

Werkstoffe der Elektrotechnik

H. P. J. Wijn · P. Dullenkopf

Werkstoffe der Elektrotechnik

Physikalische Grundlagen der technischen Anwendungen

Mit 131 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1967

H. P. J. Wijn, o. Prof. an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
P. Dullenkopf, Wiss. Ass. an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

ISBN 978-3-642-88698-0 ISBN 978-3-642-88697-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-88697-3

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1967

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin · Heidelberg New York 1967

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1967

Library of Congress Catalog Card Number 67—16136

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

Titel-Nr. 1407

Vorwort

Dieses Buch befaßt sich mit den Grundlagen der Eigenschaften der Werkstoffe der Elektrotechnik und soll dem Leser einen Begriff über Anwendungsmöglichkeiten der verschiedenen Werkstoffe vermitteln. Obwohl in erster Linie für Universitätsstudenten der Fachrichtung Elektrotechnik gedacht, wird es wahrscheinlich allen nutzen können, deren Interesse an Bauelementen der Elektrotechnik sich nicht allein darauf beschränkt, daß das Bauelement in der Schaltung richtig funktioniert, was zweifellos das Wichtigste ist, sondern die darüber hinaus ihre Neugier nach dem Verständnis des physikalischen Vorganges im Werkstoff befriedigen möchten.

Das Verhalten von dielektrischen, magnetischen und Halbleiter-Werkstoffen in elektrischen und magnetischen Feldern wird behandelt. Es wurde davon abgesehen, viele spezielle Werkstoffeigenschaften zu nennen, weil diese oft nur in Sondergebieten der Elektrotechnik eine Rolle spielen. Das Buch ist mehr oder weniger ein gedrucktes Manuskript einer Vorlesung „Werkstoffe der Elektrotechnik“, wodurch auch die Reihenfolge der Themen gegeben ist. Wir glauben, daß es nicht Aufgabe einer Planvorlesung ist, den Studenten mit einer Vielzahl von allen möglichen Eigenschaften von Werkstoffen zu konfrontieren. Im Vordergrund sollte das Verständnis der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Werkstoffeigenschaften stehen. Die Studenten sollen mit den Grundlagen, Begriffen und Größenordnungen vertraut gemacht werden, damit es ihnen möglich wird, die Funktionen der Werkstoffe in Bauelementen der Elektrotechnik zu verstehen, und, wenn sie wollen, auch ihre Kenntnisse mit Hilfe der Fachliteratur auf dem Gebiet der Festkörperelektronik zu erweitern.

Es ist versucht worden, die Themen so zu behandeln, daß Kenntnisse der Grundlagen der theoretischen Physik keine Vorbedingung zum Verständnis des gebotenen Stoffes sind. Wo notwendig, ist angegeben, von welchen Gesetzen der theoretischen Physik bei der Bearbeitung des Themas ausgegangen wurde. Wir haben davon abgesehen, Hinweise auf die außerordentlich umfangreiche Literatur über die Anwendung von Werkstoffen in der Elektrotechnik zu geben. Die Literaturhinweise am Schluß des Buches betreffen meistens Werke, in denen der physikalisch interessierte Leser eine ausführliche Behandlung der Grundlagen der Festkörperphysik finden kann. Da es sich bei den quantitativen Angaben der Werkstoffeigenschaften in Text und Tabelle meist um allgemein gebräuchliche Werte handelt, ist nur ausnahmsweise auf Originalquellen hingewiesen worden. Für Symbole und Einheiten im MKSA-System haben wir die Empfehlungen der zuständigen Kommission der Internationalen Union für reine und angewandte Physik (IUPAP) zugrunde gelegt.

Dank gebührt den Studenten, die durch viele Bemerkungen und Fragen zur Verbesserung der Vorlesung beigetragen haben. Dem Springer-Verlag sei an dieser Stelle gedankt für die Initiative zur Herausgabe des Vorlesungsmanuskriptes und für die sehr ansprechende Ausstattung des Werkes, und das dann noch zu einem Preis, der das Buch für Studenten nicht unerschwinglich macht.

Inhaltsverzeichnis

I. Aufbau der Stoffe	1
§ 1. Gase	1
§ 2. Die ideale Kristallstruktur	3
§ 3. Polykristalline Stoffe und Kristallfehler	7
II. Dielektrische Werkstoffe	9
§ 4. Polarisierbarkeit und Polarisation	9
§ 5. Dielektrische Verschiebung und Polarisation	11
§ 6. Berechnung der Dielektrizitätszahl bei Gasen	12
6.1. Berechnung der Elektronenpolarisierbarkeit eines Gases	12
6.2. Berechnung der Orientierungspolarisierbarkeit eines Gases	14
§ 7. Zusammenhang zwischen Polarisierbarkeit und Dielektrizitätszahl bei festen Stoffen	16
7.1. Das Lorentz-Feld	16
7.2. Die Clausius-Mossotti-Gleichung	17
§ 8. Temperaturkoeffizient der Dielektrizitätszahl	19
§ 9. Ferroelektrizität	21
§ 10. Piezoelektrizität	22
§ 11. Dielektrische Werkstoffe in elektrischen Wechselfeldern	23
11.1. Relaxation der Orientierungspolarisation	24
11.2. Resonanz der Elektronen- und Ionenpolarisation	27
11.3. Dielektrische Verluste	28
III. Elektronenenergieniveaus in Atomen und Kristallen	30
§ 12. Das Wasserstoffatommodell von BOHR	30
§ 13. Wellencharakter der Elektronenbewegung	32
§ 14. Wellenmechanisches Modell des Wasserstoffatoms	34
§ 15. Elektronenaufbau der Elemente	37
§ 16. Bändermodell für die Elektronenzustände in Kristallen	39
16.1. Aufspaltung der Elektronenenergieniveaus in Kristallen	39
16.2. Tatsächliche Lage der Energiebänder in verschiedenen Kristallen	42
IV. Elektrische Leiter, Halbleiter und Isolatoren	44
§ 17. Klassische Behandlung der freien Elektronen im Metall	44
§ 18. Wellenmechanische Beschreibung der freien Elektronen im Metall	46
18.1. Diskrete Energieniveaus für die Leitungselektronen	46
18.2. Lage des Fermi-Niveaus und Anzahl der möglichen Elektronenzustände in den verschiedenen Energieniveaus bei Metallen	48
18.3. Besetzungsgrad der möglichen Elektronenzustände in Abhängigkeit von der Temperatur	50
§ 19. Eigenhalbleiter	52
19.1. Elektronen- und Löcherleitung	52
19.2. Anzahl der Ladungsträger im Leitfähigkeitsband und im Valenzband	55
19.3. Lage des Fermi-Niveaus beim Eigenhalbleiter	57
19.4. Elektrische Leitfähigkeit von Eigenhalbleitern	58
§ 20. Störstellenhalbleiter	59
20.1. Störstellenleitung	59
20.2. Lage des Fermi-Niveaus beim Störstellenhalbleiter	62
20.3. Elektrische Leitfähigkeit des Störstellenhalbleiters	64
20.4. Bestimmung der Ladungsträgerdichte mit Hilfe des Hall-Effektes	66

§ 21. Halbleiterkontakte	68
21.1. Das Kontaktpotential	68
21.2. $p-n$ -Gleichrichtung	71
21.3. Verstärkungseffekte	74
V. Ferromagnetische Werkstoffe	78
§ 22. Magnetfeld und magnetisches Moment	78
22.1. Das Magnetfeld im Vakuum	78
22.2. Das Magnetfeld in magnetischen Werkstoffen	79
22.2.1. Definition der Magnetisierung eines Werkstoffes	79
22.2.2. Das Magnetfeld im geschlossenen Magnetkreis	80
22.2.3. Das Magnetfeld im offenen Magnetkreis	80
§ 23. Zusammenhang zwischen Induktion und magnetischer Feldstärke in ferro- magnetischen Werkstoffen	84
23.1. Beschreibung der Hystereseschleife	84
23.2. Definition der Permeabilität	87
23.3. Scherung der Hystereseschleife und effektive Permeabilität	89
23.4. Meßmethoden für Hystereseschleifen	93
§ 24. Energie des Magnetfeldes	95
24.1. Die Energie des Magnetfeldes im Vakuum	95
24.2. Die Energie des Magnetfeldes in Anwesenheit von magnetischen Werk- stoffen	96
24.2.1. Allgemeine Berechnung der Feldenergie	96
24.2.2. Die magnetische Energie im geschlossenen Magnetkreis	97
24.2.3. Die magnetische Energie im offenen Magnetkreis	99
24.3. Die magnetische Energie in einigen technisch wichtigen Fällen	101
24.3.1. Hystereseverluste	101
24.3.2. Entmagnetisierungsenergie	102
24.3.3. Gütefaktor eines Dauermagnetwerkstoffes	102
24.3.4. Potentielle Energie eines magnetischen Dipols in einem Magnet- feld	105
§ 25. Erscheinungsformen des Magnetismus	105
25.1. Das Atommodell und der Magnetismus	105
25.2. Diamagnetismus	107
25.3. Paramagnetismus	108
25.4. Ferromagnetismus	109
25.5. Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus	112
25.6. Paramagnetismus oberhalb der Curie-Temperatur	115
§ 26. Magnetische Anisotropien	116
26.1. Kristallanisotropie	116
26.1.1. Hexagonale Kristallanisotropie	116
26.1.2. Kubische Kristallanisotropie	121
26.2. Spannungsanisotropie	123
26.3. Formanisotropie	125
26.4. Technische Anwendungen der magnetischen Anisotropien	125
26.4.1. Dauermagnetwerkstoffe	125
26.4.2. Weichmagnetische Werkstoffe	126
§ 27. Die Bloch-Wand	129
27.1. Beschreibung der Bloch-Wand	129
27.2. Hysterese durch Bloch-Wandbewegungen	131
27.3. Eindomänenteilchen	133
§ 28. Magnetische Werkstoffe in magnetischen Wechselfeldern	134
28.1. Ersatzschaltbild einer verlustbehafteten Spule	134
28.2. Ursachen für Wechselstromverluste in ferromagnetischen Werkstoffen	135
28.3. Ferromagnetische Resonanz	139
Literatur	142
Allgemeine physikalische Konstanten	143
Sachverzeichnis	144

Verzeichnis der verwendeten Symbole

a	Steifheitskonstante	f	Besetzungsgrad
a, b, c	(Kristall-)Abmessungen	f	Frequenz
a, b, c	Hauptachsen eines Ellipsoids	f_L	Larmor-Frequenz
a	Akzeptor-Konzentration(-dichte)	F	Kraft
A	Fläche		
α	Skalenanzeige	g	Proportionalitätsfaktor
α	Winkelcosinus	γ	Raumausdehnungskoeffizient
α	Polarisierbarkeit	γ	magnetomechanisches Verhältnis
α_E	Elektronenpolarisierbarkeit	γ_{Bahn}	magnetomechanisches Verhältnis des Elektrons auf der Kreisbahn: $ e /2m = 8,8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^2/\text{Vs}^2$
α_I	Ionenpolarisierbarkeit	γ_{Spin}	magnetomechanisches Verhältnis des Elektrons bei Eigendrehung: $ e /m = 1,76 \cdot 10^{15} \text{ cm}^2/\text{Vs}^2$
α_{Or}	Orientierungspolarisierbarkeit	γ_W	spezifische Bloch-Wandenergie
b	Reibungsfaktor		
B	magnetische Induktion		
B_r	Remanenzinduktion		
c_V	spezifische Wärme bei konstantem Volumen	h	Plancksches Wirkungsquantum: $6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ $= h/2\pi$
C	Kapazität	\hbar	
C	Curie-Konstante	H	magnetische Feldstärke
χ_e	elektrische Suszeptibilität	H_a	von außen angelegte magnetische Feldstärke
χ_m	magnetische Suszeptibilität	H_i	magnetische Feldstärke am Ort eines atomaren Dipols
d	Abstand	H^A	Anisotropiefeldstärke
d	Donator-Konzentration(-dichte)	H_c	Koerzitivfeldstärke
D	Packungsdichte von Atomen	BH_c	Koerzitivfeldstärke der Induktion
D	dielektrische Verschiebung	JH_c	Koerzitivfeldstärke der magnetischen Polarisation
δ	Bloch-Wanddicke	MH_c	Koerzitivfeldstärke der Magnetisierung
δ	Verlustwinkel, Phasenwinkel	H_L	magnetische Lorentz-Feldstärke
e	Elektronenladung: $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	H_N	entmagnetisierendes Feld
$ e $	Betrag der Elektronenladung: $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	H_W	Weißsches Feld
E	elektrische Feldstärke	I	elektrischer Strom
E_a	von außen angelegte elektrische Feldstärke	$\text{Im}[a]$	Imaginärteil von a
E_i	elektrische Feldstärke am Orte eines atomaren Dipols		
E_L	elektrische Lorentz-Feldstärke	j	$= \sqrt{-1}$, imaginäre Einheit
E_0	Amplitude der harmonischen elektrischen Feldstärke	\hat{j}	mechanischer Drehimpuls
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums oder elektrische Feldkonstante: $8,85 \cdot 10^{-14} \text{ As/Vcm}$	\hat{j}_{Bahn}	mechanischer Bahndrehimpuls
		\hat{j}_{Spin}	Eigendrehimpuls des Elektrons
		J	magnetische Polarisation
ϵ_r	Dielektrizitätszahl	J_r	remanente magnetische Polarisation
$\epsilon_{r, \text{stat}}$	Dielektrizitätszahl bei $\omega = 0$	J_s	Sättigungspolarisation
$\bar{\epsilon}_r$	komplexe Dielektrizitätszahl		
ϵ'_r	Realteil der Dielektrizitätszahl	k	Boltzmann-Konstante: $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws}/^\circ\text{K}$
ϵ''_r	Imaginärteil der Dielektrizitätszahl	K_1, K_2	Anisotropiekonstanten

l	Länge	\bar{p}	zeitlicher Mittelwert der pro Volumeneinheit absorbierten Leistung
l	Nebenquantenzahl	P	elektrische Leistung
L	Induktivität	P	elektrische Polarisation
$L(a)$	Langevin-Funktion von a	P_E	Elektronenpolarisation
L_n	Diffusionslänge der Elektronen	P_I	Ionenpolarisation
λ	Wellenlänge	P_{Or}	Orientierungspolarisation
λ	Magnetostruktionskoeffizient	$P_{Or,stat}$	statischer Endwert der Orientierungspolarisation
λ_s	Sättigungsmagnetostruktionskoeffizient	Φ	magnetischer Fluß
m	Masse eines Teilchens	Φ_0	Austrittspotential
m	Elektronenmasse: $9,1 \cdot 10^{-28}$ g	Φ_E	Elektronenfluß
m_E, eff	effektive Elektronenmasse	Φ_L	Löcherfluß
m_L, eff	effektive Löchermasse	Q	elektrische Ladung
m	magnetisches Moment pro Volumeneinheit	Q	$= 1/\tan \delta$ (Spulen-) Güte
M	Magnetisierung	r	Radius
M_r	remanente Magnetisierung	R	Ohmscher Widerstand
M_s	Sättigungsmagnetisierung	R	Radius (der Elektronenhülle eines Atoms)
M_s	spontane Magnetisierung	$Re[a]$	Realteil von a
μ	Beweglichkeit	R_H	Hall-Koeffizient
μ_E	Elektronenbeweglichkeit	ϱ	Raumladungsdichte
μ_L	Löcherbeweglichkeit	ϱ	spezifischer elektrischer Widerstand
μ	magnetisches Moment	s	Oberflächenladungsdichte
μ_{Bahn}	magnetisches Bahnmoment	S	Stromdichte
μ_{Spin}	magnetisches Spinmoment	σ	Flächenladungsdichte
μ_B	Bohrsches Magneton: $9,27 \cdot 10^{-20}$ Acm ²	σ	mechanische Spannung
μ_0	absolute Permeabilität oder magnetische Feldkonstante: $4\pi \cdot 10^{-9}$ Vs/Acm	σ	elektrische Leitfähigkeit
μ_r	relative Permeabilität	σ_i	elektrische Eigenleitfähigkeit
μ_r, a	relative Anfangspermeabilität	t	Zeit
μ_r, eff	effektive Permeabilität	$\tan \delta$	Verlustfaktor
μ_r, rev	relative reversible Permeabilität	$\tan \delta_H$	Hystereseverlustfaktor
$\bar{\mu}_r$	komplexe relative Permeabilität	$\tan \delta_R$	Restverlustfaktor
μ'_r	Realteil der komplexen relativen Permeabilität	$\tan \delta_W$	Wirbelstromverlustfaktor
μ''_r	Imaginärteil der komplexen relativen Permeabilität	T	Drehmoment
n	1, 2, 3, ... n ; Zahl	T	Temperatur
n	Anzahl der Teilchen pro Volumeneinheit	T_C	ferromagnetische Curie-Temperatur
n	Hauptquantenzahl	TK_e	Temperaturkoeffizient der Dielektrizitätszahl
n_z	Elektronenzustände pro Vol.-Einh. unterhalb einer bestimmten Elektronenenergie W	TK_μ	Temperaturkoeffizient der Werkstoffpermeabilität
n_E	Elektronendichte im Leitfähigkeitsband	$(TK_\mu)_{eff}$	Temperaturkoeffizient der effektiven Permeabilität
n_L	Löcherdichte im Valenzband	TK_L	Temperaturkoeffizient der Induktivität
N	Entmagnetisierungsfaktor	Θ	Winkel
N	Windungszahl	Θ	paramagnetische Curie-Temperatur
ω	Kreisfrequenz	τ	Zeitkonstante, Relaxationszeit
ω_L	Larmor-Kreisfrequenz	τ_E	Relaxationszeit der Elektronen
ω_{res}	Resonanzkreisfrequenz	τ_L	Relaxationszeit der Löcher
p	Impuls	U	elektrische Spannung
p	elektrisches Dipolmoment	U_H	Hall-Spannung
p_D	Anzahl der ionisierten Donatoratome pro Volumeneinheit	U_K	Kontaktspannung

v	Geschwindigkeit	W_D	Energie des Donatorniveaus
v_D	Driftgeschwindigkeit	W_F	Fermi-Energie
V	Volumen	$W_{F,0}$	Fermi-Energie bei $T = 0^\circ \text{ K}$
V	Vakuumpotential	W_K	Kontaktpotential
		\tilde{W}_K	Kristallanisotropieenergie
		W_L	Energie des unteren Randes des Leitfähigkeitsbandes
w	Windungszahl pro Längeneinheit	W_N	Entmagnetisierungsenergie
w	Energiedichte (Energie pro Volumeneinheit)	W_V	Energie des oberen Randes des Valenzbandes
w_{kin}	kinetische Energiedichte	W_W	Bloch-Wandenergie
w_{pot}	potentielle Energiedichte		
w_K	Kristallanisotropieenergiedichte	x, y, z	Kartesische Koordinaten
w_N	Entmagnetisierungsenergie-dichte		
w_σ	Spannungsanisotropieenergiedichte	z	Anzahl
W	Energie	z	Ordnungszahl der Atome
W_{kin}	kinetische Energie	$z(W)$	Zustandsdichte der Elektronen
W_{pot}	potentielle Energie	z_E	Zustandsdichte der Elektronen im Leitfähigkeitsband
W_A	Energie des Akzeptorniveaus	z_L	Zustandsdichte der Löcher im Valenzband
W_A	Austauschwechselwirkungsenergie	Z	komplexer Scheinwiderstand
W_B	Breite der verbotenen Energiezone		