachtet werden, wenn ihr Kristallgitter aus Atomen besteht. Beispiele für solche Stoffe sind Diamant, Silizium, Germanium, Siliziumkarbid usw. Die Struktur von Diamant ist in Abb. 1.3 dargestellt, die zeigt, wie jedes Atom vier Bindungen mit seinen nächsten Nachbarn eingeht.

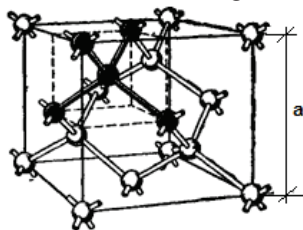


Abb. 1.3. Modell des Diamantgitters.

Die kovalente Bindung zeichnet sich durch hohe Festigkeit aus. Dies wird durch die hohe Härte und den hohen Schmelzpunkt von Substanzen wie Diamant und Siliziumkarbid bestätigt.

**Heteropolare (ionische)** Bindungen entstehen durch die Übertragung von Valenzelektronen von einem Metallatom auf ein Metalloidatom und durch die elektrostatische Anziehung von unterschiedlich geladenen Ionen zueinander. Diese Art der chemischen Bindung wird in ionischen Kristallen realisiert. Ein typisches Beispiel für

Ionenkristalle sind die Halogenidsalze der Alkalimetalle. Abb. 1.4 zeigt die Strukturen von Natriumchlorid- und Cäsiumchloridkristallen. Ionische Gitter zeichnen sich durch eine hohe Koordinationszahl aus, die die Anzahl der nächstgelegenen Ionen mit entgegengesetztem Vorzeichen angibt. Bei NaCl-Kristallen beträgt die Koordinationszahl beispielsweise 6, bei CsCl-Kristallen 8.

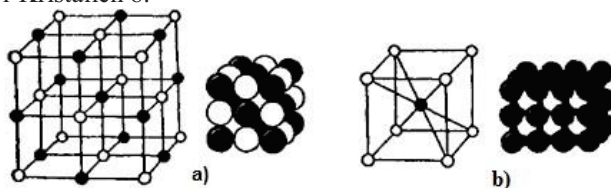


Abb. 1.4. Strukturen von Natriumchlorid- (a) und Cäsiumchlorid- (b) Kristallen.

Die Fähigkeit eines Atoms, bei der Bildung einer chemischen Bindung ein Elektron aufzunehmen, wird durch seine Elektronegativität gekennzeichnet. Ein ungefähres Maß für die Elektronegativität eines Atoms  $x$  ist die Halbsumme aus der Ionisierungsenergie  $E_i$  und der Elektronenaffinität  $E_c$

$$x = 0,5 (E_i + E_c)$$

Alkalimetallatome haben die niedrigste Elektronegativität, da sie leicht ein Elektron abgeben und eine geringe Affinitätsenergie haben. Im Gegensatz dazu haben Halogenatome die höchste Elektronegativität, da sie leicht ein Elektron aufnehmen, um die äußere Elektronenhülle zu vervollständigen. Je größer der Unterschied in der Elektronegativität der an der Bildung einer chemischen Bindung beteiligten Atome ist, desto größer ist der Grad der Ionizität der Verbindung.

Metallische Bindungen bestehen in Systemen, die aus positiven Atomrückgraten in einer Umgebung freier kollektiver Elektronen aufgebaut sind (Abb. 1.5, a). Die Anziehungskraft zwischen den positiven Atomrückgraten und den Elektronen bestimmt die Integrität des Metalls.

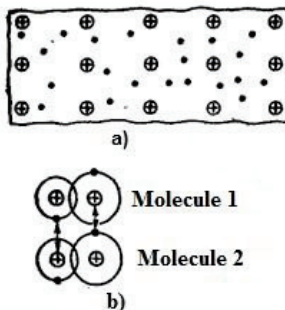


Abb. 1.5. a) Metallbindung, b) Schema der Bildung von Molekülbindungen.

Metallische Bindungen können bis zu einem gewissen Grad als kovalente Bindungen betrachtet werden, da sie auf der gemeinsamen Nutzung von externen Valenzelektronen beruhen. Die Besonderheit der metallischen Bindung besteht darin, dass alle Atome des Kristalls an der gemeinsamen Nutzung von Elektronen beteiligt sind und die gemeinsam genutzten Elektronen nicht in der Nähe ihrer Atome lokalisiert sind, sondern sich frei im gesamten Gitter bewegen und ein "Elektronengas" bilden. Da es keine lokalisierten Bindungen gibt, brechen Metallkristalle (im Gegensatz zu ionischen Kristallen) nicht zusammen, wenn sich die Positionen ihrer Atome ändern, d. h. sie zeichnen sich durch Plastizität (Duktilität) bei Verformung aus. Aufgrund der Anwesenheit freier Elektronen haben Metalle eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit.

**Molekulare Bindungen oder Van-der-Waals-Bindungen werden** zwischen Molekülen in Substanzen mit kovalenter Wechselwirkung innerhalb der Moleküle beobachtet. In diesem Fall ist das Vorhandensein einer intermolekularen Anziehung durch die koordinierte Bewegung von Valenzelektronen in benachbarten Molekülen möglich (Abb. 1.5, b). Zu jedem Zeitpunkt sollten die Elektronen so weit wie möglich voneinander entfernt und so nah wie möglich an positiven Ladungen (Kernen) sein. Dann sind die Anziehungskräfte der Valenzelektronen durch den Kern eines benachbarten Moleküls stärker als die Kräfte der gegenseitigen Abstoßung der Elektronen in den Schalen dieser Moleküle.

Eine solche Anziehungskraft zwischen fluktuierenden elektrischen Dipolen wird als Dispersionswechselwirkung bezeichnet. Die Van-der-Waals-Bindung ist die universellste, sie tritt zwischen beliebigen Teilchen auf, aber sie ist die schwächste Bindung, ihre Energie ist etwa zwei Größenordnungen niedriger als die Energie von Ionen- und kovalenten Bindungen. Da die Dispersionswechselwirkung sehr schwach ist, sind Molekülbindungen nur dann deutlich sichtbar, wenn sie zwischen Atomen oder Molekülen auftreten. Molekulare Bindungen werden leicht durch thermische Bewegung zerstört. Daher haben Molekülkristalle niedrige Schmelzpunkte (z. B. hat Paraffin einen Schmelzpunkt von 50-52° C).

### **1.3. Kristalle. Die Struktur des Kristallgitters. Millersche Indizes**

In Einkristallen sind die Atome in einer geordneten Weise angeordnet. Eine solche geordnete Anordnung von Atomen wird als Kristallgitter bezeichnet. Die charakteristischste Eigenschaft des Einkristallgitters ist die Translationssymmetrie. Jeder Knoten des Gitters kann durch den Vektor  $\vec{r}$  beschrieben werden.

$$\vec{r} = h\vec{a} + k\vec{b} + l\vec{c} \quad (1.1),$$

wobei  $h, k, l$  ganze Zahlen sind.

Die Länge der Vektoren  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  hängt von der Struktur des Kristallgitters ab. Die Fläche, die von den drei Vektoren  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  gebildet wird, wird als Einheitszelle bezeichnet. Ein makroskopischer Kristall wird durch periodische Wiederholung zahlreicher Einheitszellen gebildet. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Einheitszellen zu wählen. Je nachdem, wie die Knoten des Kristallgitters angeordnet sind, gibt es 14 Strukturen, die als Brave-Gitter bezeichnet werden. Während  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  die Länge der Hauptvektoren ist, die eine Einheitszelle bilden, werden Brave-Gitter nach der Größe der Winkel zwischen diesen Vektoren klassifiziert. Abbildung 1.6 zeigt zwei der einfachsten Brave-Gitter: ein einfaches kubisches Gitter (a) und ein kubisch-flächenzentriertes Gitter (b):

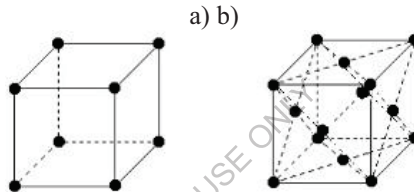


Abb. 1.6. Mutiges Gitter - einfacher kubischer Körper (a) und flächenzentrierter kubischer Körper (b).

Die Hauptthalbleiter der 4. Gruppe (Si, Ge) des Periodensystems kristallisieren im so genannten diamantartigen Gitter (Abb. 1.3). In diesem Fall sind die vier nächstgelegenen Atome in gleichem Abstand zueinander angeordnet und bilden ein regelmäßiges Tetraeder (Abb. 1.7):

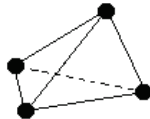


Abb. 1.7. Modell der Anordnung der Atome in einem diamantartigen Gitter.

Da Kristalle eine periodische Struktur haben, unterscheiden sich ihre Eigenschaften für verschiedene kristallographische Richtungen und Ebenen. Dies zeigt sich in den elektrischen Eigenschaften von Einkristall-Halbleitern, in ihrer Ätzung, Epitaxie, Diffusion, Oxidation usw. Zur Bezeichnung der kristallographischen Richtungen und Ebenen in Einkristallen werden Miller-Indizes verwendet, die wie folgt definiert sind (Abb. 1.8):

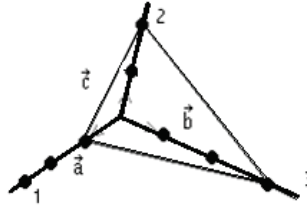


Abb. 1.8. Definition der Millerschen Indizes

Die Position eines der Atome wird als Ursprung gewählt, von dem aus die Koordinatenachsen in die Richtungen der Hauptvektoren gezogen werden.

Die Schnittpunkte der imaginären kristallographischen Ebene mit diesen Koordinatenachsen werden als ganze Zahlen ausgedrückt, wobei die Längen der Hauptvektoren als Einheit genommen werden. In der Abbildung werden diese Schnittpunkte durch die Zahlen 1, 3, 2 dargestellt.

Der Kehrwert dieser ganzen Zahlen wird mit ihrem kleinsten gemeinsamen Nenner multipliziert, wodurch sich ein einfaches Verhältnis von ganzen Zahlen ergibt.

Wenn diese Zahlen mit  $h, k, l$  bezeichnet werden, dann ist ihr Ausdruck in Klammern  $(hkl)$  der Miller-Index für diese Ebene. Für unsere Figur erhalten wir:

$$\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}\right) \cdot 6 = (623)$$

Bei Kristallen (Einkristallen) hat jede der Ebenen, z. B.  $(110)$ ,  $(100)$ ,  $(111)$ , in jedem Querschnitt des Kristalls die gleichen Eigenschaften. Die Technologie zur Herstellung von Halbleiterbauelementen, insbesondere solche Vorgänge wie Ätzen, Diffusion und Oxidation, haben je nach Ausrichtung ihre eigenen Besonderheiten. Daher werden diese Merkmale bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen berücksichtigt.

#### 1.4. Der Unterschied zwischen idealen und realen Kristallen. Gitterschwingungen und Kristalldefekte

In realen Kristallen ist das Gitter nicht perfekt und weist verschiedene Kristalldefekte auf. Daher weichen in vielen Fällen die elektrischen und optischen Eigenschaften von Halbleitermaterialien von denen ab, die für ideale Kristalle berechnet wurden. Bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen, wie z. B. Transistoren, werden diese Abweichungen vom idealen Kristall berücksichtigt und kontrolliert, um die gewünschten Bauelementeigenschaften zu erhalten.

Es gibt verschiedene Arten der Abweichung von der idealen Kristallstruktur. Wenn sich Atome in den Knotenpunkten eines idealen Kristallgitters befinden, dann schwingen sie unter dem Einfluss thermischer Energie in einem bestimmten Temperaturbereich relativ zur Position des stabilen Gleichgewichts. Die Elektronen werden durch diese thermischen Schwingungen gestreut. Diese Schwingungen werden als Gitterschwingungen oder Phononen bezeichnet. Betrachtet man die Schwingungen der Atome eines Kristalls als Ganzes, so lassen sich diese Schwingungen aufgrund der Periodizität der Kristallstruktur als Überlagerung der Schwingungen einer Reihe von harmonischen Oszillatoren darstellen. Jeder dieser Oszillatoren kann als ein einziges Quasiteilchen, ein Phonon, betrachtet werden.

Zu den Kristalldefekten gehören neben den Gitterschwingungen auch die nichtperiodische Anordnung der Atome in einem Kristall - Gitterdefekte. Punktdefekte spielen eine wichtige Rolle bei den Mechanismen der elektrischen Leitfähigkeit von Halbleitern. Punktdefekte können sich zu einer anderen Art von Defekten - Versetzungen - zusammenschließen. Heutzutage wurden große Fortschritte bei der Herstellung defektfreier Kristalle, insbesondere von Silizium, erzielt.

Die in einen Halbleiterkristall eingebrachten Verunreinigungsatome bestimmen sowohl die Art als auch das Ausmaß seiner elektrischen Leitfähigkeit und anderer Eigenschaften. Durch die Steuerung des Einbringens von Verunreinigungsatomen lassen sich verschiedene elektrophysikalische Eigenschaften von Materialien erzielen, die für die Herstellung von Transistoren und großen integrierten Schaltungen (VLSI) verwendet werden.

Wenn das Si-Atom im Silizium-Kristallgitter durch ein Element der Gruppe V, wie z. B. Phosphor (P), ersetzt wird, dann hat die äußere Schale des P-Atoms ein zusätzliches Elektron, das sich frei durch den Kristall bewegen kann, was seine elektrische Leitfähigkeit erhöht. Wenn ein Element der Gruppe III, wie z. B. Bor (B), zu Silizium hinzugefügt wird, fehlt ein Valenzelektron. Dieses fehlende Elektron, d. h. aus Sicht der Bändertheorie ein Loch, das sich in der Nähe der Decke des Valenzbandes befindet und sich frei durch den Kristall bewegen kann, wirkt sich ebenfalls auf die elektrische Leitfähigkeit aus.

Im ersten Fall wird die elektrische Leitfähigkeit durch Elektronen bestimmt - Teilchen, die eine negative Ladung tragen; solche Halbleiter werden als n-Typ-Halbleiter bezeichnet, und die Mischungsatome, die den Kristall mit zusätzlichen Elektronen versorgen, werden als Donatoren bezeichnet.

Im zweiten Fall wird die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern durch Löcher bestimmt, die eine positive Ladung tragen, und sie werden

als p-Typ-Halbleiter bezeichnet, und die Fremdatome, die die Löcher liefern, werden als Akzeptoren bezeichnet.

In einem Halbleiter wie GaAs sind die Donatoren Elemente der Gruppe VI, wie Schwefel (S) und Tellur (Te), und die Akzeptoren sind Elemente der Gruppe II, wie Beryllium (Be) und Zink (Zn).

### 1.5. Struktur der Energiezonen

Es ist bekannt, dass Elektronen Welleneigenschaften haben. Die Theorie, die diese Eigenschaften beschreibt, wurde in der Schrödinger-Wellenmechanik entwickelt. In dieser Theorie wird die Wellenfunktion  $\psi$  verwendet, um ein vereinheitlichtes System von Wellen- und Teilcheneigenschaften darzustellen. Der Ausdruck  $|\psi|^2$  wird als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezeichnet. Die physikalische Bedeutung der Wellenfunktion besteht darin, dass der Ausdruck  $|\psi|^2 \cdot dv$  die Wahrscheinlichkeit des Auftretens (oder der Existenz) eines durch die Funktion  $\psi$  beschriebenen Teilchens in einem Zeitintervall  $t$  in einem Volumen  $dv$  bestimmt. Mit anderen Worten: Die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines Elektrons in einer Zeit  $t$  in einem Volumen  $dv$  wird durch das Quadrat der Amplitude seiner Wellenfunktion bestimmt.

Nach der Wellenmechanik besteht eine Beziehung zwischen dem Quasimoment  $p$  eines freien Teilchens und dem Wellenvektor  $k$ :

$$p = \hbar k \quad , (1.2)$$

wobei  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  .

Die Energie eines freien Teilchens ist mit seiner Masse durch die Formel verbunden:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad . (1.3)$$

Vergleichen wir die Elektronen im Vakuum mit ihrem Zustand in einem Einkristall.

In einem idealen Einkristall sind die Atome periodisch in einem angemessenen Abstand zueinander angeordnet. Atome bestehen aus positiv geladenen Kernen und Elektronen mit einer entsprechenden negativen Ladung. In Kristallen, wie z. B. Silizium, umkreisen die Elektronen der äußeren Schale nicht nur ihren eigenen Kern, sondern auch benachbarte Atome und bilden kovalente interatomare Bindungen. Diese Elektronen werden als Valenzelektronen bezeichnet.

Bei einer bestimmten Temperatur erhalten einige der Valenzelektronen zusätzliche Energie, lösen sich aus der Bindung an ein Atom und beginnen, sich im gesamten Kristall zu bewegen, d. h. es kommt zur Ionisierung. Diese Elektronen werden als freie Elektronen oder Leitungselektronen bezeichnet. Für ein einzelnes (einsames) Atom sind die Energieniveaus der Elektronen diskret. In einem Kristall übersteigt die

Anzahl der Atome jedoch  $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , so dass sich unter dem Einfluss benachbarter Atome kontinuierliche Energiebänder bilden. Ein Diagramm der Bildung von Energiebändern bei der Annäherung von Atomen ist in Abbildung 1.9 dargestellt:

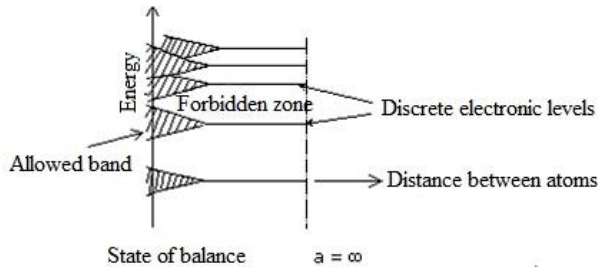


Abb. 1.9. Schema der Bildung von Energiezonen.

Die diskreten Niveaus eines einzelnen Atoms dehnen sich zu Energiebändern aus, wenn sich die Abstände zwischen den Atomen im Kristall verringern.

Die schattierten Bereiche können Elektronen enthalten und werden daher als erlaubte Bänder bezeichnet. In den Lücken zwischen diesen Bereichen gibt es keine Elektronen. Diese Energiebereiche werden als verbotene Bänder bezeichnet. Das Vorhandensein von verbotenen und erlaubten Bändern ist der wichtigste Faktor, der die elektrischen und optischen Eigenschaften von Festkörpern bestimmt.

Die Schlussfolgerung über das Vorhandensein von Energiebändern in Kristallen lässt sich auch aus anderen Überlegungen ziehen. In Kristallen bildet sich aufgrund der positiven Ladungen der Atomkerne, die in einer bestimmten Reihenfolge angeordnet sind, und der negativen Ladungen der Elektronen, die diese positiven Ladungen umgeben, ein periodisch variierendes Potenzial. Für Elektronen in einem solchen periodischen Potenzial gibt es keine kontinuierliche Energieverteilung mehr. An dieser Stelle kommen die Welleneigenschaften der Elektronen ins Spiel. Das einfachste Modell, das die Welleneigenschaften von Elektronen in einem periodischen Potenzial erklärt, ist das Cronig-Penney-Modell:

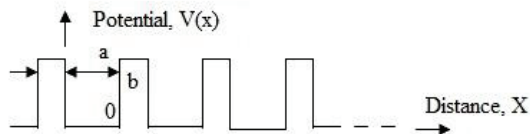




Abb. 1.10. Rechteckiges eindimensionales periodisches Potential.

Bestimmen wir die Beziehung zwischen der Elektronenenergie und dem Wellenvektor (oder Impuls) in einem rechteckigen eindimensionalen periodischen Potential (Abb. 1.10)

Die Schrödinger-Gleichung für diesen Fall wird in der Form geschrieben:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(x))\psi(x) = 0 \quad , (1.4)$$

wobei  $V(x)$  das periodische Potential und  $\psi(x)$  die Elektronenwellenfunktion ist.

Die Wellenfunktion eines Elektrons in einem periodischen Potential  $V(x)$  wird durch die Bloch-Funktion ausgedrückt:

$$\psi(x) = e^{ikx}U(x) \quad , (1.5)$$

wobei  $U(x)$  in ähnlicher Weise variiert wie  $V(x)$ .

Löst man die Schrödinger-Gleichung (1.4) unter Berücksichtigung dieser Tatsache, so erhält man die Beziehung zwischen der Elektronenenergie  $E(k)$  und dem Wellenvektor  $k$  (Abb. 1.11(a)):

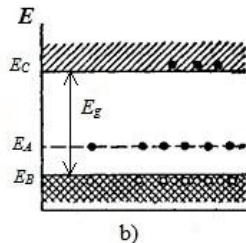
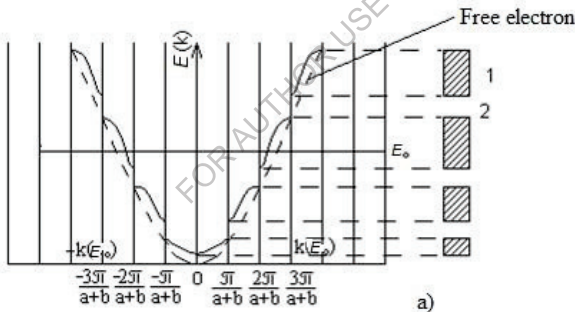


Abb. 1.11. a - Abhängigkeit der Elektronenenergie  $E$  vom Wellenvektor  $k$ , b - Bandstruktur eines p-Typ Halbleiters (Akzeptor)

Im Diagramm erscheinen Unstetigkeiten in der Funktion  $E(k)$  an den Punkten  $\frac{\pi}{a+b}$ , d. h. es erscheinen erlaubte und verbotene Energiebänder, wie auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt.

Bei der Erklärung vieler elektrophysikalischer Eigenschaften von Halbleitern werden die Elemente der Bandstruktur in der in Abb. 1.11(b) dargestellten Form verwendet. Dabei ist  $E_B$  das obere Energieniveau des Valenzbandes,  $E_C$  das untere Energieniveau des Leitungsbandes,  $E_A$  das Energieniveau, das durch die Akzeptorverunreinigung gebildet wird, und  $E_g$  die Breite der Bandlücke. In dem obigen Modell der Bandstruktur werden die Leitfähigkeit und andere kinetische Effekte durch das Vorhandensein von Löchern (Abwesenheit von Elektronen) im Valenzband und von Elektronen im Leitungsband erklärt. Die Löcher im Valenzband entstehen durch den Übergang von Elektronen auf das Akzeptorniveau und in das Leitungsband.

## 1.6. Brillouin- und reduzierte Zonen

Verschiebt man den Ausgangspunkt des Graphen der Funktion  $E(k)$  (siehe Abb. 1.11) zu den Punkten von  $\frac{2\pi n}{(a+b)}$ ,  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ , so erhält man völlig übereinstimmende Abschnitte der entsprechenden Graphen. Dies entspricht der Tatsache, dass der Transfer eines Elektrons im Raum eines periodischen Potentials oder eines reellen Kristalls in einer Entfernung  $(a+b)$  dem Transfer auf  $\frac{2\pi n}{(a+b)}$  im  $k$ -Raum vollständig entspricht. Um die Zweideutigkeit der Definition des Elektronenwellenvektors im Kristall zu beseitigen, nehmen wir daher an, dass die Funktion  $E(k)$  nur in der Region  $\frac{-\pi}{(a+b)} \leq k \leq \frac{\pi}{(a+b)}$  in der Abbildung definiert ist. Die Abschnitte des Graphen der Funktion  $E(k)$ , die außerhalb dieses Bereichs liegen, werden mit einem entsprechenden Vorzeichenwechsel in die Mitte dieses Abschnitts übertragen, und wir erhalten den Graphen der Funktion  $E(k)$  in Abbildung 1.12.

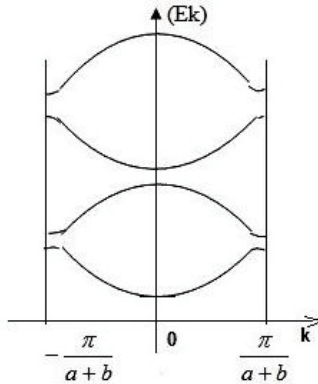


Abb. 1.12. Die erste Brillouin-Zone

Diese Transformation wird als Darstellung von reduzierten Zonen bezeichnet, und der Bereich  $-\frac{\pi}{a+b} \leq k \leq \frac{\pi}{a+b}$  wird als erste Brillouin-Zone bezeichnet.

Ähnliche Überlegungen gelten für zwei- und dreidimensionale Kristallgitter. Bei echten dreidimensionalen Kristallen hängt es von ihrer Kristallstruktur ab, zum Beispiel von der Art der Symmetrie. So haben beispielsweise Silizium und GaAs kubisch-flächenzentrierte Gitter, so dass ihre Brillouin-Bänder die gleiche Form haben.

Die  $E(k)$ -Funktion für reale Kristalle ist dreidimensional und befindet sich in den meisten Fällen nur innerhalb des ersten Brillouin-Bandes. Eine solche dreidimensionale Funktion  $E(k)$  wird als Energiebandstruktur bezeichnet.

### 1.7. Effektive Masse, Elektronen und Löcher

Die Energie und der Impuls der Elektronen in einem Kristall sind durch eine komplexe Funktion (die Struktur der Energiebänder) miteinander verbunden, die von der Struktur des Kristallgitters abhängt.

Die Struktur der Energiebänder bestimmt die elektro-optischen Eigenschaften von echten Kristallen. Daher sollte man bei der Entwicklung von Halbleiterbauelementen mit den gewünschten Eigenschaften einen Halbleiter mit der am besten geeigneten Energiebandstruktur wählen.

Betrachten wir die Bewegung von Elektronen in einem elektrischen Feld in einem Kristall - einen elektrischen Strom. Wir gehen davon aus, dass alle Elektronen, die sich in einer bestimmten Region befinden, durch

eine einzige Wellenfunktion beschrieben werden, die wir als Wellenpaket bezeichnen. Die Geschwindigkeit eines Wellenpakets von Elektronen ist die Gruppengeschwindigkeit  $V_g$  :

$$V_g = \frac{dw}{dk} = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{dE}{dk} \quad , (1.6)$$

wobei  $w$  - Eckfrequenz,  $E = \hbar w$

Die Energie, die ein Elektron in einem elektrischen Feld der Stärke  $E$  über eine Zeitspanne  $dt$  aufnimmt, wenn es sich um eine Strecke  $dx$  bewegt, ist gleich:

$$dE = -eE dx = -eE V_g \cdot dt \quad . (1.7)$$

Aus den Ausdrücken (1.2), (1.6), (1.7) lässt sich ableiten:

$$\frac{dp}{dt} = -eE = F \quad , (1.8)$$

wobei  $F$  - die Kraft, die auf ein Elektron in einem elektrischen Feld  $E$  wirkt.

Wir wollen zeigen, dass (1.8) dem zweiten Newtonschen Gesetz der klassischen Mechanik entspricht. Wir differenzieren 1.6 in Bezug auf  $t$  und erhalten mit Hilfe von (1.8):

$$\frac{dV_g}{dt} = \left( \frac{1}{\hbar^2} \cdot \frac{d^2 E}{dk^2} \right) \cdot F \quad . (1.9)$$

Wenn Sie die Notation  $m^* \equiv \frac{\hbar^2}{(d^2 E / dk^2)}$  eingeben. ( 1.10 )

Dann können wir (1.9)  $m^* \cdot \frac{dV_g}{dt} = F$  schreiben. ( 1.11 )

Somit entspricht (1.8) tatsächlich dem zweiten Newtonschen Gesetz. Der Wert  $m^*$  wird als die effektive Masse des Elektrons im Kristall bezeichnet.

Für reelle dreidimensionale Kristalle ist  $k$  der Wellenvektor des Kristalls und  $m^*$  eine Tensorgröße (abhängig von der Richtung im  $k$ -Raum).

Nehmen wir an, dass die Bewegung der Elektronen und damit auch der elektrische Strom innerhalb einer erlaubten Zone stattfindet. Wenn die Geschwindigkeit des  $i$ -ten Elektrons  $V_i$  ist, dann kann der Strom im Volumen  $V$  bestimmt werden:

$$I = -\frac{e}{V} \sum_i V_i \quad , (1.12)$$

wobei  $\Sigma$  die Addition über alle Elektronen im Band ist.

Wenn die Zone vollständig mit Elektronen gefüllt ist, ist der Strom durch sie  $I = 0$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Form der Zone symmetrisch zur Achse bei  $k = 0$  ist, und wenn wir  $V_i$  (siehe 1.6) innerhalb

der Zone integrieren, heben sich die positiven und negativen Teile des Integrals gegenseitig auf.

Nehmen wir an, dass die Elektronen, die sich in der Nähe des oberen Endes des Bandes befinden, das Band unter dem Einfluss von Wärmeenergie verlassen und einen elektronenfreien (oder leeren) Zustand bilden. Dann erhalten wir aus (1.12):

$$I = -\frac{e}{V} [\sum_i V_i - \sum_h V_h] \quad , (1.13)$$

wobei  $V_h$  die Geschwindigkeit der leeren Zustände in der Zone und  $\Sigma$  die Summe der Geschwindigkeiten aller Zustände in der Zone ist.

Das heißt, unter  $\sum_i V_i = 0$  erhalten wir: 
$$I = \frac{e}{V} \sum_h V_h \quad . (1.14)$$

)

Aus (1.14) folgt, dass auch Zustände, die nicht mit Elektronen gefüllt sind, zum elektrischen Strom beitragen. Diese Zustände bewegen sich wie Teilchen, die eine positive Ladung tragen, und werden Löcher genannt.

Da am Stromfluss in Halbleitern sowohl Elektronen als auch Löcher beteiligt sind, sind beide Ladungsträger.

### 1.8. Struktur der Silizium-Energiebänder

Bei einer Temperatur von absolutem Nullpunkt füllen die Elektronen den Bereich mit der Energie  $E \leq 0$ , der als Valenzbereich bezeichnet wird. Das Band mit  $E > 0$  ist völlig frei. Wenn die Temperatur jedoch steigt, werden einige der Elektronen im Valenzband angeregt und füllen das Band mit  $E > 0$  teilweise auf. Diese Elektronen sind an der elektrischen Leitfähigkeit des Halbleiters beteiligt, so dass dieser Bereich als Leitungsband bezeichnet wird.

Zeichnet man einen zur  $k$ -Achse parallelen Schnitt knapp über dem Rand des Leitungsbandes, so ergeben sich zwei Punkte, die auf der  $\langle 100 \rangle$ -Achse in Silizium liegen. Im dreidimensionalen  $k$ -Raum werden diese Punkte in isoenergetische Flächen umgewandelt. Diese Flächen sind Rotationsellipsoide mit der Hauptachse in den Richtungen  $\langle 100 \rangle$  für Silizium und z.B.  $\langle 111 \rangle$  für Germanium. Silizium hat sechs äquivalente Energieminima (Täler) und für einen bestimmten Energiewert sechs Ellipsoide im  $k$ -Raum (Abb. 1.13):

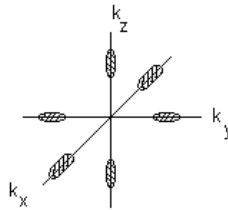


Abb. 1.13. Isoenergetische Flächen des Leitungsbandes von Silizium

Ähnliche Schnitte in der Nähe des Randes des Valenzbandes ergeben Paare von Punkten gleicher Energie, die im dreidimensionalen  $k$ -Raum zu gewellten Kugeln werden (Abb. 1.14), deren Zentrum bei  $k = 0$  liegt.

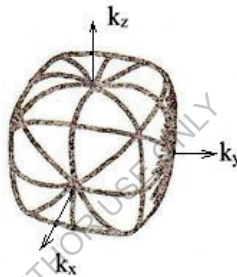


Abb. 1.14. Isoenergetische Flächen im  $k$ -Raum in der Nähe der Decke der schweren Löcher im Valenzband von Silizium und Germanium

Die Valenzbanddecke besteht aus zwei unterschiedlich gekrümmten Energiebändern, die sich bei  $k = 0$  schließen, und einem dritten, darunter liegenden Band. Eine vergrößerte Ansicht des Bereichs nahe der Valenzbanddecke ist in Abbildung 1.15 dargestellt:

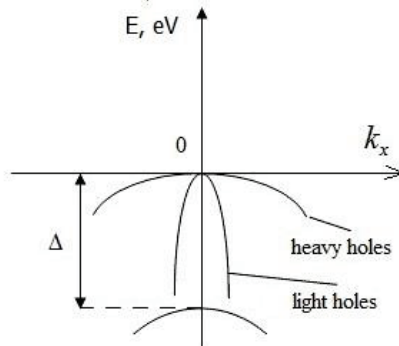


Abb. 1.15. Das Valenzband von Silizium. Energiezonen

Die effektive Masse der Ladungsträger im Valenzband besteht aus drei skalaren Größen. In der Zone mit kleinem Krümmungsradius befinden sich sogenannte leichte Löcher mit einer effektiven Masse  $m_l^*$  und in der Zone mit größerem Krümmungsradius schwere Löcher mit einer effektiven Masse  $m_h^*$ . Die dritte Zone, die von den beiden anderen durch eine Energielücke  $\Delta$  getrennt ist, wird durch die Wechselwirkung von Elektronenspins mit ihren orbitalen magnetischen Momenten gebildet. Dieser Effekt wird als Spin-Orbit-Aufspaltung bezeichnet. In Silizium beträgt der Wert von  $\Delta$  0,035 eV, und bei Raumtemperatur füllen Löcher dieses dritte Band.

In dem Energiebereich zwischen dem unteren Ende des Leitungsbandes und dem oberen Ende des Valenzbandes gibt es keine Elektronen. Dieser Bereich wird als Bandlücke bezeichnet. Materialien, in denen das verbotene Band aufgrund der gegenseitigen Überlappung der erlaubten Energiebänder nicht vorhanden ist, sind selbst bei absoluter Nulltemperatur elektrisch leitfähig, d. h. sie sind Metalle.

Die Struktur der Energiebänder hängt von Druck und Temperatur ab, da Druck und Temperatur die Gitterkonstante verändern.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Kapitel 2. Leiter. Elektrophysikalische Eigenschaften von Leitern

### 2.1. Allgemeine Informationen

Elektrischer Strom kann durch feste und flüssige Stoffe und unter bestimmten Bedingungen auch durch Gase übertragen werden.

Metalle, Metalllegierungen und einige Modifikationen von Kohlenstoff sind feste Leiter. Metalle leiten Strom und Wärme gut. In der elektronischen Technik spielen Metalle eine wichtige Rolle.

Zu den flüssigen Leitern gehören geschmolzene Metalle und Elektrolyte. In der Regel ist der Schmelzpunkt von Metallen hoch. Bei normalen Temperaturen kann nur Quecksilber, das einen Schmelzpunkt von  $-39\text{ °C}$  hat, als Flüssigmetalleiter verwendet werden. Gallium hat ebenfalls einen Schmelzpunkt nahe der Normaltemperatur ( $29,8\text{ °C}$ ).

Der Mechanismus des Stromflusses durch Metalle in festem und flüssigem Zustand wird durch die Bewegung freier Elektronen verursacht, weshalb sie als Leiter mit elektronischer elektrischer Leitfähigkeit oder Leiter erster Art bezeichnet werden.

Elektrolyte oder Leiter der zweiten Art sind Lösungen von Säuren, Laugen und Salzen sowie Schmelzen von ionischen Verbindungen. Der Stromdurchgang durch solche Leiter ist mit der Übertragung von Molekülteilen (Ionen) zusammen mit elektrischen Ladungen verbunden, wodurch sich die Zusammensetzung des Elektrolyten allmählich ändert und Elektrolyseprodukte an den Elektroden freigesetzt werden.

Alle Gase und Dämpfe, einschließlich Metaldämpfe, sind bei geringen elektrischen Feldstärken nicht leitend. Liegt die Feldstärke jedoch über einem bestimmten kritischen Wert, der das Einsetzen von Schock und Photoionisation gewährleistet, kann das Gas zu einem Leiter werden (elektronische und ionische Leitfähigkeit). Stark ionisiertes Gas wird unter bestimmten Bedingungen zu einem Medium, das als Plasma bezeichnet wird.

### 2.2. Elektrische Leitfähigkeit von Metallen

Die klassische elektronische Theorie der Metalle, die von Drude und Lorentz entwickelt wurde, basiert auf der Vorstellung eines Elektronengases, das aus freien (kollektivierten) Elektronen besteht. Dem Elektronengas werden die Eigenschaften eines idealen Gases zugeschrieben, d. h. die Bewegung der Elektronen gehorcht den Gesetzen der klassischen Statistik. Wenn wir davon ausgehen, dass die Atome in einem Metall einmal ionisiert sind, ist die Konzentration der freien Elektronen gleich der Konzentration der Atome und kann mit der Formel berechnet werden:

$$n = \frac{\rho}{A} N_o, \quad (2.1)$$



wobei  $\rho$  die Dichte des Materials,  $A$  die Atommasse und  $N_0$  die Avogadro-Zahl ist.

Im Rahmen der allgemeinen Physik wird mit Hilfe der kinetischen Theorie der idealen Gase die gerichtete Bewegung von Elektronen in einem elektrischen Feld betrachtet und die Formel für die Stromdichte abgeleitet:

$$J = \frac{e^2 n \bar{l}}{2 m_0 \bar{v}} E = \sigma E, \quad (2.2)$$

wobei  $\bar{l}$  - die mittlere freie Weglänge eines Elektrons ist,  $\bar{v}$  - mittlere Geschwindigkeit.

Das heißt, die Stromdichte ist proportional zur elektrischen Feldstärke, was dem analytischen Ausdruck des Ohmschen Gesetzes entspricht.

Die Herleitung der Formel (2.2) kann nicht als absolut rigoros angesehen werden, da nur die Bewegung eines Elektrons berücksichtigt wurde und die Schlussfolgerungen auf alle freien Elektronen angewendet wurden. Richtiger wäre es, die Wirkung des elektrischen Feldes auf die Gesamtheit der freien Elektronen zu betrachten, deren Gesamtimpuls sich sowohl unter der Einwirkung des Feldes als auch unter der Einwirkung von Zusammenstößen mit den Knoten des Kristallgitters ändert. Eine solche Analyse führt zu der Tatsache, dass die durchschnittliche Driftgeschwindigkeit der Elektronen doppelt so groß ist. Unter Berücksichtigung dieser Korrektur erhält der Ausdruck für die spezifische Leitfähigkeit die folgende Form:

$$\sigma = \frac{e^2 n \bar{l}}{m_0 \bar{v}}. \quad (2.3)$$

Mit Hilfe des Konzepts der freien Elektronen lässt sich leicht das experimentelle Wiedemann-Franz-Gesetz aufstellen, das die Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit eines Metalls herstellt. Die Elektronen in einem Metall tragen nicht nur eine elektrische Ladung, sondern gleichen auch die Temperatur aus, was zu einer hohen Wärmeleitfähigkeit führt. Aufgrund der hohen Konzentration an freien Elektronen überwiegt die elektronische Wärmeleitfähigkeit gegenüber anderen Wärmeübertragungsmechanismen. Nach der atomaren kinetischen Theorie eines idealen Gases kann die elektronische Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden:

$$\lambda_T = \frac{1}{2} k n \bar{v} \bar{l}, \quad (2.4)$$

wobei  $k$  die Boltzmann-Konstante ist.

Dividiert man den Ausdruck (2.4) durch die in (2.2) ermittelte spezifische Leitfähigkeit und berücksichtigt man, dass nach der molekularen kinetischen Theorie die durchschnittliche kinetische Energie der Elektronen in einem Zustand chaotischer Bewegung bestimmt wird durch

$$\frac{m_0 \bar{U}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

erhalten wir

$$\frac{\lambda_T}{\sigma} = 3k^2 e^{-2} T = L_o T \quad . (2.5)$$

Das heißt, das Verhältnis zwischen der spezifischen Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Leitfähigkeit des Metalls bei einer bestimmten Temperatur ist ein konstanter Wert, unabhängig von der Art des Leiters. Daraus folgt insbesondere, dass gute Leiter für elektrischen Strom auch gute Wärmeleiter sind. Die Konstante  $L_o = 3k/e^{22}$  wurde als Lorentz-Zahl bezeichnet. Eine genauere Analyse auf der Grundlage der Quantenstatistik der Elektronen ergibt einen etwas anderen Ausdruck für die Lorentz-Zahl, obwohl sich ihr numerischer Wert nicht wesentlich ändert:

$$L_o = \frac{\lambda_T}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} B^2 K^{-2} \quad . (2.6)$$

Die experimentellen Werte der Lorentz-Zahl bei Raumtemperatur stimmen für die meisten Metalle gut mit dem theoretischen Wert überein.

Neben den erfolgreichen Erklärungen des Experiments durch die klassische elektronische Theorie der Metalle traten jedoch auch Widersprüche auf. Insbesondere konnte die klassische Theorie die geringe Wärmekapazität des Elektronengases nicht erklären. Die molare Wärmekapazität des Kristallgitters eines beliebigen Festkörpers, der als ein System harmonisch schwingender Oszillatoren betrachtet werden kann, beträgt  $3R$  ( $R$  ist die universelle Gaskonstante). Dieses Ergebnis ist in der Physik als Dulong-Pty-Gesetz bekannt, das für feste Körper bei relativ hohen Temperaturen gilt.

In Metallen müssen Atome und freie Elektronen am Prozess der Energieabsorption beteiligt sein. Unter diesem Gesichtspunkt muss die Wärmekapazität des Metalls deutlich größer sein als die Wärmekapazität von Dielektrika, die keine freien Elektronen enthalten. Unter der Annahme, dass die Anzahl der freien Elektronen in einem Metall gleich der Anzahl der Atome ist, und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Elektronen als Teilchen eines idealen Gases eine durchschnittliche thermische Energie von  $(3/2) kT$  haben, erhalten wir für die molare Wärmekapazität von Metallen

$$C_v = C_{Gitter} + C_e = 3R + 3/2 kN_0 = 9/2R \quad . (2.7)$$

In der Realität unterscheidet sich die Wärmekapazität von Metallen bei hohen Temperaturen jedoch kaum von der Wärmekapazität kristalliner Dielektrika. Dies deutet darauf hin, dass das Elektronengas beim Erhitzen eines Metallleiters praktisch keine Wärme absorbiert, was den Ansichten der klassischen elektronischen Theorie widerspricht. Der erwähnte Widerspruch ist der wichtigste, aber es gibt noch weitere Widersprüche. Die Erklärungsschwierigkeiten wurden mit Hilfe der Quantentheorie der Metalle überwunden, deren Grundlagen von dem sowjetischen

Wissenschaftler Y. I. Frenkel und dem deutschen Physiker A. Sommerfeld entwickelt wurden.

Die Hauptmängel der klassischen Theorie ergeben sich nicht so sehr aus den Vorstellungen über die Existenz freier Elektronen in Metallen, sondern aus der Anwendung der Gesetze der klassischen Statistik (Maxwell-Boltzmann-Statistik) auf sie, wonach die Verteilung der Elektronen nach Energiezuständen durch eine Exponentialfunktion der Form beschrieben wird:

$$F(E) = A \exp \left[ -\frac{E}{kT} \right] \quad . \quad (2.8)$$

In diesem Fall kann sich eine beliebige Anzahl von Elektronen in jedem Energiezustand befinden.

Die Quantenstatistik beruht auf dem Pauli-Prinzip, demzufolge sich in jedem Energiezustand nur ein Elektron befinden kann. Dies führt unmittelbar zu dem Unterschied zwischen der klassischen und der Quantenverteilung der Elektronen nach Energie. Aus klassischer Sicht muss die Energie aller Elektronen bei einer Temperatur von absolut Null gleich Null sein. Und nach dem Pauli-Prinzip kann auch am absoluten Nullpunkt die Anzahl der Elektronen auf jedem Niveau nicht mehr als zwei betragen. Und wenn die Gesamtzahl der freien Elektronen in einem Kristall  $n$  beträgt, dann besetzen sie bei 0 K 1/2 der niedrigsten Energieniveaus.

In der Quantentheorie wird die Wahrscheinlichkeit, Energiezustände mit Elektronen zu besetzen, durch die Fermi-Funktion bestimmt:

$$F(E) = \left[ 1 + \exp \left( \frac{E - E_F}{kT} \right) \right]^{-1} \quad . \quad (2.9)$$

wobei  $E$  die Energie des Niveaus ist, dessen Besetzungswahrscheinlichkeit bestimmt wird;  $E_F$  ist die Energie des charakteristischen Niveaus, in Bezug auf das die Wahrscheinlichkeitskurve symmetrisch ist. Bei  $T = 0$  K hat die Fermi-Funktion die folgenden Eigenschaften:  $F(E) = 1$ , wenn  $E \leq E_F$ , und  $F(E) = 0$ , wenn  $E > E_F$ .

Der Wert von  $E_F$  bestimmt also die maximale Energie, die ein Elektron in einem Metall bei einer Temperatur von absolut Null haben kann. Diese charakteristische Energie wird als Fermi-Energie oder Fermi-Niveau bezeichnet. Das ihr entsprechende Potenzial  $\varphi_F = E_F / e$  wird als elektrochemisches Potenzial bezeichnet

Aus der Formel (2.9) ist leicht ersichtlich, dass bei jeder Temperatur für ein Niveau mit der Energie  $E = E_F$  die Wahrscheinlichkeit, dass es mit Elektronen gefüllt wird, 0,5 beträgt. Alle Niveaus unterhalb des Fermi-Niveaus sind mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 0,5 mit

Elektronen gefüllt. Umgekehrt sind alle Niveaus oberhalb des Fermi-Niveaus mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 0,5 frei von Elektronen.

Die Gesamtelektronenkonzentration in einem Metall wird durch Integration über alle gefüllten Zustände ermittelt.

Systeme von Mikroteilchen, deren Verhalten durch die Fermi-Dirac-Statistik beschrieben wird, können sich in einem entarteten Zustand befinden, der für Metalle charakteristisch ist. Im entarteten Zustand ist die durchschnittliche Energie des Elektronengases praktisch unabhängig von der Temperatur. Das Elektronengas in einem Metall bleibt so lange entartet, bis eines der Elektronen Energie mit dem Kristallgitter austauschen kann, was wiederum nur möglich ist, wenn die durchschnittliche Energie der thermischen Schwingungen nahe an die Fermi-Energie herankommt. Bei Metallen liegt die Entartungstemperatur bei  $10^4$  K, was nicht nur höher ist als der Schmelzpunkt, sondern auch die Verdampfungstemperatur von Metallen.

Infolge der Entartung können nicht alle freien Elektronen am Prozess der elektrischen Leitung teilnehmen, sondern nur ein kleiner Teil von ihnen, dessen Energie nahe der Fermi-Energie liegt. Nur diese Elektronen können ihren Zustand unter dem Einfluss eines Feldes ändern. Der elektrische Strom, der in einem Metall unter dem Einfluss einer Potenzialdifferenz auftritt, spiegelt Änderungen in der Verteilung der Elektronen nach ihrer Geschwindigkeit wider.

Bei einer Temperaturänderung ändert sich die Fermi-Energie nur wenig, was eine Besonderheit des entarteten Zustands eines Elektronengases ist. Wird beispielsweise Silber von 0 auf 1000 K erwärmt, sinkt seine Fermi-Energie nur um 0,2 %. Solch kleine Änderungen in einem so großen Temperaturbereich können vernachlässigt werden. Die Konzentrationen von  $n$  freien Elektronen in reinen Metallen unterscheiden sich kaum. Die Temperaturänderung von  $n$  ist ebenfalls sehr gering. Daher wird die Leitfähigkeit hauptsächlich durch die mittlere Weglänge der freien Elektronen bestimmt, die wiederum von der Struktur des Leiters abhängt, d. h. von der chemischen Natur der Atome und der Art des Kristallgitters. Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur lässt sich auch durch die Wellenförmigkeit der Elektronenbewegung erklären.

### **2.3 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von Metallen**

Aus der Physik ist bekannt, dass Elementarteilchen die Eigenschaft des Teilchen-Wellen-Dualismus besitzen. Daher kann die Bewegung freier Elektronen in einem Metall als die Ausbreitung ebener Elektronenwellen betrachtet werden, deren Länge durch die de Broglie-Relation bestimmt wird:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E}} \quad (2.10)$$

Eine solche ebene Elektronenwelle in einem streng periodischen Potentialfeld breitet sich ohne Energieverlust aus. Das heißt, das ideale Gitter eines Festkörpers hat keine Streuwirkung auf den Elektronenfluss. Das bedeutet, dass in einem idealen Kristall die freie Weglänge der Elektronen gleich unendlich ist und der Widerstand für den elektrischen Strom gleich Null. Dies wird durch die Tatsache bestätigt, dass der Widerstand reiner Metalle gegen Null tendiert, wenn sich die Temperatur dem absoluten Nullpunkt nähert. Die Eigenschaft eines Elektrons, sich in einem idealen Kristallgitter frei zu bewegen, hat keine Entsprechung in der klassischen Mechanik. Streuung und das Auftreten von Widerstand entstehen, wenn verschiedene Arten von Gitterstörungen im Gitter vorhanden sind.

In reinen Metallen mit perfekter Struktur ist der einzige Grund, der den freien Weg der Elektronen begrenzt, die thermische Schwingung der Atome in den Gitterknoten. Mit steigender Temperatur nehmen die Amplituden der thermischen Schwingungen der Atome und die damit verbundenen Fluktuationen im periodischen Feld des Gitters zu. Dies wiederum verstärkt die Streuung der Elektronen und führt zu einem Anstieg des spezifischen Widerstands.

In der Theorie der Atomgitterschwingungen wird die Temperatur im Verhältnis zu einer bestimmten charakteristischen Temperatur, der Debye-Temperatur  $\theta_D$ , bewertet. Die Debye-Temperatur bestimmt die maximale Frequenz der thermischen Schwingungen, die in einem Kristall angeregt werden können:

$$\theta_D = h\nu_{max}/k \quad (2.11)$$

Diese Temperatur hängt von den Bindungskräften zwischen den Knotenpunkten des Kristallgitters ab und ist ein wichtiger Parameter eines Festkörpers.

Um die Art der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands qualitativ zu bestimmen, wird ein etwas vereinfachtes Modell der atomaren Schwingungen und der Elektronenbewegung verwendet. Das Ergebnis ist eine Formel, die zeigt, dass der spezifische Widerstand von Metallen bei  $T > \theta_D$  linear mit der Temperatur variiert:

$$\rho_T = \frac{1}{\sigma} = \frac{2\pi m_n^2 k U_F}{e^2 k_{eb}} T = BT \quad (2.12)$$

wobei  $k_{eb}$  der Koeffizient der elastischen Bindung ist, die dazu neigt, das Atom in die Gleichgewichtslage zurückzubringen,  $U_F$  ist die thermische Geschwindigkeit der Elektronen mit einer Energie nahe  $E_F$ .

Wie das Experiment zeigt, ist die lineare Annäherung der Temperaturabhängigkeit von  $\rho_T(T)$  bis zu Temperaturen in der Größenordnung von  $(2/3)\theta_D$  gültig, wobei der Fehler 10 % nicht überschreitet. Bei den meisten Metallen liegt die charakteristische Debye-

Temperatur nicht über 400-450 K. Daher gilt die lineare Näherung in der Regel für Temperaturen ab Raumtemperatur und darüber. Im Tieftemperaturbereich ( $T < \theta_D$ ), wo der Widerstandsabfall auf den allmählichen Ausschluss neuer Frequenzen thermischer Schwingungen (Phononen) zurückzuführen ist, sagt die Theorie eine Potenzgesetzabhängigkeit  $\rho_r \sim T^5$  voraus. In der Physik ist diese Beziehung als Bloch-Grüneisen-Gesetz bekannt. Das Temperaturintervall, in dem eine scharfe Potenzgesetzabhängigkeit von  $\rho_r(T)$  beobachtet wird, ist in der Regel recht klein, wobei die experimentellen Werte des Potenzgesetzes zwischen 4 und 6 liegen.

Die Veränderung des spezifischen Widerstands eines Metallleiters in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abb. 2.1 dargestellt. Bei niedrigen Temperaturen kann eine Reihe von Metallen den Zustand der Supraleitung erreichen, und die Abbildung zeigt einen Sprung im spezifischen Widerstand bei der Temperatur  $T_{sc}$ .

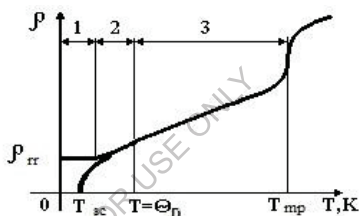


Abb. 2.1. Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes eines metallischen Leiters von der Temperatur.  $T_{sc}$  - Temperatur des Übergangs zum supraleitenden Zustand,  $T_{mp}$  - Schmelzpunkt,  $\rho_{rr}$  - Restwiderstand vor dem Übergang zur Supraleitung

Die relative Änderung des spezifischen Widerstandes bei einer Temperaturänderung von einem Kelvin (Grad) wird als Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes bezeichnet:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (2.13)$$

Das positive Vorzeichen entspricht dem Fall, dass der spezifische Widerstand in der Nähe dieses Punktes mit steigender Temperatur zunimmt. Der Wert von  $\alpha_\rho$  kann auch von der Temperatur abhängen. Im Bereich der linearen Abhängigkeit  $\rho(T)$  ist der Ausdruck gültig:

$$\rho = \rho_o [1 + \alpha_\rho (T - T_o)] \quad (2.14)$$

wobei  $\rho_o$  und  $\alpha_\rho$  der spezifische Widerstand und der Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands sind, bezogen auf den Beginn des Temperaturbereichs, d. h. die Temperatur  $T_o$ ,  $\rho$  - der spezifische Widerstand bei der Temperatur  $T$ . In der Regel wird  $T_o$  als 273° K (0° C) angenommen.

#### 2.4. Dünne Metallschichten. Dimensionale Effekte

Metallschichten werden in der Mikroelektronik in großem Umfang als Kontaktflächen, Verbindungselemente, Kondensatorauskleidungen, magnetische und resistive Elemente in integrierten Schaltungen verwendet. Die elektrischen Eigenschaften von dünnen Schichten aus Metallen und Legierungen können sich erheblich von denen der ursprünglichen leitfähigen Massenmaterialien unterscheiden. Einer der Gründe für diesen Unterschied ist die Vielfalt der strukturellen Merkmale dünner Schichten, die beispielsweise durch die Kondensation von Molekularstrahlen im Hochvakuum gewonnen werden. Durch Variation der Kondensationsbedingungen kann die Struktur der entstehenden Filme von einem extrem ungeordneten feinen Zustand (amorpher Zustand) bis zur Struktur einer perfekten Einkristallschicht (epitaktische Filme) variieren. Ein weiterer Grund für die Veränderung der Materialeigenschaften im Filmzustand hängt mit dem Auftreten von Dimensionseffekten zusammen, d. h. mit der zunehmenden Rolle von Oberflächenprozessen im Vergleich zu Volumenprozessen. Insbesondere bei der elektrischen Leitfähigkeit tritt der Größeneffekt auf, wenn die Filmdicke der durchschnittlichen freien Weglänge der Elektronen entspricht. Unter diesen Bedingungen wird die Annahme, dass der spezifische Widerstand des Materials unabhängig von den geometrischen Abmessungen der Probe ist, ungerechtfertigt.

Die Struktur der Schichten ändert sich in den verschiedenen Phasen der Kondensation erheblich, was sich auch auf den spezifischen Widerstand auswirkt.

Dünne Schichten in den frühen Stadien der Kondensation weisen eine Inselstruktur auf, d. h. bei einer geringen Menge an abgeschiedenem Metall befinden sich dessen Partikel auf dem dielektrischen Substrat in Form von einzelnen verstreuten Körnern - Inseln. Die elektrische Leitfähigkeit des Films tritt bei einer bestimmten Mindestmenge des abgeschiedenen Metalls ein. Wenn ein elektrisches Feld angelegt wird, werden Elektronen durch die engen dielektrischen Lücken zwischen benachbarten Inseln übertragen. Die für den Ladungstransfer verantwortlichen Mechanismen sind die Emission von Thermoelektronen und das Tunneln; insbesondere können Elektronen, die sich oberhalb des Fermi-Niveaus befinden, tunneln. Der Übergang der Elektronen wird durch eine Erhöhung der Temperatur begünstigt. Darüber hinaus wird der Widerstand eines Films mit Inselstruktur weitgehend durch den Oberflächenwiderstand der Bereiche des Substrats bestimmt, in denen sich keine Metallkörner befinden.

Mit zunehmender Menge der abgeschiedenen Metallschicht verringert sich die Größe der Lücken zwischen den Inseln, und die Leitfähigkeit der Filme nimmt zu. Bei der weiteren Kondensation der Substanz auf dem Substrat verschmelzen die Inseln und bilden leitfähige

Ketten und schließlich eine durchgehende homogene Schicht. Doch auch in einer durchgehenden Schicht ist der spezifische Widerstand höher als der des ursprünglichen Leiters, was auf die hohe Konzentration von Defekten - Leerstellen, Versetzungen, Korngrenzen - zurückzuführen ist, die bei der Verschmelzung der Inseln entstehen. Die aus den Restgasen absorbierten Verunreinigungen haben einen großen Einfluss auf die Eigenschaften der Schichten.

Der spezifische Widerstand des Films wird auch durch den Dimensionseffekt erhöht, d. h. durch die Verringerung der freien Weglänge der Elektronen aufgrund ihrer Reflexion an der Probenoberfläche.

Bei Raumtemperatur tritt die Oberflächenstreuung von Elektronen in reinen Metallfilmen auf, wenn ihre Dicke weniger als 200-300 Å beträgt. Bei niedrigen Temperaturen, wenn die freie Weglänge der Elektronen im Materialvolumen deutlich zunimmt, zeigt sich der Einfluss von Dimensionseffekten jedoch bei viel größeren Filmdicken.

Da die Art der Keimbildung und des Wachstums von Schichten von vielen zufälligen Faktoren abhängt, ist es in der Praxis schwierig, eine genaue Übereinstimmung der Widerstandswerte für Schichten gleicher Dicke  $\delta$  zu erhalten. Daher wird für eine vergleichende Bewertung der Eigenschaften dünner Schichten der spezifische Widerstand des Quadrats  $R_{\square}$  (Widerstand der Oberfläche) verwendet, der numerisch gleich dem Widerstand eines Schichtabschnitts ist, dessen Länge gleich seiner Breite ist, wenn der Strom durch seine beiden gegenüberliegenden Flächen parallel zur Substratoberfläche fließt:

$$R_{\square} \equiv \frac{\rho_0}{\delta} \quad (2.15)$$

Da  $R_{\square}$  nicht von der Größe des Quadrats abhängt, lässt sich der Widerstand eines Dünnschichtwiderstands leicht mit der Formel berechnen:

$$R = R_{\square} \frac{l_0}{d_0} \quad (2.16)$$

wobei  $l_0$  die Länge des Widerstands in Stromflussrichtung und  $d_0$  die Breite des Films ist.

Für die Herstellung von Dünnschichtwiderständen werden in der Regel Schichten mit einem Oberflächenwiderstand von 500-1000 Ohm/Quadrat verwendet. Die am häufigsten verwendeten Widerstandsmaterialien sind Wolfram, Molybdän, Tantal, Rhenium, Chrom und Nickel-Chrom-Legierungen. Schichtwiderstände aus reinen Metallen haben den Vorteil, dass sie in ihrer Zusammensetzung konstant sind und es daher einfacher ist, die Einheitlichkeit ihrer Struktur zu gewährleisten. Dies wiederum führt zu einer höheren Stabilität der elektrischen Parameter.



## 2.5. Kontaktphänomene. Thermo-EMK

Wenn zwei verschiedene Metalle miteinander in Berührung kommen, entsteht zwischen ihnen eine Kontaktpotentialdifferenz. Dieses Phänomen wurde 1797 von dem italienischen Physiker A. Volta entdeckt. Nach der Quantentheorie ist der Hauptgrund für die Potenzialdifferenz am Kontakt die unterschiedliche Fermi-Energie der berührten Metalle.

Nehmen wir an, dass das Elektronengas in den Metallen A und B (Abb. 2.2) durch die Fermi-Energien  $E_F^A$  und  $E_F^B$  charakterisiert ist. Angenommen,  $E_F^A < E_F^B$ . Die thermodynamische Arbeit der Elektronenausbeute ist gleich  $A_A$  bzw.  $A_B$ . Die kinetische Energie der Elektronen auf dem Fermi-Niveau ist in den verschiedenen Metallen unterschiedlich. Wenn Materialien miteinander in Kontakt kommen, kommt es daher zu einem intensiven Übergang der Elektronen von einem Bereich mit einem hohen Wert der Fermi-Energie zu einem Bereich, in dem diese Energie niedriger ist, d. h. von Metall B zu Metall A. Die Elektronen neigen nämlich dazu, einen Zustand mit minimaler Energie einzunehmen. In der Tat ist der Übergang der Elektronen von Metall B zu Metall A der Übergang der Elektronen in diesem System auf niedrigere Energieniveaus. Als Ergebnis dieses Prozesses ist Metall B positiv und Metall A negativ geladen; zwischen ihnen entsteht eine Potenzialdifferenz, die einen weiteren Transfer von Ladungsträgern verhindert. Das Gleichgewicht stellt sich ein, wenn die Arbeit des Elektrons zur Überwindung der Kräfte des erzeugten Feldes gleich der Energiedifferenz der den Kontakt passierenden Elektronen wird:

$$eU_s = E_F^B - E_F^A$$

Die interne Kontaktpotentialdifferenz ist also definiert als die Differenz der Fermi-Energien, die für die isolierten Metalle A und B vom Boden des Leitungsbandes aus berechnet werden.

Das Vorhandensein eines Kontaktfeldes gewährleistet die Gleichheit der Elektronenflüsse von einem Metall zum anderen im Gleichgewichtszustand. Unter den Bedingungen des stationären Gleichgewichts sollte das Fermi-Niveau in beiden Metallen gleich sein: Die Energieniveaus in dem positiv geladenen Metall fallen ab. Aufgrund der Ladung der Regionen kann der Niveauegleich während des Übergangs einer kleinen Anzahl von Elektronen erfolgen. Die im Kontaktbereich vorhandene elektrische Doppelschicht  $d$  ist sehr dünn (in der Größenordnung der Gitterperiode) und hat keinen Einfluss auf den Durchgang des elektrischen Stroms durch den Kontakt. Da die Fermi-Energie in Metallen einen Wert von einigen Elektronenvolt hat, kann die Kontaktpotentialdifferenz zwischen zwei Metallen von einem Zehntel bis zu mehreren Volt reichen.

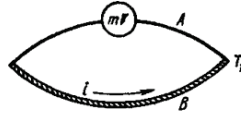


Abb. 2.2 Schaltplan des Thermoelements

Ein Thermoelement, das aus zwei verschiedenen Leitern besteht, die einen geschlossenen Kreislauf bilden, wird als Thermopaar bezeichnet (Abbildung 2.2). Wenn die Temperatur der Kontakte in dem geschlossenen Kreislauf unterschiedlich ist, fließt ein Strom, der als thermoelektrisch bezeichnet wird. Wird der Stromkreis an einer beliebigen Stelle unterbrochen, so entsteht an den Enden des offenen Stromkreises eine Potentialdifferenz, die als thermoelektromotorische Kraft (Thermo-EMK) bezeichnet wird. Dieses Phänomen wird nach seinem Entdecker Seebeck-Effekt genannt. Wie das Experiment zeigt, ist die thermoelektromotorische Kraft in einem relativ kleinen Temperaturbereich proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den Kontakten (Verbindungsstellen):

$$U = \alpha_T(T_2 - T_1). \quad (2.17)$$

Hier wird der Proportionalitätskoeffizient  $\alpha_T$  als relative differentielle oder spezifische thermische EMK bezeichnet. Der Wert von  $\alpha_T$  hängt von der Art der kontaktierenden Leiter und der Temperatur ab. Die thermische EMK in einem Stromkreis besteht aus drei Komponenten. Die erste Komponente wird durch die Temperaturabhängigkeit der Kontaktpotenzialdifferenz verursacht.

Die zweite Komponente der Thermo-EMK wird durch die Diffusion von Ladungsträgern von heißen zu kalten Verbindungsstellen verursacht. Sie diffundieren in größerer Zahl in Richtung des Temperaturgradienten. Der Diffusionsstrom, der die negative Ladung vom heißen Ende zum kalten Ende transportiert, erzeugt eine Potentialdifferenz zwischen ihnen.

Die dritte Komponente der Thermo-EMK entsteht im Stromkreis durch das Einfangen von Elektronen durch thermische Energiequanten (Phononen). Ihr Fluss erstreckt sich auch auf das kalte Ende. Alle Komponenten der Thermo-EMK werden durch eine kleine Konzentration von Elektronen bestimmt, die sich auf Energieniveaus nahe dem Fermi-Niveau befinden und von diesem um einen Wert in der Größenordnung von  $kT$  entfernt sind. Daher ist die spezifische Thermo-EMK für Metalle sehr klein. Die Quantentheorie liefert den folgenden Ausdruck für die spezifische thermische EMK einwertiger Metalle:

$$\alpha_T = \pi^2 \frac{k}{e} \frac{kT}{E_F}. \quad (2.18)$$

Bei Raumtemperatur sollte  $\alpha_T$  einige  $\mu\text{V/K}$  betragen. Ein deutlich höherer Wert der spezifischen thermischen EMK kann bei der

Verwendung von Metalllegierungen mit komplexer Bandstruktur erzielt werden.

Metallische Thermoelemente werden häufig zur Temperaturmessung verwendet. Während des Messvorgangs wird die Temperatur an einer der Verbindungsstellen stabilisiert. Zu diesem Zweck werden Standardkalibrierungstabellen verwendet. Eine solche Tabelle für ein Chromel-Kopel-Thermoelement (Typ L) ist beispielsweise in Anlage 2 dargestellt.

Es ist zu beachten, dass auch in einem homogenen Leiter bei Vorhandensein eines Temperaturgefälles an seinen Enden aus den oben genannten Gründen eine Potenzialdifferenz entsteht. Ihr Wert, bezogen auf eine Einheit Temperaturdifferenz an den Enden des Leiters, wird als absolute spezifische thermische EMK bezeichnet. Es kann bewiesen werden, dass in einem Thermoelement-Stromkreis die relative spezifische thermische EMK gleich der Differenz der absoluten spezifischen thermischen EMK der konstituierenden Leiter ist:

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B \quad , \quad (2.19)$$

wobei  $\alpha_T^A$  und  $\alpha_T^B$  die absolute spezifische thermische EMK der sich berührenden Metalle A und B sind.

Aus Gleichung (2.19) folgt, dass, wenn der absolute Wert der spezifischen thermischen EMK eines Materials, das als Referenz genommen wird, bekannt ist, dieser Parameter für jedes andere Material durch Messung (Berechnung) relativ zu dieser Referenz erhalten werden kann.

Zur Bestimmung der absoluten thermoelektrischen EMK wird am häufigsten Blei als Referenz verwendet, da seine thermoelektrischen Eigenschaften sehr schwach sind. Bei niedrigen Temperaturen werden Supraleiter als Normale verwendet, da diese immer eine absolute spezifische Thermo-EMK von Null haben. Das Vorzeichen der thermoelektrischen EMK wird als negativ angesehen, wenn das heiße Ende des Leiters positiv geladen ist, was für die meisten einfachen Metalle typisch ist. Im Allgemeinen ist die absolute thermische EMK stark temperaturabhängig und kann bei Erwärmung sogar das Vorzeichen wechseln.

## 2.6. Materialien mit hoher Leitfähigkeit

Zu dieser Gruppe von Materialien gehören Leiter, die unter normalen Bedingungen einen spezifischen Widerstand von höchstens 0,1  $\mu\Omega\cdot\text{m}$  aufweisen. Die gebräuchlichsten unter diesen Materialien sind Kupfer und Aluminium.

Die Vorteile des Kupfers, die für seine weite Verbreitung als leitendes Material sorgen, sind sein geringer spezifischer Widerstand, seine relativ hohe mechanische Festigkeit und seine in den meisten Fällen zufriedenstellende Korrosionsbeständigkeit (selbst bei hoher

Luftfeuchtigkeit oxidiert Kupfer an der Luft viel langsamer als z. B. Eisen). Eine intensive Oxidation von Kupfer tritt nur bei höheren Temperaturen auf (siehe Abb. 2.3), gute Bearbeitbarkeit (Kupfer wird zu Blechen und Bändern gewalzt und zu Drähten gezogen, deren Dicke bis auf Tausendstel Millimeter genau eingestellt werden kann), relative Leichtigkeit beim Löten und Schweißen.

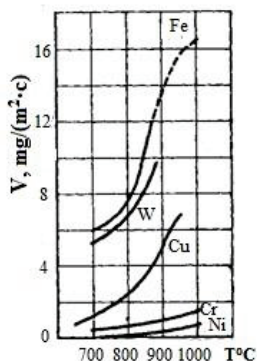


Abb. 2.3. Abhängigkeit der Oxidationsrate  $V$  in Luft von der Temperatur  $T$  für Eisen Fe, Wolfram W, Kupfer Cu, Chrom Cr, Nickel Ni.

Kupfer wird durch die Verarbeitung sulfidischer Erze gewonnen, die in der Natur am häufigsten vorkommen. Nach einer Reihe von Erzschmelzen und intensiven Hochöfen muss das für elektrische Zwecke bestimmte Kupfer einer elektrolytischen Reinigung unterzogen werden. Die nach der Elektrolyse gewonnenen Kupferkathodenplatten werden zu 80-90 kg schweren Blöcken eingeschmolzen, die zu Produkten mit dem gewünschten Querschnitt gewalzt werden.

Beim Kaltziehen entsteht hartes (hartgezogenes) Kupfer, das durch den Effekt der Vernietung eine hohe Zugfestigkeit und eine geringe relative Dehnung sowie eine hohe Härte und Biegeelastizität aufweist; Hartkupferdraht ist leicht elastisch.

Wird Kupfer geglüht, d. h. auf mehrere hundert Grad erhitzt und dann abgekühlt, erhält man weiches Kupfer, das relativ dehnbar ist, eine geringe Härte und geringe Festigkeit, aber eine sehr hohe relative Bruchdehnung und eine höhere spezifische Leitfähigkeit aufweist. Kupfer wird in speziellen Öfen ohne Luft geglüht, um Oxidation zu vermeiden. Standardkupfer hat bei 20 °C eine spezifische Leitfähigkeit von  $58,14 \text{ (M}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$ , d. h.  $\rho = 0,017241 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$ .

Sauerstofffreies Kupfer wird in der elektrischen Vakuumtechnik verwendet. Es wird aus elektrolytischem Kupfer gewonnen, das in einer Schutzatmosphäre aus reduzierendem CO-Gas geschmolzen wird. Der beim Erhitzen von Kupfer freigesetzte Sauerstoff reagiert mit

Kohlenmonoxid und wird als Kohlendioxid entfernt. Das beste sauerstofffreie Kupfer enthält 99,97 % Cu. Ein noch reineres Metall ist Vakuumpkupfer, das in Vakuump-Induktionsöfen in Graphitiegeln bei einem Restgasdruck von etwa  $10^{-3}$  Pa geschmolzen wird. Es kann 99,99 % Cu enthalten. Sauerstofffreies Kupfer unterscheidet sich in Bezug auf die mechanische Festigkeit und die elektrische Leitfähigkeit kaum von herkömmlich geschmolzenem elektrolytischem Kupfer. Sein wesentlicher Vorteil ist seine hohe Duktilität.

Die spezifische Leitfähigkeit von Kupfer reagiert sehr empfindlich auf das Vorhandensein von Verunreinigungen. Wenn Kupfer beispielsweise 0,5 % Zn-, Cd- oder Ag-Verunreinigungen enthält, sinkt seine spezifische Leitfähigkeit um 5 %. Bei demselben Gehalt an Ni, Sn oder Al sinkt die spezifische Leitfähigkeit von Kupfer um 25-40 %. Gleichzeitig erhöhen die Zusätze vieler Metalle die mechanische Festigkeit und Härte von Kupfer sowohl im kaltgezogenen als auch im geglähten Zustand.

Der Nachteil von Kupfer ist seine Anfälligkeit für atmosphärische Korrosion mit Bildung von Oxid- und Sulfidschichten. Die Oxidationsrate nimmt bei Erwärmung schnell zu (siehe Abb. 2.3), aber die Haftfestigkeit der Oxidschicht auf dem Metall ist gering. Infolge der Oxidation ist Kupfer für Schwachstromkontakte ungeeignet. Bei hohen Temperaturen in einem elektrischen Lichtbogen zersetzt sich das Kupferoxid und legt die Metalloberfläche frei. Die Ablösung des Metalls und die thermische Zersetzung der Oxidschicht führen zu einem erhöhten Verschleiß der Kupferkontakte bei hohen Strömen.

Wasserstoff hat einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Kupfer. Nach einer Wasserstoffglühung kann die Härte von Kupfer um ein Vielfaches sinken. Die zerstörerische Wirkung von Wasserstoff ist besonders ausgeprägt in Gegenwart von Sauerstoff, der in industriellem Kupfer in Form von  $\text{Cu}_2\text{O}$  vorhanden ist. Wasserstoff dringt bei hohen Temperaturen leicht tief in das Metall ein und reagiert.

Kupfer wird in der Elektrotechnik zur Herstellung von Drähten, Kabeln, Schaltschienen, Transformatorwicklungen, elektrischen Maschinen, leitenden Teilen von Geräten und Apparaten sowie Anoden in der Galvanik und Galvanisierung verwendet. Kupferbänder werden als Kabelabschirmungen verwendet. Massives Kupfer wird dort eingesetzt, wo eine besonders hohe mechanische Festigkeit, Härte und Abriebfestigkeit erforderlich ist, z. B. bei der Herstellung von nicht isolierten Drähten. Wenn eine gute Flexibilität und Dehnbarkeit erforderlich ist und die Zugfestigkeit nicht so wichtig ist, ist Weichkupfer besser geeignet. Spezielle Elektrovakuumpkupfersorten werden zur Herstellung von Teilen von Klystrons, Magnetrons, Anoden von leistungsstarken Generatorlampen, Leistungsausgängen von Mikrowellengeräten und einigen Arten von Wellenleitern und

Resonatoren verwendet. Außerdem wird Kupfer zur Herstellung von Getinax-Folien und in der Mikroelektronik in Form von Schichten verwendet, die auf Substraten aufgebracht werden und als Verbindungen zwischen funktionalen Schaltungselementen dienen.

Das zweitwichtigste leitende Material ist Aluminium, ein silberweißes Metall, das wichtigste der so genannten Leichtmetalle. Der spezifische Widerstand von Aluminium ist 1,6 Mal höher als der von Kupfer, aber Aluminium ist 3,5 Mal leichter als Kupfer. Aufgrund seiner geringen Dichte bietet es eine hohe Leitfähigkeit pro Masseneinheit, d. h. bei gleichem Widerstand und gleicher Länge sind Aluminiumdrähte trotz des größeren Querschnitts doppelt so leicht wie Kupferdrähte. Darüber hinaus ist Aluminium im Vergleich zu Kupfer in der Natur viel häufiger anzutreffen und zeichnet sich durch niedrigere Kosten aus. Diese Faktoren tragen zur weit verbreiteten Verwendung von Aluminium in der Elektrotechnik bei.

Der Nachteil von Aluminium ist seine geringe mechanische Festigkeit. Geglühtes Aluminium ist dreimal weniger zugfest als geglühtes Kupfer.

Aluminium wird durch Elektrolyse von Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in einer Schmelze von Kryolith  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  bei einer Temperatur von  $950^\circ\text{C}$  hergestellt.

Für elektrische Zwecke wird Aluminium der technischen Reinheit AE verwendet, das nicht mehr als 0,5 % Verunreinigungen enthält. Aus Aluminium hergestellter und bei  $350 \pm 20^\circ\text{C}$  geglühter Draht hat bei  $20^\circ\text{C}$  einen spezifischen Widerstand von höchstens  $0,0280 \mu\Omega\cdot\text{m}$ . Hochreines Aluminium A97 (nicht mehr als 0,03 % Verunreinigungen) wird zur Herstellung von Aluminiumfolie, Elektroden und Elektrolytkondensatorgehäusen verwendet. Hochreines Aluminium A999 hat Verunreinigungen von nicht mehr als 0,001 %. Seine Reinheit wird durch den Wert des Restwiderstandes bei der Temperatur von flüssigem Helium kontrolliert, der  $4 \cdot 10^{-6} \mu\Omega\cdot\text{m}$  nicht überschreiten sollte.

Verschiedene Verunreinigungen verringern die spezifische Leitfähigkeit von Aluminium in unterschiedlichem Maße. Zusätze von Verunreinigungen wie Nickel, Silizium, Zink, Eisen, Arsen, Antimon, Blei und Wismut in einer Menge von 0,5 % verringern die spezifische Leitfähigkeit von Aluminium um höchstens 2-3 %. Kupfer-, Silber- und Magnesiumverunreinigungen haben eine deutlichere Wirkung und verringern die spezifische Leitfähigkeit bei gleichem Gewichtsanteil um 5-10 %. Auch Vanadium-, Titan- und Manganzusätze verringern die spezifische Leitfähigkeit von Aluminium erheblich. Die wichtigsten Verunreinigungen in technischem Aluminium sind Silizium und Eisen.

Aluminium wird auf die gleiche Weise wie Kupfer gewalzt, gezogen und geglüht. Walzaluminium kann zur Herstellung sehr dünner (6-7 Mikrometer) Folien verwendet werden, die als Auskleidung von

Papierkondensatoren oder Platten von Kondensatoren mit variabler Kapazität dienen.

Die Abhängigkeit einiger physikalischer Eigenschaften von Aluminium von der Temperatur ist in Abb. 2.4 dargestellt. Es ist interessant festzustellen, dass Aluminium bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff in Bezug auf den spezifischen Widerstand fast mit Kupfer vergleichbar ist und bei noch niedrigeren Temperaturen sogar besser als Kupfer ist. Daher ist die Verwendung von Aluminium als Kryoleiter vielversprechend.

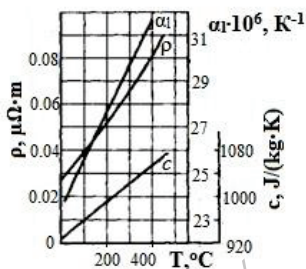


Abb. 2.4. Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands  $\rho$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c$  und des Temperaturkoeffizienten der linearen Ausdehnung  $\alpha_1$  für Aluminium

Aluminium wird aktiv oxidiert und mit einer dünnen Oxidschicht mit hohem elektrischen Widerstand überzogen. Eine solche Schicht schützt Aluminium vor Korrosion, erzeugt aber an den Kontaktstellen der Aluminiumdrähte einen hohen Übergangswiderstand, der das Lötten von Aluminium mit herkömmlichen Methoden unmöglich macht. Daher werden zum Hartlöten von Aluminium spezielle Lötpasten oder UltraschalllötKolben verwendet. Eine dickere Oxidschicht, die eine zuverlässige elektrische Isolierung für relativ hohe Spannungen schafft, wird durch elektrochemische Behandlung von Aluminium erreicht.

Die Oxidisolierung ist mechanisch stabil und hitzebeständig. Sie kann relativ dünn sein (eine 0,03 mm dicke Oxidschicht hat eine Durchschlagsspannung von etwa 100 V, eine 0,04 mm dicke Schicht hat eine Durchschlagsspannung von etwa 250 V).

Verschiedene Spulen werden aus oxidiertem Aluminium hergestellt. Die Nachteile der Oxidrahtisolierung sind ihre begrenzte Flexibilität (vor allem, wenn die Oxidschicht dick ist) und ihre spürbare Hygroskopizität (in Fällen, in denen eine hohe Wärmebeständigkeit der Oxidisolierung nicht erforderlich ist, wird sie lackiert).

Die Oxidisolierung wird am häufigsten in Elektrolytkondensatoren verwendet. Sie wird auch in einigen Arten von Gleichrichtern und Ableitern verwendet.

In der Praxis ist es wichtig, die Kontaktflächen zwischen Aluminium und Kupfer vor galvanischer Korrosion zu schützen. Wenn der Kontaktbereich Feuchtigkeit ausgesetzt ist, bildet sich ein lokales galvanisches Paar mit einem ausreichend hohen EMK-Wert, und die Polarität dieses Paares ist so, dass der Strom an der Außenfläche des Kontakts von Aluminium zu Kupfer geleitet wird, wodurch der Aluminiumleiter durch Korrosion stark beschädigt werden kann. Daher müssen die Verbindungsstellen zwischen Kupfer- und Aluminiumleitern sorgfältig vor Feuchtigkeit geschützt werden (Lackierung usw.).

Aluminiumschichten werden in integrierten Schaltungen häufig als Kontakte und leitende Verbindungen verwendet. Die Schichten werden in der Regel durch Aufdampfen und Kondensation im Vakuum auf Siliziumwafern abgeschieden. Das erforderliche Muster der Verbindungen wird mit Hilfe der Fotolithografie hergestellt. Die Vorteile von Aluminium als Kontaktmaterial liegen darin, dass es sich leicht aufsprühen lässt, eine gute Haftung auf Silizium aufweist und eine gute Auflösung bei der Fotolithografie ermöglicht. Darüber hinaus bildet Aluminium gute ohmsche Kontakte mit Silizium.

Der Nachteil von Aluminium ist seine starke Neigung zur Elektromigration, die zu einer Erhöhung des Widerstands oder sogar zum Bruch von Verbindungen führt.

## 2.7. Supraleiter

Das Phänomen der Supraleitfähigkeit. Viele Metalle und Legierungen weisen bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt eine starke Abnahme des spezifischen Widerstandes auf. Dieses Phänomen wird als Supraleitung bezeichnet, und die Temperatur  $T_{sc}$ , bei der der Übergang in den supraleitenden Zustand erfolgt, wird als kritische Übergangstemperatur bezeichnet. Die Supraleitung wurde erstmals von dem niederländischen Physiker X. Kammerling-Onnes bei Quecksilber ( $T_{sc} = 4,2$  K) entdeckt.

Wenn ein elektrischer Strom in einem Supraleiterring induziert wird, klingt er lange Zeit nicht ab. Die Abklingrate des Magnetfelds des induzierten Stroms im Ring wurde verwendet, um den spezifischen Widerstand von Materialien im supraleitenden Zustand zu schätzen. Sein Wert betrug etwa  $10^{-25}$  Ohm-m, was  $10^{17}$  mal weniger ist als der Widerstand von Kupfer bei Raumtemperatur.

Das Phänomen der Supraleitung lässt sich nur mit Hilfe von Quantendarstellungen verstehen und begründen. Fast ein halbes Jahrhundert nach seiner Entdeckung blieb das Wesen dieses Phänomens ungelöst, weil die Methoden der Quantenmechanik in der Festkörperphysik noch nicht vollständig genutzt wurden. Die mikroskopische Theorie der Supraleitfähigkeit wurde 1957 von den amerikanischen Wissenschaftlern Bardeen, Cooper und Schrieffer (BCS-



Theorie) vorgeschlagen. Der sowjetische Wissenschaftler N. N. Bogolyubov leistete einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung der Theorie der Supraleitung.

Das Phänomen der Supraleitung tritt auf, wenn sich die Elektronen in einem Metall gegenseitig anziehen. Die Anziehung von Elektronen ist nur in einer Umgebung möglich, die positiv geladene Ionen enthält, deren Feld die Coulomb-Abstoßungskräfte zwischen Elektronen schwächt. Nur die Elektronen, die an der elektrischen Leitung beteiligt sind, d. h. die in der Nähe des Fermi-Niveaus liegen, können angezogen werden. Kommt es zu einer solchen Anziehung, dann werden Elektronen mit entgegengesetzter Impuls- und Spinrichtung zu Paaren gebunden, die als Cooper-Paare bezeichnet werden. Bei der Bildung von Cooper-Paaren spielt die Wechselwirkung der Elektronen mit thermischen Schwingungen des Gitters - Phononen - eine entscheidende Rolle. In einem Festkörper können die Elektronen sowohl Phononen absorbieren als auch erzeugen. Die Austausch-Phononen-Wechselwirkung verursacht Anziehungskräfte zwischen den Elektronen, die die Coulomb-Abstoßungskräfte übersteigen. Der Austausch von Phononen, an dem das Gitter beteiligt ist, erfolgt kontinuierlich.

Da die Anziehungskräfte gering sind, sind die gepaarten Elektronen im Raum nur schwach lokalisiert. Der effektive Durchmesser eines Cooper-Paares liegt in der Größenordnung von  $10^{-7}$  m, d.h. er umfasst Tausende von Elementarzellen. Diese Paarbildungen überlappen einander, lösen sich ständig auf und bilden sich neu, aber im Allgemeinen bilden alle Paare ein Elektronenkondensat, dessen Energie aufgrund der internen Wechselwirkung niedriger ist als die einer Gruppe unverbundener normaler Elektronen. Infolgedessen entsteht im Energiespektrum des Supraleiters eine Energielücke  $2\Delta$ , ein Bereich mit verbotenen Energiezuständen. Die gepaarten Elektronen befinden sich am unteren Ende der Energielücke. Die Größe der Energielücke hängt von der Temperatur ab, erreicht einen Maximalwert bei absolutem Nullpunkt und verschwindet vollständig bei  $T = T_{sc}$ . Die BCS-Theorie liefert die folgende Beziehung zwischen der Breite der Bandlücke und der kritischen Übergangstemperatur

$$2\Delta = 3,52kT_{sc} \quad (2.20)$$

Die Formel (2.20) ist experimentell gut bestätigt. Bei den meisten Supraleitern beträgt die Energielücke  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  eV.

Wie gezeigt wurde, ist der elektrische Widerstand eines Metalls auf die Streuung der Elektronen an thermischen Schwingungen des Gitters und an Verunreinigungen zurückzuführen. Bei Vorhandensein einer Energielücke erfordert der Übergang der Elektronen vom Grundzustand in den angeregten Zustand jedoch einen ausreichenden Anteil an Wärmeenergie, den die Elektronen bei niedrigen Temperaturen nicht aus dem Gitter erhalten können, da die Energie der thermischen

Schwingungen geringer ist als die Breite der Lücke. Aus diesem Grund streuen die gepaarten Elektronen nicht an Defekten in der Struktur. Die Besonderheit der Cooper-Paare ist ihre Impulsordnung, d. h. alle Paare haben denselben Impuls und können ihren Zustand nicht unabhängig voneinander ändern. Die Elektronenwellen, die die Bewegung der Paare beschreiben, haben die gleiche Länge und Phase. Tatsächlich kann die Bewegung aller Elektronenpaare als die Ausbreitung einer einzigen Elektronenwelle betrachtet werden, die nicht am Gitter gestreut wird und die Defekte in der Struktur "umläuft". Diese Konsistenz im Verhalten der Paare ist auf die hohe Mobilität des Elektronenkondensats zurückzuführen: Die Paarsätze ändern sich ständig, und es findet ein ständiger Wechsel der Partner statt.

Am absoluten Nullpunkt sind alle Elektronen in der Nähe des Fermi-Niveaus in Paaren gebunden. Wenn die Temperatur aufgrund von Wärmeenergie steigt, werden einige der Elektronenpaare aufgebrochen, was zu einer Verringerung der Breite der Bandlücke führt. Die Bewegung ungepaarter Elektronen vom Grundniveau zu den angeregten Niveaus wird durch Streuung an Gitterdefekten behindert. Bei einer Temperatur von  $T = T_{sc}$  sind alle Paare vollständig aufgebrochen, die Bandlücke wird Null und die Supraleitung verschwindet.

Die wichtigste Eigenschaft von Supraleitern ist, dass das äußere Magnetfeld die Dicke der Probe überhaupt nicht durchdringt und in der dünnsten Schicht dämpft. Die Magnetfeldlinien krümmen sich um den Supraleiter. Dieses als Meissner-Effekt bezeichnete Phänomen ist darauf zurückzuführen, dass in der Oberflächenschicht des Supraleiters ein kreisförmiger, nicht gedämpfter Strom entsteht, wenn er einem Magnetfeld ausgesetzt wird, das das externe Feld in der Dicke der Probe vollständig kompensiert. Die Tiefe, in die das Magnetfeld eindringt, beträgt in der Regel  $10^{-7-8}$  m. In Bezug auf die magnetischen Eigenschaften sind Supraleiter also ideale Diamagnete mit einer magnetischen Permeabilität von  $\mu = 0$ . Wie alle Diamagnete werden auch Supraleiter aus dem Magnetfeld herausgedrückt. In diesem Fall ist die Wirkung des Ausstoßes so stark, dass es möglich ist, eine Last mit Hilfe eines Magnetfeldes im Raum zu halten. In ähnlicher Weise kann man einen Permanentmagneten über einem Ring aus supraleitendem Material schweben lassen, in dem magnetisch induzierte, nicht gedämpfte Ströme zirkulieren.

Der supraleitende Zustand kann zerstört werden, wenn die magnetische Feldstärke einen bestimmten kritischen Wert überschreitet,  $H_{sc}$ . Je nach Art des Übergangs des Materials vom supraleitenden Zustand in den Zustand normaler elektrischer Leitfähigkeit unter dem Einfluss eines Magnetfeldes unterscheidet man Supraleiter der Art I und II. Bei Supraleitern der ersten Art erfolgt dieser Übergang abrupt, sobald die Feldstärke einen kritischen Wert erreicht. Supraleiter der zweiten Art

gehen allmählich von einem Zustand in den anderen über; für sie gibt es untere  $H_{sc}$  und obere  $H_{sc2}$  kritische Feldstärken. In der Zeit dazwischen befindet sich das Material in einem heterogenen Zwischenzustand, in dem normale und supraleitende Phasen nebeneinander existieren. Das Verhältnis zwischen ihren Volumina hängt von  $H$  ab. Das Magnetfeld dringt also allmählich in den Supraleiter der zweiten Art ein. Bis zur oberen kritischen Feldstärke behält das Material jedoch den Widerstand Null.

Die kritische magnetische Feldstärke hängt von der Temperatur ab. Bei  $T = T_{sc}$  geht sie gegen Null, steigt aber monoton an, wenn die Temperatur gegen 0 K tendiert. Für Supraleiter vom Typ I wird die Temperaturabhängigkeit von  $H_{sc}$  in guter Näherung durch den Ausdruck beschrieben:

$$H_{sc}(T) = H_{sc}(0)[1 - (T/T_{sc})^2] \quad (2.21)$$

wobei  $H_{sc}(0)$  die kritische Feldstärke bei absoluter Nulltemperatur ist.

Die kritische Magnetfeldstärke für Supraleiter vom Typ I liegt bei etwa  $10^5$  A/m, und bei Supraleitern vom Typ II kann der Wert der oberen kritischen Stärke  $10^7$  A/m übersteigen.

Die Supraleitung kann nicht nur durch ein äußeres Magnetfeld zerstört werden, sondern auch durch den Strom, der durch den Supraleiter fließt, wenn er einen bestimmten kritischen Wert von  $I_{sc}$  überschreitet. Für Supraleiter vom Typ I wird die Grenzstromdichte durch die kritische Magnetfeldstärke begrenzt, die an der Oberfläche der Probe erreicht wird. Im Falle eines langen geraden Drahtes mit kreisförmigem Querschnitt und dem Radius  $r$  wird der Grenzstrom durch die folgende Formel bestimmt:

$$I_{sc} = 2\pi r H_{sc}(T) \quad (2.22)$$

Da in supraleitenden Elementen der Strom in einer dünnen Oberflächenschicht fließt, nimmt die durchschnittliche Stromdichte, bezogen auf den gesamten Querschnitt, mit zunehmendem Drahtdurchmesser ab. Bei Supraleitern der zweiten Art ist die Beziehung (2.22) nicht erfüllt, und die Beziehung zwischen  $I_{sc}$  und  $N_{sc}$  ist komplexer.

Das Phänomen der Supraleitung bei tiefsten Temperaturen ist in der Natur recht weit verbreitet. Es gibt 26 Metalle mit Supraleitfähigkeit. Die meisten von ihnen sind Supraleiter der ersten Art mit kritischen Übergangstemperaturen unter 4,2 K. Dies ist einer der Gründe, warum die meisten supraleitenden Metalle nicht für elektrische Zwecke verwendet werden können. Weitere 13 Elemente weisen bei hohem Druck supraleitende Eigenschaften auf. Darunter befinden sich Halbleiter wie Silizium, Germanium, Selen, Tellur, Antimon usw. Es sei darauf hingewiesen, dass die Metalle, die unter normalen Bedingungen die besten

Leiter sind, keine Supraleitfähigkeit aufweisen. Dazu gehören Gold, Kupfer und Silber. Der geringe Widerstand dieser Materialien deutet auf eine schwache Wechselwirkung der Elektronen mit dem Gitter hin. Diese schwache Wechselwirkung führt in der Nähe des absoluten Nullpunkts nicht zu einer ausreichenden Anziehung der Elektronen, um die Coulomb-Abstoßung zu überwinden. Daher findet der Übergang in den supraleitenden Zustand nicht statt.

Neben den reinen Metallen sind auch viele intermetallische Verbindungen und Legierungen supraleitfähig. Die Gesamtzahl der derzeit bekannten Supraleiter beträgt etwa 2000. Unter ihnen weisen Legierungen und Verbindungen von Niob die höchsten kritischen Parameter auf (Tabelle 2.1). Einige von ihnen ermöglichen die Verwendung eines billigeren Kühlmittels, flüssigen Wasserstoffs, anstelle von flüssigem Helium, um den supraleitenden Zustand zu erreichen. Kürzlich wurden supraleitende Materialien mit  $T_{sc} > 77$  K entdeckt (siehe unten).

Tabelle 2.1. Grundlegende Eigenschaften einiger supraleitender Legierungen

Material	$T_{sc}$ , K	Features
V <sub>3</sub> Ga	14,8	Satisfactory mechanical properties
V <sub>3</sub> Si	17,0	Same
Ni <sub>3</sub> Sn	18,3	High current density, manufacturability
Nb <sub>3</sub> Ga	20,3	High transition temperature, manufacturability
Nb <sub>3</sub> Ge	21-24,3	The highest transition temperature

Alle intermetallischen Verbindungen und Legierungen werden als Supraleiter vom Typ II eingestuft. Die Einteilung der Stoffe in zwei Typen auf der Grundlage ihrer supraleitenden Eigenschaften ist jedoch nicht absolut. Jeder Supraleiter vom Typ I kann in einen Supraleiter vom Typ II umgewandelt werden, indem eine ausreichende Konzentration von Gitterfehlern im Kristall erzeugt wird. Supraleitung wird nie in Systemen mit Ferro- oder Antiferromagnetismus beobachtet. Die Bildung eines supraleitenden Zustands in Halbleitern und Dielektrika wird durch die geringe Konzentration an freien Elektronen verhindert. In Materialien mit einer hohen Dielektrizitätskonstante sind die Coulomb'schen Abstoßungskräfte zwischen den Elektronen jedoch erheblich geschwächt. Daher weisen einige von ihnen auch bei niedrigen Temperaturen supraleitende Eigenschaften auf. Ein Beispiel dafür ist Strontiumtitanat (SrTiO<sub>3</sub>), das zur Gruppe der Ferroelektrika gehört. Eine Reihe von Halbleitern kann durch Zugabe einer hohen Konzentration von

Legierungselementen (GeTe, SnTe, CuS usw.) in einen supraleitenden Zustand überführt werden.

Heute stellt die Industrie eine breite Palette von supraleitenden Drähten und Bändern für die verschiedensten Zwecke her. Die Herstellung solcher Leiter ist mit großen technologischen Schwierigkeiten verbunden. Diese sind auf die schlechten mechanischen Eigenschaften vieler Supraleiter, ihre geringe Wärmeleitfähigkeit und die komplexe Struktur der Drähte zurückzuführen. Intermetallische Verbindungen mit hohen kritischen Parametern sind besonders empfindlich. Daher müssen anstelle von einfachen Drähten und Bändern Zusammensetzungen aus zwei (in der Regel ein Supraleiter mit Kupfer) oder sogar mehreren Metallen hergestellt werden. Für die Herstellung von Litzen aus spröden Intermetallen ist das sogenannte Bronzeverfahren, das von der Industrie beherrscht wird, besonders vielversprechend. Bei diesem Verfahren wird durch Pressen und Ziehen ein Verbund aus dünnen Niobfäden in einer Zinn-Bronze-Matrix hergestellt. Beim Erhitzen diffundiert das Zinn in das Niob und bildet auf dessen Oberfläche einen dünnen supraleitenden Film. Ein solches Geschirr kann gebogen werden, aber die Filme bleiben intakt.

Supraleitende Elemente und Geräte werden in einer Vielzahl von Bereichen der Wissenschaft und Technik immer häufiger eingesetzt. Es wurden groß angelegte langfristige Programme für die industrielle Nutzung der Supraleitung entwickelt.

Eine der wichtigsten Anwendungen von Supraleitern ist die Erzeugung von superstarken Magnetfeldern. Supraleitende Solenoide ermöglichen es, homogene Magnetfelder mit einer Stärke von mehr als  $10^7$  A/m in einem relativ großen Raum zu erzeugen, während die Grenze bei herkömmlichen Elektromagneten mit Eisenkern bei etwa  $10^6$  A/m liegt. Darüber hinaus zirkuliert in supraleitenden Magnetsystemen ein nicht gedämpfter Strom, so dass keine externe Stromquelle erforderlich ist. Für die wissenschaftliche Forschung werden starke Magnetfelder benötigt. Supraleitende Solenoide können die Größe und den Energieverbrauch von Synchrotronen und anderen Teilchenbeschleunigern erheblich reduzieren. Der Einsatz supraleitender magnetischer Systeme für den Plasmaeinschluss in kontrollierten Fusionsreaktoren, in magnetohydrodynamischen (MHD) Wärme-Strom-Wandlern und als induktive Energiespeicher zur Abdeckung von Leistungsspitzen in großen Stromsystemen ist vielversprechend. Die Entwicklung von elektrischen Maschinen mit supraleitenden Erregerwicklungen ist weit fortgeschritten. Die Entwicklung von supraleitenden Transformatoren für hohe Leistungen ist wirtschaftlich gerechtfertigt. In verschiedenen Ländern wird der Entwicklung von supraleitenden Wechsel- und Gleichstromleitungen große Aufmerksamkeit geschenkt. Es wurden Prototypen von gepulsten supraleitenden Spulen für den Betrieb von Plasmakanonen und

Pumpssystemen für Festkörperlaser entwickelt. Supraleitende Volumenresonatoren mit supraleitenden Eigenschaften werden in der Funktechnik eingesetzt. Das Prinzip des mechanischen Ausstoßes von Supraleitern aus einem Magnetfeld ist die Grundlage für den Aufbau eines Ultrahochgeschwindigkeits-Schienenverkehrs auf einem "Magnetkissen".

Der Einsatz von Supraleitern eröffnet der Messtechnik breite Perspektiven. Indem sie die Fähigkeiten bestehender Messgeräte ergänzen, ermöglichen supraleitende Elemente die Erfassung sehr subtiler physikalischer Effekte, Messungen mit hoher Genauigkeit und die Verarbeitung großer Mengen an Informationen.

Auf der Grundlage der Supraleitung wurden bereits hochempfindliche Bolometer zur Aufzeichnung von Infrarotstrahlung, Magnetometer zur Messung schwacher magnetischer Flüsse und Indikatoren für extrem niedrige Spannungen und Ströme entwickelt.

1986 entdeckten Karl Müller und Georg Bednorz die erste Verbindung aus der Klasse der Hochtemperatursupraleiter aus Cuprit  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ . Für diese Entdeckung wurden sie 1987 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Hochtemperatursupraleiter sind eine Familie von Materialien (supraleitende Keramiken) mit einem gemeinsamen Strukturmerkmal, nämlich relativ gut getrennten Kupfer-Sauerstoff-Ebenen. Sie werden auch als Supraleiter auf Cupritbasis bezeichnet. Die supraleitende Übergangstemperatur, die in einigen Zusammensetzungen dieser Familie erreicht werden kann, ist die höchste aller bekannten Supraleiter. Derzeit wird der Rekordwert der kritischen Temperatur  $T_c = 135 \text{ K}$  (unter Druck  $T_c = 165 \text{ K}$ ) von der 1993 entdeckten Substanz  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{CuO}_{38+x}$  gehalten. S. N. Putilin und E. V. Antipov von der Staatlichen Universität Moskau. Die normalen (und supraleitenden) Zustände weisen viele Gemeinsamkeiten zwischen den verschiedenen Zusammensetzungen von Cupraten auf. Viele dieser Eigenschaften können im Rahmen der BKS-Theorie nicht erklärt werden. Derzeit gibt es keine konsistente Theorie der Supraleitung in Kupraten. Dennoch hat dieses Problem zu zahlreichen experimentellen und theoretischen Ergebnissen geführt.

## **2.8. Metalle und Legierungen für verschiedene Zwecke. Hochbeständige Legierungen.**

Hochohmige Legierungen sind leitfähige Materialien, deren  $\rho$ -Wert unter normalen Bedingungen mindestens  $0,3 \mu\Omega\cdot\text{m}$  beträgt. Sie werden bei der Herstellung von elektrischen Messgeräten, Referenzwiderständen, Rheostaten und elektrischen Heizgeräten verwendet. Wenn Legierungen in elektrischen Messgeräten verwendet werden, müssen sie nicht nur einen hohen spezifischen Widerstand, sondern auch einen möglichst niedrigen  $\alpha\rho$ -Wert sowie einen niedrigen Wärmeenergieausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu Kupfer aufweisen. In elektrischen Heizgeräten müssen

leitfähige Materialien lange Zeit in Luft bei Temperaturen von etwa 1000°C arbeiten. Unter einer Vielzahl von Werkstoffen für diese Zwecke sind in der Praxis vor allem Kupferbasislegierungen wie Mangan und Konstantan sowie Chrom-Nickel- und Eisen-Aluminium-Legierungen gebräuchlich.

Mangan ist die wichtigste Kupferbasislegierung für elektrische Messgeräte und Referenzwiderstände. Mangan zeichnet sich durch einen gelblichen Farbton aus und lässt sich gut zu dünnen Drähten bis zu einem Durchmesser von 0,02 mm ziehen. Mangan wird auch zur Herstellung von Bändern mit einer Dicke von 0,01-1 mm und einer Breite von 10-300 mm verwendet.

Constantan ist eine Legierung aus Kupfer und Nickel. Der Nickelgehalt in der Legierung entspricht ungefähr dem maximalen  $\rho$  und minimalen  $\alpha_p$  für Cu-Ni-Legierungen. Constantan lässt sich leicht verarbeiten; es kann zu Draht gezogen und zu Bändern mit denselben Abmessungen wie Mangan gewalzt werden. Der Wert  $\alpha_p$  von Constantan liegt nahe bei Null und hat normalerweise ein negatives Vorzeichen.

Constantan wird für die Herstellung von Rheostaten und elektrischen Heizelementen verwendet, wenn die Betriebstemperatur 400-450°C nicht überschreitet.

Wenn es auf eine ausreichend hohe Temperatur erhitzt wird, bildet sich auf der Oberfläche des Constantans ein Oxidfilm, der elektrisch isolierend wirkt. Constantandraht, der mit einer solchen Isolierung beschichtet ist, kann eng gewickelt werden, Spule auf Spule, ohne viel Isolierung zwischen den Spulen, es sei denn, die Spannung zwischen benachbarten Spulen übersteigt 1 V. Auf diese Weise werden z. B. Rheostate hergestellt. Die Oxidation eines Constantandrahts, bei der eine recht flexible und dauerhafte Oxidschicht entsteht, erfordert eine schnelle (nicht mehr als 3 Sekunden) Erhitzung des Drahts auf eine Temperatur von 900 °C und eine anschließende Abkühlung an der Luft.

Constantan in Verbindung mit Kupfer oder Eisen hat eine hohe thermische EMK. Dies ist ein Nachteil bei der Verwendung von Constantan-Widerständen in Messkreisen. Aufgrund des Temperaturunterschieds an den Kontaktstellen von Constantan-Leitern mit Kupfer treten Thermospannungen auf, die insbesondere bei Nullmessungen in Brücken und potentiometrischen Schaltungen eine Fehlerquelle darstellen können.

Constantan wird erfolgreich zur Herstellung von Thermoelementen verwendet, die die Temperatur messen, wenn diese mehrere hundert Grad nicht überschreitet.

Chrom-Nickel-Legierungen (Nichrome) werden zur Herstellung von Heizelementen für Elektroöfen, Fliesen, Lötkolben usw. verwendet. Diese Legierungen werden zur Herstellung von Drähten mit einem

Durchmesser von 0,02 mm und mehr sowie von Bändern mit einem Querschnitt von 0,1 x 1,0 mm und mehr verwendet.

Die hohe Wärmebeständigkeit von Nichrom lässt sich durch die hohe Beständigkeit dieser Legierung gegen fortschreitende Oxidation an der Luft bei hohen Temperaturen erklären.

Die Beständigkeit von Chrom-Nickel-Legierungen bei hohen Temperaturen an der Luft erklärt sich durch die nahe beieinander liegenden Werte der Temperaturkoeffizienten der linearen Ausdehnung der Legierungen und ihrer Oxidschichten. Daher reißen letztere nicht und lösen sich nicht vom Draht, wenn dieser erhitzt und gedehnt wird. Obwohl die Temperaturexpansionskoeffizienten der Legierung und der Chrom- und Nickeloxide nahe beieinander liegen, sind sie nicht gleich. Folglich kann die Oxidschicht bei plötzlichen Temperaturschwankungen reißen. Bei der anschließenden Erwärmung dringt Sauerstoff in die Risse ein und verursacht eine zusätzliche Oxidation der Legierung. Folglich kann ein elektrisches Heizelement aus einer Chrom-Nickel-Legierung bei wiederholtem kurzzeitigem Einschalten schneller ausbrennen als bei kontinuierlicher Beheizung (die Heiztemperatur ist in beiden Fällen gleich, und die Lebensdauer kann sich um den Faktor 20-30 unterscheiden).

Die Lebensdauer der Heizelemente kann erhöht werden, indem die Spiralen in ein festes, inertes Medium wie Tonschamotte eingebettet werden, das sie vor mechanischer Beanspruchung schützt und den Zugang von Sauerstoff verhindert.

Dünne Schichten aus Nichrom X20N80, die durch thermische Verdampfung und Kondensation im Vakuum hergestellt werden, werden häufig zur Herstellung von Dünnschichtwiderständen, insbesondere von Widerständen für integrierte Schaltungen, verwendet. Die chemische Zusammensetzung der Schichten kann sich erheblich von der ursprünglich aufgedampften Legierung unterscheiden, da der Dampfdruck von Nickel und Chrom bei den Verdampfungstemperaturen sehr unterschiedlich ist. Daher hängt die Zusammensetzung des Kondensats von vielen technologischen Faktoren ab: Abscheidungsrate, Temperatur und Substratmaterial, Restdampfdruck in der Kammer usw.

**Legierungen für Thermoelemente.** Die überwiegende Mehrheit der Thermoelemente wird aus Metalllegierungen hergestellt. Es gibt aber auch Materialien mit wesentlich höheren Thermospannungswerten. Zu diesen Materialien gehören vor allem Halbleiter. Die Technologie zur Herstellung von Thermoelementen aus Halbleitern ist jedoch sehr komplex und unvollkommen.

Die folgenden Legierungen werden am häufigsten zur Herstellung von Thermoelementen verwendet:



1) Copel (56% Cu und 44% Ni); 2) Alumel (95% Ni, der Rest ist Al, Si und Mn); 3) Chromel (90% Ni und 10% Cr); 4) Platin (90% Pt und 10% Rh).

Die Abhängigkeiten der Thermo-EMK von der Temperaturdifferenz zwischen heißer und kalter Verbindungsstelle für verschiedene Thermoelemente sind in Abb. 2.5 dargestellt.

Eine auch nur geringfügige Änderung der Legierungszusammensetzung kann zu erheblichen Änderungen der Thermo-EMK-Werte führen. Um eine hohe Messgenauigkeit mit Thermoelementen zu erreichen, ist in diesen Fällen eine vorherige Kalibrierung erforderlich, anstatt Standardtabellen zu verwenden.

Obere Temperaturgrenzen für Thermoelemente: Platin - Platin bis zu 1600°C; Kupfer - konstant und Kupfer - Kupfer bis zu 350°C; Eisen - konstant, Eisen - Kupfer und Chrom - Chrom bis zu 600°C; Chrom - Alumel bis zu 900-1000°C.

Von den bekannten Metall-Thermoelementen hat das Chrom-Copel-Thermoelement bei gleicher Temperaturdifferenz die höchste Thermospannung. Das thermoelektrische Vorzeichen der in Abb. 2.5 dargestellten Thermoelemente ist wie folgt: In der kalten Verbindungsstelle fließt der Strom vom ersten Material des Paares zum zweiten (von Chromel zu Copel, von Kupfer zu Konstant usw.) und in der heißen Verbindungsstelle umgekehrt.

Die meisten Thermoelemente arbeiten stabil in einer oxidierenden Umgebung. Bei Langzeitbetrieb ist eine allmähliche Änderung der Thermospannung zu beobachten. Die Gründe für diese Instabilität sind die Verunreinigung mit Verunreinigungen aus der umgebenden Atmosphäre, die Oxidation des Drahtes, die Flüchtigkeit der Komponenten, scharfe Biegungen und mechanische Verformungen, die innere Spannungen einbringen und strukturelle Heterogenität erzeugen. Platin-Rhodium-Thermoelemente weisen die höchste Stabilität, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit auf, trotz des niedrigen Wertes der Thermospannung. Dies ist auf die chemische Inertheit des Materials und den hohen Reinheitsgrad des gewonnenen Materials zurückzuführen.

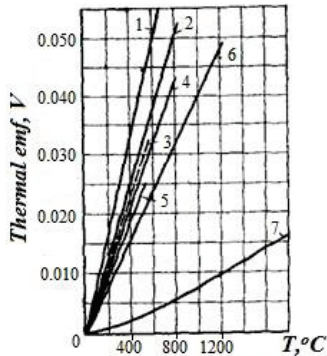


Abb. 2.5. Abhängigkeit der ThermoEMF von der Temperaturdifferenz zwischen heißem und kaltem Anschluss für Thermoelemente: 1 - Chromel - Kopel, 2 - Eisen - Kopel, 3 - Kupfer - Kopel, 4 - Eisen - Konstantan, 5 - Kupfer - Konstantan, 6 - Chromel - Alumel, 7 - Platinorhodium - Platin

**Nichtmetallische Materialien, die Strom leiten.** Neben Metallen und Metalllegierungen werden auch verschiedene Verbundwerkstoffe, einige Oxide und Modifikationen von Kohlenstoff als Widerstands-, Kontakt- und Leitelemente verwendet. In der Regel haben diese Materialien einen hochspezialisierten Zweck.

Unter den festen nichtmetallischen Leitern wird Graphit, eine der allotropen Formen von reinem Kohlenstoff, in der Elektrotechnik am häufigsten verwendet. Zu den wertvollen Eigenschaften von Graphit gehören neben seinem geringen spezifischen Widerstand eine hohe Wärmeleitfähigkeit, Beständigkeit gegenüber chemisch aggressiven Umgebungen, hohe Hitzebeständigkeit und leichte Bearbeitbarkeit. Naturgraphit, Anthrazit und pyrolytischer Kohlenstoff werden zur Herstellung von elektrischen Kohlenstoffprodukten verwendet.

Naturgraphit ist ein großkristallines Material mit einem sehr hohen Schmelzpunkt (ca. 3900 °C). Bei freiem Zugang zu Sauerstoff und hohen Temperaturen oxidiert es zu den gasförmigen Oxiden C und CO<sub>2</sub>.

Pyrolytischer Kohlenstoff wird durch thermische Zersetzung von Kohlenwasserstoffdämpfen im Vakuum oder in einer Inertgasumgebung hergestellt (Pyrolyse). Als zu pyrolysierende Stoffe werden in der Regel Methanverbindungen gewählt. Um eine dichte Struktur zu erhalten, ist eine Pyrolysetemperatur von mindestens 900 °C erforderlich. Pyrolytische Kohlenstoffschichten werden häufig zur Herstellung von linearen Oberflächenwiderständen verwendet.

Ruß ist eine feine Form von Kohlenstoff. Er entsteht als Produkt einer unvollständigen Verbrennung oder thermischen Zersetzung von kohlenstoffhaltigen Substanzen. Wird er in ein Bindemittel eingearbeitet, neigt Ruß zur Bildung von Strukturen.

Bei der Herstellung der meisten Kohlenstoffprodukte werden die Kohlenstoffrohstoffe zu Pulver gemahlen, mit Bindemitteln gemischt, geformt und gebrannt, so dass das Produkt eine ausreichende mechanische Festigkeit und Härte aufweist und bearbeitet werden kann.

Graphit wird in der Halbleiterwerkstofftechnik in großem Umfang zur Herstellung verschiedener Arten von Heizern und Schirmen, Shuttles, Tiegeln, Kassetten usw. verwendet. In Vakuum- oder Schutzgasumgebungen können Graphitprodukte bei Temperaturen von bis zu 2500°C betrieben werden.

Eine besondere Modifikation von Graphit ist glasartiger Kohlenstoff, der durch Polymerisation von organischen Polymerharzen wie Bakelit gewonnen wird, die über einen längeren Zeitraum in einer Atmosphäre neutraler Gase durchgeführt wird. Die hergestellten Produkte haben eine glänzende Oberfläche, ein glasartiges Aussehen und einen schalenartigen Bruch. Glaskohlenstoff unterscheidet sich von gewöhnlichem Graphit durch seine erhöhte chemische Beständigkeit.

Es gibt Verbundwerkstoffe, die Strom leiten. Verbundwerkstoffe sind eine mechanische Mischung aus einem leitfähigen Füllstoff und einer dielektrischen Bindung. Durch Änderung der Zusammensetzung und Verteilung der Komponenten lassen sich die elektrischen Eigenschaften solcher Materialien in einem relativ weiten Bereich steuern. Ein Merkmal aller Verbundwerkstoffe ist die Frequenzabhängigkeit der Leitfähigkeit und der Alterung bei längerer Belastung. In einigen Fällen ist die Nichtlinearität der elektrischen Eigenschaften deutlich ausgeprägt. Als Bestandteile der leitenden Phase werden Metalle, Graphit, Ruß, einige Oxide und Karbide verwendet. Sowohl organische als auch anorganische Dielektrika können als Bindemittel dienen.

Unter der Vielzahl der kombinierten leitfähigen Materialien sind vor allem die Kontaktoren und Cermets zu nennen.

Kontaktmittel werden als leitfähige Klebstoffe, Farben, Beschichtungen und Emails verwendet. Es handelt sich um dünnflüssige oder pastenartige Polymerzusammensetzungen. Als Bindemittel werden verschiedene Kunstharze und als leitfähige Füllstoffe feine Metallpulver (Silber, Nickel, Palladium) verwendet. Die erforderliche Viskosität von Kontaktol wird durch die Verwendung von Lösungsmitteln (Aceton, Alkohol usw.) vor dem Auftragen auf die Oberfläche sichergestellt. Kontaktmaterialien werden zur Herstellung von Kontakten zwischen Metallen, Metallen und Halbleitern, zur Herstellung von Elektroden auf Dielektrika, zur Abschirmung von Räumen und Geräten gegen Interferenzen, für leitende Verbindungen auf dielektrischen Substraten, in flexiblen Wellenleitern und anderen elektronischen Produkten verwendet.

Cermets sind Metall-Dielektrikum-Zusammensetzungen mit einem anorganischen Bindemittel. Sie werden zur Herstellung von Dünnschichtwiderständen verwendet. Ein wesentlicher Vorteil von

Cermet-Filmen ist die Möglichkeit, ihren spezifischen Widerstand in einem weiten Bereich zu variieren. Am weitesten verbreitet ist die Mikrozusammensetzung Cr-SiO<sub>2</sub>, deren dünne Schichten durch thermische Verdampfung und Kondensation im Vakuum hergestellt werden, gefolgt von einer Wärmebehandlung zur Stabilisierung der Eigenschaften.

In Dickschicht-Mikroschaltungen werden Widerstände verwendet, die aus einer Zusammensetzung von Glas mit Palladium und Silber bestehen.

**Materialien auf der Basis von leitfähigen Oxiden.** Zinndioxid ist von größtem praktischen Interesse. In der Funkelektronik wird es hauptsächlich in Form von dünnen Schichten verwendet. Solche Schichten werden mit verschiedenen Verfahren hergestellt: thermische Vakuumverdampfung und Kondensation mit anschließender Luftglühung, kathodisches oder Ionenplasma-Sputtern usw. Oxid zeichnet sich durch eine sehr starke Haftung auf Keramik- oder Glassubstraten aus. Die Adhäsionskraft erreicht 20 MPa und ist damit wesentlich höher als die von Metallschichten. Der spezifische Widerstand der Schichten hängt vom Grad der stöchiometrischen Störung ab und kann bis zu  $10^{-5}$  Ohm·m betragen. Das Erhitzen von SnO<sub>2</sub>-Filmen auf über 240 °C führt zu einer irreversiblen Änderung des Widerstands infolge einer vollständigeren Oxidation. Gleichzeitig sind die Schichten gegen viele chemische Umgebungen beständig - sie werden nur durch Flusssäure und kochende Laugen zerstört. Dünne Schichten aus Zinndioxid haben eine wertvolle optische Eigenschaft - hohe Transparenz im sichtbaren und infraroten Bereich des Spektrums. Die intrinsische Absorption von SnO<sub>2</sub>-Filmen mit einer Dicke von bis zu 2 Mikrometern im sichtbaren Teil des Spektrums beträgt nicht mehr als 3 %.

Die Kombination aus hoher optischer Transparenz und erhöhter elektrischer Leitfähigkeit von Zinndioxidfilmen macht sie geeignet für die Verwendung als leitende Beschichtungen auf den Innenwänden von Glaszylindern elektrischer Vakuumgeräte, Elektroden von Elektrolumineszenzcondensatoren und Flüssigkristallanzeigen, Fernsehübertragungsröhren usw.

Neben Zinndioxid weisen auch Schichten aus Indiumoxid In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eine hohe elektrische Leitfähigkeit und Transparenz im sichtbaren Spektrum auf. Sie haben ähnliche Anwendungsmöglichkeiten.

**Lote.** Lote sind spezielle Legierungen, die zum Hartlöten verwendet werden. Das Hartlöten dient entweder zur Herstellung einer mechanisch festen Verbindung oder zur Herstellung eines elektrischen Kontakts mit geringem Übergangswiderstand. Beim Hartlöten werden die Verbindungen und das Lot erhitzt. Da das Lot einen deutlich niedrigeren Schmelzpunkt hat als das zu verbindende Metall, schmilzt es, während das Grundmetall fest bleibt. An der Grenzfläche zwischen dem

geschmolzenen Lot und dem festen Metall laufen verschiedene physikalische und chemische Prozesse ab. Das Lot benetzt das Metall, breitet sich auf ihm aus und füllt die Spalten zwischen den zu verbindenden Teilen aus. Gleichzeitig diffundieren die Lotbestandteile in das unedle Metall, das unedle Metall löst sich im Lot auf, so dass sich eine Zwischenschicht bildet, die nach dem Erstarren die Teile zu einem Ganzen verbindet.

Lote werden gewöhnlich in zwei Gruppen eingeteilt: Weich- und Hartlote. Weichlote haben einen Schmelzpunkt von bis zu 300 °C, während Hartlote einen Schmelzpunkt von über 300 °C haben. Darüber hinaus unterscheiden sich Lote erheblich in ihrer mechanischen Festigkeit. Weichlote haben eine Zugfestigkeit von 16-100 MPa, während Hartlote eine Zugfestigkeit von 100-500 MPa haben.

Das Lot wird unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der zu verbindenden Metalle, der erforderlichen mechanischen Festigkeit der Verbindung, seiner Korrosionsbeständigkeit und der Kosten ausgewählt. Beim Löten von leitfähigen Teilen muss die spezifische Leitfähigkeit des Lots berücksichtigt werden.

Weich- und Hartlote werden in verschiedenen Bereichen der Funkelektronik eingesetzt.

Weichlote sind Zinn-Blei-Legierungen mit einem Zinngehalt von 10 bis 90 %, der Rest ist Blei. Die Leitfähigkeit dieser Lote beträgt 9-15 % derjenigen von reinem Kupfer. Viele Zinn-Blei-Lote enthalten einen geringen Anteil an Antimon.

Die gebräuchlichsten festen Lote sind Kupfer-Zink und Silber mit verschiedenen Zusätzen.

Hilfsmittel für ein sicheres Löten werden Flussmittel genannt. Sie müssen:

- 1) Oxide und Verunreinigungen von der Oberfläche der zu lötenen Metalle aufzulösen und zu entfernen;
- 2) schützt die Oberfläche und das geschmolzene Lot vor Oxidation während des Lötprozesses
- 3) die Oberflächenspannung des geschmolzenen Lots zu verringern;
- 4) die Benetzbarkeit der zu verbindenden Oberflächen durch das Lot zu verbessern.

Flussmittel werden je nach ihrer Wirkung auf das zu lötenen Metall in mehrere Gruppen eingeteilt.

Aktive oder saure Flussmittel werden auf der Grundlage aktiver Substanzen wie Salzsäure, Chlorid- und Fluoridmetalle usw. hergestellt. Diese Flussmittel lösen die Oxidschichten auf der Metalloberfläche intensiv auf, was eine gute Haftung und damit eine hohe mechanische Festigkeit der Verbindung gewährleistet. Flussmittlrückstände nach dem Hartlöten führen zu starker Korrosion der Verbindung und des

Grundmetalls. Daher werden diese Flussmittel nur dann verwendet, wenn ein gründliches Waschen und eine vollständige Entfernung ihrer Rückstände möglich ist.

Die Verwendung aktiver Flussmittel ist beim Zusammenlöten von Elektro- und Funkgeräten strengstens untersagt.

Säurefreie Flussmittel sind Kolophonium und Flussmittel, die auf seiner Basis unter Zusatz inaktiver Substanzen (Alkohol, Glycerin) hergestellt werden.

Aktivierete Flussmittel werden auf der Basis von Kolophonium unter Zugabe von Aktivatoren hergestellt - kleine Mengen Salzsäure oder Phosphorsäure, Anilin, Salicylsäure, Salzsäurediethylamin usw. Die hohe Aktivität einiger aktivierter Flussmittel ermöglicht das Löten ohne vorherige Entfernung der Oxide nach dem Entfetten.

Korrosionsschutz-Flussmittel werden auf der Basis von Phosphorsäure unter Zusatz verschiedener organischer Verbindungen und Lösungsmittel sowie auf der Basis organischer Säuren hergestellt. Flussmittelrückstände verursachen keine Korrosion.

## **2.9. Nanotechnologische Materialien und Nanotechnologien.**

Nanowerkstoffe sind Materialien, die unter Verwendung von Nanopartikeln mit Hilfe der Nanotechnologie hergestellt werden. Zu den Nanomaterialien gehören Objekte mit einer ihrer charakteristischen Dimensionen im Bereich von 1 bis 100 nm. Nanomaterialien werden unterteilt in nanoporöse Strukturen, Nanopartikel, Nanoröhren und Nanofasern, Nanodispersionen (Kolloide), Nanokristalle und Nanocluster.

Je nach ihrem Zweck werden Nanomaterialien in funktionelle, zusammengesetzte und strukturelle Materialien unterteilt. Nach der Anzahl der Dimensionen: nulldimensional, eindimensional, zweidimensional, dreidimensional.

Die Eigenschaften von Nanomaterialien unterscheiden sich in der Regel von ähnlichen Materialien im massiven Zustand. So lassen sich bei Nanomaterialien beispielsweise Veränderungen der magnetischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften beobachten. Bei besonders kleinen Materialien können Sie eine Veränderung des Schmelzpunkts in Richtung einer Senkung feststellen.

Nanomaterialien sind mit dem Problem der Lagerung und des Transports konfrontiert. Mit ihrer entwickelten Oberfläche sind die Materialien sehr aktiv und interagieren leicht mit der Umwelt, insbesondere Nanomaterialien aus Metall. Die Verwendung von Nanomaterialien ist noch nicht weit verbreitet, da ihre eingehende Untersuchung gerade erst begonnen hat und das Wissen über diese Materialien erst noch gesammelt werden muss.

Die ersten Elemente von Nanostrukturen waren die 1960 entdeckten stabilen mehratomigen Kohlenstoffcluster  $C_n$ , wobei  $n = 60, 70$  für die Anzahl der Kohlenstoffatome in den stabilsten Clustern steht. Sie wurden Fullerene genannt, zu Ehren des amerikanischen Architekten und Erfinders Richard Fuller, der Gebäudestrukturen in Form von Halbkugeln vorschlug, die aus Fragmenten von polyedrischen Oberflächen bestehen. Die ersten Fullerene wurden durch die Analyse von Produkten gewonnen, die durch Laserstrahlung auf Graphit entstanden.

Im Gegensatz zu Graphit und Diamant, die periodische Gitter aus Atomen haben, sind Fullerene Moleküle. Das Gerüst des  $C_{60}$ -Moleküls beispielsweise besteht aus 12 regelmäßigen Fünfecken (Pentagonen) und 20 ungleichen Sechsecken (Abb. 2.6).

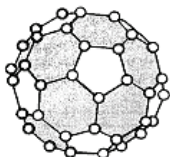


Abb. 2.6 Fulleren

Es stellte sich heraus, dass einige Clusterkonfigurationen sehr stabil sind und alle äußeren Atome in ihnen sehr eng gehalten werden. Solche Cluster werden als magische Cluster bezeichnet, und die Anzahl der Atome in ihnen wird als magische Zahl bezeichnet. Für Alkalimetallatome lauten die magischen Zahlen zum Beispiel 8, 20, 40 und für Edelmetallatome 13, 55, 137, 255.  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  und andere Fullerene sind ebenfalls magische Zahlen.

Aufgrund der Vielfalt der Zusatzstoffe geht die Zahl der Varianten von Fulleren-Materialien, Halbleitern mit Metalleigenschaften, Ferromagneten und Polymeren in die Tausende.

$C_{60}$ -Moleküle können Kristalle aus sogenannten Fulleriten mit einem FCC-Gitter und eher schwachen intermolekularen Bindungen bilden. Die interatomaren Hohlräume von Fullerenen können mit Verunreinigungsatomen (Alkalimetalle usw.) gefüllt werden. Wie sich herausstellte, werden auf der Grundlage von Fulleriden, die mit K, Rb, Cs usw. dotiert sind, Nanomaterialien mit unterschiedlichen, oft einzigartigen Eigenschaften erhalten.

Daher können Fulleren- und Fulleridverbindungen als Bausteine dreidimensionaler Nanoblöcke betrachtet werden.

Fullerene wurden in der Nanoelektronik als mechanisch starke Widerstände mit hoher Auflösung eingesetzt. Durch den Zusatz von Fullerenen kann die Widerstandsfähigkeit von Widerständen gegen Plasmaätzung erhöht und die optische Absorption bei einer Wellenlänge

von 0,193 Mikrometern verringert werden. Im Jahr 2000 wurden Nanotransistoren auf der Basis von C60-Fulleren-Clustern hergestellt.

**Nanoröhren.** Nanoröhren sind lange Strukturen, die aus gewundenen sechseckigen Gittern mit Kohlenstoffatomen in den Knotenpunkten bestehen. Sie wurden 1991 von dem japanischen Forscher Sumio Iijima als Nebenprodukt bei der Synthese der Fullerene C40, C60, C70 usw. entdeckt. Der Wissenschaftler untersuchte den Niederschlag, der sich auf der Kathode bildet, wenn Graphit in einem elektrischen Lichtbogen im Vakuum oder unter Inertgas versprüht wird. Die Ketten der abgeschiedenen Kohlenstoffatome sind zu Röhren mit einem Durchmesser von einigen Nanometern und einer Länge von bis zu mehreren Mikrometern gerollt. Die Enden der Röhren sind mit ein- oder mehrlagigen halbkugelförmigen Molekülen verschlossen, die in ihrer Struktur Fullerenen ähneln. Es wurde festgestellt, dass Nanoröhren Moleküle sind, die mehr als 106 Kohlenstoffatome enthalten und die Form von einwandigen Röhren mit einem Durchmesser von 1,1 nm und einer Länge von einigen zehn Mikrometern haben. Die Länge der Kohlenstoff-Nanoröhren beträgt jedoch das Tausendfache oder mehr als ihr Durchmesser. Dies macht es im Prinzip möglich, die Röhren als Leiter für den dreidimensionalen Aufbau von Nanoschaltungen zu verwenden.

Die Struktur eines einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhrchens ist ein zylindrisch aufgerolltes Band mit einer graphitähnlichen Packung von Atomen. Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind magisch. Dieser Umstand hat dazu geführt, dass die Technologie zur vorläufigen Herstellung magischer Nanostrukturen in speziellen Reaktoren und ihre anschließende Verwendung für den Aufbau von Nanotransistoren in Aussicht gestellt wurde.

Die Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften von Nanoröhren von geometrischen Parametern wurde auf der Grundlage von quantenchemischen Berechnungen ihrer Bandstruktur vorhergesagt. Kohlenstoff-Nanoröhren stellen Quantenleiter mit quantenmechanischen Eigenschaften dar. Insbesondere nimmt die Bandlücke für die Elektronen eines Quantenleiters mit der Stärke des angelegten transversalen elektrischen Feldes zu. In diesem Fall ist die Bandlücke umgekehrt proportional zum Durchmesser der Röhre:  $\Delta W_g \sim 1/d$ . Der Entwurf eines nanoelektronischen Feldeffekttransistors beruht auf diesen Prinzipien. Diese Zusammenhänge wurden 1998 experimentell bestätigt.

Im Jahr 2004 wurde ein Nanotransistor mit einer Frequenz von 2,6 GHz auf der Grundlage eines einlagigen Kohlenstoff-Nanoröhrchens mit Goldelektroden hergestellt. Im selben Jahr wurde ein rekordverdächtig kleiner Nanotransistor auf der Grundlage kleinerer Kohlenstoff-Nanoröhren hergestellt: Der Röhrendurchmesser beträgt 0,7-1,1 nm bei einer Kanallänge von 50 nm. Die Drain- und Source-Elektroden wurden aus Palladium hergestellt. Der Transistor hat außerdem ein



rekordverdächtig hohes Widerstandsverhältnis im geschlossenen und offenen Zustand - etwa  $10^6$ .

Nanoröhren haben eine Reihe von einzigartigen Eigenschaften. Einzelwandige Nanoröhren können um bis zu 16 % ihrer Länge gedehnt werden. Aufgrund ihrer hohen mechanischen Festigkeit, die hundertmal höher ist als die von Stahl, eignen sie sich für den Einsatz als Sonden in Rastertunnelmikroskopen. Aus Nanoröhren lassen sich ultrastarke und elastische Gewebe herstellen. Nanoröhren mit offenen Enden haben einen Kapillareffekt und können Flüssigkeiten und geschmolzenes Metall anziehen. So lassen sich auf der Basis von Nanoröhren supraleitende Fäden mit einem Durchmesser von mehreren Nanometern herstellen. Metallische Nanoröhren können sehr hohen Stromdichten standhalten (100-1000 Mal höher als herkömmliche Metalle).

Eine besondere Eigenschaft von Nanoröhren ist die Chiralität. Die Chiralität ist der Ausrichtungswinkel der Graphitebene relativ zur Rohrachse. Je nach Chiralität kann ein einlagiges Rohr die Eigenschaften von Graphit aufweisen, einem Halbmetall, das keine Bandlücke hat. Das Nanoröhrchen kann auch die Eigenschaften eines Halbleiters mit einer Bandlücke von 0,01-0,70 eV haben. Halbleiter-Nanoröhren haben die Fähigkeit, unter dem Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes in den Isolatorzustand zu wechseln.

Werden zwei Nanoröhren mit unterschiedlicher Chiralität zusammengefügt, kann ein p-n-Übergang entstehen. Die Größe eines solchen Übergangs beträgt mehrere Nanometer und eröffnet die Möglichkeit, elektronische Geräte zusammenzubauen.

Ein Beispiel für ein Modell der Struktur eines elektronischen Bauteils mit gleichrichtenden Eigenschaften ist in Abb. 2.7 dargestellt. Der Kontakt wird durch die Verbindung zweier Nanoröhren mit unterschiedlicher Chiralität hergestellt. Der Metall-Halbleiterkontakt in einer solchen Diodenstruktur kann durch selektives Füllen und Dotieren der Kohlenstoffnanoröhre mit Verunreinigungen erreicht werden, die metallische und halbleitende oder dielektrische Leitfähigkeitstypen erzeugen.

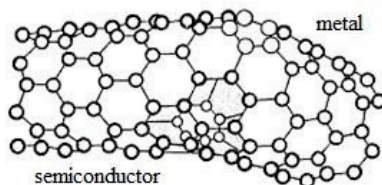


Abb. 2.7. Modell einer gebogenen Kohlenstoffröhre - Diode

Nanoröhren haben hohe Emissionseigenschaften. Bei einer Spannung von 500 V bei Raumtemperatur erreicht die autoelektronische Emissionslücke  $0,1 \text{ A/cm}^2$ .

Auf der Grundlage von Kohlenstoff-Nanoröhren werden ultradünne Anzeigetafeln entwickelt, die in ihren Parametern die von seltenen Kristallen übertreffen.

Eines der Merkmale von Kohlenstoff-Nanoröhren ist der hohe negative Wert der diamagnetischen Suszeptibilität. Der Diamagnetismus nimmt bei niedrigen Temperaturen zu.

Die praktische Anwendung von Nanoröhren führt zu einer Lösung für eine Reihe von Problemen. Die Technologien zur Herstellung von Nanoröhren sind nicht ausreichend, und das erlaubt nicht die Herstellung von Nanoröhren mit einem bestimmten Durchmesser und einer bestimmten Länge, einer bestimmten Chiralität. Für einen praktischen Einsatz von Nanoröhren ist es notwendig, Strom zu liefern, verbunden mit einer Quantisierung der elektrischen und magnetischen Felder. Identifizieren Sie und andere Probleme.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Kapitel 3. Halbleitermaterialien

### 3.1 Intrinsische und verunreinigte Halbleiter

Der Strom in Halbleitern ist die Bewegung von Elektronen und Löchern und enthält Drift- und Diffusionskomponenten. Die Driftkomponente des Stroms ist proportional zur Konzentration der Ladungsträger, die Diffusionskomponente ist proportional zum Gradienten der räumlichen Verteilung dieser Konzentration.

Die statistische Methode der Energieverteilung von Ladungsträgern in einem Halbleiter führt zu folgendem Ergebnis. Die Konzentration der Elektronen in einem Halbleiter, dessen Fermi-Energie (Niveau) in der verbotenen Zone liegt und mehr als  $kT$  unter dem Boden des Leitungsbandes liegt, wird durch die folgende Formel bestimmt:

$$n = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (3.1)$$

wobei  $N_c$  die effektive Zustandsdichte im Leitungsband,  $E_c$  die Energie am Boden des Leitungsbandes und  $E_F$  die Fermienergie ist.

Solche Halbleiter werden als nicht entartet bezeichnet.

Wenn die Ladungsträgerkonzentration zunimmt, kann der Zeitpunkt kommen, an dem  $E_c < E_F$  ist und solche Halbleiter in einen Zustand übergehen, der als entartet bezeichnet wird. Für sie wird die Ladungsträgerkonzentration durch numerische Berechnungen nach der Formel bestimmt:

$$n = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot F_{1/2}\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (3.2)$$

Die Funktion  $F_{1/2}$  ist das Fermi-Dirac-Integral, das in Tabellenform dargestellt wird.

Die folgenden Formeln gelten für die Konzentration von Löchern im Valenzband:

- für einen nicht entarteten Halbleiter:  $p = N_v \cdot \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)$  ( 3.3 )

- für einen entarteten Halbleiter:  $p = N_v \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)$  ( 3.4 )

Die Grenzkonzentration von Löchern in nicht entarteten und entarteten p-Typ-Halbleitern wird ähnlich wie die Elektronenkonzentration bestimmt und beträgt z. B.  $3,75 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  für Silizium.

Halbleiter, die frei von Verunreinigungen sind, werden als intrinsisch bezeichnet. In intrinsischen Halbleitern werden Elektronen, die sich in der Nähe der Decke des Valenzbandes befinden, durch thermische Energie angeregt und können in das Leitungsband eintreten, wobei Löcher im Valenzband zurückbleiben. Daher sind die Konzentrationen der Elektronen im Leitungsband und der Löcher im Valenzband gleich  $n = p \equiv n_i$ , wobei  $n_i$  die intrinsische Ladungsträgerkonzentration ist.

Nehmen wir an, dass dem intrinsischen Halbleiter Verunreinigungen hinzugefügt werden, z. B. Phosphor (P)-Atome (Donatoren) zu Silizium hinzugefügt werden. Die Ionisierungsenergie von Phosphor ist gering - 0,012 eV, so dass bei Raumtemperatur alle P-Atome ionisiert sind. Dementsprechend ist die Elektronenkonzentration gleich der P-Konzentration. Wird die Temperatur gesenkt, werden die Verunreinigungen nur teilweise ionisiert und die Elektronenkonzentration sinkt. Dieses Phänomen wird als Carrier-Freezing-Effekt bezeichnet. Ähnliche Prozesse treten auf, wenn eine Akzeptorverunreinigung hinzugefügt wird. Wenn sowohl Donatoren als auch Akzeptoren bei Raumtemperatur eingebracht werden, werden beide Arten von Verunreinigungen ionisiert, und die Menge der Ladungsträger ergibt sich aus der Differenz zwischen Donatoren und Akzeptoren. Dieser Effekt wird als Verunreinigungskompensation bezeichnet.

Die Temperaturabhängigkeit der Elektronenkonzentration an den Donatorniveaus in einem n-Typ-Halbleiter wird bestimmt:

$$n_d = N_d \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_d - E_F}{kT}\right)} \right\}, \quad (3.5)$$

wobei  $N_d$  die Konzentration der Donatoren,  $E_d$  das Energieniveau der Donatoren,  $\Delta E_d = E_d - E_F$  die Ionisierungsenergie der Donatoren und  $g$  der Entartungsfaktor ist, der gleich 2 ist, wobei der Elektronenspin berücksichtigt wird.

Eine ähnliche Formel erhält man für einen Akzeptor-Halbleiter.

### 3.2. Temperaturabhängigkeit der Stromträgerkonzentration und der spezifischen Leitfähigkeit in Halbleitern

In einem weiten Temperaturbereich und für verschiedene Verunreinigungsgehalte gibt es Temperaturabhängigkeiten der Ladungsträgerkonzentration in einem n-Typ-Halbleiter, wie in Abb. 3.1 dargestellt. Betrachten Sie den Verlauf der Kurven, die einer relativ niedrigen Konzentration von  $N_{DI}$  Donatoren entsprechen. Im Niedertemperaturbereich ist der Anstieg der Elektronenkonzentration bei Erwärmung des Halbleiters auf eine Erhöhung des Donor-Ionisierungsgrades zurückzuführen (der Abschnitt der Kurve zwischen den Punkten 1 und 4).

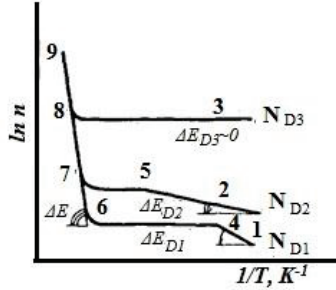


Abb. 3.1. Charakteristische Abhängigkeiten der Konzentration von Ladungsträgern in einem Halbleiter von der Temperatur bei verschiedenen Konzentrationen von Donor-Verunreinigungen  $N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$

Jeder ionisierte Donor kann als ein Zentrum betrachtet werden, das ein Loch eingefangen hat. Wenn man davon ausgeht, dass die Gesamtzahl der Energiezustände auf den Donatorniveaus pro Volumeneinheit gleich  $N_{D1}$  ist, schreiben wir für die Konzentration der ionisierten Donatoren  $p_D$

$$p_D = N_{D1} \exp\left(\frac{E_{D1} - E_F}{kT}\right), \quad (3.6)$$

wobei  $E_{D1}$  die Position des Donorniveaus auf der Energieskala ist.

Bei niedriger Temperatur ist die Konzentration der ionisierten Donatoren gleich der Konzentration der Elektronen:

$$p_D = n_o \approx N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (3.7)$$

Daraus folgt, dass

$$p_D n_o = n_o^2 \approx N_c N_{D1} \exp\left(\frac{E_{D1} - E_F}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (3.8)$$

und dementsprechend

$$n_o = \sqrt{N_c N_{D1}} \exp\left(-\frac{\Delta E_{D1}}{2kT}\right), \quad (3.9)$$

wobei  $\Delta E_{D1} = E_c - E_{D1}$ .

Aus dem Ausdruck (3.9) folgt, dass die Steigung der Linie im Abschnitt 1-4 von Abb. 3.1 die Ionisierungsenergie der Verunreinigungen charakterisiert. Bei der weiteren Erwärmung bei einer bestimmten Temperatur, die dem Punkt 4 entspricht, werden alle Elektronen aus den Verunreinigungsniveaus in das Leitungsband übertragen. Gleichzeitig ist die Wahrscheinlichkeit der Ionisierung der eigenen Atome des Halbleiters immer noch vernachlässigbar. Daher bleibt die Ladungsträgerkonzentration in einem relativ weiten Temperaturbereich (Bereich 4-6) konstant und ist nahezu gleich der Konzentration der Donatoren. Dieser Bereich der Temperaturabhängigkeit wird gemeinhin als Verarmungsgebiet bezeichnet.

Bei relativ hohen Temperaturen (Kurvenabschnitt jenseits von Punkt 6) beginnt der Elektronentransfer über die Bandlücke eine

dominante Rolle zu spielen, d. h. es erfolgt der Übergang zur intrinsischen elektrischen Leitfähigkeit, bei der die Elektronenkonzentration gleich der Lochkonzentration ist und die Kurvensteilheit durch die Bandlücke des Halbleiters bestimmt wird.

Bei den meisten Verunreinigungshalbleitern liegt die Temperatur  $T_i$  des Übergangs zur intrinsischen elektrischen Leitfähigkeit deutlich über der Raumtemperatur. Für n-Typ-Germanium mit einer Donorkonzentration von  $N_D \sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$  liegt die  $T_i$ -Temperatur beispielsweise bei etwa 450 K. Der Wert von  $T_i$  hängt von der Konzentration der Verunreinigungen und der Breite der Halbleiterbandlücke ab.

Mit zunehmender Verunreinigungskonzentration verschieben sich die Teile der Kurven, die der elektrischen Leitfähigkeit der Verunreinigungen entsprechen, nach oben. Der Grund für diese Verschiebung lässt sich anhand der Formel (3.9) leicht nachvollziehen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Konzentration der Fremdatome der Abstand zwischen ihnen abnimmt. Dies führt zu einer stärkeren Wechselwirkung der Elektronenschalen der Fremdatome und zur Aufspaltung der diskreten Energieniveaus in Fremdatomzonen. Dementsprechend nimmt die Ionisierungsenergie der Verunreinigungen ab. Aus diesem Grund gilt:  $\Delta E_{D1} > \Delta E_{D2} > \Delta E_{D3}$ . Je höher die Konzentration der Verunreinigungen ist, desto höher ist die Temperatur ihrer Verarmung.

Bei einer ausreichend hohen Konzentration von Donatoren ( $N_{D3}$ ) geht deren Ionisierungsenergie gegen Null, da sich das Störstellenband mit dem Leitungsband überlappt. Ein solcher Halbleiter wird degeneriert. In diesem Fall ist die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration durch eine gestrichelte Linie mit zwei geraden Segmenten 3-8 und 8-9 gekennzeichnet. Die Konzentration der Elektronen in einem entarteten n-Typ-Halbleiter ist über den gesamten Bereich der Störstellenleitfähigkeit konstant. Ein entarteter Halbleiter ist in der Lage, auch bei sehr niedrigen Temperaturen elektrischen Strom zu leiten. Aufgrund dieser Eigenschaften ähneln entartete Halbleiter den Metallen. Daher werden sie manchmal auch als Halbmetalle bezeichnet.

Das Fermi-Niveau ist einer der wichtigsten Parameter zur Charakterisierung des Elektronengases in Halbleitern. Die Position des Fermi-Niveaus in einem nicht entarteten Halbleiter bei niedrigen Temperaturen kann durch Logarithmierung von Gleichung (3.7) ermittelt werden:

$$\ln p_D = \ln N_{D1} + \frac{E_D - E_F}{kT} = \ln n_o = \ln N_C - \frac{E_C - E_F}{kT}, \quad (3.10)$$

daraus folgt, dass

$$E_F = (E_C + E_D)/2 + kT/2 \cdot \ln(N_D/N_C) \quad (3.11)$$

Wie Sie sehen können, liegt das Fermi-Niveau in einem n-Typ-Halbleiter bei sehr niedrigen Temperaturen in der Mitte zwischen dem unteren Ende des Leitungsbandes und dem Donator-Niveau. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die Donor-Zustände gefüllt werden, und das Fermi-Niveau verschiebt sich nach unten. Bei hohen Temperaturen hat der Halbleiter Eigenschaften, die seinen eigenen sehr ähnlich sind, und das Fermi-Niveau tendiert zur Mitte der Bandlücke (Abb. 3.2, a).

Alle betrachteten Regelmäßigkeiten sind in ähnlicher Weise auch bei p-Typ-Halbleitern zu beobachten. Die Temperaturabhängigkeit des Fermi-Niveaus für einen Loch-Halbleiter ist in Abb. 3.2, b dargestellt.

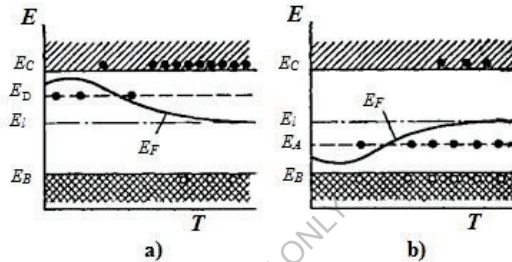


Abb. 3.2. Temperaturvariation der Fermi-Niveau-Position in einem Störstellen-Halbleiter; a - n-Typ, b - p-Typ

Nach der Betrachtung des Einflusses der Temperatur auf die Konzentration und die Beweglichkeit der Ladungsträger lässt sich der allgemeine Verlauf der Änderung der spezifischen Leitfähigkeit mit der Temperatur darstellen. In Halbleitern mit Atomgittern (wie auch in ionischen Halbleitern bei erhöhten Temperaturen) ändert sich die Mobilität mit der Temperatur relativ wenig (nach einem Potenzgesetz), die Konzentration dagegen sehr stark (nach einem Exponentialgesetz). Daher ist die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit ähnlich wie die Temperaturabhängigkeit der Konzentration (Abb. 3.3).

In dem Temperaturbereich, der der Verarmung an Verunreinigungen entspricht, wenn die Konzentration der Hauptladungsträger praktisch unverändert bleibt, sind Temperaturänderungen der spezifischen Leitfähigkeit auf die Temperaturabhängigkeit der Mobilität zurückzuführen. Eine Abnahme der spezifischen Leitfähigkeit im Niedertemperaturbereich ist zum einen mit einer Abnahme der Konzentration der von Fremdatomen (Donatoren oder Akzeptoren) gelieferten Ladungsträger und zum anderen mit einer Abnahme der Mobilität aufgrund der Streuung an ionisierten Fremdatomen verbunden. Der starke Anstieg der spezifischen Leitfähigkeit bei höheren Temperaturen entspricht dem Bereich der

intrinsischen Leitfähigkeit, der durch die Gleichheit der Konzentrationen von Elektronen und Löchern gekennzeichnet ist. Die Steigung der Linie im Bereich der intrinsischen Leitfähigkeit kann zur Bestimmung der Breite der Halbleiterbandlücke verwendet werden.

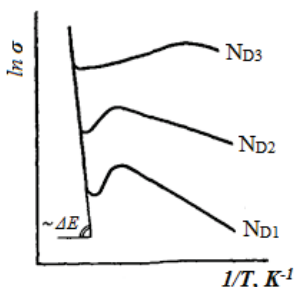


Abb. 3.3. Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit eines Halbleiters bei verschiedenen Konzentrationen von Verunreinigungen:  $N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$

In Abb. 3.3 sind Kurven für verschiedene Werte der Störstellenkonzentration bis zur Entartung des Halbleiters dargestellt. Je höher die Donorkonzentration, desto mehr Elektronen werden bei dieser Temperatur an das Leitungsband abgegeben, und desto höher ist der Wert der spezifischen Leitfähigkeit. Wenn sich der Gehalt an Verunreinigungen ändert, verschiebt sich auch die Übergangstemperatur zur intrinsischen Leitfähigkeit. Durch Erhöhung der Reinheit des Materials kann der Beginn der intrinsischen elektrischen Leitfähigkeit bereits bei Raumtemperatur erreicht werden.

In einem entarteten Halbleiter ist die Konzentration der Ladungsträger unabhängig von der Temperatur, und die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit im Bereich der Störstellenleitfähigkeit ist qualitativ ähnlich wie die Temperaturänderung der spezifischen Leitfähigkeit von Metallen.

In realen Halbleitern kann die Temperaturvariation der Leitfähigkeit aus einer Reihe von Gründen erheblich von den diskutierten Abhängigkeiten abweichen. Einer davon hängt mit der Tatsache zusammen, dass die Materialien in der Praxis nicht nur eine, sondern mehrere Arten von Verunreinigungen mit unterschiedlichen Ionisierungsenergien enthalten. Ein weiterer Grund für das Auftreten einiger Anomalien in der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit kann auf die unterschiedlichen Mobilitäten von Elektronen und Löchern zurückzuführen sein.

### 3.3. Mobilität von Stromträgern in Halbleitern



Wie bereits erwähnt, erreichen die Ladungsträger unter dem Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes eine bestimmte Geschwindigkeit der Richtungsbewegung und erzeugen einen elektrischen Strom. Das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen Richtungsgeschwindigkeit und der Intensität des elektrischen Feldes wird als Mobilität der Ladungsträger bezeichnet:

$$\mu = \bar{U}/E \quad (3.12)$$

Bei Halbleitern ist zwischen der Mobilität der Elektronen und der Mobilität der Löcher zu unterscheiden. Unter Berücksichtigung der beiden Arten von Ladungsträgern nimmt der Ausdruck (2.2) für die Stromdichte die Form an:

$$J = en_o\mu_n E + ep_o\mu_p E, \quad (3.13)$$

wobei  $n_o$  und  $p_o$  die Gleichgewichtskonzentrationen von Elektronen und Löchern im Halbleiter sind.

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes aus (3.13) können wir die Formel für die spezifische Leitfähigkeit eines Halbleiters erhalten:

$$\sigma = en_o\mu_n + ep_o\mu_p \quad (3.14)$$

In verunreinigten Halbleitern kann in der Regel einer der Terme in Ausdruck (3.14) vernachlässigt werden. Zum Beispiel ist bei einer ausreichend hohen Konzentration von Donatoren in einem Halbleiter der Beitrag von Löchern zur elektrischen Leitfähigkeit sehr gering. In den meisten Fällen ist die Mobilität der Löcher geringer als die der Elektronen.

Experimentellen Daten zufolge kann die Mobilität von Ladungsträgern in einigen Halbleitern um mehrere Größenordnungen größer sein als in Metallen.

Es hat sich gezeigt, dass die Driftgeschwindigkeit und damit die Mobilität der Ladungsträger eng mit ihrer freien Weglänge im Kristall zusammenhängt:

$$\mu = \frac{e}{m^*} \tau_o = \frac{e}{m^*} \bar{l}, \quad (3.15)$$

wobei  $m^*$  die effektive Masse der Ladungsträger ist;  $\bar{l}$  ist die thermische Geschwindigkeit.

Eine hohe Mobilität kann durch eine kleine effektive Masse des Ladungsträgers  $m^*$  und einen großen Wert der Freilaufzeit oder genauer gesagt der Relaxationszeit  $\tau_o$  verursacht werden. In Halbleitern kann die effektive Masse der Ladungsträger entweder größer oder kleiner als die Masse eines freien Elektrons sein.

Die Relaxationszeit charakterisiert die Abnahme des Stroms nach Wegfall des Feldes und wird durch Elektronenstreuungsprozesse bestimmt. Je höher die Frequenz der Stöße und je intensiver sie sind, desto kürzer ist die Relaxationszeit und folglich die Mobilität.

Die Ursachen der Ladungsträgerstreuung in Halbleitern, die sich auf die Temperaturabhängigkeit der Mobilität auswirken, sind: thermische

Schwingungen von Atomen oder Ionen im Kristallgitter, Verunreinigungen und Gitterdefekte. Die gegenseitige Streuung der Elektronen aufgrund der geringen Konzentration des Elektronengases wird in der Theorie der Halbleiter vernachlässigt.

In Halbleitern mit Atomgittern wird die Ladungsträgerstreuung durch thermische Schwingungen des Gitters und ionisierte Verunreinigungen verursacht. Diese beiden Streuungsmechanismen führen zum Auftreten von zwei Abschnitten der Temperaturabhängigkeit der Mobilität. Die Streuung durch thermische Gitterschwingungen spielt bei höheren Temperaturen eine dominante Rolle. Im Tieftemperaturbereich ist die Streuung an ionisierten Verunreinigungsatomen von primärer Bedeutung.

Aufgrund der niedrigen Ionisierungsenergie befinden sich die meisten Verunreinigungsatome bereits bei einer relativ niedrigen Temperatur in einem ionisierten Zustand. Jedes ionisierte Atom erzeugt ein Coulomb-Feld um sich herum. Bewegte Ladungsträger, die in den Bereich dieses Feldes fallen, erfahren Coulomb-Anziehung oder Abstoßung und verzerren dadurch ihre ursprüngliche Flugbahn. Je höher die Gesamtgeschwindigkeit des Ladungsträgers ist, desto kürzer ist seine Verweildauer in der Nähe des geladenen Atoms und desto geringer ist der Streuungsgrad.

Wenn also die Streuung der Ladungsträger an ionisierten Verunreinigungen überwiegt, nimmt die Mobilität mit der Temperatur zu.

Wenn beide Mechanismen an der Streuung von Ladungsträgern beteiligt sind, kann die resultierende Mobilität mit Hilfe der folgenden Beziehung ermittelt werden:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_T} + \frac{1}{\mu_i} \quad . (3.16)$$

Ihre Temperaturabhängigkeit wird durch eine Kurve mit einem deutlichen Maximum ausgedrückt, wie in Abb. 3.4 für verschiedene Konzentrationen von Verunreinigungsatomen gezeigt. Mit zunehmender Verunreinigungs-konzentration nimmt die maximale Mobilität ab und verschiebt sich zu höheren Temperaturen.

Bei sehr niedrigen Temperaturen, wenn die Verunreinigungen nur schwach ionisiert sind, findet eine Streuung der Ladungsträger an neutralen Verunreinigungsatomen statt. Bei Vorhandensein dieses Streuungsmechanismus allein ist die Mobilität nicht von der Temperatur abhängig, sondern wird nur durch die Störstellenkonzentration bestimmt.

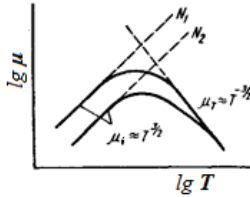


Abbildung 3.4. Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgermobilität für einen nicht entarteten Halbleiter bei verschiedenen Verunreinigungskonzentrationen

Die Mobilität von Ladungsträgern in einem Halbleiter kann je nach Zusammensetzung und Perfektion der Kristallstruktur von Probe zu Probe stark variieren.

### 3.4. Kinetische Effekte in Halbleitern

#### a) Elektrische Leitfähigkeit

In Abwesenheit eines äußeren elektrischen Feldes bewegen sich die Elektronen nur thermisch mit der Geschwindigkeit  $V_t$ . Diese Bewegung ähnelt der Bewegung von Atomen, die in der kinetischen Theorie der Gase betrachtet wird. Aufgrund der ungeordneten thermischen Bewegung in einem Elektronengas im thermischen Gleichgewicht gibt es keine bevorzugten Bewegungsrichtungen, so dass die durchschnittliche thermische Geschwindigkeit gleich Null ist.

Wenn ein äußeres elektrisches Feld angelegt wird, erhalten die Elektronen unter dem Einfluss des Feldes zusätzliche Geschwindigkeiten. Die gerichtete Bewegung der Elektronen tritt auf. Die mittlere Geschwindigkeit der gerichteten Bewegung wird als Driftgeschwindigkeit  $V_d$  bezeichnet. In der Regel ist die Driftgeschwindigkeit proportional zur Intensität des elektrischen Feldes  $E$ . Unter Berücksichtigung dieser Tatsache wird das Konzept der Driftmobilität geladener Teilchen  $\mu$  eingeführt, die per Definition die Driftgeschwindigkeit ist, die ein Teilchen in einem Feld mit der Stärke 1 erreicht. Oder sie kann geschrieben werden:

$$V_d = \mu \cdot E. \quad (3.17)$$

Für Elektronen ist die Mobilität  $\mu$  negativ, für positive Teilchen ist sie positiv.

Wenn die Ladungen vom gleichen Typ sind, ist die elektrische Stromdichte gleich:

$$j = enV_d = en\mu \cdot E, \quad (3.18)$$

wobei:  $n$  die Konzentration der bewegten Ladungen (Teilchen) ist.

Andererseits, nach dem Ohmschen Gesetz:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (3.19)$$

wobei  $\sigma$  die spezifische elektrische Leitfähigkeit eines Stoffes ist. Folglich

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu. \quad (3.20)$$

Bei isotropen Stoffen ist die Driftgeschwindigkeit parallel zum Feld und die Vektoren  $\vec{j}$  und  $\vec{E}$  stimmen in ihrer Richtung überein. Bei anisotropen Stoffen ist dies nicht mehr der Fall, und die Beziehung zwischen  $\vec{j}$  und  $\vec{E}$  hat eine allgemeinere Form, die die Beziehung zwischen den Richtungen des Stroms und des elektrischen Feldes im Raum definiert und berücksichtigt:

$$\vec{J}_x = \sigma_{xx} \cdot \vec{E}_x + \sigma_{xy} \cdot \vec{E}_y + \sigma_{xz} \cdot \vec{E}_z$$

$$\vec{J}_y = \sigma_{yx} \cdot \vec{E}_x + \sigma_{yy} \cdot \vec{E}_y + \sigma_{yz} \cdot \vec{E}_z$$

$$\vec{J}_z = \sigma_{zx} \cdot \vec{E}_x + \sigma_{zy} \cdot \vec{E}_y + \sigma_{zz} \cdot \vec{E}_z$$

### b) Hall-Effekt

Elektronen (Träger elektrischer Ladung), die sich in einem äußeren Magnetfeld bewegen, unterliegen der Lorentzkraft, die senkrecht zur Richtung ihrer Geschwindigkeit und der magnetischen Induktion wirkt.

Der Hall-Effekt besteht darin, dass in einem stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet, zusätzliche elektromotorische Kräfte auftreten und dadurch ein zusätzliches elektrisches Feld entsteht. Der Grund für dieses Phänomen sind die Lorentz-Kräfte, die auf den Stromträger wirken. Das Wesen des Effekts kann man sich wie folgt vorstellen (Abb. 3.5):

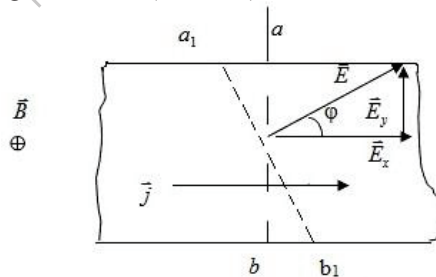


Abb. 3.5. Schema der Entstehung des Hall-Feldes  $\vec{E}_y$

Bei fehlender Magnetfeldinduktion  $\vec{B}$  fällt die elektrische Feldstärke im Leiter  $\vec{E}$  mit der Richtung der Stromdichte  $\vec{j}$  zusammen, und zwischen zwei symmetrischen Querkontakten  $a$  und  $b$ , die sich in einer Ebene senkrecht zu  $\vec{j}$  befinden, ist die Potenzialdifferenz Null.

Wenn das transversale Magnetfeld eingeschaltet wird, entsteht zwischen den offenen Kontakten  $a$  und  $b$  eine Potentialdifferenz  $U$  (Spannung, Hall-EMK). Diese Potentialdifferenz wechselt das Vorzeichen, wenn sich die Richtung des Stroms oder des Magnetfelds ändert, und wird durch die Wirkung der Lorentz-Kraft auf die Stromträger, ihre Ablenkung und die Erzeugung einer Differenz in der Konzentration (und der elektrischen Ladung) der Stromträger in der Richtung  $a$ - $b$  verursacht.

Das Auftreten dieser Potentialdifferenz zeigt, dass bei Vorhandensein eines Magnetfeldes ein zusätzliches elektrisches Feld  $\vec{E}_y$  im Leiter auftritt. Die Richtung des entstehenden elektrischen Feldes  $\vec{E}$  fällt nun nicht mit der Richtung von  $\vec{j}$  zusammen, sondern ist um einen bestimmten Winkel  $\varphi$  gedreht, der als Hall-Winkel bezeichnet wird.

Betrachtet man die Bewegung von Ladungsträgern in einem elektrischen Feld und einem senkrechten Magnetfeld für eine Probe mit endlichen Abmessungen, so lässt sich eine Beziehung zwischen der Hall-Effekt-Feldstärke  $\vec{E}_y$ , der Hall-Spannung  $U$  und anderen Parametern herstellen:

$$E_y = \frac{U}{d} = R \cdot B \cdot J = R \cdot B \cdot \frac{i}{a \cdot d}, \quad (3.21)$$

$d$  ist die Dicke der Probe,  $a$  ist die Breite der Probe,  $i$  ist die Gesamtstromstärke,  $R$  ist der Proportionalitätskoeffizient, der in schwachen Magnetfeldern nicht von der magnetischen Induktion abhängt und nur die Eigenschaften der Substanz charakterisiert. Er wird als Hall-Konstante bezeichnet.

Der Hall-Effekt ist in der Technik weit verbreitet. Er kann verwendet werden, um die Stärke eines Magnetfeldes zu messen oder, wenn dieses bekannt ist, um Strom und Leistung zu messen. Der Hall-Effekt kann zur Erzeugung, Modulation und Demodulation elektrischer Schwingungen, zur Erkennung von Schwingungen, zur Verstärkung elektrischer Signale usw. verwendet werden.

### c) Änderung des Widerstands in einem Magnetfeld

Äußere Magnetfelder verursachen nicht nur das Auftreten des Hall-Feldes, sondern verändern auch den Strom. Das bedeutet, dass sich der Widerstand eines Leiters in einem transversalen Magnetfeld ändert. Die Änderung der Leitfähigkeit  $\Delta\delta$  und des spezifischen Widerstands  $\Delta\rho$  wird durch die Formel beschrieben:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = -\frac{\Delta\rho}{\rho} \alpha \cdot B^2, \quad (3.22)$$

wobei  $\delta$  und  $\rho$  die Werte bei  $B = 0$  sind und  $\alpha$  der transversale Magnetowiderstandskoeffizient ist, der von den Materialeigenschaften abhängt.

Die Formeln für den Hall-Effekt und den Magnetowiderstand sind nur für ein unendliches Medium gültig. In realen Proben mit endlichen Abmessungen führt das Vorhandensein von leitenden Metallkontakten zu Verzerrungen der Strom- und Feldlinien. Dies muss bei den Messungen berücksichtigt werden. Um den Einfluss von Randeffekten gering zu halten, muss die Länge der Proben (in Stromrichtung) viel größer sein als ihre Querschnittsabmessungen.

#### d) Piezowiderstandseffekt

Die Änderung des elektrischen Widerstands eines Halbleiters infolge einer äußeren einachsigen mechanischen Spannung oder eines hydrostatischen Drucks wird als Piezowiderstandseffekt bezeichnet. Der Piezowiderstand ist gekennzeichnet durch den Koeffizienten

$$\pi = \frac{\Delta\rho}{\rho\chi}$$

wobei  $\chi$  der Wert des mechanischen Drucks (Spannung) ist.

Die Beziehung zwischen  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  und  $\chi$  unter hydrostatischem Druck

wird durch die Komponenten des Tensors  $\pi_{ik}$  beschrieben:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{\Delta\delta}{\delta} = (+2\pi_{11}\pi_{12})\chi. \quad (3.23)$$

Diese Komponenten sowie  $\pi_{44}$  sind für die mathematische Beschreibung und Bestimmung der relativen mechanischen Spannung in kubischen Gitterhalbleitern erforderlich, wenn die Richtung  $\vec{\chi}$  und die Stromdichte  $\vec{j}$  einen beliebigen Winkel bilden. Tabelle 3.1 zeigt verschiedene Kombinationen dieser Komponenten für die Richtungen  $\vec{\chi}$  und  $\vec{j}$ , die mit verschiedenen kristallographischen Achsen übereinstimmen. Der Vektor  $\vec{\chi}$  wird im Fall von Spannung als positiv und im Fall von Kompression als negativ angesehen. Alle drei Komponenten des Tensors können durch drei Messungen in verschiedenen Richtungen bestimmt werden.

Tabelle 3.1. Verschiedene Kombinationen von Komponenten für Richtungen mit unterschiedlichen kristallographischen Achsen

	$\vec{\chi}$	$\vec{j}$	$\frac{\Delta\rho}{\rho\chi}$

Longitudinal Komponenten	<100>	<100>	$\pi_{11}$
	<110>	<110>	$\frac{\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}}{2}$
	<111>	<111>	$\frac{\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}}{3}$
Transversal Komponenten	<100>	<010>	$\pi_{12}$
	<110>	<111>	$\frac{\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}}{2}$

Die experimentell ermittelten Werte der Piezowiderstandskoeffizienten, zum Beispiel für p-Si mit einem spezifischen Widerstand von  $\rho = 7,8 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ , lauten wie folgt:

$$\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\pi_{12} = -1,1 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\pi_{44} = 138 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

#### e) Thermo-EMF

In Halbleitern wie auch in Metallen entsteht unter dem Einfluss eines Temperaturunterschieds eine Potenzialdifferenz, die als thermoelektromotorische Kraft (thermo-elektromotorische Kraft) bezeichnet wird. In einem geschlossenen Stromkreis, der aus zwei verschiedenen leitenden Materialien (z. B. einem Halbleiter und einem Metall) besteht, fließt ein elektrischer Strom, wenn die Temperatur der Kontakte nicht gleich ist.

Die ungleichmäßige Erwärmung eines homogenen Halbleiters führt zu einem Gradienten in der durchschnittlichen Energie der Ladungsträger in verschiedenen Teilen des Kristalls. Darüber hinaus kann sich der Temperaturunterschied auf die Änderung der Ladungsträgerkonzentration auswirken, was bei Metallen nicht beobachtet wird. Aus diesen Gründen kommt es zu einem Diffusionsfluss von Ladungsträgern aus dem erwärmten in den kälteren Bereich des Kristalls. Das daraus resultierende interne elektrische Feld verhindert eine weitere Verteilung der Ladungen und fördert das Gleichgewicht.

In Halbleitern sind im Allgemeinen zwei Arten von Ladungsträgern - Elektronen und Löcher - an der Entstehung der Thermospannung beteiligt. Die Komponenten der von ihnen verursachten Thermospannung haben entgegengesetzte Vorzeichen. Bei fehlender Entartung des Elektronengases wird der Wert der differentiellen Thermospannung, d. h. bezogen auf eine Einheits-Temperaturdifferenz, durch den folgenden Ausdruck bestimmt:

$$\alpha_T = \frac{k}{\sigma} \left\{ n\mu_n \left[ 2 + \ln \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{nh^3} \right] - p\mu_p \left[ 2 + \ln \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{3/2}}{ph^3} \right] \right\}, \quad (3.24)$$

wobei der erste Term den Beitrag der Elektronen und der zweite den der Löcher beschreibt. Für Störstellen-Halbleiter wird die Formel vereinfacht, da einer der Terme vernachlässigt werden kann.

In einem n-Typ-Halbleiter sind die Elektronen die Hauptladungsträger. Ihr Fluss vom heißen Ende zum kalten Ende ist größer als in umgekehrter Richtung. Infolge der Diffusion sammelt sich am kalten Ende eine negative Ladung überschüssiger Elektronen an, und am heißen Ende bildet sich eine positive Ladung ionisierter Donatoren, die nicht kompensiert wird. In einem p-Typ-Halbleiter sind Löcher an dem Diffusionsprozess beteiligt, so dass die Polarität der resultierenden Thermo-EMK ein entgegengesetztes Vorzeichen hat. Die unterschiedliche Reaktion von Störstellen-Halbleitern auf thermische Feldinhomogenitäten ermöglicht es, den thermoelektrischen Effekt zur schnellen Bestimmung der Art der elektrischen Leitfähigkeit eines Materials zu nutzen. Ein einfaches Gerät, das für diesen Zweck entwickelt wurde, heißt Thermosonde. Der Zahlenwert der differentiellen Thermospannung von Halbleitern liegt je nach Temperatur und Konzentration von Fremdatomen zwischen  $10^2$  und  $10^4$   $\mu\text{V}/\text{K}$ , d. h. um 2-4 Größenordnungen höher als bei Metallen. Dieser Unterschied in den Materialeigenschaften führt dazu, dass in einem geschlossenen Kreislauf, der aus einem Halbleiter und einem Metall besteht, die Thermospannung nur schwach von der Art des Metallleiters abhängt. Daher wird bei der Angabe des Wertes von  $\alpha_i$  für einen Halbleiter in der Regel nicht angegeben, für welches Metall er bestimmt ist.

Die hohe Thermospannung von Halbleitern ermöglicht es, sie als effiziente Wandler von Wärmeenergie in elektrische Energie zu nutzen. Die Grundlage solcher Wandler sind Thermoelemente, die aus p- und n-Typ-Halbleitern in Reihe geschaltet sind. In diesem Fall ist die relative Thermospannung, die sich aus dem Temperaturunterschied zwischen den Verbindungsstellen ergibt, gleich der Summe der absoluten differentiellen Thermospannung der beiden Zweige.

### 3.5. Klassifizierung von Halbleitermaterialien

Halbleiter sind eine sehr große Klasse von Materialien. Sie umfasst Hunderte von verschiedenen Substanzen, sowohl einzelne Elemente als auch chemische Verbindungen. Sowohl anorganische als auch organische Stoffe, kristalline und amorphe, feste und flüssige, nichtmagnetische und magnetische, können Halbleitereigenschaften haben. Trotz erheblicher Unterschiede in Struktur und chemischer Zusammensetzung haben die Materialien dieser Klasse eine Eigenschaft gemeinsam: die Fähigkeit, ihre



elektrischen Eigenschaften unter dem Einfluss kleiner äußerer Energieeinwirkungen erheblich zu verändern.

Es gibt die folgende Klassifizierung von Halbleitermaterialien (Abb. 3.6):

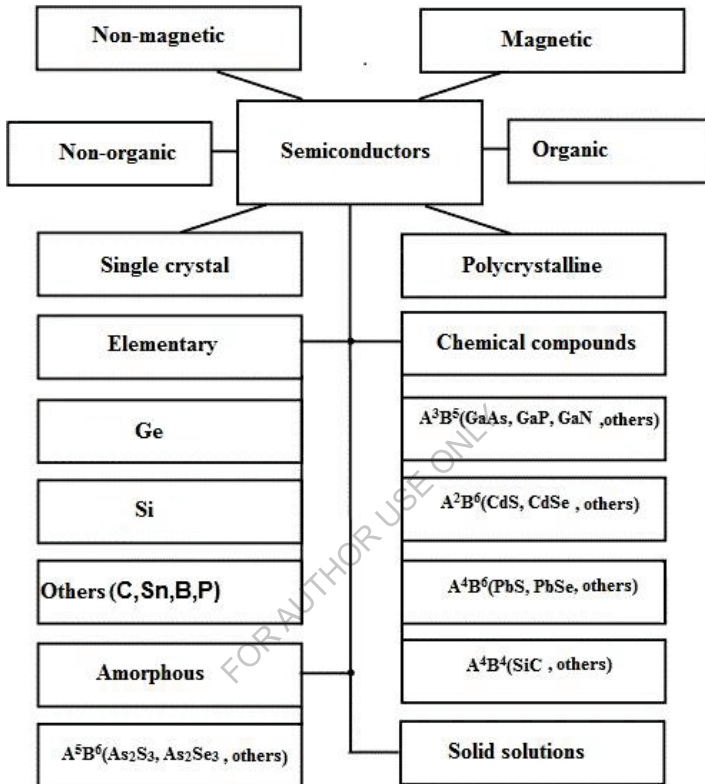


Abb. 3.6. Klassifizierung von Halbleitermaterialien

Anorganische kristalline Halbleiter bilden die Grundlage der modernen Elektronik. Halbleitereigenschaften weisen 12 chemische Elemente auf, die im mittleren Teil des Periodensystems von D. I. Mendelejew. Die Werte der Bandlücke von elementaren Halbleitern sind in verschiedenen Nachschlagewerken zur Halbleiterphysik angegeben (Tabelle 3.2). Ordnet man die Elemente in der Reihenfolge ihrer Position im Periodensystem an, so lassen sich einige Regelmäßigkeiten in der Veränderung der Bandlücke erkennen - sie nimmt in jeder Periode zu, wenn man sich von Element zu Element von links nach rechts bewegt, verringert sich jedoch in jeder Gruppe, wenn man sich von oben nach unten bewegt.

Tabelle 3.2 Bandlücke von elementaren Halbleitern (bei 300 K)

Element	$z, \Delta E_eV$	Element	$z, \Delta E_eV$
Bor	1,1	Arsen	1,2
Kohlenstoff (Diamant)	5,6	Antimon	0,12
Silizium	1,12	Schwefel	2,5
Germanium	0,665	Selen	1,8
Zinn ( $\alpha$ -Sn)	0,08	Tellur	0,36
Phosphor	1,5	Jod	1,25

Einige Modifikationen von Zinn und Kohlenstoff haben ebenfalls halbleitende Eigenschaften. Letzterer existiert in zwei allotropen Formen - Diamant und Graphit. Graphit ist in Bezug auf seine elektrischen Eigenschaften nahe an Leitern (Bandlücke  $\Delta E_z < 0,1 eV$ ), während reine Diamanten Dielektrika sind. Künstliche Diamanten erhalten jedoch durch die eingebrachten Verunreinigungen die Eigenschaften von Halbleitern.

Unter normalen Bedingungen ist Zinn ein guter Leiter, aber bei Temperaturen unter  $13,2^\circ C$  verwandelt es sich in die graue Zinnmodifikation. Der Prozess der Festphasenumwandlung ist sehr langsam, so dass es schwierig ist, Kristalle von praktischem Interesse zu erhalten.

Silizium und Germanium sind die führenden Halbleitermaterialien in Bezug auf ihre elektrophysikalischen Eigenschaften, die Prozesskontrolle sowie die Anzahl und Bandbreite der hergestellten Geräte.

Eine sehr große Gruppe von anorganischen Halbleiterverbindungen, die aus zwei, drei oder mehr Elementen bestehen können. Beispiele für solche Verbindungen sind  $InSb$ ,  $Vi_2 Te_3$ ,  $ZnSiAs_2$ ,  $CuAlS_2$ , und  $CuGe P_{23}$ . Die Kristallstruktur vieler Verbindungen ist durch die Koordination im Diamantgitter gekennzeichnet. Solche Halbleiterverbindungen werden als diamantartige Halbleiter bezeichnet. Unter ihnen sind die binären Verbindungen des Typs  $A B^{IIIIV}$  und  $A B^{IIVI}$  von größtem wissenschaftlichen und praktischen Interesse, da sie die wichtigsten Materialien für die Halbleiter-Optoelektronik sind.

Die meisten diamantartigen Halbleiter mit verwandten Eigenschaften bilden miteinander isovalente Mischkristalle.

In festen Lösungen lassen sich die wichtigsten Eigenschaften von Halbleitern, wie die Breite der Bandlücke und die Beweglichkeit von

Ladungsträgern, durch Änderung der Zusammensetzung stufenlos und in einem relativ großen Bereich steuern. Dies eröffnet zusätzliche Möglichkeiten zur Optimierung der Parameter von Halbleiterbauelementen und ermöglicht eine bessere Abstimmung der physikalischen Eigenschaften verschiedener Komponenten elektronischer Geräte.

Sowohl Einkristalle als auch polykristalline Materialien werden zur Herstellung von Halbleiterbauelementen verwendet. Einkristalle sind einfachere Systeme mit einer perfekteren Struktur als polykristalline Materialien. Sie sind am besten erforscht, ihre physikalischen Phänomene sind besser berechenbar, und sie bieten eine größere Zuverlässigkeit und identische Parameter von Halbleiterbauelementen.

Die Eigenschaften von amorphen, organischen und magnetischen Halbleitern sind noch nicht ausreichend untersucht worden, obwohl die praktische Bedeutung dieser Stoffe ständig zunimmt. Im Mechanismus der elektrischen Leitfähigkeit von amorphen anorganischen und kristallinen organischen Halbleitern wurden eine Reihe von Gemeinsamkeiten festgestellt. Das Interesse an organischen Halbleitern beruht auf der Tatsache, dass einige von ihnen Halbleitereigenschaften mit Elastizität verbinden, was die Herstellung von Arbeitselementen in Form von flexiblen Bändern und Fasern ermöglicht.

### **3.6. Die gebräuchlichsten Halbleitermaterialien sind Silizium, Germanium, Galliumarsenid usw.**

**Silizium.** Silizium ist mit einem Anteil von 29,5 % (nach Gewicht) eines der am häufigsten vorkommenden Elemente in der Erdkruste. Damit ist Silizium nach Sauerstoff das zweithäufigste Element. Zahlreiche Siliziumverbindungen sind in den meisten Gesteinen und Mineralien enthalten. Auch Sand und Ton, die den mineralischen Teil des Bodens bilden, enthalten Siliziumverbindungen. Die häufigste Verbindung dieses Elements ist Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ . Freies Siliziumdioxid kommt hauptsächlich in Form des Minerals Quarz vor. In einigen Lagerstätten erreicht der Reinheitsgrad von Quarzsand 99,9 %. Silizium in freiem Zustand kommt in der Natur nicht vor. In seiner elementaren Form wurde es erstmals 1811 gewonnen, also viel früher als Germanium. Als Halbleitermaterial für die Elektronik fand Silizium jedoch erst in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts breite Verwendung, nachdem wirksame Verfahren zu seiner Reinigung entwickelt worden waren.

Silizium kristallisiert in der Diamantstruktur mit einer etwas kürzeren Gitterperiode als Germanium. Geringere Abstände zwischen den Atomen im Gitter als bei Germanium führen zu einer stärkeren kovalenten chemischen Bindung und folglich zu einer größeren Bandlücke.

Chemisch gesehen ist kristallines Silicium bei Raumtemperatur eine relativ träge Substanz. Es ist unlöslich in Wasser und reagiert mit vielen Säuren in keiner Konzentration. Es löst sich nur in einem Gemisch aus Salpeter- und Flusssäure und in kochenden Alkalien gut auf.

Silicium ist an der Luft bei einer Temperatur von bis zu 900 °C stabil. Oberhalb dieser Temperatur beginnt es stark zu oxidieren und bildet  $\text{SiO}_2$ . Beim Erhitzen geht Silicium leicht Wechselwirkungen mit Halogenen ein, und bei Temperaturen von 1100-1300 °C kann es sich direkt mit Stickstoff verbinden und  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Nitrid bilden. Silicium löst sich gut in vielen Metallschmelzen (Al, Ga, Sn, Au, Ag usw.). Mit einer Reihe von Metallen (Cr, Mo, Fe, Cu, Mg usw.) bildet es stabile chemische Verbindungen - Silizide.

Silizium hat einen relativ hohen Schmelzpunkt und ist im geschmolzenen Zustand sehr reaktiv. Daher gibt es große Schwierigkeiten bei der Auswahl des Tiegelmaterials für die Züchtung von Einkristallen. Die reinsten Materialien (Quarz und Graphit), die üblicherweise zur Herstellung von Booten und Tiegeln verwendet werden, reagieren bei hohen Temperaturen mit Silizium. Die Reaktion von Silizium mit Kohlenstoff führt zur Bildung von Siliziumkarbid, einer sehr stabilen chemischen Verbindung mit Halbleitereigenschaften.

Aufgrund seiner größeren Bandlücke ist der spezifische Widerstand von Silizium um mehr als drei Größenordnungen höher als der von Germanium. Um die intrinsische elektrische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur zu erhalten, sollte der Gehalt an Restverunreinigungen in Silizium  $10^{16} \text{ m}^{-3}$  nicht überschreiten. Die modernen Methoden zur Reinigung von Halbleitern erlauben keinen so hohen Reinheitsgrad.

Das Verhalten von Verunreinigungen in Silizium folgt im Wesentlichen denselben Gesetzen wie in Germanium. Die Atome der Elemente der Gruppen III und V des Periodensystems bilden als Akzeptoren bzw. Donatoren feine Niveaus in der Bandlücke. Aufgrund der niedrigeren Dielektrizitätskonstante und der höheren effektiven Masse der Ladungsträger ist die Ionisierungsenergie kleiner Donatoren und Akzeptoren in Silizium jedoch wesentlich höher als in Germanium und beträgt für die meisten Verunreinigungen etwa 0,05 eV. In diesem Fall entspricht die Raumtemperatur jedoch dem Bereich der Verarmung an Verunreinigungen.

Die Verunreinigungen der Elemente der Gruppen I, II, VI und VII führen tiefe Niveaus in die Bandlücke ein und schränken die Lebensdauer von Nicht-Gleichgewichtsladungsträgern stark ein. Im Vergleich zu Germanium hat Silizium eine höhere Löslichkeitsgrenze für kleine Donatoren und eine geringere Löslichkeit für Akzeptoren. Gleichzeitig haben die meisten Verunreinigungen ein Löslichkeitsmaximum bei Temperaturen von 1200-1300°C.

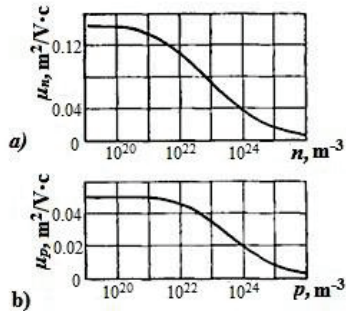


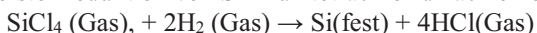
Abb. 3.7. Abhängigkeit der Mobilität der Hauptladungsträger in Silizium von der Konzentration der Elektronen und Löcher

Abbildung 3.7, *a* und *b* veranschaulicht die Auswirkung der Konzentration elektrisch aktiver Verunreinigungen (n-Donatoren, p-Akzeptoren) auf die Mobilität  $\mu$  der Ladungsträger in Silicium. Die Streuung von Ladungsträgern an ionisierten Verunreinigungen spielt bei Raumtemperatur eine bedeutende Rolle, wenn der Gehalt an Dotierstoffen  $10^{22} \text{ m}^{-3}$  übersteigt. In reinen Siliziumkristallen ist die Mobilität von Elektronen etwa dreimal so groß wie die von Löchern. Die Abnahme der Ladungsträgerbeweglichkeit mit zunehmendem Dotierungsgrad der Kristalle ist die Ursache für die nichtlineare Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von der Konzentration der Dotierstoffe. Aufgrund der geringen Mobilität der Ladungsträger und der begrenzten Löslichkeit von Verunreinigungen ist es schwierig, Silizium-Einkristalle mit einem spezifischen Widerstand von weniger als  $10^{-5} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$  zu erhalten. Wenn der Gehalt an Verunreinigungsatomen in einem Halbleiter  $10^{25} \text{ m}^{-3}$  übersteigt, ist die Bildung verschiedener Komplexe und Mikroausscheidungen der zweiten Phase möglich, was mit einer Veränderung der elektrischen Aktivität der Verunreinigungen einhergeht. Dies äußert sich in der Diskrepanz zwischen der Konzentration der Ladungsträger und der Konzentration der eingebrachten Donatoren und Akzeptoren.

Die Reinigung von Silizium von Verunreinigungen erfolgt hauptsächlich mit chemischen Methoden. Kristallisationsverfahren werden eingesetzt, um chemisch hergestelltes polykristallines Silizium in Einkristalle mit bestimmten elektrophysikalischen Eigenschaften umzuwandeln. Masseneinkristalle aus Silicium werden durch Schmelzziehen und tiegelfreies Zonenschmelzen gezüchtet. Das erste Verfahren wird in der Regel zur Herstellung großer Einkristalle mit einem spezifischen Widerstand von weniger als  $2,5 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$  verwendet. Die zweite Methode wird zur Herstellung von Einkristallen mit hohem Widerstand (mit einem Widerstand von bis zu  $200 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ ) und einem

geringen Gehalt an Restverunreinigungen, insbesondere Sauerstoff, verwendet.

Die epitaktische Abscheidung dünner Schichten spielt eine wichtige Rolle in der Planartechnologie für Siliziumbauelemente und integrierte Schaltkreise. Der Begriff "Epitaxie" bezieht sich auf das orientierte Wachstum einer kristallinen Substanz auf der Oberfläche eines anderen Kristalls, der als Substrat dient. Die gängigste industrielle Technologie zur Herstellung von Silizium-Epitaxieschichten basiert auf der Wasserstoffreduktion von Siliziumtetrachlorid nach einer Reaktion:



Die Reaktion findet in Quarzreaktoren oder bei Temperaturen von etwa 1200°C statt. Bei den Substraten handelt es sich um einkristalline Siliziumscheiben, die aus Blöcken geschnitten und mechanisch und chemisch poliert werden. Die Wachstumsrate wird durch das Verhältnis von Reagenzgasströmen und Temperatur gesteuert. Unter optimalen Bedingungen beträgt sie 15-20 nm/s. In der Praxis werden Schichten mit einer Dicke von 2 bis 20 Mikrometern verwendet. Die Schichten werden mit einem Paar von Verbindungen dotiert, die Verunreinigungselemente enthalten (z. B.  $\text{PCl}_3$ ,  $\text{BBr}_3$ ,  $\text{AsH}_3$ , usw.).

Relativ niedrige Betriebstemperaturen und niedrige Kristallisationsraten führen zu einer hohen Reinheit und strukturellen Perfektion der epitaktischen Schichten. Das epitaktische Wachstum von Strukturen mit p-n-Übergängen ist für die Isolierung integrierter Schaltelemente durch einen Bereich mit Bulk-Ladung weit verbreitet, dessen Länge zunimmt, wenn eine Sperrspannung an den p-n-Übergang angelegt wird.

In einigen Fällen werden bei der Herstellung integrierter Schaltungen epitaktische Siliziumschichten auf einkristalline dielektrische Substrate aufgebracht. Als Material für solche Substrate werden verschiedene Stoffe verwendet: Saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Spinell, Berylliumoxid ( $\text{BeO}$ ), Quarz usw. Die Epitaxie von Silizium auf dielektrischen Substraten eröffnet die Möglichkeit, integrierte Schaltungen mit nahezu perfekter Isolierung der Elemente herzustellen.

Bei der Herstellung großer integrierter Schaltkreise wird immer häufiger eine Methode angewandt, die auf der Verwendung von polykristallinem Silizium beruht. Die Besonderheit dieser Methode besteht darin, dass eine Schicht aus polykristallinem Silizium auf der Oberfläche von Siliziumscheiben abgeschieden wird, die mit einem dielektrischen Film  $\text{SiO}_2$  beschichtet sind, der als Widerstand, Anschlüsse und Kontaktflächen zum Emitter und Kollektor des Transistors dienen kann. Meistens wird die Abscheidung mit der thermischen Silan-Zersetzungsmethode durchgeführt. Das Silanverfahren ermöglicht eine dichte, feinkörnige Schichtstruktur bei niedrigen Temperaturen (700-1000°C).

Unlegierte polykristalline Siliziumschichten sind in der Regel durch einen Restverunreinigungsgehalt von bis zu  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  und einen spezifischen Widerstand von  $10^{-10^{46}} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$  gekennzeichnet, der um mehrere Größenordnungen höher ist als der von unlegiertem einkristallinem Silizium. Der höhere spezifische Widerstand von polykristallinem Material ist auf den Einfluss der Grenzen zwischen den einzelnen Körnern zurückzuführen.

Silizium ist ein Grundmaterial für die Herstellung von planaren Transistoren und integrierten Schaltungen. Die Entwicklung der Planartechnik für Siliziumbauelemente hat zu einem Qualitätssprung in der Halbleiterproduktion geführt. Integrierte Halbleiterschaltungen, die sich durch sehr kleine Abmessungen und eine komplexe Konfiguration aktiver Bereiche auszeichnen, finden vor allem in der Empfangs- und Verstärkertechnik sowie in der Computertechnologie breite Anwendung.

Trotz der intensiven Entwicklung der integrierten Mikroelektronik machen diskrete Siliziumbauelemente einen bedeutenden Anteil an der Gesamtproduktion von Halbleiterprodukten aus. Gleichrichter-, Impuls- und Mikrowellendioden, Niederfrequenz- und Hochfrequenz-, Hochleistungs- und Niederleistungs-Bipolartransistoren, Feldeffekttransistoren und ladungsgekoppelte Bauelemente werden aus Silizium hergestellt. Die Betriebsfrequenzen von Planartransistoren erreichen 10 GHz.

Silizium-Gleichrichter-Planardioden können Sperrspannungen von bis zu 1500 V standhalten und einen Vorwärtsstrom von bis zu 1500 A durchlassen, was Germanium-Dioden in diesen Parametern deutlich übertrifft.

Die meisten Zenerdioden und Thyristoren werden aus Silizium hergestellt. Je nach dem Grad der Dotierung des Materials haben Silizium-Zenerdioden eine Stabilisierungsspannung von 3 bis 400 V.

Lichtempfindliche Siliziumbauteile, insbesondere Fotodioden, sind in der Technik weit verbreitet und zeichnen sich durch hohe Geschwindigkeit aus. Das Lichtempfindlichkeitsspektrum von Silizium-Fotodetektoren (0,3-1,1 Mikrometer) ist gut auf das Emissionsspektrum vieler Halbleiterlichtquellen abgestimmt. Silizium-Fotozellen, die zur Umwandlung von Sonnenenergie in Elektrizität verwendet werden, werden Solarzellen genannt. Sie werden in den Stromversorgungssystemen von Raumfahrzeugen eingesetzt. Ihr Wirkungsgrad liegt in den meisten Fällen bei 10-12 %.

Wie Germanium wird auch Silizium zur Herstellung von Kernstrahlungsdetektoren, Hall-Sensoren und Dehnungsmessern verwendet. Letztere nutzen eine starke Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von der mechanischen Verformung.

Da Silizium eine größere Bandlücke als Germanium hat, können Silizium-Bauelemente bei höheren Temperaturen betrieben werden als

Germanium-Bauelemente. Die obere Temperaturgrenze von Silizium-Bauelementen liegt bei 180-200 °C.

**Germanium.** Germanium (Ge) kommt in der Natur häufig vor, ist aber in sehr geringen Mengen in verschiedenen Mineralien enthalten. Sein Gehalt in der Erdkruste beträgt etwa  $7 \cdot 10^{-4}$  %, was in etwa den natürlichen Vorräten an gängigen Metallen wie Zinn und Blei entspricht und deutlich höher ist als die Menge an Silber, Cadmium, Quecksilber, Antimon und einer Reihe anderer Elemente. Die Gewinnung von Germanium in elementarer Form ist jedoch sehr schwierig. Mineralien mit einer hohen Germaniumkonzentration sind sehr selten und können nicht als Rohstoffe für die Herstellung von Halbleitern dienen. Die wichtigsten Quellen für die industrielle Germaniumproduktion sind derzeit Nebenprodukte der Zinkproduktion, Kohleverkockung und Germaniumkonzentrate, die aus Kupfer-Blei-Zink-Erzen gewonnen werden. Tabelle 3.3 zeigt einige physikalische Parameter von Germanium und Silizium.

Tabelle 3.3. Grundlegende Eigenschaften von Germanium und Silizium.

<b>Eigenschaften</b>	<b>Ge</b>	<b>Si</b>
Gitterperiode, nm	0,566	0,542
Dichte bei 20°C, g/cm <sup>3</sup>	5,3	2,3
Temperaturkoeffizient der linearen Ausdehnung (0-	$6 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Spezifische Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	55	80
Spezifische Wärmekapazität (0 - 100°C), J/(kg·K)	333	710
Schmelzpunkt, °C	936	1414
Oberflächenspannungskoeffizi	0,6	0,72
Widerstandswert bei 20 °C,	0,47	$2 \cdot 10^3$
Intrinsische Konzentration der Ladungsträger, m <sup>-3</sup>	$2,5 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$
Bandlücke, eV:		
bei 0 K	0,746	1,165
bei 300 K	0,665	1,12
Mobilität der Elektronen, m <sup>2</sup>	0,39	0,14
Mobilität der Löcher, m <sup>2</sup>	0,19	0,05



Elektronenausgangsarbeit, eV	4,8	4,3
Dielektrizitätskonstante	16	12,5

Reines Germanium hat einen metallischen Glanz und zeichnet sich durch relativ hohe Härte und Sprödigkeit aus. Ähnlich wie Silizium kristallisiert es in der Struktur eines Diamanten, dessen Einheitszelle acht Atome enthält. Ein Kristallgitter vom Typ Diamant kann als Überlagerung zweier kubisch-flächenzentrierter Gitter betrachtet werden, die in Richtung der Volumendiagonale um ein Viertel ihrer Länge versetzt sind. Jedes Gitteratom ist von vier nächsten Nachbarn umgeben, die sich an den Eckpunkten eines regelmäßigen Tetraeders befinden.

Kristallines Germanium ist an der Luft bei Raumtemperatur chemisch stabil. Wenn es an der Luft auf Temperaturen über 650 °C erhitzt wird, oxidiert es zu  $\text{GeO}_2$ .

Bei Raumtemperatur ist Germanium unlöslich in Wasser, Salzsäure und verdünnter Schwefelsäure. Unter normalen Bedingungen sind die aktiven Lösungsmittel des Germaniums eine Mischung aus Salpeter- und Flußsäure, Wasserstoffperoxidlösung und Ätzmittel, die oxidierende Reagenzien enthalten. Beim Erhitzen reagiert Germanium intensiv mit Halogenen, Schwefel und Schwefelverbindungen.

Germanium hat einen relativ niedrigen Schmelzpunkt (936°C) und einen vernachlässigbaren Sättigungsdampfdruck bei dieser Temperatur. Dieser Umstand vereinfacht die Technik der Kristallisationsreinigung und des Einkristallwachstums erheblich. Selbst im geschmolzenen Zustand geht Germanium praktisch keine Wechselwirkung mit Graphit und Quarzglas ein, so dass diese in metallurgischen Prozessen als Schmelztiegel und Shuttles verwendet werden können. Flüssiges Germanium hat die Fähigkeit, intensiv Wasserstoff zu absorbieren, dessen maximale Löslichkeit in der festen Phase  $4 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$  nicht überschreitet, und Wasserstoff ist eine elektrisch neutrale Verunreinigung.

Unter normalen Bedingungen ist reines Germanium für elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von mehr als 1,8 Mikrometern transparent.

Bei Raumtemperatur ist die Mobilität der Elektronen etwa doppelt so groß wie die der Löcher. Dieses Verhältnis bleibt jedoch nicht unverändert, wenn sich die Temperatur ändert.

Für die Herstellung von Halbleiterbauelementen wird Germanium mit bestimmten Zusätzen von elektrisch aktiven Verunreinigungen verwendet. Der Prozess der Zugabe von Verunreinigungen zum Grundmaterial wird als Legieren bezeichnet. Die Elemente der Gruppen V und III des Periodensystems werden am häufigsten als Donatoren bzw. Akzeptoren verwendet. Diese Verunreinigungen erzeugen kleine Niveaus in der Bandlücke mit einer Ionisierungsenergie von etwa 0,01 eV.

Verunreinigungen von Elementen der Gruppen I, II, VI, VII und VIII haben ein komplexeres Verhalten. Wenn sie in das Germaniumgitter eingebracht werden, weisen die Atome der meisten dieser Elemente die Eigenschaften von Mehrfachladungszentren auf, d. h. sie erzeugen mehrere ziemlich tiefe Niveaus in der Bandlücke, was auf starke Unterschiede in den Valenzen der Verunreinigungs- und Basisatome zurückzuführen ist.

Kleine Donatoren und Akzeptoren sind bei Temperaturen über 90 K vollständig ionisiert, so dass die Konzentration der Ladungsträger im Germanium unter normalen Bedingungen durch die Konzentration der Verunreinigung bestimmt wird.

Bei niedrig legiertem Germanium wird in einem relativ breiten Temperaturbereich ein positiver Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands beobachtet, d. h. eine Abnahme der Leitfähigkeit bei Erwärmung, die auf eine Abnahme der Mobilität der Ladungsträger aufgrund ihrer zunehmenden Streuung bei thermischen Schwingungen der Gitterknoten zurückzuführen ist.

Die Temperatur, bei der die intrinsische elektrische Leitfähigkeit auftritt, hängt von der Konzentration der legierenden Verunreinigung ab. So tritt bei einem Gehalt an kleinen Donatoren von  $8 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  die intrinsische elektrische Leitfähigkeit bei  $50^\circ\text{C}$  auf, und wenn die Donatorenkonzentration  $7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$  beträgt, muss Germanium über  $200^\circ\text{C}$  erhitzt werden, um die intrinsische elektrische Leitfähigkeit zu beobachten.

Damit Germanium seine eigentliche elektrische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur behält, sollte es so gereinigt werden, dass es nicht mehr als  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  Verunreinigungen enthält.

Von praktischem Interesse ist die Abhängigkeit des Germanium-Widerstands von der Konzentration der Verunreinigungsatome (Donatoren oder Akzeptoren). Diese experimentell ermittelte Abhängigkeit ist in Abb. 3.8.a) dargestellt. Sie wird verwendet, um die Menge an Legierungselementen zu berechnen, die erforderlich ist, um Germanium-Einkristalle mit dem gewünschten spezifischen Widerstand zu erzeugen.

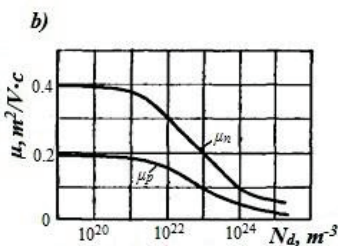
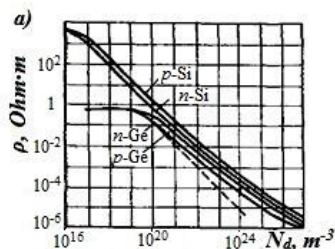


Abb. 3.8. a) - Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Silizium und Germanium von der Konzentration der Verunreinigungen bei 20 °C, b) - Abhängigkeit der Beweglichkeit der Hauptladungsträger in Germanium von der Konzentration der legierenden Verunreinigungen.

Die Konzentrationsabhängigkeit der Elektronen- und Lochbeweglichkeit in Germanium ist in Abb. 3.8.b) dargestellt. Wenn die Konzentration der Fremdatome  $10^{22} \text{ m}^{-3}$  übersteigt, beginnt die Streuung an ionisierten Fremdatomen selbst bei Raumtemperatur eine bedeutende Rolle zu spielen. Bei gleichem Dotierungsgrad ist die Mobilität von Löchern in einem p-Typ-Material immer geringer als die Mobilität von Elektronen in einem n-Typ-Material. Daher ist die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von der Dotierstoffkonzentration bei p-Typ-Germanium größer als bei n-Typ-Germanium (siehe Abb. 3.8.a)). Bei Verunreinigungskonzentrationen von weniger als  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  wird der spezifische Widerstand von Germanium durch seine eigene elektrische Leitfähigkeit bestimmt.

Die Wärmebehandlung von Germanium kann zu einer erheblichen Veränderung seiner elektrischen Eigenschaften führen. Wird beispielsweise eine n-Typ-Probe auf eine Temperatur von über 550 °C erhitzt, einige Zeit gehalten und dann schnell abgekühlt (abgeschreckt), kann eine Änderung der Art der elektrischen Leitfähigkeit des Halbleiters beobachtet werden. Eine ähnliche Wärmebehandlung von p-Typ-Germanium führt zu einer Abnahme des spezifischen Widerstands, ohne dass sich die Art der elektrischen Leitfähigkeit ändert. Das Ausglühen der abgeschreckten Proben bei einer Temperatur von 500-550°C stellt nicht nur die Art der elektrischen Leitfähigkeit, sondern auch den ursprünglichen Widerstandswert wieder her. Die Veränderung der Eigenschaften während des Aushärtens der Proben hängt mit der Bildung so genannter Wärmeakzeptoren in den Proben aufgrund von Gefügefehlern zusammen.

Auf der Basis von Germanium wird eine breite Palette von Bauelementen für verschiedene Zwecke, vor allem Dioden und Transistoren, hergestellt. Am weitesten verbreitet sind Gleichrichter-Flachdioden und legierte Bipolartransistoren.

Germanium wird auch zur Herstellung von Avalanche- und Tunneldioden, Varicaps, Punkt-Hochfrequenz-, Impuls- und Mikrowellendioden verwendet. Bei gepulsten Dioden ist ein Material mit einer kurzen Lebensdauer von Nichtgleichgewichtsladungsträgern erforderlich, um eine hohe Schaltgeschwindigkeit zu erreichen. Diese Anforderung wird durch golddotiertes Germanium erfüllt. Goldverunreinigungen schaffen effektive Rekombinationszentren im Germanium.

Aufgrund der relativ hohen Mobilität der Ladungsträger wird Germanium zur Herstellung von Hall-Sensoren und anderen magnetisch empfindlichen Bauteilen verwendet.

Die optischen Eigenschaften von Germanium ermöglichen die Herstellung von Fototransistoren und Fotodioden, optischen Linsen mit hoher Lichtausbeute (für Infrarotstrahlen), optischen Filtern, Licht- und Kurzwellenmodulatoren und Kernteilchenzählern. Der Betriebstemperaturbereich von Germanium-Bauelementen liegt zwischen (-60°C) und (+70°C). Die niedrige Obergrenze der Betriebstemperatur ist ein wesentlicher Nachteil von Germanium.

**Halbleiterverbindungen des Typs A<sup>III</sup>B<sup>IV</sup>**. A<sup>III</sup>B<sup>IV</sup> Verbindungen sind die engsten elektronischen Entsprechungen von Silizium und Germanium. Sie entstehen durch die Wechselwirkung von Elementen der III. Nebengruppe des Periodensystems (Bor, Aluminium, Gallium, Indium) mit Elementen der V. Nebengruppe (Stickstoff, Phosphor, Arsen und Antimon). Wismut und Thallium bilden keine Verbindungen dieser Reihe. A<sup>III</sup>B<sup>IV</sup> Die Einteilung der Verbindungen erfolgt in der Regel nach dem Metallelement. Dementsprechend werden Nitride, Phosphide, Arsenide und Antimonide unterschieden.

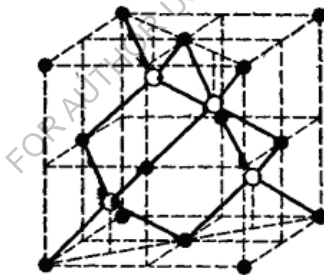


Abb. 3.9. Sphaleritstruktur von Verbindungen des Typs A<sup>III</sup>B<sup>IV</sup>:  
schwarze Kugeln - Atome A<sup>III</sup>; weiß - Atome B<sup>IV</sup>

Mit Ausnahme von Nitrid kristallisieren alle A<sup>III</sup>B<sup>IV</sup> Verbindungen in kubischen Zinkgittern (siehe Abb. 3.9). Nitrid ist durch eine hexagonale Struktur (Wurtzit) gekennzeichnet. In den Gittern beider Typen ist jedes Atom eines Elements der Gruppe III von einem Tetraeder aus vier Atomen eines Elements der Gruppe V umgeben und umgekehrt. Im Gegensatz zur Struktur des Diamanten hat die Struktur des Sphalerits kein Symmetriezentrum. Dieses Merkmal führt zu einem Unterschied in den Eigenschaften der Oberflächen (111) und ( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ ), die vollständig aus Atomen mit unterschiedlichen Namen zusammengesetzt sind. Das

unterschiedliche Verhalten der (111)- und ( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )-Flächen zeigt sich beim Ätzen, bei der Oxidation und beim Kristallwachstum.

A B<sup>IIIIV</sup> Verbindungen zeichnen sich durch eine besondere Art der chemischen Bindung aus, die so genannte Donor-Akzeptor-Bindung. Von den vier kovalenten Bindungen, die jedes Atom zum Aufbau des Gitters verwendet, werden drei durch die gemeinsame Nutzung der Valenzelektronen von A<sup>III</sup> und B<sup>V</sup> Atomen gebildet, und die vierte Bindung wird durch ein nicht geteiltes Paar von Valenzelektronen von B<sup>V</sup> Atomen gebildet. Bei jeder kovalenten Bindung wird die maximale Elektronendichte in Richtung des Atoms mit der höchsten Elektronegativität verschoben, d. h. die Elektronenwolken werden zu den Gitterknoten gezogen, an denen sich die BV-Atome befinden. Aufgrund dieser Polarisierung der Bindungen erhalten die Atome von A<sup>III</sup> eine bestimmte effektive positive Ladung und die BV-Atome eine negative Ladung. Der Wert dieser effektiven Ladung ( $\pm q$ ) bestimmt den Grad der Ionizität der Verbindung, der sich natürlich ändert, wenn man von einer Verbindung zur anderen übergeht, je nach der Position der chemischen Elemente im Periodensystem von D. I. Mendelejew.

Eine wertvolle Eigenschaft vieler A B<sup>IIIIV</sup> Halbleiter ist die hohe Effizienz der strahlenden Rekombination von Nicht-Gleichgewichtsladungsträgern. Um Strahlung im sichtbaren Spektralbereich zu erzeugen, muss die Bandlücke eines Halbleiters über 1,7 eV liegen. Unter den technologisch entwickelten Verbindungen vom Typ A B<sup>IIIIV</sup> erfüllen Galliumphosphid GaP und Galliumnitrid GaN diese Bedingung. Materialien mit einer geringeren Bandlücke können im Infrarotbereich effizient strahlen. Dazu gehört vor allem Galliumarsenid,  $\Delta E_z = 1,43$  eV.

Die Technologie zur Herstellung von Halbleiterverbindungen unterscheidet sich von der Technologie zur Herstellung von Elementarhalbleitern dadurch, dass sie einen Synthesevorgang umfasst. Um nicht abbaubare A B<sup>IIIIV</sup> Verbindungen (Antimonide) zu erhalten, erfolgt die Synthese durch direkte Verschmelzung der Ausgangskomponenten, z. B. Indium und Antimon. Die weiteren technologischen Verfahren (Kristallisationsreinigung, Dotierung und Einkristallzüchtung) unterscheiden sich nicht grundlegend von denen der Germaniumherstellung.

Bei der Gewinnung von Kristallen aus abbaubaren Verbindungen ist die Prozessausrüstung komplizierter. Die effektivste Methode zur Züchtung von Einkristallen abbaubarer Verbindungen besteht darin, sie unter einer Schicht aus inertem Flussmittel herauszuziehen. Eine Schicht aus flüssigem, transparentem Flussmittel, einem unter Druck stehenden Inertgas, sorgt für eine vollständige Abdichtung des Tiegels und unterdrückt die Verdampfung flüchtiger Bestandteile aus der Schmelze. Als Dichtungsflüssigkeit wird eine Schmelze aus Borsäureanhydrid B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

verwendet, die eine geringe chemische Aktivität und einen niedrigen Erweichungspunkt aufweist. Die Dicke der Flussmittelschicht beträgt in der Regel etwa 1 cm.

Einkristalle, die durch Ziehen aus der Schmelze gewonnen werden, weisen eine unzureichende chemische Reinheit auf und enthalten eine beträchtliche Anzahl von Punktdefekten in der Struktur, die wirksame Rekombinationsfallen sind und eine kurze Lebensdauer von Nichtgleichgewichtsladungsträgern verursachen. Daher werden die meisten Halbleiterbauelemente auf der Grundlage von Epitaxieschichten hergestellt, die aus der Flüssig- oder Gasphase abgeschieden werden. Als Substrate werden Wafer verwendet, die aus einkristallinen Barren in einer bestimmten kristallographischen Richtung geschnitten wurden. Bei der Flüssigphasenepitaxie ist die am weitesten verbreitete Methode das Mehrkammershuttle.

Die Vielfalt der Eigenschaften von  $AB^{IIIIV}$  Halbleitern bestimmt ihre breite Anwendung in Instrumenten und Geräten für verschiedene technische Zwecke. Besonderes Interesse an dieser Materialgruppe wurde durch den Bedarf der Optoelektronik an Hochgeschwindigkeitsstrahlungsquellen und -empfängern geweckt. Injektionslaser und LEDs auf der Basis von  $AB^{IIIIV}$  Halbleitern zeichnen sich durch eine hohe Effizienz bei der Umwandlung von elektrischer Energie in elektromagnetische Strahlung aus. Zu den wesentlichen Vorteilen dieser Geräte gehören die geringen Abmessungen, die Einfachheit des Entwurfs, die Möglichkeit, die Strahlung durch Änderung der Steuerspannung intern zu modulieren, und die Kompatibilität mit integrierten Schaltkreisen in Bezug auf Betriebsparameter und technologische Abläufe.

Dank dieser Tatsache werden Halbleiterlaser und LEDs erfolgreich in der Computer-, Informations- und Messtechnik, in der Verteidigungstechnik, in der Raumfahrt und Kommunikation sowie in Haushaltsgeräten eingesetzt. Galliumarsenid war der erste Halbleiter, der 1962 einen Injektionslaser herstellte, d. h. kohärente Strahlung mit Hilfe eines p-n-Übergangs erzeugte.

Die große Bandbreite der Bandlückenwerte von  $AB^{IIIIV}$  Halbleitern ermöglicht die Herstellung verschiedener Arten von Fotodetektoren, die eine große Bandbreite von Spektren abdecken. Am häufigsten werden Fotodioden und Fotozellen eingesetzt. Galliumarsenid ist potenziell eines der besten lichtempfindlichen Materialien für den Einsatz in Solarzellen. Indiumantimonid ist von großer technischer Bedeutung für die Herstellung von Infrarotstrahlungsempfängern.

Galliumarsenid und Indiumantimonid werden zur Herstellung von Tunnelioden verwendet. Im Vergleich zu Germaniumdioden zeichnen sich Galliumarsenid-Bauelemente durch eine höhere Betriebstemperatur

aus, und InSb-Dioden haben bessere Frequenzeigenschaften bei niedrigen Temperaturen.

Magnetowiderstände und Hall-Wandler werden auf der Grundlage von Schmalband-Halbleitern wie  $A B^{IIIIV}$  (InSb, InAs) hergestellt.

Die in den letzten zehn Jahren erzielten Fortschritte in der Galliumarsenidtechnologie haben breite Perspektiven für die Verwendung dieses Materials zur Herstellung von Feldeffekttransistoren und integrierten Hochleistungsschaltungen eröffnet. Im Vergleich zu Silizium ist Galliumarsenid ein technologisch komplexeres Material. Es ist schwierig, ein stabiles natives Oxid darauf zu züchten, und es erlaubt keine Diffusionsdotierung mit Donor-Verunreinigungen. Die Zersetzung bei hohen Temperaturen führt zu Schwierigkeiten bei Glühvorgängen. Verbesserungen bei den Epitaxietechniken, die Entwicklung der Ionendotierung, das Lasertempeln, die Elektronenstrahlolithographie und die Entwicklung neuer Methoden zur Abscheidung von Schutzschichten ermöglichen es jedoch, das Potenzial von Galliumarsenid zur Erhöhung des Integrationsgrads und der Leistung integrierter Schaltungen zu nutzen.

**Siliziumkarbid.** Siliciumcarbid  $SiC$  ist die einzige binäre Verbindung, die aus Halbleiterelementen der Gruppe IV des Periodensystems besteht. Dieses Material ist in der Natur äußerst selten und kommt nur in begrenzten Mengen vor.

Von der Art der chemischen Bindung her ist Siliciumcarbid ein kovalenter Kristall. Der Anteil der ionischen Bindung aufgrund der unterschiedlichen Elektronegativität von Si- und C-Atomen beträgt nicht mehr als 10-12 %. Die starken chemischen Bindungen zwischen Silizium- und Kohlenstoffatomen führen zu einer sehr hohen chemischen und Temperaturstabilität von  $SiC$  sowie zu einer hohen Härte.

Die hexagonale Modifikation von  $SiC$  besteht aus vielen Polytypen, d. h. Kristallstrukturen, die sich in der Anordnung der Atome unterscheiden. Polytypismus entsteht durch die unterschiedliche Ausrichtung einer Schicht gleichnamiger Atome im Verhältnis zu einer anderen, obwohl alle Polytypen die gleiche Nahbereichsordnung beibehalten, d. h. jedes Siliziumatom im Kristallgitter ist von einem Tetraeder aus Kohlenstoffatomen umgeben und umgekehrt. Derzeit sind mehr als 100 verschiedene  $SiC$ -Polytypen bekannt. Die elektrophysikalischen Eigenschaften der gebräuchlichsten Siliciumcarbid-Polytypen sind in der Tabelle systematisiert. 3. 4.

Wie aus Tabelle. 3.4 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Werte für die Bandlücke und die Elektronenbeweglichkeit zwischen den verschiedenen Polytypen erheblich. Die Variation der grundlegenden elektrophysikalischen Eigenschaften in verschiedenen Polytypen erlaubt es uns, Siliciumcarbid als eine Gruppe von Halbleitermaterialien mit derselben chemischen Zusammensetzung zu betrachten.

Die elektrische Leitfähigkeit von Kristallen bei Normaltemperatur ist eine Verunreinigung. Die Art der elektrischen Leitfähigkeit und die Farbe der Siliciumcarbidkristalle hängen von den Fremdverunreinigungen ab oder werden durch den Überschuss an Si- oder C-Atomen gegenüber der stöchiometrischen Zusammensetzung bestimmt. Reines Siliciumcarbid mit stöchiometrischer Zusammensetzung ist farblos.

Tabelle 3.4. Elektrophysikalische Eigenschaften der wichtigsten Siliciumcarbid-Polytypen (T=300 K)

Änderung	$\beta$ - SiC	$\alpha$ -SiC			
		15 R	6H	4H	2H
Polytop-Symbol	3C	15 R	6H	4H	2H
Gitterperiode x10, nm	4,359	3,073 (a) 37,3(c)	3,081  15.12	3,076  10.05	-
Breite der verbotenen Zone, eV	2,39	2,986	3,023	3,265	3,333
Mobilität der Elektronen, $\text{m}^2 /(\text{V}\cdot\text{s})$	0,1	0,05	0,033	0,07	-
Mobilität der Löcher, $\text{m}^2 /(\text{V}\cdot\text{s})$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

Siliziumkarbid ist von praktischem Interesse für die Herstellung leistungsfähiger Gleichrichterioden, Hochtemperatur-Dehnungsmessstreifen und hochenergetischer Teilchenzähler, die in chemisch aggressiven Umgebungen arbeiten können. Die Möglichkeiten der Verwendung von Siliziumkarbid zur Herstellung von Feldeffekttransistoren mit guten Frequenzeigenschaften, Mikrowellendioden, Thermistoren und einigen anderen Geräten werden aufgezeigt.

Varistoren (nichtlineare Halbleiterwiderstände), Hochtemperaturheizungen und Hohlleiterabsorber werden auf der Basis von pulverförmigem Siliziumkarbid hergestellt, das mit einem Bindemittel gebunden ist. Varistoren werden in Automatisierungssystemen, Computern und elektrischen Geräten eingesetzt, um Ströme und Spannungen zu stabilisieren, Schaltkreise vor



Überspannungen zu schützen und Signale zu regeln und umzuwandeln. Aufgrund seiner hohen Härte wird Siliziumkarbid für die Bearbeitung verschiedener Materialien verwendet.

FOR AUTHOR USE ONLY

# Kapitel 4. Dielektrika

## 4.1 Allgemeine Informationen

Dielektrika sind Stoffe, deren wichtigste elektrische Eigenschaft die Fähigkeit ist, sich in einem elektrischen Feld zu polarisieren. In gasförmigen, flüssigen und festen Dielektrika sind die elektrischen Ladungen stark an Atome, Moleküle oder Ionen gebunden und können sich nur in einem elektrischen Feld bewegen, was zur Trennung der Zentren positiver und negativer Ladungen, d. h. zur Polarisierung, führt. Dielektrika enthalten auch freie Ladungen, die, wenn sie sich in einem elektrischen Feld bewegen, elektrische Leitfähigkeit verursachen. Die Anzahl dieser freien Ladungen in einem Dielektrikum ist jedoch gering, so dass die Stromstärke gering ist. Dielektrika, die als Isoliermaterial verwendet werden, nennt man passiv. Es gibt aktive Dielektrika, deren Parameter durch Änderung der Stärke des elektrischen Feldes, der Temperatur und der mechanischen Belastung eingestellt werden können. Je nach ihrer chemischen Zusammensetzung werden sie unterteilt in organische Verbindungen von Kohlenstoff mit Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und anderen Elementen, elementare organische Verbindungen, deren Moleküle Atome von Silizium, Magnesium, Aluminium, Titan und anderen Elementen enthalten, und anorganische Verbindungen, die keinen Kohlenstoff enthalten. Zu den verschiedenen Eigenschaften von Dielektrika, die ihre technische Anwendung bestimmen, zählen vor allem die elektrische Leitfähigkeit, die Polarisierung, die dielektrischen Verluste, die elektrische Festigkeit und die elektrische Alterung. Die wichtigsten Eigenschaften, die für die Verwendung von Dielektrika in elektrotechnischen und funktechnischen Geräten ausschlaggebend sind, sind ihre Isoliereigenschaften sowie die Fähigkeit, aufgrund eines internen elektrischen Feldes, d. h. der Polarisierung, eine elektrische Kapazität zu erzeugen. Um die Funktion der elektrischen Isolierung zu erfüllen, müssen dielektrische Materialien den Durchgang von elektrischem Strom durch für den Betrieb des Geräts unerwünschte Pfade verhindern. Unter diesem Gesichtspunkt ist das Hauptmerkmal von Dielektrika der Wert der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit oder des spezifischen Widerstands.

## 4.2. Polarisierung von Dielektrika

Das grundlegende Phänomen, das die Möglichkeit der Verwendung eines Dielektrikums zur Erzeugung von Kapazität für Kondensatoren in elektronischen Geräten bestimmt, ist die Polarisierung.

Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes äußert sich die elektrische Polarisierung in einer begrenzten elastischen Verschiebung der gebundenen Ladungen, der Ausrichtung der Dipolmoleküle, wodurch ein bestimmtes Volumen oder eine bestimmte Oberfläche des Dielektrikums

ein elektrisches Moment erhält. Nach Wegnahme des elektrischen Feldes kehren die gebundenen Ladungen in ihren ursprünglichen Zustand zurück.

Um Dielektrika mit unterschiedlichem Polarisationsgrad zu vergleichen, wird das Konzept der relativen Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$  verwendet. Dieser Wert ist das Verhältnis zwischen der Ladung  $Q$  eines Kondensators mit einem bestimmten Dielektrikum und der Ladung  $Q_0$  eines Kondensators gleicher Größe und Spannung mit einem Vakuum zwischen seinen Belägen:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0}, \quad (4.1)$$

$\varepsilon$  ist eine dimensionslose Größe und ist immer größer als eins, da reale Dielektrika im Gegensatz zum Vakuum immer elektrische Ladungen enthalten.

Dielektrika werden in zwei Klassen unterteilt: polare und unpolare. Bei Molekülen unpolarer Stoffe fallen die Anziehungspunkte der gesamten positiven und negativen Ladungen zusammen. Moleküle von polaren Stoffen haben die Form von elektrischen Dipolen, die sich in einem elektrischen Feld ausrichten können.

Elektronische Polarisation ist eine elastische Verschiebung und Verformung der elektronischen Schalen von Atomen und Ionen. Die Zeit für die Etablierung der elektronischen Polarisation ist sehr kurz (etwa 10-15 s), und der Prozess erfolgt praktisch ohne Energieverlust. Elektronische Polarisation wird ausnahmslos in allen Dielektrika beobachtet, da sich in allen Dielektrika die Elektronen in einem gebundenen Zustand befinden.

Die Ionenpolarisation ist charakteristisch für feste Dielektrika mit ionischer Struktur (Glimmer, Korund, Steinsalz) und äußert sich in einer elastischen Verschiebung der gebundenen Ionen unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes. In diesem Fall erfolgt die Verschiebung der Ionen in einem Abstand, der kleiner ist als die Kristallgitterkonstante (der Mindestabstand zwischen identischen Ionen). Die Zeit für den Aufbau der Polarisation beträgt etwa 10-13 s, und es tritt kein Energieverlust auf.

Die Relaxationspolarisation von Elektronen und Ionen geht mit dielektrischen Verlusten einher. Die Elektronenrelaxationspolarisation entsteht durch die Anregung überschüssiger (defekter) Elektronen oder Löcher durch thermische Energie. Die Ionen-Relaxationspolarisation ist charakteristisch für Materialien mit ionischer Struktur und lockerer Ionenpackung (z. B. in anorganischen Gläsern). Bei dieser Art der Polarisation bewegen sich schwach gebundene Ionen unter dem Einfluss eines Feldes um einen oder mehrere Atomabstände und werden in einer neuen Position fixiert, wodurch eine Asymmetrie in der Ladungsverteilung und ein elektrisches Moment pro Volumeneinheit entsteht. Die Relaxationszeit beträgt  $10^{-11}$  -  $10^{-8}$  s.

Die Dipol-Relaxations-Polarisation wird in der Regel bei polaren organischen Dielektrika (Polymethylmethacrylat, Polyvinylchlorid usw.)

beobachtet und besteht in der Ausrichtung und Drehung von Dipolmolekülen und Dipolgruppen unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes. Diese Art der Polarisierung ist mit Energieverlusten verbunden. Je niedriger die Temperatur und je mehr Dipole, desto länger ist die Relaxationszeit, die zwischen  $10^{-10}$  und  $10^{-6}$  s liegt.

Die strukturelle Polarisierung wird durch die Bewegung freier Ladungen (positive und negative Ionen, Elektronen) und ihre Fixierung an Defekten und Grenzflächen verschiedener Komponenten des elektrischen Isoliermaterials verursacht. Diese Art der Polarisation wird bei heterogenen Dielektrika (Verbundkunststoffe, Getinax, Textolite, Keramik usw.) beobachtet, deren Bestandteile unterschiedliche elektrische Eigenschaften aufweisen. Die Relaxationszeit kann bis zu zehn Minuten betragen, und die Polarisation ist mit dielektrischen Verlusten verbunden.

Die oben erörterten Polarisationsmechanismen sind charakteristisch für die so genannten linearen Dielektrika, deren Ladungsabhängigkeit (Polarisierbarkeit) von der Stärke des elektrischen Feldes eine lineare Funktion ist, und der Wert von  $\epsilon$  ist unabhängig vom Feld. Eine besondere Gruppe von Dielektrika, die als nichtlineare oder aktive Dielektrika bezeichnet werden, besteht aus Ferroelektrika, die eine spontane Polarisation aufweisen.

Bei einer für das Material charakteristischen Temperatur, dem so genannten Curie-Punkt, erhalten die einzelnen Einheitszellen eines ferroelektrischen Kristalls ein elektrisches Dipolmoment, das auf die Verschiebung eines Kations zu einem Anion zurückzuführen ist, d. h. auf die Entstehung einer asymmetrischen Verteilung von Ladungen mit unterschiedlichen Namen. Ein Satz benachbarter Einheitszellen ist ein Bereich mit getrennten positiven und negativen Ladungen, d. h. ein Bereich mit einem internen elektrischen Dipolmoment. Solche Bereiche haben eine Größe von  $\sim 0,1-1 \text{ nm}^3$  und werden Domänen genannt. Unter bestimmten Bedingungen ist das Material also spontan polarisiert.

Vor der Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes sind die Richtungen der Dipolmomente der einzelnen Domänenbereiche chaotisch und ihre Summe ist Null, so dass das Ferroelektrikum im Allgemeinen neutral, unpolarisiert ist. Unter der Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes treten in einem Ferroelektrikum die Prozesse der Verschiebung der Domänengrenzen und der Ausrichtung der elektrischen Momentenvektoren der Domänen hauptsächlich in Richtung des äußeren Feldes auf, d. h. die Polarisation nimmt zu. Die Abhängigkeit der Ladung (Polarisierbarkeit) eines Ferroelektrikums von der Intensität des elektrischen Feldes ist nichtlinear und stellt in einem Wechselfeld eine dielektrische Hystereseschleife dar (Abb. 4.1a). Daher hängt bei spontaner Polarisation auch die relative Dielektrizitätskonstante des Materials nichtlinear von der elektrischen Feldstärke ab (Abb. 4.1b).

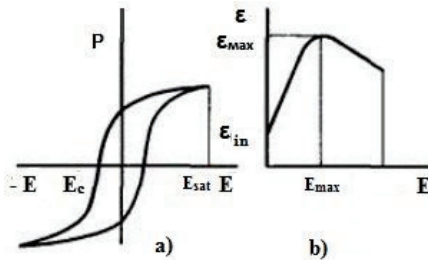


Abb. 4.1. Abhängigkeit der Polarisation  $P$  (a) und der relativen Permittivität  $\epsilon$  (b) eines Ferroelektrikums von der elektrischen Feldstärke  $E$ .

Spontane Polarisation wird von dielektrischen Verlusten begleitet, und die Fläche der dielektrischen Hystereseschleife ist proportional zur Verlustleistung.

Die Art der Abhängigkeit von  $\epsilon(T)$  eines bestimmten Dielektrikums wird durch die vorherrschende Art der Polarisation bestimmt. Bei unpolaren Materialien (Polyethylen, Paraffin) nimmt  $\epsilon$  mit steigender Temperatur ab, da die Dichte und damit die Konzentration der Polarisationsobjekte abnimmt. Wenn die Temperatur bis zum Curie-Punkt ansteigt, erhöht sich das  $\epsilon$  von Ferroelektrika aufgrund der Erleichterung der Domänenpolarisation, und oberhalb des Curie-Punkts nimmt es aufgrund der Störung der Domänenstruktur ab.

### 4.3. Vorspannströme und elektrische Leitfähigkeit von Dielektrika

Polarisationsprozesse der Verschiebung beliebiger Ladungen in einer Substanz, die zeitlich bis zur Herstellung und Erreichung des Gleichgewichtszustandes verlaufen, verursachen das Auftreten von Polarisationsströmen oder Verschiebungsströmen  $J_{dc}$  in Dielektrika. Die Verschiebungsströme elastisch gebundener Ladungen bei elektronischen und ionischen Polarisierungen sind so kurzlebig, dass sie in der Regel nicht mit einem Gerät erfasst werden können. Die Verschiebungsströme bei verschiedenen Arten von verzögerter Polarisation, die in vielen technischen Dielektrika beobachtet werden, werden als Absorptionsströme  $J_{ab}$  bezeichnet.

Bei konstanter Spannung treten Absorptionsströme, die ihre Richtung ändern, nur während der Ein- und Ausschaltphasen der Spannung auf. Bei Wechselspannung treten sie während der gesamten Zeit auf, in der sich das Material im elektrischen Feld befindet.

Das Vorhandensein einer kleinen Anzahl von freien Ladungen in technischen Dielektrika sowie deren Injektion von den Elektroden führt zum Auftreten kleiner Leitungsströme  $J_c$ .

Die Gesamtstromdichte im Dielektrikum, der so genannte Leckstrom, ist also die Summe der Absorptions- und Transmissionsstromdichten:

$$J_{lc} = J_{dc} + J_e \quad (4.2)$$

Die verwendeten Dielektrika enthalten, wie bereits erwähnt, eine kleine Menge freier Ladungen in ihrem Volumen, die sich im elektrischen Feld bewegen. Dieser Strom wird als Leckstrom bezeichnet. In Dielektrika können freie Ladungen, die sich in einem elektrischen Feld bewegen, Ionen (positiv und negativ), Elektronen und Elektronenlücken (Löcher) sowie Polaronen sein. Elektronen können durch Erwärmung des Dielektrikums oder durch ionisierende Strahlung genügend Energie erhalten, um in das Leitungsband zu gelangen. In starken Feldern ist es möglich, von Metallelektroden aus Ladungen (Elektronen, Löcher) in das Dielektrikum zu injizieren; durch Stoßionisation können freie Ladungen (Ionen und Elektronen) gebildet werden, wenn die Energie der freien Ladungen ausreicht, um Atome bei einem Zusammenstoß zu ionisieren.

Feste Dielektrika zeichnen sich durch ionische elektrische Leitfähigkeit aus. Werden solche Dielektrika erhitzt oder beleuchtet, einer Strahlung oder einem starken elektrischen Feld ausgesetzt, werden die darin enthaltenen Defekte und Verunreinigungen zunächst ionisiert. Die auf diese Weise gebildeten Ionen bestimmen den Niedertemperaturbereich der elektrischen Leitfähigkeit des Dielektrikums. Bei intensiverer Bestrahlung des Dielektrikums werden die Hauptteilchen des Materials ionisiert. In diesem Fall ändert sich die spezifische Leitfähigkeit mit der Temperatur stärker, da die Zahl der bei der Ionisierung der Hauptteilchen gebildeten Ionen größer ist als bei der Ionisierung von Defekten und Verunreinigungen. Die Aktivierungsenergie der Hauptteilchen ist höher, dieser Bereich der elektrischen Leitfähigkeit wird als intrinsische Hochtemperaturleitfähigkeit bezeichnet. Die elektrische Oberflächenleitfähigkeit von Dielektrika wird durch die Fähigkeit der Materialoberfläche bestimmt, Schadstoffe zu adsorbieren, insbesondere die in der umgebenden Atmosphäre enthaltene Feuchtigkeit. Polare Dielektrika sind gut benetzbar, sie werden als hydrophil bezeichnet, im Gegensatz zu hydrophoben Dielektrika, die von Wasser nicht benetzt werden. Unpolare Dielektrika sind hydrophob. Eine dünne Feuchtigkeitsschicht auf der Oberfläche verringert den Oberflächenwiderstand.

#### **4.4. Dielektrische Verluste in Dielektrika**

Der dielektrische Verlust ist die Leistung, die in einem Dielektrikum unter dem Einfluss eines angelegten elektrischen Feldes

verloren geht, wodurch es sich erwärmt. Wir betrachten die gesamten dielektrischen Verluste, die sowohl durch Wechsel- als auch durch Gleichspannungen aufgrund von durch Leitung verursachten Strömen verursacht werden.

Die Art der dielektrischen Verluste in isolierenden Materialien ist unterschiedlich und hängt vom Aggregatzustand der Substanz ab: gasförmig, flüssig und fest. Bei der Untersuchung der dielektrischen Verluste, die mit dem Phänomen der dielektrischen Polarisierung verbunden sind, werden die Kurven der Abhängigkeit der Ladung  $Q$  auf den Kondensatorbelägen mit einem bestimmten Dielektrikum von der elektrischen Feldspannung betrachtet. Verluste, die durch sofortige Polarisierungen verursacht werden, erwärmen das Dielektrikum nicht und werden grafisch durch eine lineare Abhängigkeit dargestellt. Die durch eine verzögerte Polarisierung verursachten Verluste werden durch die Fläche eines Ovals ausgedrückt, die proportional zur in Wärme umgewandelten Energie pro Spannungsperiode ist. Bei Dielektrika mit spontaner Polarisierung wird der Energieverlust pro Periode durch die von der Hystereseschleife begrenzte Fläche bestimmt. Betrachten wir die Verluste in einem Dielektrikum anhand von Vektordiagrammen von Substitutionschaltungen.

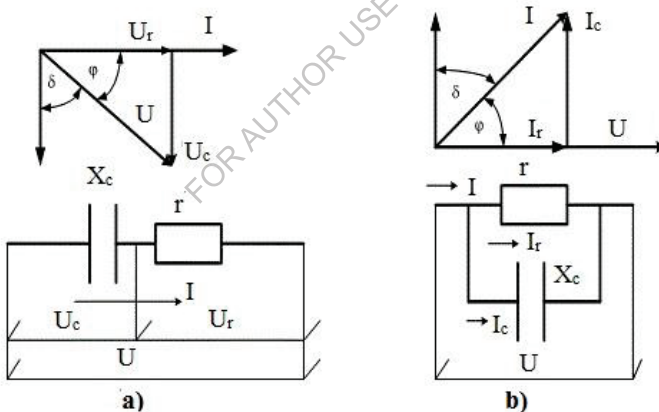


Abb. 4.2. Vektordiagramme der sequentiellen (a) und parallelen (b) Substitutionsverfahren

Bei einer konstanten Spannung  $U$  auf der Isolierstrecke mit einem Widerstand  $R$  wird der Wert des aktiven Verlusts  $P_a$  wie folgt bestimmt

$$P_a = U^2 / R = UI = I^2 R, \quad (4.3)$$

wobei  $I$  der Leckstrom durch das Dielektrikum oder die Isolierung ist.

Bei einer variablen Spannungsform haben wir den Wert der Wärmeverlustenergie  $W_a$  oder der Wirkverluste  $P_a$ , auf dem

Isolationsabschnitt mit einer Kapazität  $C$ , bei dem aktuellen Wert der angelegten Spannung  $U$ , der Frequenz  $f$  oder  $\omega = 2\pi f$  (Kreisfrequenz). In diesem Fall ist es notwendig, den Phasenwinkel  $\varphi$  zwischen dem Gesamtstrom und der Gesamtspannung aus den Vektordiagrammen der Serien- und Parallel-Isolationsersatzschemata zu ermitteln und durch Addition zu  $90^\circ$  den Winkel  $\delta$  - den Winkel der dielektrischen Verluste - gemäß den Abbildungen 4.2. a), b) zu bestimmen. Je größer die Verlustleistung im Dielektrikum ist, die sich in Wärme umwandelt, desto kleiner ist der Phasenwinkel  $\varphi$  und desto größer ist der Winkel  $\delta$  und folglich seine Funktion  $\operatorname{tg}\delta$  - der Tangens des dielektrischen Verlustwinkels. Daher

$$W_a = P_a = U I \cos \varphi = U I \operatorname{tg} \delta = U \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (4.4)$$

Wir können  $\operatorname{tg}\delta$  aus den Vektordiagrammen von Abb. 4.2. a), b) darstellen:

$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_c \quad \text{oder} \quad \operatorname{tg} \delta = I_a / I_c. \quad (4.5)$$

Der Verlustfaktor  $\delta$  ist ein Parameter sowohl des Materials selbst als auch des dielektrischen Produkts. Häufig wird der Begriff "Isolationsqualitätsfaktor" verwendet, der der Kehrwert des Tangens des dielektrischen Verlustwinkels ist

$$Q = 1 / \operatorname{tg} \delta = U_c / U_a \quad \text{oder} \quad Q = 1 / \operatorname{tg} \delta = I_c / I_a. \quad (4.6)$$

Bei hochwertigen Materialien liegen die  $\operatorname{tg}\delta$ -Werte im Bereich von Tausenden und sogar Zehntausenden von Bruchteilen einer Einheit, können aber bei minderwertigen elektrischen Materialien höher sein (einige Hundertstel einer Einheit).

Das Produkt aus der relativen Dielektrizitätskonstante und dem dielektrischen Verlusttangens ( $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ ) wird als dielektrischer Verlustfaktor eines Materials bezeichnet.

Bei Wechselspannungen sind die Verluste in der Regel größer als bei konstanten Spannungen, wie die Ungleichung

$$f \rho \varepsilon \operatorname{tg} \delta > 1,8 \cdot 10^{10}.$$

Diese Ungleichung setzt den bei einer konstanten Spannung gemessenen spezifischen Widerstand  $\rho$  mit den Parametern  $\varepsilon$  und  $\operatorname{tg}\delta$  bei einer Wechselspannung mit einer Frequenz  $f$  in Beziehung.

#### 4.5. Elektrischer Durchbruch von Dielektrika

Die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der elektrischen Isolierung von Drähten, Kondensatordielektrika und anderen Teilen elektronischer Geräte hängt von der so genannten elektrischen Festigkeit des Dielektrikums ab. Unter Durchschlag versteht man den Verlust der dielektrischen Eigenschaften des Materials in dem zwischen den Elektroden gebildeten Kanal unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes. Die Spannung, bei der der Durchbruch stattfindet, wird als Durchbruchspannung ( $U_b$ ) bezeichnet.



Die elektrische Festigkeit des Dielektrikums  $E_b$  in einem homogenen elektrischen Feld wird durch den Wert der Durchschlagsspannung  $U_b$  bestimmt, die von der dielektrischen Dicke  $d$  (Abstand zwischen den Elektroden) abhängt:

$$E_b = U_b / d. \quad (4.7)$$

Im Falle eines inhomogenen Feldes bezieht sich  $E_b$  auf den Durchschnittswert der Durchschlagfestigkeit.

Der Wert von  $E_b$  kennzeichnet die Fähigkeit eines Dielektrikums, der zerstörerischen Wirkung eines elektrischen Feldes zu widerstehen.

Das Phänomen des Zusammenbruchs ist verbunden mit der Unterbrechung chemischer Bindungen zwischen Molekülen (Atomen), der Ionisierung von Stoffatomen durch einen lawinenartigen Strom von Elektronen, der unter dem Einfluss der Schockionisierung zunimmt. Die elektrische Festigkeit eines Materials wird durch die freie Weglänge der Elektronen, d. h. die Dichte des Stoffes und seinen Aggregatzustand bestimmt.

#### 4.6. Aufschlüsselung der festen Dielektrika

Bei festen Dielektrika werden drei Hauptarten von Durchschlägen unterschieden: elektrische, elektrothermische und elektrochemische. Das Auftreten der einen oder anderen Art von Durchschlag in einem Dielektrikum hängt von seinen Eigenschaften, der Elektrodenform und den Bedingungen ab. Ein elektrischer Durchschlag ist ein Durchschlag, der durch Stoßionisation oder das Aufbrechen von Bindungen zwischen dielektrischen Teilchen direkt unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes verursacht wird.

Die elektrische Festigkeit  $E_b$  fester Dielektrika bei elektrischem Durchschlag liegt in relativ engen Grenzen: 100 - 1000 MV/m, was in der Nähe des  $E_b$  von hochkomprimierten Gasen und sehr reinen Flüssigkeiten liegt. Der Wert von  $E_b$  wird hauptsächlich durch die innere Struktur des Dielektrikums bestimmt (Packungsdichte der Atome, Stärke ihrer Bindungen) und ist nur schwach von äußeren Faktoren wie Temperatur, Frequenz der angelegten Spannung, Form und Größe der Probe (mit Ausnahme einer sehr geringen Dicke) abhängig. Charakteristisch ist eine sehr kurze elektrische Durchbruchzeit von weniger als einer Mikrosekunde.

Der elektrothermische Durchschlag wird durch eine Verletzung des thermischen Gleichgewichts des Dielektrikums aufgrund von dielektrischen Verlusten verursacht.

Es wird die Leistung bestimmt, die in einer dielektrischen Probe mit einer Kapazität  $C$  freigesetzt wird, wenn eine Spannung  $U$  mit einer Kreisfrequenz  $\omega$  an sie angelegt wird:

$$P_n = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (4.8)$$

Die von der Probe abgegebene Wärmeleistung ist proportional zur Kühlkörperfläche  $S$  und der Temperaturdifferenz zwischen der Probe  $T$  und der Umgebung  $T_o$  :

$$P_p = kS(T - T_o) \quad (4.9)$$

wobei  $k$  der Wärmeübergangskoeffizient ist.

Die Bedingung des thermischen Gleichgewichts wird durch die Gleichheit der aufgenommenen und abgeleiteten Leistung bestimmt:  $P_n = P_p$ . Da  $\text{tg} \delta$  in der Regel mit steigender Temperatur zunimmt, ist ab einer bestimmten kritischen Temperatur  $T_k$  der Wert von  $P_n > P_p$  (Abb. 4.3); ein weiterer Punkt der Gleichheit von  $P_n$  und  $P_p$  ( $T_l$ ) entspricht einem stabilen Gleichgewicht. Infolge des Überschusses der Wärmeerzeugung über die Wärmeübertragung wird das Dielektrikum lawinenartig aufgeheizt, was zu seiner Zerstörung (Schmelzen, Verbrennung) führt.

Entsprechend der thermischen Gleichgewichtsbedingung ist die Durchbruchspannung:

$$U_{bd} = \sqrt{\frac{kS(T_k - T_o)}{2\pi f C \cdot \text{tg} \delta}} \quad (4.10)$$

wobei  $\text{tg} \delta$  der kritischen Temperatur  $T_k$  entspricht.

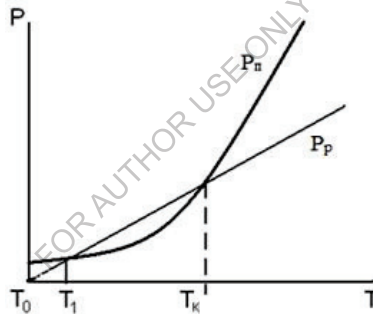


Abb. 4.3. Abhängigkeit der von  $P_n$  aufgenommenen und der von der dielektrischen Probe  $P_p$  abgegebenen Leistung von ihrer Temperatur.

Daher kann bei einer bestimmten Betriebsfrequenz eine Isolierung aus diesem Material mit einer Durchbruchspannung hergestellt werden, die den angegebenen Wert nicht überschreitet. Diese Spannung hängt von dem dielektrischen Verlustfaktor und anderen Parametern ab.

Im Gegensatz zum elektrischen Durchschlag ist die Spannung des elektrothermischen Durchschlags, wie aus (4.10) ersichtlich, von der Frequenz abhängig:

$$U_{bd} = \frac{A}{\sqrt{f}} \quad (4.11)$$

wobei  $A$  eine Konstante ist (wenn die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Verluste vernachlässigt wird).

Folglich nimmt  $U_{bd}$  bei hohen Frequenzen ab. In ähnlicher Weise hängt  $U_{bd}$  beim thermischen Durchbruch von der Temperatur ab und nimmt mit deren Anstieg aufgrund des Wachstums von  $tg \delta$  ab [siehe (4.10)]. Aus den oben genannten Gründen kommt es bei einem Anstieg der Frequenz  $f$  oder der Temperatur  $T$ , wenn die thermische Durchbruchsspannung  $U_{bd,T}$  groß ist, zu einem elektrischen Durchbruch, und bei hohen  $f$  oder  $T$ , wenn  $U_{bd,T}$  auf Werte unter der elektrischen Durchbruchsspannung  $U_{bd,E}$  sinkt, wird der Durchbruch zu einem elektrothermischen Durchbruch (Abb. 4.4).

Die kritische Frequenz  $f_k$  oder die Temperatur  $T_k$ , bei der der Übergang vom elektrischen zum thermischen Durchschlag erfolgt, hängt von den Eigenschaften des Dielektrikums, den Bedingungen für die Wärmeableitung der Isolierung, der Dauer der angelegten Spannung und der Art der Impulse ab.

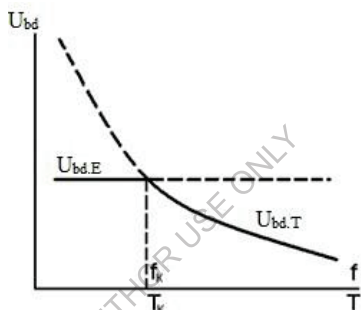


Abb. 4.4. Typische Abhängigkeit der Durchbruchspannung von Frequenz und Temperatur.

Die Durchbruchsspannung nimmt mit der Dauer der angelegten Spannung ab, was auf die zusätzliche Erwärmung des Dielektrikums sowie auf die chemische Alterung und andere Phänomene zurückzuführen ist. Bei einer kurzzeitigen Spannungsanwendung (z. B. gepulst) ist die Wahrscheinlichkeit eines thermischen Durchbruchs selbst bei einer relativ hohen Leitfähigkeit gering, da die Probe keine Zeit hat, sich zu erwärmen.

Die elektrische Festigkeit eines thermischen Durchschlags nimmt mit zunehmender Dicke des Dielektrikums ab, da dessen Heterogenität zunimmt und sich die Wärmeübertragung verschlechtert.

Bei Dielektrika, die über einen längeren Zeitraum einem elektrischen Feld ausgesetzt sind, kann es zu einer elektrochemischen Zersetzung infolge von Elektrolyse, Ionisierung von Gaseinschlüssen usw. kommen. Diese Prozesse führen zu einer chemischen Alterung des Dielektrikums. Das Endstadium des elektrochemischen Durchbruchs ist meist der thermische Durchbruch.

Feste Dielektrika haben die höchste elektrische Festigkeit, sind homogen in ihrer Struktur, haben eine geringe elektrische Leitfähigkeit, eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Wärmebeständigkeit (Fluorkunststoffolie, Polyethylen, Lavsan, Glimmer usw.). Das elektrische Durchschlagsfeld solcher Materialien erreicht 100-300 MV/m.

#### **4.7. Passive Dielektrika. Anwendung von passiven dielektrischen Materialien**

Heute werden dielektrische Materialien zur Herstellung zahlreicher technischer und Haushaltsprodukte verwendet. Die physikalischen Eigenschaften dielektrischer Materialien, die ihre praktische Anwendung bestimmen, wurden oben erörtert.

Zu den Dielektrika gehört eine breite Palette von Materialien sowohl organischen (Kunstharze, Gummi, Fasermaterialien) als auch anorganischen Ursprungs (Glas, Keramik). Dielektrische Materialien in festem, flüssigem und gasförmigem Zustand sowie in Form eines Plasmas (bei Gasdurchbruch) werden in der Praxis häufig verwendet. Synthetische Materialien sind Materialien, die durch Synthese, d. h. durch Polymerisationsreaktion monomerer Stoffe, gewonnen werden. Diese Materialien werden auch als Polymere, Kunststoffe und Kunstharze bezeichnet. Zu den künstlichen Materialien gehören Materialien, die durch chemische Verarbeitung von Rohstoffen natürlichen Ursprungs gewonnen werden (Zellophan, Papier, Viskose, Acetat). Darüber hinaus gibt es zahlreiche Verbundwerkstoffe unterschiedlicher Zusammensetzung, die sowohl synthetische als auch künstliche Bestandteile enthalten (Zelluloid, Lamine, Phenolkunststoffe, Aminokunststoffe).

Es gibt eine Reihe von Hauptgruppen dielektrischer Materialien im festen Zustand: Kunstharze (Kunststoffe, Polymere), Elastomere, Fasermaterialien, laminierte Kunststoffe, Gläser, Keramiken und natürliche anorganische Dielektrika.

**Kunststoffe.** Der wichtigste Stoff, aus dem Kunststoffe bestehen, ist Kunstharz. Zur Herstellung von Kunststoffen werden zwei Arten von Harzen verwendet: Thermoplaste und Duroplaste. Harze, die ihre Fähigkeit behalten, beim Wiedererwärmen zu schmelzen und beim Abkühlen zu härten, werden als Thermoplaste bezeichnet.

Duroplastische Harze sind solche, die bei höheren Temperaturen aushärten und in einen nicht schmelzenden und unlöslichen, d. h. irreversiblen Zustand übergehen.

Polyethylen ( $CH_2-CH_2$ ) ist ein Kunstharz und entsteht durch Polymerisation von Ethylen, einem Gas, das durch thermische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen oder durch Pyrolyse von flüssigen Erdölrohstoffen gewonnen wird. Je nach den Eigenschaften des

entstehenden Polymers gibt es drei Hauptgruppen von Polyethylen: niedrige Dichte, mittlere Dichte und hohe Dichte.

Polyethylen zeichnet sich durch eine hohe chemische Beständigkeit gegenüber aggressiven Umgebungen aus, mit Ausnahme von Mineralsäuren. Wasser wird von Polyethylen praktisch nicht absorbiert.

Das Molekulargewicht, der Kristallinitätsgrad, der Grad der Verzweigung des linearen Polymers und die Art der supramolekularen Struktur haben einen großen Einfluss auf die Eigenschaften von Polyethylen. Derzeit gibt es verschiedene Polyethylenqualitäten mit Molekulargewichten zwischen 20.000 und 6.500.000. Polyethylen mit einem Molekulargewicht über 100.000 wird als hochmolekulares Polyethylen bezeichnet.

Mit zunehmendem Molekulargewicht nehmen die Dichte und die Steifigkeit des Materials ab, während sich die Gleiteigenschaften, die Verschleißfestigkeit und die Schlagfestigkeit verbessern. Optimale Eigenschaften von hochmolekularem Polyethylen als strukturelles Antifrikationsmaterial werden bei einem Molekulargewicht von 1.000.000 erreicht. Die Festigkeitseigenschaften von Polyethylenen mit einem Molekulargewicht von mehr als 1.000.000 bleiben praktisch gleich.

Polyethylen ist ein unpolares Dielektrikum und zeichnet sich durch hohe Isoliereigenschaften aus:  $\rho \approx 10^{14}$  ohm-m;  $\epsilon = 2,3 - 2,4$ ;  $\tan \delta \sim 10^{-4}$ ;  $E_{bd} = 15 - 20$  MV/m

Polyethylen ist säure- und laugenbeständig und wird zur Herstellung von Chemieutensilien, Stopfen und Deckeln verwendet. Die hohe relative Bruchdehnung  $\epsilon$  (300 - 750 %, siehe Tabelle 4.1 mit Näherungswerten für Kunstharze ohne Füllstoffe) bietet technische Vorteile beim Formen von Produkten mit komplexen Formen. Polyethylen wird zur Isolierung von Hochfrequenz-, Telefon- und Stromkabeln verwendet. Polyethylenfolien werden als Verpackungsmaterial verwendet.

Viele der Eigenschaften von Polypropylen ähneln denen von Polyethylen, aber es gibt grundlegende Unterschiede, die dazu führen, dass es häufiger verwendet wird. Der Elastizitätsmodul, die Biegefestigkeit, die Zugfestigkeit und die plastischen Eigenschaften von Polypropylen sind besser als die von Polyethylen hoher Dichte (die relative Bruchdehnung beträgt 400-700 %).

Die chemische Beständigkeit gegenüber den meisten Substanzen ist recht hoch, mit Ausnahme von Schwefel- und Salzsäure bei erhöhten Temperaturen. Die Beständigkeit gegen ultraviolette Strahlung ist unzureichend, doch werden Stabilisatoren verwendet, um diese Beständigkeit zu verbessern.

Tabelle 4.1 Eigenschaften von Kunstharzen

Harze	Dichte, mg/m <sup>3</sup>	$\sigma$ , MPa	$\Theta$ , %	Wärmeb eständig keit, °C	Wasseraufn ahme in 24 Stunden, % nach
Polyethylen	0,91-	10-15	300-750	80-90	0,01
Polypropylen	0,90-	30-40	400 -	170	0,005
Polystyrol	1,05	35-60	1-4	70-80	0,04
Polytetrafluorethyle	2,30	15-30	250-300	250	0,01
Polyvinylchlorid	1,40-	30-50	50-150	60-70	0,10
Polymethylmethacr	1,20	40-70	2-10	70-90	0,35
Polyamide	1,10-	70-90	90	70-90	0,35

Polystyrol (Tabelle 4.1) hat im Vergleich zu Polyethylen eine geringere Plastizität, d. h. einen deutlich niedrigeren Wert der relativen Dehnung vor dem Bruch. Daher weist Polystyrol Sprödigkeit (insbesondere bei niedrigen Temperaturen) und eine Tendenz zur allmählichen Bildung von Oberflächenrissen auf. Die mangelnde Festigkeit von Polystyrol wird im so genannten schlagfesten Polystyrol beseitigt, das durch Copolymerisation von Styrol mit verschiedenen Kautschuken gewonnen wird. Je mehr Kautschuk das Material enthält, desto höher ist seine Festigkeit und Schlagzähigkeit. Die dielektrischen Eigenschaften von Polystyrol sind durch die folgenden Parameter gekennzeichnet:  $\rho \approx 10^{14} - 10^{15}$  ohm·m;  $\epsilon = 2,4 - 2,6$ ;  $\tan \delta \sim 10^{-4}$ ;  $E_{bd} = 20 - 35$  MV/m

Polystyrol zeichnet sich durch eine geringe Beständigkeit gegen Lösungsmittel (insbesondere flüssige Kohlenwasserstoffe) und eine geringe Wärmebeständigkeit aus. Zu den Vorteilen dieses Materials gehört, wie bei Polyethylen, die geringe Hygroskopizität. Es kann leicht in verschiedenen Farben und Schattierungen lackiert werden.

Polystyrol und seine Polymere werden in großem Umfang zur Herstellung von Bauelementen für elektronische Geräte verwendet.

Polytetrafluorethylen (PTFE). Fluorkunststoffe (oder Fluorkohlenwasserstoffe, Fluorpolymere), zu denen PTFE gehört, sind Polymere und Copolymere von Ethylen- und Propylenhalogeniden. Fluorkunststoff-4 ist ein Produkt der Suspensionspolymerisation von Tetrafluorethylen, und Fluorkunststoff-4D ist ein Produkt der Emulsionspolymerisation von Tetrafluorethylen. Fluorkunststoff-4 und modifizierter Fluorkunststoff-4DM machen mehr als 90 % der Gesamtproduktion von Fluorkunststoffen aus und sind die wichtigsten Vertreter der Fluorpolymere. Sie werden mit ähnlichen Methoden wie in der Pulvermetallurgie verarbeitet. PTFE-Produkte werden durch maschinelle Bearbeitung hergestellt. PTFE weist eine außergewöhnliche chemische Beständigkeit auf, die sogar Gold und Platin übertrifft: Es wird von Salz-, Schwefel- und Flusssäure sowie von Laugen nicht angegriffen.

Die weit verbreitete Verwendung dieses Materials wird durch seine relativ hohen Kosten eingeschränkt. Chemische Glasgeräte aus PTFE-4 werden nur zur Aufbewahrung der chemisch aktivsten Reagenzien verwendet. Polytetrafluorethylen ist nicht hygroskopisch und wird von Wasser nicht benetzt, hat eine hohe Verschleißfestigkeit und Duktilität (Tabelle 4.1). Es ist absolut nicht brennbar und hat einen extrem weiten Temperaturbereich für den Einsatz. Es kann auf eine Temperatur von 90-200 °C erwärmt und auf negative Temperaturen innerhalb desselben Bereichs abgekühlt werden. Obwohl PTFE-4 ein thermoplastisches Material ist, erweicht es aufgrund seines hohen Molekulargewichts bei hohen Temperaturen nicht. Bei einer Temperatur von 280-300 °C setzt es giftiges gasförmiges Fluor frei.

PTFE-4 zeichnet sich durch hohe Reibungseigenschaften und Selbstschmierfähigkeit aus, so dass es auch bei fehlendem Zugang zu Schmiermitteln verwendet werden kann. Bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten und geringen Belastungen liegt der Reibungskoeffizient des Polymers auf Stahl bei 0,04. Im Gegensatz zu anderen Gleitwerkstoffen unterliegt PTFE-4 jedoch bei Belastungen von mehr als 1 MPa einem erheblichen Verschleiß. In Bezug auf die Verschleißfestigkeit ist PTFE anderen Thermoplasten deutlich unterlegen, obwohl es den niedrigsten Reibungskoeffizienten aufweist.

In Bezug auf die elektrischen Isolationseigenschaften ist PTFE eines der bekanntesten Dielektrika;  $\epsilon = 1,9-2,1$  bei Frequenzen von 50 bis  $10^{10}$  Hz;  $\text{tg } \delta \sim 10^{-4}$ ; spezifischer Widerstand  $\rho \approx 10^{16}$  Ohm-m;  $E_{bd} = 20-30$  MV/m.

Polyvinylchlorid (Tabelle 4.1) ist beständig gegen Wasser, Laugen, verdünnte Säuren, Öle, Benzin und Alkohol. Es hat eine geringe Festigkeit, weshalb es bei mechanischer Beanspruchung nicht verwendet wird. Darüber hinaus zeigt PVC eine Instabilität der Eigenschaften unter dem Einfluss von Wärme und Licht. Unter Zusatz verschiedener Weichmacher wird es zur Herstellung von Kunststoffen und gummiartigen Materialien verwendet. Polyvinylchlorid ist durch die folgenden dielektrischen Parameter gekennzeichnet:  $\rho \approx 10-10^{13,14}$  ohm-m;  $\epsilon = 3,0-5,0$ ;  $\text{tg } \delta \sim 10^{-4}$ ;  $E_{bd} = 15-20$  MV/m. Die Materialeigenschaften hängen von den Parametern der verschiedenen Zusatzstoffe (Farbstoffe, Stabilisatoren, Weichmacher usw.) ab. Auf der Basis von PVC wurde eine Vielzahl von Kunststoffen (Vynylkunststoffe) mit unterschiedlichen Elastizitätsgraden, transparent und farbig, entwickelt.

Polyamide sind Polymere mit einer linearen Struktur von Molekülen, die Amidgruppen - CO - NH - in der Kette enthalten. Diese Materialien haben eine hohe chemische Beständigkeit. Dielektrische Parameter von Polyamiden:  $\rho = 10^{11} - 10^{12}$  Ohm-m;  $\epsilon = 3,0 - 4,0$ ;  $\text{tg } \delta \sim 10^{-2}$ ;  $E_{bd} = 15 - 20$  MV/m. Die gebräuchlichsten Polyamide sind Nylon und Nylons.

Polyamide werden in großem Umfang für die Herstellung von Kunstfasern, flexiblen Folien usw. verwendet.

Polyurethane (PU), die zu den Polyamiden gehören, sind Produkte der Wechselwirkung von Diisocyanaten mit polyatomaren Alkoholen. Eine beträchtliche Anzahl von Polyurethanen wird in einer Vielzahl von physikalischen Formen hergestellt, darunter Hartschaum, Weichschaum und Hartelastomere.

Die dielektrischen Eigenschaften von Polyurethanen hängen von der Herstellungstechnologie ab und variieren in einem ziemlich breiten Bereich:  $\rho = 10^{11} - 10^{14}$  ohm-m;  $\varepsilon = 3,0 - 4,5$ ;  $tg \delta = 0,002 - 0,020$ ;  $E_{bd} = 15 - 25$  MV/m.

Polyurethane werden für Lackdrähte verwendet. Der Nachteil ist, dass der Lackfilm bei Temperaturen über 150 °C zum Erweichen neigt.

Polyethylterephthalat (Lavan, Terylen usw.) (PET) gehört zur Klasse der Ester und wird durch Umesterung von Dimethylterephthalat mit Ethylglykol in Gegenwart von Katalysatoren und anschließender Polykondensation des entstandenen Diglykoltterephthalats gewonnen. Eine Besonderheit von PET ist seine Fähigkeit zu kristallisieren: Durch schnelles Abkühlen der Schmelze entsteht ein amorphes Polymer, und durch Erhitzen auf eine Temperatur von 190-200 °C entsteht ein Polymer mit einer Kristallisationsrate von 55-75 %.

Die folgenden dielektrischen Parameter sind typisch für PET:  $\rho = 10^{12}$  ohm-m;  $\varepsilon = 3,5 - 4,5$ ;  $tg \delta = 10^{-2}$ ;  $E_{bd} = 20 - 25$  MV/m.

Elastische Produkte (Elastomere) werden aus natürlichem oder synthetischem Kautschuk hergestellt, der den Hauptbestandteil von Gummi darstellt. Naturkautschuk (ein Material pflanzlichen Ursprungs) wird aus Latex, dem Saft des Hevea-Baums, gewonnen, der in äquatorialen Ländern wächst. Aufgrund seiner geringen Beständigkeit gegenüber hohen und niedrigen Temperaturen und Lösungsmitteln wird reiner Naturkautschuk nicht verwendet. Um diese Nachteile zu beseitigen, wird der Kautschuk vulkanisiert, d. h. nach Zugabe von Schwefel (1-3 %) auf 140 °C erhitzt, wodurch ein weicher Kautschuk mit sehr hoher Dehnbarkeit und Elastizität entsteht. Seine relative Dehnung vor dem Bruch beträgt 700-800 %. Naturkautschuk ist praktisch unpolar: er hat  $\rho \approx 10^{14}$  ohm-m;  $\varepsilon = 2,4$ ;  $tg \delta = 0,002$ . Die Vulkanisation führt zu einer Zunahme der polaren Eigenschaften des Materials durch den Einfluss von Schwefelatomen. Für herkömmliche elektrisch isolierende Kautschuke gilt  $\rho \approx 10^{13}$  Ohm-m;  $\varepsilon = 3 - 7$ ;  $tg \delta = 0,02 - 0,10$ ;  $E_{bd} = 20 - 30$  MV/m.

**Lamine** sind duroplastische Werkstoffe. Es handelt sich um Kunststoffe, bei denen der Füllstoff ein blattförmiges Fasermaterial (Papier, Gewebe, Vliesstoff) mit parallelen Schichten ist, was die Anisotropie ihrer Eigenschaften bestimmt.

Je nach Verwendungszweck können Lamine in strukturelle, elektrisch isolierende und dekorative Lamine unterteilt werden.



Je nach chemischer Beschaffenheit des Bindemittels und des Füllstoffs können die elektrischen Eigenschaften von elektrisch isolierenden Laminaten stark variieren ( $\rho = 10 \cdot 10^{814}$  ohm-m;  $\varepsilon = 6-8$ ;  $\tan \delta = (2-10)10^{-2}$ ;  $E_{bd} = 8-33$  kV/mm bei einer Dicke von  $h = 1$  mm). Schichtkunststoffe haben ein hohes Maß an mechanischen Eigenschaften und können lange Zeit bei Temperaturen bis zu  $180$  °C betrieben werden. Die gebräuchlichsten Lamine sind Getinax und Textolith.

Getinax wird durch Pressen mehrerer Schichten von Papier hergestellt, das mit Phenol- oder Kresol-Formaldehydharzen oder deren Mischungen imprägniert ist. Bei einer Temperatur von  $150-160$  °C und einem Druck von  $6-10$  MPa schmilzt das Oligomer, füllt die Poren zwischen den Papierfasern und den einzelnen Blättern und härtet aus.

Foliengetinax wird zur Herstellung von Leiterplatten für elektronische Niederfrequenzgeräte verwendet. Es handelt sich um ein Plattenmaterial, das ein- oder beidseitig mit einer elektrolytischen Kupferfolie ( $99,9$  %) beschichtet ist.

Textolite ist ein laminiertes Kunststoff, der aus mehreren Gewebeschichten besteht, die mit einem Phenol-Formaldehyd-Harz-Oligomer vorimprägniert sind. Als Füllstoff können Baumwolle, Glas, Asbest, Vliesstoffe usw. verwendet werden.

Am gebräuchlichsten ist Textolith auf der Basis von Baumwollgewebe. Im Vergleich zu Getinax ist es wesentlich teurer, hat aber bessere mechanische Eigenschaften. Die elektrischen Eigenschaften von Textolith sind in etwa die gleichen wie die von Getinax, mit Ausnahme der geringeren elektrischen Festigkeit. Textolith wird in Produkten verwendet, die Stößen oder Abrieb ausgesetzt sind (Schalterteile usw.).

Elektrische Glasfasern werden aus Glasfasergewebe hergestellt. Es wird auch Folienglas hergestellt, das im Vergleich zu folienglasverstärktem Polyester eine höhere Feuchtigkeits- und Hitzebeständigkeit aufweist. Die elektrische Festigkeit von Glasfasergeweben ist fast dreimal so hoch wie die von Baumwollgeweben.

**Glasartige Stoffe** (anorganische Gläser) zeichnen sich dadurch aus, dass sie beim Abkühlen aushärten, ohne zu kristallisieren, und einen unruhigen Festkörper bilden. Die Eigenschaften eines solchen Körpers sind unabhängig von der Raumrichtung konstant.

Gläser sind in ihrer Struktur heterogen, uneinheitlich. Sie können Poren und Einschlüsse von anderen Stoffen enthalten. In diesem Fall machen die Poren bis zu  $60$  % des Glasvolumens aus, so dass das elektrische Feld im Glas heterogen ist, was zu einer erheblichen Abnahme der elektrischen Festigkeit führt.

Die gängigsten technischen Gläser sind Silikatgläser auf der Basis von  $\text{SiO}_2$ . Die Gläser werden unterteilt in 1) alkalische Gläser

(Fenstergläser, Flaschengläser usw.), die Natrium- und Kaliumoxide enthalten; 2) alkalische Gläser mit einem hohen Gehalt an Schwermetalloxiden (PbO, BaO). Gläser mit einem hohen PbO-Gehalt werden als Flintgläser und solche mit einem hohen BaO-Gehalt als Krongläser bezeichnet; 3) alkalifreie Gläser - Quarzglas, das aus reinem Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$  besteht. Die beiden letztgenannten Arten werden als elektrische Isoliergläser und optische Gläser verwendet. Sie haben hohe Werte für  $\epsilon$  und  $\rho$  und einen niedrigen  $\text{tg } \delta$ . Zum Beispiel gilt für Quarzglas:  $\epsilon = 3,8$ ;  $\rho = 10^{15}$  Ohm-m;  $\epsilon = 6 - 8$ ;  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ ;  $E_{bd} = 60$  MV/m.

Optisches Glas wird für die Herstellung von Brillengläsern und medizinischen Geräten verwendet. Es gibt sieben Kronenklassen und sieben Feuersteinklassen, so dass Sie Gläser mit dem richtigen Brechungsindex von 1,47 (leichte Kronenklasse) bis 1,75 (schwere Feuersteinklasse) wählen können. Gefärbte Gläser werden zur Herstellung von Lichtfiltern für den Lichtschutz der Augen von Schweißern, Metallurgen usw. verwendet: blau gefärbt mit Kobalt- und Eisenoxiden, gelb-grün gefärbt mit Eisenoxiden mit unterschiedlichen Lichtdurchlässigkeitskoeffizienten. Die meisten Gläser absorbieren ultraviolette Strahlen stark, da sie eine Mischung aus Eisenoxid enthalten.

Je nach Verwendungszweck gibt es verschiedene Haupttypen von Elektroglas: elektrisches Vakuum, Isolator, Kondensator, Glasemail und Glasfasern.

Elektro-Vakuumgläser werden zur Herstellung von Ballons und Lampenfüßen für Beleuchtungslampen und verschiedene elektronische Geräte verwendet. Die wichtigste Voraussetzung für solche Gläser ist, dass die Wärmeausdehnungskoeffizienten des Glases und des Metalls, die miteinander verlötet werden, sehr nahe beieinander liegen.

Isoliergläser werden für die Herstellung verschiedener Isolatoren verwendet: lineare Isolatoren, einschließlich Stift- und Hängeisolatoren, Stationsisolatoren, wie Stütz- und Durchgangsisolatoren, Telegraphenisolatoren, Antennenisolatoren usw. Die elektrische Kapazität von Glasisolatoren, einschließlich Hängeisolatoren, ist höher als die von Porzellanisolatoren. Isoliergläser werden auch häufig als abgedichtete Durchführungen in einigen Arten von Kondensatoren, Thermistoren, Silizium- und Germaniumtransistoren usw. verwendet.

Kondensatorgläser werden zur Herstellung von elektrischen Kondensatoren verwendet, die in Impulsgeneratoren und als Hochspannungsfiler eingesetzt werden. Für diese Produkte ist es erforderlich, dass die Gläser hohe Werte von  $E_{bd}$  und  $\epsilon$  aufweisen, bei Gläsern für Hochfrequenzkondensatoren zusätzlich niedrige Werte von  $\text{tg } \delta$ .

Zur Herstellung von Lichtleitern werden Glasfasern von 20-30 Mikron verwendet. Der Durchmesser des Lichtleiters selbst erreicht 5-6

mm. Eine Lichtleitfaser besteht aus einem Kern und einem Mantel, deren Material so gewählt wird, dass der Brechungsindex des Kerns größer ist als der des Mantels. Daher werden für den Kern der Lichtleitfaser schwerer Flint, Barytflint und extraschwere Krongläser und für den Mantel Krongläser oder leichte Krongläser verwendet. Diese Gläser werden auf der Basis von reinem Quarz hergestellt. Ein Lichtstrahl, der auf das Eingangsende der Faser fällt, breitet sich aufgrund von mehrfachen Totalreflexionen an der Kern-Mantel-Grenzfläche entlang der Faser aus und tritt am anderen Ende wieder aus. Die Qualität des Lichtleiters (Lichtenergieverlust) hängt in erster Linie von der Reinheit der Ausgangsmaterialien und der Sterilität in allen Phasen der Herstellung ab. So werden beispielsweise billigere Polymerfasern aus Polymethylmethacrylat, Polystyrol usw. für die Beleuchtung verwendet.

**Sitale** sind polykristalline, undurchsichtige Materialien, die durch gezielte Kristallisation von Gläsern mit einer speziellen Zusammensetzung gewonnen werden. Der Kristallinitätsgrad von Sitalen kann 30-95 % betragen, die Größe der Kristallite liegt bei 0,01-2 Mikrometern und die Schrumpfung während der Kristallisation erreicht 2 %. Der Name "Sieb" ist eine Abkürzung der Wörter "Silikat" und "Kristall". Bei der Herstellung von Sieben werden spezielle Zusatzstoffe in die Glasmasse eingebracht, um Kristallisationszentren (Keime) zu bilden. Je nach Art des Zusatzes und des anschließenden Kristallisationsprozesses unterscheidet man zwischen Thermosynthetik und Photosynthetik.

Die elektrischen Eigenschaften von Sieben sind in der Regel höher als die von Gläsern der gleichen Zusammensetzung, und im Vergleich zu Keramiken haben Siebe der gleichen Zusammensetzung eine höhere Dielektrizitätskonstante:  $\epsilon = 5-7$ ,  $\rho = 10 \cdot 10^{10} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ ;  $\text{tg } \delta = (1 - 80) \cdot 10^{-3}$ ;  $E_{bd} = 20-80 \text{ MV/m}$ , Betriebstemperaturbereich von  $-50$  bis  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Sitals werden als Substrate für Dünnschicht- und Hybrid-Mikroschaltungen und als Träger für die Montage von Ableitern verwendet.

**Keramische Werkstoffe** (Porzellan und Steingut) werden durch Brennen einer Mischung aus Ton unter Zugabe von Quarz (Sand) und Feldspat bei hoher Temperatur hergestellt. Der Herstellungsprozess von Keramik erfolgt in drei Hauptphasen: 1) Vorbereitung der keramischen Masse, indem die Bestandteile von Verunreinigungen befreit, gründlich gemahlen und mit Wasser zu einer homogenen Masse vermischt werden; 2) Formung eines Erzeugnisses mit einer bestimmten Form und Größe durch Pressen, Extrudieren oder Gießen; 3) Trocknen und Brennen.

Keramische Werkstoffe können in Bezug auf ihre Eigenschaften und Anwendungen sehr vielfältig sein. Porzellanprodukte sind sehr widerstandsfähig gegen thermische Alterung. Porzellan hat eine hohe Druckfestigkeit (400-700 MPa), eine viel geringere Zugfestigkeit (45-70

MPa) und Biegefestigkeit (80-150 MPa) sowie eine erhöhte Schlagzähigkeit.

Der wichtigste Vertreter der Niederfrequenzkeramik ist das Elektroporzellan, das häufig zur Herstellung von Isolatoren verwendet wird. Im Gegensatz zu anderen Keramiktypen weist Elektroporzellan geringere elektrische und mechanische Eigenschaften auf. Die Vorteile liegen in der Möglichkeit, mit einfachen technologischen Verfahren Produkte mit komplexer Konfiguration herzustellen, und in der geringen Knappheit der Rohstoffe.

Polycor ( $Al_2O_3$ ) hat eine besonders dichte Struktur und ist im Gegensatz zur herkömmlichen (undurchsichtigen) Korundkeramik transparent, so dass es zur Herstellung von Kolben für bestimmte elektrische Lichtquellen verwendet wird. Ihr  $\rho$ -Wert ist um eine Größenordnung höher als der von undurchsichtiger Aluminiumoxid-Keramik.

Keramische Dielektrika zeichnen sich durch einen hohen spezifischen Widerstand ( $\rho \approx 10^{14}$  Ohm-m) und einen niedrigen dielektrischen Verlusttangens ( $tg \delta = 10^{-4} - 10^{-3}$ ) auch bei erhöhten Temperaturen (bis zu 1000 °C) aus. Der Wert von  $\varepsilon = 6 - 10$ . Bei der Herstellung von Kondensatoren werden keramische Materialien verwendet - Ferroelektrika mit einem hohen  $\varepsilon$  (bis zu 10.000 und mehr).

Zu den natürlichen mineralischen anorganischen Dielektrika gehören Glimmer und Asbest. Glimmer hat hohe elektrische Isolationseigenschaften, Hitzebeständigkeit, mechanische Festigkeit und Flexibilität. In dünnen Schichten sind viele Arten von Glimmer transparent.

Glimmer tritt in Form von Kristallen auf, die sich leicht in dünne Platten entlang paralleler Ebenen spalten lassen. Der chemischen Zusammensetzung nach ist Glimmer ein wässriges Alumosilikat.

Die tatsächliche Zusammensetzung von natürlichem Glimmer ist aufgrund von Verunreinigungen sehr viel komplexer.

Die Arbeitstemperatur von Glimmer (500-900) °C wird durch die Freisetzung des in seiner Zusammensetzung enthaltenen Wassers begrenzt, was mit einem Verlust der Transparenz, einer Zunahme der Dicke ("Aufquellen") und der Zerstörung der kristallinen Struktur verbunden ist; dehydrierter Glimmer schmilzt bei einer Temperatur von 1250 - 1300°C. Der  $\varepsilon$ -Wert von Glimmer beträgt 6 - 8;  $tg \delta \sim 10^{-4}$ ;  $\rho = 10^{11} - 10^{14}$  Ohm-m.

#### **4.8. Aktive Dielektrika**

##### **a) Klassifizierung von aktiven Dielektrika**

Aktive Dielektrika sind Dielektrika, deren Eigenschaften durch externe Energieeinwirkung gesteuert und zur Herstellung funktioneller elektronischer Elemente verwendet werden können. Aktive Dielektrika

ermöglichen die Erzeugung, Verstärkung und Modulation von elektrischen und optischen Signalen sowie die Speicherung oder Umwandlung von Informationen. Mit der zunehmenden Komplexität elektronischer Geräte und dem Übergang zur funktionalen Elektronik nehmen die Rolle und die Bedeutung aktiver Materialien bei der Lösung der wichtigsten wissenschaftlichen und technischen Probleme ständig zu.

Zu den aktiven Dielektrika gehören Ferroelektrika, Piezoelektrika, Pyroelektrika, Elektrete, Materialien der Quantenelektronik, Flüssigkristalle, elektro-, magneto- und akustooptische Materialien, dielektrische Kristalle mit nichtlinearen optischen Eigenschaften usw.

Aktive Dielektrika können nicht nur für Feststoffe, sondern auch für Flüssigkeiten und sogar Gase (z. B. das aktive Medium von Gaslasern) verwendet werden. Was die chemische Zusammensetzung betrifft, so kann es sich um organische und anorganische Materialien handeln. Je nach ihrer Struktur und ihren Eigenschaften lassen sie sich in kristalline und amorphe, polare und unpolare Dielektrika einteilen. Eine Reihe von Materialien entfaltet ihre Aktivität nur aufgrund einer spontanen oder stabilen Restpolarisation. Der polarisierte Ausgangszustand ist jedoch keine Voraussetzung dafür, dass das Material unter äußeren Einflüssen aktiv ist. Eine strenge Klassifizierung der aktiven Dielektrika, die viele Merkmale dieser Materialien umfasst, ist sehr schwierig. Außerdem gibt es keine scharfe Grenze zwischen aktiven und passiven Dielektrika. Ein und dasselbe Material kann unter verschiedenen Betriebsbedingungen entweder die passiven Funktionen eines Isolators oder Kondensators oder die aktiven Funktionen eines Steuer- oder Wandlerelements erfüllen.

Je nach technischer Anwendung sind auch die Anforderungen an die Materialien sehr unterschiedlich. So besteht eine der Hauptanforderungen an passive Dielektrika darin, die Stabilität ihrer Eigenschaften unter äußeren Einflüssen zu erhalten. Gleichzeitig sind die Anforderungen an ein aktives Material genau umgekehrt: Je mehr sich seine Eigenschaften unter äußeren Einflüssen ändern, desto besser kann das aktive Element die Funktionen des Energiemanagements oder der Umwandlung eingehender Informationen erfüllen.

In den meisten Fällen werden aktive Dielektrika nach der Art der physikalischen Effekte eingeteilt, die zur Steuerung der Materialeigenschaften genutzt werden können. Eine solche Klassifizierung ist zwar logisch und vernünftig, erlaubt aber keine klare Abgrenzung einer Materialgruppe von einer anderen.

### **b) Ferroelektrisch**

Ein Ferroelektrikum ist ein Stoff, der eine spontane Polarisation aufweist, deren Richtung durch ein äußeres elektrisches Feld umgekehrt werden kann.

In Abwesenheit eines äußeren elektrischen Feldes weisen Ferroelektrika in der Regel eine Domänenstruktur auf. Domänen sind makroskopische Bereiche mit spontaner Polarisierung, die unter dem Einfluss interner Prozesse im Dielektrikum auftritt. Die Richtungen der elektrischen Momente in verschiedenen Domänen sind unterschiedlich. Daher kann die Gesamtpolarisierung der Probe als Ganzes gleich Null sein. Wenn ein Kristall klein ist, kann er im Prinzip aus nur einer Domäne bestehen. Große Proben werden jedoch immer in viele Domänen aufgeteilt, da ein Zustand mit nur einer Domäne energetisch nachteilig ist. Die Aufteilung in Domänen verringert die elektrostatische Energie des Ferroelektrikums.

In einem Einkristall wird die relative Ausrichtung der elektrischen Momente der Domänen durch die Symmetrie des Kristallgitters bestimmt. Die energetisch günstigste Struktur ist diejenige, die die elektrische Neutralität der Domänengrenzen gewährleistet, d. h. die Projektion des Polarisationsvektors auf die Grenze von einer Domäne sollte gleich lang und entgegengesetzt zur Projektion des Polarisationsvektors von der benachbarten Domäne sein.

Das äußere elektrische Feld verändert die Richtungen der elektrischen Momente der Domänen, was den Effekt einer sehr starken Polarisierung bewirkt. Dies erklärt die ultrahohe Dielektrizitätskonstante (bis zu Hunderttausenden), die Ferroelektrika aufweisen. Die Domänenpolarisierung ist mit den Prozessen der Keimbildung und des Wachstums neuer Domänen aufgrund der Verschiebung der Domänengrenzen verbunden, die schließlich eine Neuausrichtung des spontanen Polarisationsvektors in Richtung des externen elektrischen Feldes bewirken.

Wenn die Feldstärke in einer bis zur Sättigung polarisierten Probe auf Null reduziert wird, geht die Induktion nicht auf Null zurück, sondern nimmt einen gewissen Restwert an. Unter der Einwirkung eines Feldes mit entgegengesetzter Polarität nimmt die Induktion rasch ab und ändert bei einer bestimmten Feldstärke ihre Richtung. Eine weitere Erhöhung der Feldstärke bringt die Probe wieder in einen Zustand der technischen Sättigung. Daraus folgt, dass die Repolarisierung eines Ferroelektrikums in Wechselfeldern von einer dielektrischen Hysterese begleitet wird. Die Feldstärke, bei der die Induktion gegen Null geht, wird als Koerzitivfeldstärke bezeichnet.

Die dielektrische Hysterese wird durch die irreversible Verschiebung von Domänengrenzen unter dem Einfluss eines Feldes verursacht und weist auf einen zusätzlichen Mechanismus dielektrischer Verluste hin, der mit dem Energieaufwand für die Domänenorientierung verbunden ist. Die Fläche der Hystereseschleife ist proportional zu der Energie, die während einer Periode im Dielektrikum verloren geht. Die Nichtlinearität der Polarisierung in Bezug auf das Feld und das

Vorhandensein der Hysterese bestimmen die Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante und der Kapazität des ferroelektrischen Kondensators von der Betriebsart. Zur Charakterisierung der Materialeigenschaften unter verschiedenen Betriebsbedingungen eines nichtlinearen Elements werden die Konzepte der statischen, reversiblen, effektiven und anderen Dielektrizitätskonstanten verwendet.

Die spezifischen Eigenschaften von Ferroelektrika kommen nur innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs zum Tragen. Bei Erhitzung über eine bestimmte Temperatur hinaus bricht die Domänenstruktur zusammen und das ferroelektrische Material wird paraelektrisch. Die Temperatur  $T_c$ , bei der dieser Phasenübergang stattfindet, wird als ferroelektrischer Curie-Punkt bezeichnet. Am Curie-Punkt verschwindet die spontane Polarisierbarkeit und die Dielektrizitätskonstante erreicht ihren Höchstwert.

Derzeit sind mehrere hundert Ferroelektrika bekannt. Diese Gruppe wird durch feste Lösungen auf der Grundlage verschiedener Verbindungen erheblich ergänzt und erweitert. Die Ferroelektrizität ist also ein ziemlich weit verbreitetes Phänomen bei den Dielektrika. Gleichzeitig zeichnen sich ferroelektrische Kristalle durch eine Vielzahl von Strukturtypen aus, was auf Unterschiede in den molekularen Mechanismen der spontanen Polarisierung hinweist. Die Temperatur des Übergangs in den spontan polarisierten Zustand (Curie-Punkt) reicht bei den verschiedenen Ferroelektrika von einigen Kelvin bis zu eineinhalbtausend Kelvin.

Je nach Art der chemischen Bindung und der physikalischen Eigenschaften werden alle Ferroelektrika in zwei Gruppen unterteilt: 1) ionische Kristalle und 2) Dipolkristalle.

Bei den Verbindungen der ersten Gruppe ist das charakteristische Strukturelement des Kristallgitters ein Sauerstoffoktaeder, weshalb diese Materialien als Ferroelektrika vom Sauerstoffoktaedertyp bezeichnet werden. Zu den ionischen Ferroelektrika gehören Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ ), Bleititanat ( $\text{PbTiO}_3$ ), usw.

Zum ersten Mal wurden Besonderheiten im Verhalten von Dielektrika in Kristallen aus Selensalz entdeckt, die auf spontane Polarisierung zurückzuführen sind. Daher der Name der gesamten Gruppe von Materialien mit spezifischen Eigenschaften - Ferroelektrika.

Die überwiegende Mehrheit der Ferroelektrika der ersten Gruppe hat eine viel höhere Curie-Temperatur und einen höheren Wert der spontanen Polarisierbarkeit als die Ferroelektrika der zweiten Gruppe. Bei einem großen Teil der Dipol-Ferroelektrika liegt der Curie-Punkt weit unter der Raumtemperatur.

### c) Piezoelektrika

Piezoelektrika sind Dielektrika, die einen starken piezoelektrischen Effekt haben. Der direkte piezoelektrische Effekt ist das Phänomen der dielektrischen Polarisierung unter mechanischer Belastung. Dieses Phänomen wurde von den Gebrütern Curie im Jahr 1880 entdeckt. Die auf jeder Oberfläche eines Dielektrikums erzeugte elektrische Ladung ändert sich nach einem linearen Gesetz in Abhängigkeit von der mechanischen Kraft:

$$Q = kF; Q/S = kF/S, \text{ oder } q_s = P = k\sigma, \quad (8.1)$$

wobei  $Q$  die Ladung,  $k$  das Piezomodul,  $F$  die Kraft,  $S$  die Fläche,  $q_s$  die Ladung pro Flächeneinheit,  $P$  die Polarisierbarkeit und  $\sigma$  die mechanische Spannung im dielektrischen Querschnitt ist.

Der umgekehrte piezoelektrische Effekt ist ein Phänomen, bei dem es unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes zu einer mechanischen Verformung eines Dielektrikums kommt. Die Verformung des Piezoelektrikums hängt von der Richtung des elektrischen Feldes ab und wechselt das Vorzeichen, wenn sich die Richtung des elektrischen Feldes ändert. Es gibt auch longitudinale und transversale piezoelektrische Effekte. Unter ersterem versteht man einen Effekt, bei dem das Auftreten von Ladungen auf gegenüberliegenden Seiten der Platte in der gleichen Richtung wie die mechanische Kraft bestimmt wird, und unter letzterem eine Verformung, die in der Richtung des angelegten elektrischen Feldes gemessen wird. Beim transversalen piezoelektrischen Effekt werden die resultierenden Ladungen oder Dehnungen in der Richtung senkrecht zur Richtung der mechanischen Kraft bzw. des elektrischen Feldes gemessen.

Der piezoelektrische Effekt wird nur bei Substanzen mit heteropolarer chemischer Bindung beobachtet, d. h. sowohl ionische als auch stark polare Dielektrika können piezoelektrisch sein. Die zweite notwendige Bedingung für das Auftreten des piezoelektrischen Effekts ist das Fehlen eines Symmetriezentrums in der dielektrischen Struktur. Andernfalls führt die Verformung zu einer symmetrischen Verschiebung positiver und negativer Ladungen, und es entsteht kein elektrisches Moment. Nur Stoffe mit hohem spezifischen Widerstand können piezoelektrisch sein. In leitenden Medien wird die piezoelektrische Polarisierung schnell durch freie Ladungsträger kompensiert. Da jedes Dielektrikum einen gewissen Leckstrom aufweist, sind alle Anwendungen des piezoelektrischen Effekts mit variablen Prozessen verbunden.

Es sind mehr als tausend Stoffe bekannt, die piezoelektrische Eigenschaften haben, darunter alle Ferroelektrika. In der Praxis wird jedoch nur eine begrenzte Anzahl von Materialien verwendet. Einer der wichtigsten unter ihnen ist der Einkristallquarz. Es handelt sich dabei um eine Modifikation von Siliziumdioxid.

Große natürliche transparente Quarzkristalle werden als Bergkristall bezeichnet. Natürliche Kristalle haben in der Regel die Form



eines sechseckigen Prismas, was die Symmetrie der inneren Struktur widerspiegelt.

Eine planparallele polierte Quarzplatte mit Elektroden und einem Halter ist ein piezoelektrischer Resonator, d. h. ein Schwingkreis mit einer bestimmten Resonanzfrequenz. Diese hängt von der Dicke der Platte und der Richtung des kristallographischen Schnitts ab. Die Vorteile von Quarzresonatoren sind ihr niedriges  $tg \delta$  und ihr hoher mechanischer Gütefaktor (d. h. sehr geringe mechanische Verluste). Bei den besten Quarzkristallen kann der mechanische Gütefaktor  $10^{-10}$  betragen. Ein piezoelektrisches Quarzelement, das in den Eingangskreis eines elektrischen Generators eingesetzt wird, zwingt diesem seine eigene Resonanzfrequenz auf.

Aufgrund ihrer hohen Qualität werden Quarzresonatoren als Filter mit hoher Selektivität sowie zur Stabilisierung und Standardisierung der Frequenz von Oszillatoren (in Radarstationen, elektronischen Uhren usw.) verwendet.

Da die natürlichen Quarzvorkommen begrenzt sind, wird der Hauptbedarf der piezoelektrischen Technik durch künstlich gezüchtete Kristalle gedeckt. Sie werden nach dem hydrothermalen Verfahren hergestellt. Die Kristallisation erfolgt aus wässrigen Alkalilösungen in großvolumigen Stahlautoklaven bei einer Temperatur von  $350-400^{\circ}\text{C}$  und einem Druck von etwa  $10^8$  Pa. Aufgrund der geringen Löslichkeit von Kieselsäure in wässrigen Lösungen beträgt die Dauer eines Wachstumszyklus mehrere Monate.

Neben Quarz werden in verschiedenen piezoelektrischen Wandlern Kristalle aus Lithiumsulfat, Selensalz, Ammoniumdihydrogenphosphat sowie Lithiumniobat und Tantalat verwendet. Letztere sind ein bedeutender Konkurrent von Quarz und übertreffen diesen hinsichtlich des Qualitätsfaktors im Hoch- und Ultrahochfrequenzbereich.

Das am häufigsten verwendete piezoelektrische Material ist die ferroelektrische Keramik. Im Normalzustand weisen ferroelektrische Keramiken keine piezoelektrische Aktivität auf, da sie aufgrund der chaotischen Anordnung der einzelnen Kristallkörner und ihrer Aufteilung in Domänen mit unterschiedlichen Richtungen der spontanen Polarisierung ein isotropes Medium sind. Werden die ferroelektrischen Keramiken jedoch einem starken elektrischen Feld ausgesetzt, ist die Polarisierung der Domänen überwiegend in eine Richtung ausgerichtet. Nach Entfernen des Feldes bleibt eine stabile Restpolarisation bestehen. Die polarisierte ferrokeramische Probe kommt in ihren Eigenschaften einem Ein-Domänen-Kristall nahe, d. h. sie hat eine hohe Piezoelektrizität.

Polarisierte ferroelektrische Keramiken, die für die Verwendung in piezoelektrischen Wandlern bestimmt sind, werden als piezoelektrische Keramiken bezeichnet. Piezokeramiken haben gegenüber Einkristallen den Vorteil, dass aus ihnen ein aktives Element von nahezu beliebigem

Größe und Form hergestellt werden kann (z. B. ein Hohlzylinder, der Teil eines Sonars ist).

Das wichtigste Material für die Herstellung von piezoelektrischen Elementen ist Bleizirkonattitanat. Diese Keramik wird in großem Umfang zur Herstellung von leistungsstarken Ultraschallsendern in einem breiten Frequenzbereich für die Hydroakustik, die Fehlererkennung und die Materialbearbeitung verwendet. Solche Ultraschallgeneratoren werden auch in der chemischen Industrie zur Beschleunigung verschiedener Prozesse (Emulgatoren, Polymerisatoren, Sterilisatoren usw.) und in der Halbleitertechnik zum effizienten Waschen und Entfetten von Halbleiterwafern in einem Ultraschallbad eingesetzt. Kleine Mikrofone, Telefone, Lautsprecher (Hochfrequenz), Hörgeräte, Sprengkapseln und verschiedene Zündvorrichtungen in Gassystemen werden aus Piezokeramiken hergestellt. Piezokeramische Elemente können als Sensoren für Druck, Verformung, Beschleunigung und Vibration eingesetzt werden. Die doppelte Umwandlung von Energie (elektrisch in mechanisch und umgekehrt) ist die Grundlage für den Betrieb von piezoresonanten Filtern, Verzögerungsleitungen und piezoelektrischen Transformatoren.

Piezoelektrische Transformatoren sind für die Erzeugung hoher Spannungen ausgelegt. Ein elektrisches Wechselfeld, das an die Erregerklemmen angelegt wird, verursacht mechanische Resonanzschwingungen entlang der Länge des Stabes. Die mechanischen Schwingungen, die im Generatorteil auftreten, führen wiederum zum Auftreten der elektrischen Ausgangsspannung. Transformatoren können für den Betrieb in einem Frequenzbereich von 10-500 kHz ausgelegt werden.

#### **d) Pyroelektrik**

Der pyroelektrische Effekt ist eine Änderung der spontanen Polarisierbarkeit von Dielektrika mit der Temperatur. Pyroelektrika sind Dielektrika, die einen stark ausgeprägten pyroelektrischen Effekt haben.

Die Qualität eines pyroelektrischen Materials wird in der Regel durch die folgenden physikalischen Parameter charakterisiert

$$R_B = p/(\epsilon c), \quad (4.12)$$

wobei  $p$  der pyroelektrische Koeffizient,  $\epsilon$  die Dielektrizitätskonstante und  $c$  die spezifische Volumenwärmekapazität ist.

Je höher der Wert von  $R_B$  ist, desto größer ist die Potenzialdifferenz, die bei gleicher absorbierter Leistung auf der Probe erzielt werden kann.

Einige lineare Dielektrika (z. B. Turmalin, Lithiumsulfat) und alle ferroelektrischen Materialien haben pyroelektrische Eigenschaften. Die Besonderheit der linearen Pyroelektrika besteht darin, dass die Richtung

der spontanen Polarisation im Gegensatz zu den Ferroelektrika nicht durch ein äußeres elektrisches Feld geändert werden kann.

Ferroelektrika weisen nur im monodomänen Zustand pyroelektrische Eigenschaften auf, der durch die gleiche Ausrichtung der spontanen Polarisation aller Domänen gekennzeichnet ist. Bei einer Probe mit mehreren Domänen ist die Gesamtpolarisierbarkeit gleich Null, so dass es keinen pyroelektrischen Effekt gibt. Die Monodomänisierung eines Ferroelektrikums wird durchgeführt, indem man es in einem konstanten elektrischen Feld bei einer Temperatur knapp unter dem Curie-Punkt hält. Die Erzeugung und Konsolidierung eines monodominierten Zustands in ferroelektrischen Kristallen ist eines der wichtigsten Probleme bei ihrer Verwendung als Pyroelektrika.

Die Temperaturänderung der spontanen Polarisierbarkeit ist auf zwei Hauptgründe zurückzuführen. Zum einen stört eine Temperaturerhöhung die Ordnung der Anordnung der elementaren Dipolmomente (primärer oder echter pyroelektrischer Effekt), zum anderen bewirkt die Erwärmung eine Änderung der linearen Dimensionen der dielektrischen und piezoelektrischen Polarisation aufgrund von Dehnungen.

Der bedeutende pyroelektrische Effekt in Ferroelektrika wird zur Herstellung von Wärmesensoren und Strahlungsenergieempfängern genutzt.

Die höchsten Werte der pyroelektrischen Koeffizienten werden für Ferroelektrika mit einem Curiepunkt nahe der Raumtemperatur erzielt. Dazu gehören Barium-Strontium-Niobat-Kristalle ( $\text{Sr}_x \text{Ba}_{1-x} \text{NbO}_3$ ), die  $p = (4-28)10^{-4} \text{ Cl/m}^2 \cdot \text{K}$  haben. Der höchste Wert von  $R_B$  ( $8,5 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$ ) wird für Triglycinsulfatkristalle beobachtet. Aufgrund der guten Kombination von Eigenschaften und der vergleichsweise einfachen Technologie zur Gewinnung großer Kristalle wird dieses Material häufig in Niederfrequenz-Strahlungsdetektoren eingesetzt. Die Hygroskopizität ist etwas ungünstig, was eine besondere Versiegelung in praktischen Geräten erforderlich macht.

Die Kristalle  $\text{LiNbO}_3$  und  $\text{LiTaO}_3$  zeichnen sich durch eine erhöhte Empfindlichkeit bei hohen Frequenzen und durch stabile pyroelektrische Eigenschaften aus. Aufgrund ihrer hohen Curie-Temperatur benötigen sie keine speziellen Techniken zur Fixierung des monodomänen Zustands und können bis zu Temperaturen von etwa  $500^\circ\text{C}$  stabil arbeiten.

Der pyroelektrische Effekt tritt auch bei polarisierten ferroelektrischen Keramiken auf, obwohl die pyroelektrischen Eigenschaften von polykristallinen Proben deutlich schlechter sind als die von Einkristallen. Alle Arten von Piezokeramiken können für die Herstellung von Fotodetektoren verwendet werden, aber das am besten geeignete Material für diese Zwecke ist die ferroelektrische Blei-Zirkonat-Titanat-Keramik. Durch die Zugabe von Lanthanoxid lässt sich die Curie-

Temperatur näher an die Raumtemperatur heranbringen und höhere pyroelektrische Koeffizienten erzielen.

### e) Flüssigkristalle

Flüssigkristalle sind Stoffe, die sich in einem Zwischenzustand (mesomorph) zwischen einer isotropen Flüssigkeit und einem festen Kristallkörper befinden. Einerseits besitzen sie Fließfähigkeit und die Fähigkeit, sich in einem Tröpfchenzustand zu befinden, andererseits sind sie durch Anisotropie der Eigenschaften und vor allem durch optische Anisotropie gekennzeichnet.

Die kleinen zwischenmolekularen Kräfte, die für die geordnete Struktur eines Flüssigkristalls sorgen, sind die grundlegende Basis für die starke Abhängigkeit der Eigenschaften von äußeren Faktoren (Temperatur, Druck, elektrisches Feld usw.). Diese Abhängigkeit eröffnet wiederum vielfältige Möglichkeiten für die Entwicklung von Anzeigegeräten für verschiedene Zwecke. Flüssigkristalle wurden im Jahr 1888 von dem österreichischen Botaniker F. Reinitzer entdeckt. Diese Stoffe finden jedoch erst seit relativ kurzer Zeit eine breite praktische Anwendung. Die Besonderheit von Flüssigkristallen liegt in dem begrenzten Temperaturbereich der Mesophase (Flüssigkristallzustand). Der flüssigkristalline Zustand wird hauptsächlich von organischen Verbindungen mit länglichen, stäbchenförmigen Molekülen gebildet. Ein bedeutender Teil der Flüssigkristalle sind Verbindungen der aromatischen Reihe, d. h. Verbindungen, deren Moleküle Benzolringe enthalten.

Derzeit sind mehr als 3000 organische Verbindungen bekannt, die in mesomorphem Zustand vorliegen. Darunter befinden sich auch Stoffe, bei denen der Temperaturbereich der Mesophase die Raumtemperatur einschließt.

Aufgrund ihrer allgemeinen Symmetrie werden alle Flüssigkristalle in drei Typen unterteilt: smektische, nematische und cholesterische.

Die smektische Phase ist durch eine geschichtete Struktur gekennzeichnet (Abb. 4.5, a). Die Schwerpunkte der langgestreckten Moleküle liegen in Ebenen, die gleich weit voneinander entfernt sind. In jeder Schicht sind die Moleküle aufgrund der elastischen Dispersionswechselwirkung parallel ausgerichtet. Die Flüssigkeit wird nur durch das gegenseitige Gleiten der Schichten erzeugt, so dass die Viskosität des Mediums recht hoch ist. Aufgrund ihrer hohen Viskosität werden smektische Flüssigkristalle in der Technik nur selten verwendet.

In der nematischen Phase sind die Längsachsen der Moleküle entlang einer gemeinsamen Richtung, dem nematischen Direktor, ausgerichtet. Die Schwerpunkte der Moleküle sind jedoch zufällig angeordnet, so dass eine Symmetrie niedrigerer Ordnung als in smektischen Kristallen auftritt (Abb. 4.5, b). Bei dieser Struktur der

Substanz ist ein gegenseitiges Gleiten der Moleküle entlang des nematischen Leiters möglich.

Die Cholesterinphase ist der nematischen Phase auf molekularer Ebene ähnlich. Ihre gesamte Struktur ist jedoch zusätzlich um die Witt-Achse verdreht, die senkrecht zu den Molekülachsen verläuft. Das Ergebnis ist eine geschichtete Helixstruktur mit einer Helixsteigung von etwa 300 nm (Abb. 4.5, c). Eine solche Phase verhält sich in Bezug auf die einfallende Strahlung wie ein Interferenzfilter, d. h. Lichtstrahlen werden selektiv reflektiert. Das Phänomen ist in vielerlei Hinsicht vergleichbar mit der Beugung von Röntgenstrahlen an den Kristallgittern von Festkörpern.

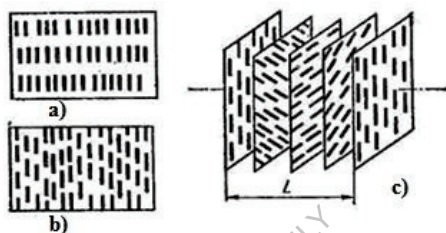


Abb. 4.5. Schematische Darstellung der Struktur von Flüssigkristallen:  
a - smektisch; b - nematisch; c - cholesterisch

Wenn eine flache Schicht eines Cholesterin-Flüssigkristalls mit weißem Licht beleuchtet wird, erscheint sie im reflektierten Licht farbig, wobei die Farbe je nach Betrachtungswinkel variieren kann.

Die Steigung einer spiralförmigen Spirale ist stark von äußeren Einflüssen abhängig. Wenn sich die Temperatur ändert, ändert sich der Abstand zwischen den Molekülschichten, und die Wellenlänge der maximalen Streuung bei einem bestimmten Beobachtungswinkel ändert sich entsprechend. Das Ergebnis ist ein Farbthermometer, das verschiedene Anwendungen gefunden hat. Die Veränderung der Texturfarbe mit der Temperatur wird als thermochromer Effekt bezeichnet. Farbthermometer werden erfolgreich in der technischen und medizinischen Diagnostik eingesetzt. Sie machen es sehr einfach, sich ein Bild des thermischen Feldes in Form einer Farbkarte zu machen.

Für die Steuerung eines Lichtstrahls und die visuelle Darstellung von Informationen sind elektro-optische Effekte in nematischen Flüssigkristallen von größtem praktischen Interesse. Wie bei Ferroelektrika ist das gesamte Volumen eines nematischen Flüssigkristalls in kleine Bereiche - Domänen - unterteilt, die sich in der Richtung ihrer bevorzugten Ausrichtung unterscheiden, was zu einer optischen Heterogenität des Mediums und einer starken Lichtstreuung führt. Ein solcher Flüssigkristall erscheint im reflektierten und

durchgelassenen Licht trübe. Für die praktische Anwendung werden dünne, homogen orientierte Schichten benötigt. Dabei unterscheidet man zwischen homogener (horizontaler) und homöotroper (vertikaler) Ausrichtung der Moleküle relativ zu Substraten aus Glas. Die gewünschte Orientierung wird durch eine spezielle Oberflächenbehandlung von Glassubstraten (Ätzen, Reiben, Ritzen, Aufbringen von organischen und anorganischen Beschichtungen usw.) oder durch das Einbringen von Tensiden in die Mesophase erreicht.

Was die elektrischen Eigenschaften betrifft, so gehören nematische Flüssigkristalle zur Gruppe der polaren Dielektrika mit einem niedrigen spezifischen Widerstand ( $\rho = 10 \cdot 10^{610}$  Ohm·m), dessen Wert durch das Auflösen dissozierender ionischer Verbindungen leicht eingestellt werden kann. Optische und dielektrische Anisotropie sind wichtige Eigenschaften nematischer Flüssigkristalle. Ein Maß für die optische Anisotropie ist die Differenz  $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$  (wobei  $n_{\parallel}$  und  $n_{\perp}$  Brechungsindizes für eine Lichtwelle sind, deren elektrischer Vektor entweder parallel oder senkrecht zur Richtung der vorherrschenden Ausrichtung der Moleküle verläuft. bzw. ein ungewöhnlicher und ein gewöhnlicher Strahl).

Bei der Herstellung von Informationsanzeigen auf Flüssigkristallen werden vor allem der Effekt der dynamischen Lichtstreuung und der "Twist"-Effekt des Feldes (Abwickeln der nematischen Phase) genutzt.

Dynamische Lichtstreuung wird in Flüssigkristallen mit negativer dielektrischer Anisotropie und niedrigem spezifischen Widerstand (etwa  $10^6$  Ohm·m) beobachtet. Die homöotrope Ausrichtung der Mesophasenmoleküle entspricht dem Ausgangszustand. Aufgrund seiner inneren Ordnung ist das Medium für einfallendes Licht transparent. Unter dem Einfluss einer äußeren Spannung drehen sich die Dipole (ihr elektrisches Moment steht senkrecht zu den Längsachsen der Moleküle), und die Ausrichtung ändert sich in einen homogenen Zustand. Gleichzeitig wird durch ein starkes elektrisches Feld ein Ionenfluss ausgelöst, der die geordnete statische Anordnung der Moleküle stört. Wenn sich die Molekülachsen in Richtung des Ionenflusses ausrichten, kommt es in der Mesophase zu Turbulenzen, die zu lokalen Änderungen des Brechungsindex führen, d. h. es entstehen Lichtstreuzentren. Äußerlich macht sich dies als Trübung des Mediums bemerkbar. Die Intensität der Lichtstreuung und damit der Kontrast der optischen Antwort nimmt mit einer Erhöhung der Steuerspannung zu. Die Geometrie des beleuchteten Zeichens wird durch die Form der Elektrode bestimmt. Wird das Feld abgeschaltet, kehrt das Medium in seinen ursprünglichen transparenten Zustand zurück.

Um Farbbilder zu erhalten, werden Farbstoffmoleküle in Flüssigkristalle eingebracht, die ebenfalls eine längliche, stäbchenartige Form haben und aufgrund der elastischen Dispersionswechselwirkung

parallel zu den Mesophasenmolekülen ausgerichtet sind. Das Absorptionsspektrum solcher Moleküle ist eine Funktion ihrer Ausrichtung in Bezug auf die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts. Die Absorption wird maximiert, wenn die Längsachsen der Moleküle parallel zu den Schwingungen des elektrischen Vektors der Lichtwelle verlaufen. Ein äußeres Feld verändert die statische Ausrichtung der Moleküle, wodurch sich das Absorptionsspektrum von linear polarisiertem Licht und der daraus resultierende Farbkontrast der elektro-optischen Zelle ändert.

Flüssigkristalle, die in Anzeigegeräten verwendet werden, sind in der Regel eine Mischung aus zwei oder mehr Verbindungen. In gemischten Systemen ist es möglich, einen größeren Temperaturbereich der Mesophase zu erhalten.

Der Anwendungsbereich nematischer Flüssigkristalle ist nach wie vor hauptsächlich auf Anzeigegeräte beschränkt. Zu diesen Geräten gehören Displays, großformatige Anzeigetafeln, digitale Anzeigen für Mikrocomputer, elektronische Zifferblätter und digitale Messgeräte. Die wichtigsten Vorteile solcher Anzeigen sind: a) guter Kontrast bei hellem Licht; b) geringer Stromverbrauch; c) Kompatibilität mit integrierten Schaltkreisen in Bezug auf Betriebsparameter und Design; d) vergleichsweise einfache Herstellung und geringe Kosten. Flüssigkristalle nutzen das Umgebungslicht für die Anzeige, daher ist ihr Stromverbrauch viel geringer als bei anderen Anzeigegeräten und liegt bei  $10^{-4-6}$  W/cm<sup>2</sup>. Dies ist um mehrere Größenordnungen niedriger als bei LEDs, Pulver- und Filmleuchtstoffen und Gasentladungsanzeigen. Die Hauptnachteile von Flüssigkristallgeräten sind ihre geringe Geschwindigkeit und ihre Anfälligkeit für elektro- und photochemische Alterung.

# Kapitel 5. Magnetische Werkstoffe

## 5.1. Allgemeine Konzepte des Magnetismus

Je nach Art der Wechselwirkung mit dem Magnetfeld werden Werkstoffe in der Regel in schwach wechselwirkende und stark wechselwirkende Werkstoffe unterteilt. Ein Maß für die Wechselwirkung von Materialien mit einem Magnetfeld ist die magnetische Induktion ( $B$ ), d. h. die durchschnittliche Magnetfeldstärke im Inneren des Materials, wenn es sich in einem äußeren Magnetfeld der Stärke  $H$  befindet. Die magnetische Induktion ist die Überlagerung der äußeren Magnetfeldstärke und der Magnetisierung:

$$B = \mu_o (H + M), \quad (5.1)$$

wobei  $M$  die Magnetisierung des Materials ist, d. h. das Verhältnis der Vektorsumme der elementaren magnetischen Momente zum Volumen des Materials,  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Gn/m ist die magnetische Konstante.

Bei Stoffen, die nur schwach mit dem Feld wechselwirken, ist die Magnetisierung gering  $B \approx \mu_o H$ . Zu diesen Stoffen gehören Diamagnete und Paramagnete. Bei Diamagneten ist die Induktion geringer als die äußere Feldstärke und bei Paramagneten ist die Induktion größer als die äußere Feldstärke. Stoffe, die stark mit dem Feld wechselwirken, haben eine hohe Magnetisierung. Zu diesen Stoffen gehören Ferromagnete, Antiferromagnete (Ferrite), Supermagnete und Spin-Gläser.

## 5.2. Klassifizierung der magnetischen Werkstoffe

Je nach der Reaktion auf ein äußeres Magnetfeld und der Art ihrer inneren magnetischen Ordnung lassen sich alle Stoffe in der Natur in fünf Gruppen einteilen: Diamagnete, Paramagnete, Ferromagnete, Antiferromagnete und Ferromagnete. Diese Arten von Magneten entsprechen fünf verschiedenen Arten von magnetischen Zuständen der Materie: Diamagnetismus, Paramagnetismus, Ferromagnetismus, Antiferromagnetismus und Ferromagnetismus.

Diamagnete sind Stoffe, deren magnetische Suszeptibilität negativ ist und nicht von der Stärke des äußeren Magnetfeldes abhängt.

Der Diamagnetismus wird durch eine geringfügige Änderung der Winkelgeschwindigkeit der Umlaufbahn der Elektronen verursacht, wenn sich ein Atom in einem Magnetfeld befindet. Der diamagnetische Effekt ist eine Manifestation des Gesetzes der elektromagnetischen Induktion auf atomarer Ebene. Die Elektronenbahn kann als ein geschlossener Kreislauf ohne aktiven Widerstand betrachtet werden. Unter dem Einfluss eines äußeren Feldes ändert sich der Strom in diesem Kreis und es entsteht ein zusätzliches magnetisches Moment. Nach der Lenz'schen Regel ist dieses Moment auf das äußere Feld gerichtet. Der Diamanteffekt ist ein universeller Effekt, der allen Substanzen innewohnt. In den meisten Fällen



wird er jedoch durch stärkere magnetische Effekte überlagert. Der Diamagnetismus der Elektronenschalen tritt in den Vordergrund, wenn das intrinsische magnetische Moment der Atome Null ist.

Zu den Diamagneten gehören Edelgase, Wasserstoff, Stickstoff, zahlreiche Flüssigkeiten (Wasser, Öl und seine Derivate), eine Reihe von Metallen (Kupfer, Silber, Gold, Zink, Quecksilber, Gallium usw.), die meisten Halbleiter (Silizium, Germanium usw.) und organische Verbindungen, Alkali-Halogenid-Kristalle, anorganische Gläser usw. Diamagnete sind alle Stoffe mit kovalenten chemischen Bindungen und Stoffe im supraleitenden Zustand.

Der Zahlenwert der magnetischen Suszeptibilität von Diamagnetika ist  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$ . Da Diamagnetika gegen die Feldrichtung magnetisiert sind, ist die Ungleichung  $\mu < 1$  für sie erfüllt. Die relative magnetische Permeabilität weicht jedoch nur sehr wenig von der Einheit ab (außer bei Supraleitern). Die magnetische Suszeptibilität von Diamagneten ändert sich nur sehr wenig mit der Temperatur. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der diamagnetische Effekt durch inneratomare Prozesse verursacht wird, die von der thermischen Bewegung der Teilchen nicht beeinflusst werden. Eine äußere Erscheinungsform des Diamagnetismus ist der Ausstoß von Diamagneten aus einem inhomogenen Magnetfeld.

Paramagnete sind Stoffe mit einer positiven magnetischen Suszeptibilität, die nicht von der Stärke eines äußeren Magnetfeldes abhängt. In der Paramagnetik haben die Atome auch bei Abwesenheit eines äußeren Feldes ein elementares magnetisches Moment, aber aufgrund der thermischen Bewegung sind diese magnetischen Momente zufällig verteilt, so dass die Magnetisierung der Substanz im Allgemeinen null ist. Ein äußeres Magnetfeld bewirkt, dass die magnetischen Momente der Atome überwiegend in eine Richtung ausgerichtet sind. Die thermische Energie wirkt der Entstehung der magnetischen Ordnung entgegen. Daher ist die paramagnetische Suszeptibilität stark temperaturabhängig.

Bei Raumtemperatur beträgt die magnetische Suszeptibilität von Paramagneten  $10^{-3}$  bis  $10^{-6}$ . Daher weicht ihre magnetische Permeabilität geringfügig von der Einheit ab. Aufgrund ihrer positiven Magnetisierung werden Paramagnete, die sich in einem inhomogenen Magnetfeld befinden, von diesem angezogen. In sehr starken Feldern und bei niedrigen Temperaturen können Paramagnete einen Zustand der magnetischen Sättigung erreichen, in dem alle elementaren magnetischen Momente parallel zu  $H$  ausgerichtet sind.

Zu den Paramagneten gehören Sauerstoff, Stickstoffoxid, Alkali- und Erdalkalimetalle, einige Übergangsmetalle, Salze von Eisen, Kobalt, Nickel und Seltenerdmetalle. Der paramagnetische Effekt ähnelt physikalisch der Dipol-Relaxations-Polarisation von Dielektrika.

Ferromagnete sind Stoffe mit einer großen positiven magnetischen Suszeptibilität (bis zu  $10^6$ ), die stark von der Magnetfeldstärke und der Temperatur abhängt. Ferromagnete zeichnen sich durch eine innere magnetische Ordnung aus, die sich in der Existenz makroskopischer Bereiche mit parallel ausgerichteten magnetischen Momenten der Atome ausdrückt. Die wichtigste Eigenschaft von Ferromagneten ist ihre Fähigkeit, in relativ schwachen Magnetfeldern bis zur Sättigung magnetisiert zu werden.

Antiferromagnete sind Stoffe, in denen die antiparallele Ausrichtung der elementaren magnetischen Momente identischer Atome oder Ionen im Kristallgitter unterhalb einer bestimmten Temperatur spontan auftritt. Antiferromagnete sind durch eine kleine positive magnetische Suszeptibilität ( $\chi = 10^{-3} - 10^{-5}$ ) gekennzeichnet, die stark temperaturabhängig ist. Beim Erhitzen geht der Antiferromagnet in einen paramagnetischen Zustand über. Die Temperatur dieses Übergangs, bei der die magnetische Ordnung verschwindet, wird als Neel-Punkt (oder antiferromagnetischer Curie-Punkt) bezeichnet. Antiferromagnetismus findet sich bei Chrom, Mangan und einer Reihe von Seltenerdelementen. Typische Antiferromagneten sind einfache chemische Verbindungen auf der Basis von Übergangsguppenmetallen wie Oxide, Halogenide, Sulfide, Carbonate und dergleichen.

Ferromagnete sind Stoffe, deren magnetische Eigenschaften auf unkompensierten Antiferromagnetismus zurückzuführen sind. Ähnlich wie Ferromagnete haben sie eine hohe magnetische Suszeptibilität, die stark von der Magnetfeldstärke und der Temperatur abhängt. Gleichzeitig sind Ferromagnete durch eine Reihe signifikanter Unterschiede zu ferromagnetischen Materialien gekennzeichnet. Einige geordnete Metalllegierungen weisen ferromagnetische Eigenschaften auf, vor allem aber verschiedene Oxidverbindungen, unter denen die Ferrite von größtem praktischen Interesse sind.

Dia-, Para- und Antiferromagnete lassen sich in die Gruppe der schwach magnetischen Stoffe einordnen, während Ferro- und Ferromagnete stark magnetische Materialien sind.

Alle magnetischen Werkstoffe werden üblicherweise in weichmagnetische und hartmagnetische eingeteilt. Weichmagnetische Werkstoffe sind Werkstoffe, die sich durch ein äußeres Magnetfeld leicht magnetisieren lassen. Solche Materialien zeichnen sich durch niedrige Werte der Koerzitivkraft und hohe Werte der magnetischen Permeabilität aus. Sie werden verwendet, um ein Magnetfeld zu konzentrieren. In den meisten Fällen arbeiten weichmagnetische Materialien in magnetischen Wechselfeldern, weshalb ein hoher spezifischer Widerstand für sie wichtig ist. Historisch gesehen war das erste weichmagnetische Material Eisen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, das eine geringe mechanische

Härte aufweist. Daher werden solche Werkstoffe auch als weichmagnetisch bezeichnet.

Magneto-resistive Materialien sind Materialien mit hoher Koerzitivkraft und hoher Restinduktion. Sie werden zur Herstellung von Dauermagneten verwendet, die ein konstantes Magnetfeld erzeugen. Historisch gesehen waren die ersten magnetisch harten Werkstoffe mechanisch harte, gehärtete Kohlenstoffstähle. Daher werden solche Werkstoffe auch als magneto-resistent bezeichnet.

### 5.3. Ferromagnete

Nach Ampères Hypothese fließen molekulare Ströme im Inneren von Atomen und Molekülen, so dass es magnetische Dipole gibt. Tatsächlich wurde die Hypothese von Ampere auf brillante Weise bestätigt, als die elektronische Struktur des Atoms verstanden wurde. Die Bewegung der Elektronen um die Atomkerne sind die Elementarströme, die magnetische Momente erzeugen. Eine genauere Betrachtung der elementaren magnetischen Momente zeigt, dass ein Atom magnetische Momente der Kerne, magnetische Orbitalmomente der Elektronen und magnetische Spinnmomente der Elektronen besitzt. Die magnetischen Momente der Atomkerne sind im Vergleich zu den magnetischen Momenten der Elektronen vernachlässigbar klein, so dass ihr Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften von Materialien vernachlässigt werden kann. Die orbitalen magnetischen Momente der Elektronen sind ebenfalls viel kleiner als die magnetischen Spinnmomente. Daher werden die magnetischen Eigenschaften von Materialien hauptsächlich durch die magnetischen Spinnmomente der Elektronen bestimmt.

Nach der Hund'schen Regel werden die Elektronenorbitale so gefüllt, dass die magnetischen und mechanischen Momente der Elektronen maximiert werden. Bei den Übergangsmetallen sind die inneren Elektronenorbitale (3d oder 5f) nicht vollständig besetzt. Daher haben die Atome dieser Elemente ein erhebliches magnetisches Moment. Austauschwechselwirkungen können zu einer gegenseitigen Ausrichtung der magnetischen Momente benachbarter Atome führen. Je nach der Ausrichtung der magnetischen Momente benachbarter Atome werden alle Stoffe in Ferromagnete, Antiferromagnete und Paramagnete unterteilt.

Damit ein Stoff ferromagnetisch ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- 1) Das Material muss Übergangsmetallatome mit großen magnetischen Momenten enthalten;
- 2) Das Verhältnis zwischen dem Abstand zwischen den Atomen und dem Radius der unbesetzten Elektronenschalen muss größer als 3 sein.

Die magnetischen Momente benachbarter ferromagnetischer Atome sind parallel ausgerichtet, aber in einem ausreichend großen

Kristalle können nicht alle magnetischen Momente parallel ausgerichtet sein. Andernfalls entsteht ein Magnetfeld um den Kristall, und die Energie des Systems steigt. Um die Energie des Systems zu verringern, wird der Kristall in Domänen unterteilt - Regionen mit spontaner Magnetisierung, und die Unterteilung erfolgt so, dass kein äußeres Magnetfeld vorhanden ist.

An den Grenzen der Domänen erhöht sich die Energie der Atome. Damit die Energie des Materials minimal ist, muss die Länge der Domänengrenzen bzw. die Größe der Domäne, d. h. die Verformung des Kristallgitters unter dem Einfluss eines Magnetfeldes, minimal sein. Die Austauschwechselwirkung zwischen den Atomen führt zur Entstehung zusätzlicher Wechselwirkungskräfte und das Kristallgitter wird deformiert. Das Wachstum der Domäne führt zu einer Zunahme der lokalen Feldstärke innerhalb der Domäne und zu einer Zunahme der Gitterverformung. Gleichzeitig nimmt die Energie des Systems zu. Der Gegensatz zwischen magnetischer Anisotropie und Magnetostraktion führt also dazu, dass sich die optimale Größe der magnetischen Domänen einstellt.

Wenn ein Ferromagnet in ein äußeres Magnetfeld gebracht wird, sind die Magnetisierungsvektoren einiger Domänen gleich oder nahezu gleich dem Vektor der äußeren Magnetfeldstärke. Die Energie dieser Bereiche wird minimal sein, während die Energie aller anderen Bereiche zunimmt. Die Abhängigkeit der Induktion von der äußeren Magnetfeldstärke wird als Magnetisierungskurve bezeichnet (Abb. 5.1).

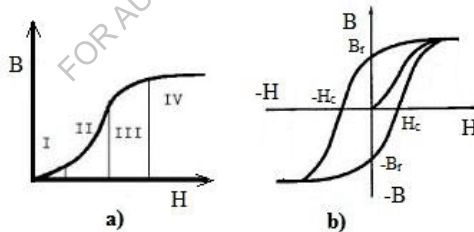


Abb. 5.1. Magnetisierungskurve (a) und Hystereseschleife (b).

Im Anfangsteil der Magnetisierungskurve führt eine Erhöhung der äußeren Feldstärke zu einem leichten Anstieg der Induktion, und wenn das äußere Feld abgeschaltet wird, sinkt die Induktion auf Null. Dieser Abschnitt wird als Umkehrmagnetisierungsabschnitt oder Rayleigh-Bereich (I) bezeichnet (Abb. 5.1.a). Im zweiten Abschnitt führt eine geringfügige Änderung der äußeren Feldstärke zu merklichen Änderungen der Induktion. Dieser Abschnitt wird als Bereich des starken Induktionsanstiegs oder als Barkhausensprungbereich (II) bezeichnet. Im dritten Abschnitt der Magnetisierungskurve wird die Abhängigkeit der Induktion von der äußeren Feldstärke wieder schwächer. Dieser Abschnitt

wird als Abschnitt der langsamen Magnetisierung oder als Bereich der Magnetisierung aufgrund von Rotationsprozessen bezeichnet (III). Im vierten Bereich nimmt die Induktion proportional zur magnetischen Feldstärke zu. Dieser Bereich wird als Sättigungsbereich oder Paraprozessbereich (IV) bezeichnet.

Wenn ein Ferromagnet einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt wird, beginnt das Wachstum von günstig orientierten Domänen, d.h. ihre Grenzen verschieben sich. Die strukturellen Inhomogenitäten des Materials verhindern jedoch die Verschiebung der Domänengrenzen (d. h. sie sind die Verankerungspunkte der Domänengrenzen), und die Grenzen verbiegen sich unter dem Einfluss eines externen Feldes.

Die Biegung der Grenzen ist energetisch nicht vorteilhaft, da sie zu einer Vergrößerung ihrer Oberfläche führt. Wenn das externe Feld abgeschaltet wird, werden die Grenzen wieder begradigt und die Magnetisierung verschwindet. So entsteht bei niedrigen Werten der externen Feldstärke eine Region mit umgekehrter Magnetisierung oder eine Rayleigh-Region. Bei einer weiteren Erhöhung der äußeren Feldstärke wird die Biegung der Grenzen so groß, dass die Energie der gebogenen Grenzen mit der Energie der Grenzen übereinstimmt, die sich von den Verankerungspunkten gelöst haben. Eine weitere Biegung der Ränder wird energetisch ungünstig, die Ränder lösen sich von den Verankerungspunkten und wandern in Sprüngen zur nächsten Reihe von Verankerungspunkten. Gleichzeitig wird ein Bereich mit stark ansteigender Induktion oder ein Bereich mit Barkhausen-Sprüngen beobachtet.

Sobald die Domänengrenzen verschoben sind, füllen die günstig orientierten Domänen das gesamte Volumen des Kristalls aus, und die Magnetisierung beginnt aufgrund der Drehung der magnetischen Momente der Atome von der Richtung der leichten Magnetisierung zur Richtung der schweren Magnetisierung zuzunehmen. Da die Drehung der magnetischen Momente energetisch nicht vorteilhaft ist, erfordert sie eine hohe externe Feldstärke. Auf diese Weise entsteht ein Bereich mit langsamer Magnetisierung oder ein Magnetisierungsbereich, der durch Rotationsprozesse entsteht. Wenn alle magnetischen Momente der Atome durch das äußere Feld gelenkt werden, kommt es zu keinem Anstieg der Magnetisierung, und der Anstieg der Induktion erfolgt durch eine Erhöhung der magnetischen Feldstärke, wie bei Paramagneten. Es wird eine Sättigungszone oder ein Paraprozessbereich beobachtet.

Wenn nach der Sättigungsmagnetisierung des Ferromagneten das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird, wird die Magnetisierung des Ferromagneten nicht vollständig entfernt und die Restinduktion  $B_r$  bleibt erhalten (Abb. 5.1, b). Dies ist darauf zurückzuführen, dass strukturelle Defekte, die die Bewegung der Domänengrenzen während der Magnetisierung verhindern, die umgekehrte Verschiebung der

Domänengrenzen während der Entmagnetisierung verhindern. Um die Restinduktion zu beseitigen, ist es notwendig, ein Feld mit umgekehrter Polarität anzulegen. Bei einem bestimmten Wert der Feldstärke, die als Koerzitivfeldstärke  $H_c$  bezeichnet wird, verschwindet die Induktion. Eine weitere Erhöhung der Feldstärke in die entgegengesetzte Richtung führt zur Magnetisierung des Ferromagneten. Dabei ändert sich natürlich das Vorzeichen des magnetischen Induktionsvektors. Schaltet man das äußere Magnetfeld ab, so tritt wieder eine Restinduktion auf, die durch Anlegen einer Koerzitivkraft beseitigt werden muss. Wird also ein Ferromagnet in ein magnetisches Wechselfeld gebracht, entsteht eine Hystereseschleife (Abb. 5.1.b). Je mehr strukturelle Defekte und Korngrenzen im Material vorhanden sind, die die Bewegung erschweren, desto höher ist die Koerzitivkraft und desto größer ist die Hystereseschleife.

#### 5.4. Weichmagnetische Materialien

Gängige weichmagnetische Werkstoffe sind Eisen und seine Legierungen mit Silizium. Sie werden zum Betrieb von Magnetkernen in Gleichstrom- und Niederfrequenzfeldern verwendet. Das billigste Material ist technisch reines Eisen mit einem Gesamtverunreinigungsgehalt von bis zu 0,1%. Aufgrund seines relativ geringen elektrischen Widerstandes ( $0,1 \mu\Omega\cdot\text{m}$ ) wird Reineisen hauptsächlich für Magnetkerne mit konstantem Magnetfluss verwendet. Ein wesentlicher Nachteil von technisch reinem Eisen ist die Alterung, d. h. die Zunahme der Koerzitivfeldstärke im Laufe der Zeit aufgrund der Freisetzung fein verteilter Karbid- und Nitridteilchen.

Die Reinigung des Eisens von Verunreinigungen führt zu einer Erhöhung der magnetischen Permeabilität und einer Verringerung der Koerzitivfeldstärke. Diese Vorteile sind in schwachen Feldern, d. h. in Feldern, die in der Elektronik und in Messgeräten verwendet werden, besonders ausgeprägt. Je nach Technologie der Eisenreinigung wird zwischen elektrolytischem, reduziertem und carbonyliertem Eisen unterschieden. Da die Reinigung die Kosten für das Material erheblich erhöht, ist ihre Verwendung äußerst begrenzt. Carbonyleisen ist am weitesten verbreitet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Zersetzung von Eisenpentacarbonyl ein Metallpulver entsteht. Mischt man dieses Pulver mit einem Lack, erhält man ein Material, das einen hohen spezifischen Widerstand mit einer hohen magnetischen Permeabilität kombiniert.

Der geringe elektrische Widerstand von Eisen führt zu hohen Wirbelstromverlusten in Wechselfeldern und einer geringeren magnetischen Permeabilität. Wenn Eisen mit Silizium legiert wird, erhöht sich der spezifische Widerstand erheblich. Bei einer Legierung mit 5% Silizium beispielsweise erreicht der spezifische Widerstand  $0,7 \mu\Omega\cdot\text{m}$ , d. h. er steigt im Vergleich zu reinem Eisen um mehr als das Siebenfache.

Darüber hinaus verringert die Anwesenheit von Silizium im Eisen die magnetische Anisotropie und die Magnetostriktion. Es ist wichtig zu beachten, dass die Wechselwirkung von Silizium mit Versetzungen zu einer Verringerung der Beweglichkeit der Versetzungen führt, was die Duktilität der Legierungen verringert. In dieser Hinsicht enthalten industrielle Eisen-Silizium-Legierungen, wie z. B. Elektrostähle, nicht mehr als 5 % Si.

Da Elektrostähle eine magnetische Anisotropie aufweisen, wird zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften texturierter Stahl verwendet, d. h. Stahl, bei dem einige kristallografische Richtungen in benachbarten Körnern übereinstimmen. Um Stahl mit hoher magnetischer Permeabilität und geringen Verlusten zu erhalten, ist eine Koinkidenz von Richtungen des Typs [111] erforderlich. Um eine magnetische Textur zu erhalten, wird das Kaltwalzen mit starker Verdichtung und anschließendem Glühen bei einer Temperatur von 900-1000°C verwendet.

Für Materialien, die in schwachen Feldern arbeiten, ist ein hoher Wert der anfänglichen magnetischen Permeabilität von äußerster Wichtigkeit. Mit anderen Worten, eine hohe Mobilität der Domänengrenzen unter den Bedingungen einer geringen äußeren Magnetfeldstärke ist für solche Materialien wichtig. Folglich sollten solche Materialien einphasig sein und eine geringe magnetische Anisotropie und Magnetostriktion aufweisen. Um eine maximale magnetische Permeabilität zu erreichen, werden stark legierte Legierungen verwendet. Beispiele hierfür sind Alsifer und Permalloy.

Alsifer ist eine Legierung des Systems Fe - Si - Al mit etwa 9,5 % Silizium und 5,5 % Aluminium. Bei dieser Zusammensetzung ist die magnetische Anisotropie minimal und die Legierung hat eine sehr hohe magnetische Permeabilität. Die Legierung hat einen recht hohen spezifischen elektrischen Widerstand ( $\rho = 0,81 \mu\Omega\cdot\text{m}$ ), der die Wirbelstromverluste verringert. Zugleich ist die Legierung nicht plastisch und hart. Teile aus dieser Legierung werden pulvermetallurgisch hergestellt, und die Endbearbeitung der Teile ist nur durch anodenmechanische und funkenerzeugende Verfahren sowie durch Schleifen möglich. Die Komplexität der Verarbeitung erhöht die Kosten der Produkte, aber da die Legierung keine teuren Komponenten enthält, wird sie häufig für die Herstellung von magnetischen Bildschirmen und Magnetkernen verwendet.

Eine Legierung aus Eisen und Nickel wird als Permalloy bezeichnet. Man unterscheidet zwischen nickelarmer Permalloy und nickelreicher Permalloy. Eine Permalloy mit niedrigem Nickelgehalt enthält 45-65% Ni, während eine Permalloy mit hohem Nickelgehalt 76-80% Ni enthält. Nickelarmer Permalloyen zeichnen sich durch einen höheren spezifischen Widerstand und eine höhere Sättigungsinduktion

aus, die magnetische Permeabilität von nickelarmen Permalloyen ist jedoch geringer als die von hochnickeligen Permalloyen.

In Hochfrequenzfeldern steigen die Wirbelstromverluste drastisch an. Daher werden in Hochfrequenzfeldern Materialien mit einem hohen spezifischen Widerstand verwendet, wie Magnetodielektrika, Ferromagnete mit amorpher Struktur und Ferrite.

Magnetodielektrika werden durch Mischen von pulverförmigen Ferromagneten und einem organischen oder anorganischen Bindemittel hergestellt. Als Ferromagneten werden Carbonyleisen-, Alsiifer- oder Molybdän-Permalloy, die zusätzlich mit Schwefel dotiert sind, verwendet. Durch den Zusatz von Schwefel wird die Permalloy spröde. Ferromagnete mit amorpher Struktur werden durch ultraschnelles Abkühlen der Schmelze mit Abkühlungsraten von  $10^6$  bis  $10^8$  Grad pro Sekunde gewonnen. Bei einer derart schnellen Abkühlung hat das Kristallgitter keine Zeit, sich zu bilden, und das Material ist eine unterkühlte Flüssigkeit. Das Fehlen eines Kristallgitters führt zu einer vollständigen Isotropie der magnetischen Eigenschaften, und bei fehlender magnetischer Anisotropie ist die Mobilität der Domänengrenzen hoch. Daher sind Materialien mit einer amorphen Struktur magnetisch weich.

Ferrite sind ionische Verbindungen vom Typ  $\text{MeOFeO}_{23}$ , die chemische Salze der Säure  $\text{MeFeO}_{24}$  sind, wobei Me ein Kation eines beliebigen zweiwertigen Metalls oder zwei Kationen eines einwertigen Metalls ist. Die meisten Ferrite haben ein symmetrisches kubisches Kristallgitter. Nickel-Zink-, Lithium-Zink- und Mangan-Zink-Ferrite sind die am häufigsten verwendeten weichmagnetischen Materialien.

Ihren elektrischen Eigenschaften nach sind Ferrite Halbleiter oder Dielektrika, so dass die Verluste aufgrund von Wirbelströmen in Ferriten vernachlässigbar sind. Darüber hinaus haben sie eine hohe Dielektrizitätskonstante, was zu einer Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in Ferriten führt. Dieser Umstand ermöglicht die Herstellung von Verzögerungsleitungen, Magnetventilen usw. auf der Basis von Ferriten. Einkristalle aus weichmagnetischen Ferriten werden zur Herstellung von Magnetköpfen für die Aufnahme und Wiedergabe von Audio- und Videosignalen in Tonbandgeräten verwendet.

### 5.5. Hartmagnetische Materialien

Zur Herstellung von Dauermagneten werden hartmagnetische Werkstoffe verwendet, deren gespeicherte magnetische Energie als Produkt aus Restinduktion und Koerzitivkraft geschätzt wird

$$W_{\text{mag}} = EH B_{cr} \quad (5.2)$$

Um die Koerzitivkraft zu erhöhen, muss die Bewegung der Domänengrenzen erschwert werden. Zu diesem Zweck sollte die magnetische Anisotropie maximiert werden, die Korngröße sollte



minimal sein, und das Material sollte Partikel enthalten, die die Bewegung der Domänengrenzen verhindern.

Hartmagnetische Werkstoffe sind auf Martensit gehärtete Kohlenstoffstähle. Dies führt zu einer Struktur, die aus der Sicht von hartmagnetischen Werkstoffen ideal ist - eine dispergierte Mischung aus ferromagnetischen und nichtferromagnetischen Phasen, wobei die ferromagnetische Phase eine große magnetische Anisotropie aufweist. Die Eigenschaften martensitischer gehärteter Stähle sind jedoch bei weitem nicht ideal, da ein großer Teil der gehärteten Stähle von der nichtferromagnetischen Phase Austenit eingenommen wird, so dass ihre Magnetisierung und folglich auch ihre Restinduktion gering sind. Ein weiterer Nachteil der martensitischen Stähle ist ihre geringe Härbarkeit, d. h. die Fähigkeit, einer Härtung bis zu einer beträchtlichen Tiefe standzuhalten, wodurch eine martensitische Umwandlung in den tieferen Schichten des Materials verhindert wird. Um die Härbarkeit zu erhöhen, werden die Stähle zusätzlich mit Chrom, Wolfram, Molybdän und Kobalt legiert. Die Legierung von Stählen mit Kobalt ist besonders wirksam, da Kobaltatome ein magnetisches Moment besitzen und die Restinduktion in Gegenwart von Kobalt zunimmt.

Hartmagnetische Werkstoffe sind nicht duktil, da dispergierte Teilchen der Emissionen, die die Verschiebung von Domänengrenzen verhindern, die Bewegung von Versetzungen behindern. In einigen Fällen ist es jedoch notwendig, hartmagnetische Werkstoffe in Form von Bändern, Blechen, Drähten für die Herstellung von Prägeelementen von Messsystemen, Kompass- und Perlenzeigern, magnetischen Aufzeichnungsbändern usw. zu verwenden. Solche Materialien sollten eine spürbare Plastizität aufweisen.

Zu den magnetisch verformbaren Werkstoffen gehören Legierungen der Systeme Cu-20% Ni-20% Fe-cunife, Cu-20% Ni-20% Co-cunico und Fe-52% Co-(4-14)%V-vicaloy. Bei Legierungen auf Kupferbasis tritt nach einer starken Verdichtung und anschließendem Anlassen bei 600 °C eine große Koerzitivkraft auf. Die hohen magnetischen Eigenschaften dieser Werkstoffe sind auf die Freisetzung von Einzeldomänenpartikeln der ferromagnetischen Phase während der Abkühlung des übersättigten Mischkristalls zurückzuführen. Es ist wichtig zu beachten, dass während der Vorverformung eine scharfe Textur im Material auftritt, so dass die freigesetzten Teilchen ausgerichtet sind. Legierungen des Systems Co - V - Fe zeichnen sich durch eine hohe Induktion (bis zu 1,8 T) aus. Sie werden zur Herstellung von kleinen Magneten, Kompass- und Perlenzeigern und Magnetdraht verwendet.

Das bekannteste unter den hartmagnetischen Ferriten ist Bariumferrit  $\text{BaO}_6 \text{Fe O}_{23}$  (FB, Ferroxdur). Im Gegensatz zu den weichmagnetischen Ferriten hat es ein hexagonales Gitter mit uniaxialer Anisotropie und kein kubisches Gitter. Die hohe Koerzitivkraft ist auf die

geringe Korngröße und die starke kristallographische Anisotropie zurückzuführen. Neben Bariumferrit werden auch Chrom-Barium-Ferrit (CB) und Kobaltferrit verwendet. Ferritische Werkstoffe sind viel billiger als metallische Werkstoffe. Gleichzeitig haben sie ein deutlich geringeres spezifisches Gewicht. Die hohe Koerzitivfeldstärke ermöglicht die Herstellung von Magneten mit einem geringen Verhältnis zwischen Länge und Querschnitt.

Zu den Nachteilen von hartmagnetischem Ferrit gehören geringe mechanische Festigkeit, Sprödigkeit und hohe Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen.

## Anhang

Tabelle 1. Eigenschaften von Ge, Si, GaAs (bei 300 K).

Eigenschaften	Ge	Si	GaAs
1	2	3	4
Anzahl der Atome in 1 cm <sup>3</sup>	4,42 · 10 <sup>22</sup>	5,0 · 10 <sup>22</sup>	2,21 · 10 <sup>22</sup>
Atommasse	72,6	28,08	144,63
Durchschlagfeld, V/cm	~10 <sup>5</sup>	~3 · 10 <sup>5</sup>	~4 · 10 <sup>5</sup>
Kristallstruktur	Diamant	Diamant	Zink Täuschungen
Dichte, g/cm <sup>3</sup>	5,3267	2,328	5,32
Relative Dielektrizitätskonstante Durchlässigkeit	16	11,8	10,9
Effektive Dichte der Zustände im Leitungsband N <sub>c</sub> , cm <sup>-3</sup>	1,04 · 10 <sup>19</sup>	2,8 · 10 <sup>19</sup>	4,7 · 10 <sup>17</sup>
Effektive Dichte der Zustände im Valenzband N <sub>v</sub> , cm <sup>-3</sup>	6,1 · 10 <sup>18</sup>	1,02 · 10 <sup>19</sup>	7,0 · 10 <sup>18</sup>
Wirksame Massen m*:			
Elektronen	0,22m <sub>e</sub>	1,06 m <sub>e</sub>	0,07 m <sub>e</sub>
Löcher	0,39 m <sub>e</sub>	0,56 m <sub>e</sub>	0,5 m <sub>e</sub>
Affinität für Elektron, eV	4,0	4,05	4,07
Bandlücke bei 300 K, eV	0,66	1,11	1,43

Intrinsische Konzentration, $\text{cm}^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^7$
Gitterkonstante, nm	0,565748	0,543086	0,56534
Temperaturkoeffizient der linearen Ausdehnung der linearen Ausdehnung $\Delta L/L \Delta T, \text{C}^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Schmelzpunkt, $^{\circ}\text{C}$	937	1420	1238
Lebensdauer von Nicht-Basismedien, s	$10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$10^{-8}$
Mobilität ist Drift $\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ :			
Elektronen $\mu_n$	3900	1500	8500
Löcher $\mu_p$	1900	600	400

Fortsetzung von Tabelle 1

<b>Eigenschaften</b>	<b>Ge</b>	<b>Si</b>	<b>GaAs</b>
1	2	3	4
Energie der Raman-Phononen Er, eV	0,037	0,063	0,035
Spezifische Wärme, $\text{J}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$	0,31	0,7	0,35
Wärmeleitfähigkeit (bei 300 K), $\text{W}/(\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C})$	0,64	1,45	0,46
Thermischer Diffusionskoeffizient, $\text{cm}^2/\text{s}$	0,36	0,9	0,44
Dampfdruck, Pa	0,133 bei $1270^{\circ}\text{C}$ $1,33 \cdot 10^{-6}$ bei $800^{\circ}\text{C}$	0,133 bei $1600^{\circ}\text{C}$ $1,33 \cdot 10^{-6}$ bei $930^{\circ}\text{C}$	$1,01 \cdot 10^5$ bei $1050^{\circ}\text{C}$ $1,01 \cdot 10^7$ bei $1220^{\circ}\text{C}$
Ausgangsarbeit, eV	4,4	4,8	4,7

**Tabelle 2.**

Abhängigkeit der EMK eines Differentialthermoelementes aus Chrom-Kupfer (Тип L) von der Temperatur der Arbeitsstelle (Kalibriertabelle).  
Temperaturbereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+200^{\circ}\text{C}$

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	ЭДС, мВ									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38



## Fortsetzung von Tabelle 3

200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.498	8.539	200
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940	210
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343	220
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747	230
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153	240
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.848	15.891	15.933	15.975	380
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820	400
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941	450
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
470	19.368	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179	620
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602	630
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025	640
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447	650
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869	660
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289	670
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710	680
690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129	690

Fortsetzung von Tabelle 3

700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.548	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.985	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.849	33.890	33.930	33.971	34.012	34.053	34.094
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.828	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.725
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.668	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.511	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.854	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.255	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.654	52.689	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.886								1370

## Literaturverzeichnis

1. R.K. Rajput. A Textbook of Electrical Engineering Materials. Firewall Media, 2004, 449 S.
2. Ian Jones. Materialwissenschaft für Elektro- und Elektronikingenieure Taschenbuch. Oxford University Press; 6. Auflage (1. Januar 2007) 360 S.. ISBN-10 : 9780195691634
3. Gorbatschuk MT. Elektrotechnische Materialien. Lehrgang. (UA). LAP LAMBERT Academic Publishing. 17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius, 2017. ISBN: 978-620-2-05432-4, 110 c.
4. Vasylenko I.I., Shirokov V.V., Vasylenko Yu.I. Structural and electrical materials. Studienführer. - Lviv: Magnolia, 2008 - 242 S.
5. Gorbachuk, M. Larionov, A. Firsov, N. Shatil. Halbleitersensoren für einen breiten Temperaturbereich. Sensors & Transducers Journal and Magazine, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4
6. S.A.Mulenko, N.T.Gobachuk. Synthese von nanometrischen Eisenoxidfilmen durch RPLD und LCVD für Thermophotosensoren. Angewandte Physik B: Laser und Optik, v.105, #3, S.517-523, 2011
7. Gorbachuk N.T., Mitin V.V., Tkhorik Yu.A., Shvarts Yu.M. Piezo-Hall effect in p-germanium. Phys. Stat. Sol.(c) 100. 1980, p.309
8. Gorbachuk N.T., Mitin V.V., Tkhorik Yu.A., Shvarts Yu.M. On determining the deformation potential constants of semiconductors of the p-germanium type from the temperature dependence of the piezoresistance. FTP, Vol. 15, V. 14,S.649, 1981
9. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I. etc. Halbleiter-Messwandler für Verformung, Temperatur und Magnetfeld zur Verwendung unter Strahlungsbedingungen, einem breiten Temperaturbereich und Magnetfeldern. Ausgaben der Atomwissenschaft und -technologie, Reihe: Elektrophysikalische Ausrüstung, v.3(29), 2005, S.46-5.
10. Didenko P.I., Gorbachuk N.T. The influence of neutron irradiation on the characteristics of semiconductor measuring transducers of temperature, strain, and magnetic field. Oberfläche, 2005, 4, S.57-58.



11. M.T. Gorbachuk, A.P. Klimenko. Physikalische Grundlagen der fortgeschrittenen Technologien. /Synopsis of lectures/. Kiew, DALPU, 1999, 39 S.

12. M.T. Gorbachuk, A.P. Klimenko, M.T. Stepashko, L.M. Khanat. Theoretische Grundlagen der fortgeschrittenen Technologien. /Synopsis of lectures/. Kiew, DALPU, 1997, 44 S.

FOR AUTHOR USE ONLY

# INHALTSVERZEICHNIS

Kapitel 1. Allgemeine Informationen über elektrische Materialien.....	2
Kapitel 2. Leiter. Elektrophysikalische Eigenschaften von Leitern.....	20
Kapitel 3. Halbleitermaterialien.....	55
Kapitel 4. Dielektrika .....	86
Kapitel 5. Magnetische Werkstoffe .....	116
Anhang.....	126
Literaturverzeichnis.....	132

FOR AUTHOR USE ONLY

**More  
Books!**



yes  
**I want morebooks!**

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

Kaufen Sie Ihre Bücher schnell und unkompliziert online – auf einer der am schnellsten wachsenden Buchhandelsplattformen weltweit! Dank Print-On-Demand umwelt- und ressourcenschonend produziert.

Bücher schneller online kaufen  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**



[info@omniscryptum.com](mailto:info@omniscryptum.com)  
[www.omniscryptum.com](http://www.omniscryptum.com)

OMNIScriptum

