
Springer-Lehrbuch

Holger Göbel • Henning Siemund

Übungsaufgaben zur Halbleiter-Schaltungstechnik

3., aktualisierte Auflage

Holger Göbel
Henning Siemund

Elektronik, Fakultät ET
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland

OnlinePLUS Material zu diesem Buch finden Sie auf
<http://www.springer-vieweg.de/978-3-642-53902-2>

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-53902-2

ISBN 978-3-642-53903-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-53903-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, 2011, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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 dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Buch *Übungsaufgaben zur Halbleiter-Schaltungstechnik* wurde als Ergänzung zu dem Lehrbuch *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik* konzipiert, welches ebenfalls im Springer-Verlag erschienen ist und mittlerweile in der zweiten Auflage vorliegt. Das Übungsbuch kommt damit dem berechtigten Wunsch vieler Studierender entgegen, zu einem Lehrbuch auch eine Sammlung von Übungsaufgaben zu erhalten, die der Vertiefung des Lehrstoffes und der Überprüfung des Gelernten dienen. Die Autoren haben sich dabei bewusst für eine Trennung zwischen Lehr- und Übungsbuch entschieden, statt die Aufgaben in das Lehrbuch zu integrieren. Der Grund dafür ist zum einen, dass nicht alle Leser eines Lehrbuches auch Übungsaufgaben benötigen und zum anderen, dass das Übungsbuch so auch unabhängig vom Lehrbuch erworben und genutzt werden kann.

Die enge Beziehung zwischen dem Lehr- und dem Übungsbuch spiegelt sich dabei auch im Aufbau des Übungsbuches wider. So wird nicht nur der gleiche Stoff – von der Halbleiterphysik über die wichtigsten Bauelemente bis hin zu analogen und digitalen Schaltungen sowie deren Herstellung – abgedeckt, sondern es wurden auch die Kapitelbezeichnungen aus dem Lehrbuch übernommen, um dem Leser die Orientierung zu erleichtern. Die einzelnen Kapitel sind so gestaltet, dass sie jeweils mit einer Zusammenstellung der wichtigsten Formeln beginnen, so dass die Aufgaben auch ohne das Lehrbuch gelöst werden können. Es folgen dann die einzelnen Aufgaben mit ausführlichen Lösungen, wobei die Aufgabenstellungen im Sinne der Übersichtlichkeit grau hinterlegt sind. Bei den Lösungen wird an geeigneten Stellen auf das Lehrbuch verwiesen, wenn dort weiterführende Erklärungen oder Herleitungen zu finden sind. Dazu ist an den entsprechenden Stellen im Übungsbuch ein Icon (siehe rechte Randspalte) angebracht, welches auf den entsprechenden Abschnitt im Lehrbuch (hier z.B. Abschn. 1.2.3) verweist. Ebenfalls verwendet das Übungsbuch die bereits aus dem Lehrbuch bekannten Icons für Verweise auf Simulationsdateien für das Schaltungssimulationsprogramm PSpice



sowie auf Applets des Lehr- und Lernprogrammes S.m.i.L.E. Beide Programme sind Bestandteil der beiliegenden CD-ROM. Auf ein Literaturverzeichnis wurde bei dem vorliegenden Übungsbuch bewusst verzichtet, da alle nötigen Herleitungen in dem Lehrbuch zu finden sind und dort auch weiterführende Literatur zu den einzelnen Kapiteln angegeben ist.

Bedanken möchten sich die Autoren an dieser Stelle bei allen, die zum Entstehen dieses Werkes beigetragen haben. Dies gilt vor allem für den Springer-Verlag sowie die Firma Le-TeX für die Unterstützung, die gute Zusammenarbeit und die Geduld bis zur Fertigstellung des Manuskripts.

Hamburg, im Sommer 2007

H. Göbel, H. Siemund

Vorwort zur zweiten Auflage

Die zweite Auflage des vorliegenden Übungsbuches wurde um ein Kapitel über optoelektronische Bauelemente ergänzt und in einigen Bereichen überarbeitet. Als weitere Neuerung sind das interaktive Lernprogramm S.m.i.L.E sowie die Studentenversion des Schaltungssimulators PSpice inklusive der zu den einzelnen Übungsaufgaben gehörigen Simulationsdateien nun als Online-Materialien auf dem Extrasserver des Springer-Verlages verfügbar.

Die aus der ersten Auflage bekannten Icons für Verweise beziehen sich auf die inzwischen erschienene 4. Auflage des Lehrbuches *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik* von Holger Göbel.

Dank gebührt an dieser Stelle wieder dem Springer-Verlag und der Firma Le-TeX für die gewohnt professionelle Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit.

Hamburg, im Sommer 2011

H. Göbel, H. Siemund

Vorwort zur dritten Auflage

Neben kleineren Korrekturen besteht die wesentliche Neuerung der dritten Auflage des vorliegenden Übungsbuches darin, dass das interaktive Lernprogramm S.m.i.L.E nunmehr von der Webseite <http://smile.hsu-hh.de> aufzurufen ist. Durch diese Maßnahme ist sichergestellt, dass dem Leser stets die aktuelle Version des Programms vorliegt.

Die Studentenversion des Schaltungssimulators PSpice inklusive der zu den einzelnen Übungsaufgaben gehörigen Simulationsdateien sind hingegen weiterhin als Online-Materialien auf dem Extrasserver des Springer-Verlages verfügbar.

Hamburg, im Frühjahr 2014

H. Göbel, H. Siemund

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Symbole	XI
1 Grundlagen der Halbleiterphysik	1
1.1 Formelsammlung	1
1.2 Verständnisfragen zur Halbleiterphysik	3
1.3 Dotierter Halbleiter	7
1.4 Fermi-niveau und freie Ladungsträger	9
1.5 Störung des thermodynamischen Gleichgewichts	12
2 Diode	17
2.1 Formelsammlung	17
2.2 Verständnisfragen zur Diode	18
2.3 pn-Übergang	22
2.4 Diodenschaltungen	29
2.5 Schaltverhalten	34
3 Bipolartransistor	39
3.1 Formelsammlung (nnp-Transistor)	39
3.2 Verständnisfragen zum Bipolartransistor	41
3.3 npn-Transistor	47
3.4 Transistorschaltung	53
3.5 Schaltverhalten	55
4 Feldeffekttransistor	61
4.1 Formelsammlung	61
4.2 Verständnisfragen zum Feldeffekttransistor	62
4.3 n-Kanal MOSFET	68
4.4 MOS-Inverter	72
4.5 CMOS-Inverter	77
4.6 Schaltungen mit MOS-Feldeffekttransistoren	81

5	Optoelektronische Bauelemente	85
5.1	Verständnisfragen zu optoelektronischen Bauelementen	85
5.2	Radiometrische und fotometrische Größen	87
5.3	Fotowiderstand	89
5.4	Solarzelle	92
5.5	Luminiszenzdiode	100
6	Der Transistor als Verstärker	107
6.1	Verstärker mit n-Kanal MOSFET	107
6.2	Arbeitspunkteinstellung mit 4-Widerstandsnetzwerk	116
6.3	Stromspiegel mit npn-Bipolartransistoren	119
6.4	Verstärker mit npn-Bipolartransistor	124
7	Transistorgrundsaltungen	129
7.1	Einstufiger Verstärker mit MOSFET	129
7.2	Zweistufiger Verstärker	134
7.3	Gateschaltung	142
7.4	Push-Pull Ausgangsstufe	150
8	Operationsverstärker	155
8.1	Übertragungsverhalten im Frequenzbereich	155
8.2	Übertragungsverhalten im Zeitbereich	156
8.3	Stromquelle, Großsignalverhalten	158
8.4	Stromquelle, Kleinsignalverhalten	160
8.5	Analogrechenschaltung	161
8.6	Messverstärker	165
8.7	Nichtlineare Verstärkerschaltung	167
8.8	Schmitt-Trigger	169
9	Frequenzverhalten analoger Schaltungen	173
9.1	Formelsammlung	173
9.2	Komplexe Übertragungsfunktion	175
9.3	Übertragungsverhalten einer Verstärkerschaltung	179
9.4	Sourceschaltung	183
9.5	Gateschaltung	188
10	Rückkopplung in Verstärkern	195
10.1	Formelsammlung	195
10.2	Serien-Parallel-Rückkopplung	196
10.3	Spannungsverstärker	197
10.4	Transimpedanzverstärker	204
10.5	Stabilität	211
10.6	Wien-Brücken-Oszillator	213
10.7	Ring-Oszillator	217

11 Logikschaltungen	221
11.1 Formelsammlung	221
11.2 Entwurf von CMOS-Gattern (I)	222
11.3 Entwurf von CMOS-Gattern (II)	226
11.4 C ² MOS-Technologie	231
11.5 Treiberschaltung für große kapazitive Lasten	233
12 Herstellung integrierter Schaltungen in CMOS-Technik	239
12.1 Layout-Analyse	239
12.2 Layout-Synthese	241
13 Anhang	245
13.1 Normreihen für Bauteilnennwerte	245

Liste der verwendeten Symbole

Formelzeichen

Name	Bedeutung	Einheit
a, A	Übertragungsfunktion	
$A(s)$	komplexe Übertragungsfunktion	
$A(j\omega)$	Frequenzgang	
$ A(j\omega) $	Amplitudengang	
a^*	Übertragungsfunktion der erweiterten Schaltung	
A	Fläche	m^2
A_u	Spannungsverstärkung	1
$A_{u'}$	Spannungsverstärkung der vereinfachten Schaltung	1
B_N	Stromverstärkung im Normalbetrieb	1
B_I	Stromverstärkung im Inversbetrieb	1
C	Kapazität	F
C_L	Lastkapazität	F
C_{ox}	Oxidkapazität	F
C'	Kapazität pro Fläche	Fm^{-2}
C_{BE}	Basis-Emitterkapazität	F
C_{BC}	Basis-Kollektorkapazität	F
C_d	Diffusionskapazität	F
C_j	Sperrschichtkapazität	F
C_{j0}	Sperrschichtkapazität bei $U_{pn} = 0 \text{ V}$ Sperrspannung	F
d_{ox}	Oxiddicke	m
D_n	Diffusionskoeffizient der Elektronen	m^2s^{-1}
D_p	Diffusionskoeffizient der Löcher	m^2s^{-1}
E	Elektrische Feldstärke	Vm^{-1}
E_e	Bestrahlungsstärke	W m^{-2}
E_{max}	Maximalwert der elektrischen Feldstärke	Vm^{-1}
E_v	Beleuchtungsstärke	lx

XII Liste der verwendeten Symbole

E_{ph}	Photonenbestrahlungsstärke	$s^{-1}m^{-2}$
$F(W)$	Fermiverteilung	1
g_D	Diodenleitwert	AV^{-1}
g_m	Steilheit	AV^{-1}
g_π	Transistoreingangsleitwert	AV^{-1}
g_0	Transistorausgangsleitwert	AV^{-1}
G	Generationsrate	$m^{-3}s^{-1}$
G	Gleichtaktunterdrückung	1
G_{ph}	Fotogenerationsrate	$m^{-3}s^{-1}$
i	Impuls	$kgms^{-1}$
i	Kleinsignalstrom	A
I	Strom, allgemein	A
$I]$	Quellenvektor	A
I_B	Basisstrom	A
I_C	Kollektorstrom	A
I_{DS}	Drain-Source-Strom	A
I_e	Strahlstärke	$W sr^{-1}$
I_E	Emitterstrom	A
I_G	Gatestrom	A
I_{ph}	Fotostrom	A
I_{pp}	primärer Fotostrom	A
I_v	Lichtstärke	cd
I_S	Sperrstrom der Diode	A
I_S	Transfersättigungsstrom des Bipolartransistors	A
I_T	Transferstrom des Bipolartransistors	A
j	Stromdichte	Am^{-2}
j	imaginäre Einheit	
j_{Diff}	Diffusionsstromdichte	Am^{-2}
j_{Drift}	Driftstromdichte	Am^{-2}
j_{ges}	Gesamtstromdichte	Am^{-2}
j_n	Elektronenstromdichte	Am^{-2}
j_p	Löcherstromdichte	Am^{-2}
k	Rückkopplungsfaktor	
k_n	Verstärkungsfaktor des Prozesses (n-MOS)	AV^{-2}
k_p	Verstärkungsfaktor des Prozesses (p-MOS)	AV^{-2}
l	Länge, allgemein	m
l	Kanallänge des Feldeffekttransistors	m
L_e	Strahldichte	$W sr^{-1}m^{-2}$
L_n	Diffusionslänge der Elektronen	m
L_p	Diffusionslänge der Löcher	m
L_v	Leuchtdichte	cdm^{-2}
M	Kapazitätskoeffizient	1
n	Elektronendichte	m^{-3}
n	Nullstelle der Übertragungsfunktion	$rad s^{-1}$

n_B	Elektronendichteverteilung in der Basis	m^{-3}
n_i	Intrinsicdichte	m^{-3}
n_n	Elektronendichte im n-Gebiet	m^{-3}
n_p	Elektronendichte im p-Gebiet	m^{-3}
n_0	Elektronendichte im thermodynamischen Gleichgewicht	m^{-3}
n'	Überschusselektronendichte	m^{-3}
N	Emissionskoeffizient	1
$N(W)$	Zustandsdichte	m^{-3}
N_A	Akzeptordichte	m^{-3}
N_C	Äquivalente Zustandsdichte an der Leitungsbandkante	m^{-3}
N_D	Donatordichte	m^{-3}
N_V	Äquivalente Zustandsdichte an der Valenzbandkante	m^{-3}
p	Löcherdichte	m^{-3}
p	Polstelle der Übertragungsfunktion	rad s^{-1}
p'	Überschusslöcherdichte	m^{-3}
p_n	Löcherdichte im n-Gebiet	m^{-3}
p_p	Löcherdichte im p-Gebiet	m^{-3}
p_0	Löcherdichte im thermodynamischen Gleichgewicht	m^{-3}
Q	Ladung, allgemein	As
Q_d	Diffusionsladung	As
Q_j	Sperrschichtladung	As
r_π	Transistoreingangswiderstand	VA^{-1}
r_0	Transistorausgangswiderstand	VA^{-1}
R	Rekombinationsrate	$m^{-3}\text{s}^{-1}$
R	Widerstand, allgemein	VA^{-1}
R_a	Lastwiderstand	VA^{-1}
R_{aus}	Ausgangswiderstand	VA^{-1}
R_{aus}'	Ausgangswiderstand der vereinfachten Schaltung	VA^{-1}
R_{aus}^*	Ausgangswiderstand der erweiterten Schaltung	VA^{-1}
R_e	Quellwiderstand	VA^{-1}
R_{ein}	Eingangswiderstand	VA^{-1}
R_{ein}'	Eingangswiderstand der vereinfachten Schaltung	VA^{-1}
R_{ein}^*	Eingangswiderstand der erweiterten Schaltung	VA^{-1}
R_k	Rückkopplungswiderstand	VA^{-1}
R_\square	Flächenwiderstand	VA^{-1}
t_f	Abfallzeit	s
t_r	Anstiegszeit	s
t_S	Speicherzeit	s
T	Temperatur	K
u	Kleinsignalspannung	V
U	Spannung, allgemein	V
$U]$	Knotenpotentialvektor	V
U_a	Ausgangsspannung	V
u_a	Kleinsignalausgangsspannung	V

XIV Liste der verwendeten Symbole

$u_{a'}$	Kleinsignalausgangsspng. der vereinfachten Schaltung	V
U_{AN}	Early-Spannung	V
U_{br}	Durchbruchspannung	V
U_B	Versorgungsspannung	V
U_{B+}	Positive Versorgungsspannung	V
U_{B-}	Negative Versorgungsspannung	V
U_{BC}	Basis-Kollektor-Spannung	V
U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung	V
$U_{CE_{sat}}$	Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung	V
U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung	V
U_{DS}	Drain-Source-Spannung	V
$U_{DS,sat}$	Drain-Source-Sättigungsspannung	V
U_e	Eingangsspannung	V
u_e	Kleinsignaleingangsspannung	V
$u_{e'}$	Kleinsignaleingangsspng. der vereinfachten Schaltung	V
U_{GS}	Gate-Source-Spannung	V
U_K	Kanalpotenzial	V
U_{ox}	Spannung über dem Gateoxid	V
U_{pn}	Spannung über dem pn-Übergang	V
U_{SB}	Source-Bulk-Spannung	V
U_{Th}	Einsatzspannung	V
v_n	Driftgeschwindigkeit der Elektronen	m s^{-1}
v_p	Driftgeschwindigkeit der Löcher	m s^{-1}
w	Weite, allgemein	m
w_E	Emitterweite	m
W	Energie, allgemein	eV
w_n	Länge des neutralen n-Gebietes	m
w_p	Länge des neutralen p-Gebietes	m
W_A	Akzeptorniveau	eV
W_D	Donatorniveau	eV
W_C	Energieniveau der Leitungsbandkante	eV
W_D	Donatorniveau	eV
W_{em}	Energie eines emittierten Photons	eV
W_{Ex}	Austrittsarbeit	eV
W_F	Ferminiveau	eV
W_g	Bandabstand	eV
W_i	Intrinsicniveau	eV
$W_{kin,n}$	Kinetische Energie der Elektronen	eV
W_{ph}	Photonenenergie	eV
W_V	Energieniveau der Valenzbandkante	eV
W_X	Elektronenaffinität	eV
x_B	Basisweite	m
x_n	Ausdehnung der Raumladungszone im n-Gebiet	m
x_p	Ausdehnung der Raumladungszone im p-Gebiet	m
$[Y]$	Leitwertmatrix	AV^{-1}

β_n	Verstärkungsfaktor des n-Kanal MOSFET	AV^{-2}
β_p	Verstärkungsfaktor des p-Kanal MOSFET	AV^{-2}
β_N	Kleinsignalstromverstärkung des Bipolartransistors	1
ε_r	Relative Dielektrizitätszahl	1
η	Wirkungsgrad, allgemein	1
η_{inj}	Injektionswirkungsgrad	1
η_{opt}	optischer Wirkungsgrad	1
η_q	Quantenwirkungsgrad	1
η_P	Leistungswirkungsgrad	1
$\eta_{q,ext}$	externer Quantenwirkungsgrad	1
$\eta_{q,int}$	interner Quantenwirkungsgrad	1
μ_n	Beweglichkeit der Elektronen	$m^2V^{-1}s^{-1}$
μ_p	Beweglichkeit der Löcher	$m^2V^{-1}s^{-1}$
φ	Phase	°
$\varphi(j\omega)$	Phasengang	°
φ_R	Phasenrand	°
Φ_e	Strahlungsleistung	W
Φ_i	Diffusionspotenzial	V
Φ_K	Kontaktpotenzial	V
Φ_{ph}	Photonenstrom	s^{-1}
Φ_v	Lichtstrom	lm
ρ	Ladungsdichte	$As\ m^{-3}$
σ	Elektrische Leitfähigkeit	$AV^{-1}m^{-1}$
σ_n	Flächenladungsdichte	$As\ m^{-2}$
τ_n	Lebensdauer der Elektronen	s
τ_N	Transitzeit im Normalbetrieb	s
τ_I	Transitzeit im Inversbetrieb	s
τ_p	Lebensdauer der Löcher	s
τ_T	Transitzeit	s
ω	Kreisfrequenz, allgemein	$rad\ s^{-1}$
ω_β	Beta-Grenzfrequenz	$rad\ s^{-1}$
ω_H	obere Grenzfrequenz	$rad\ s^{-1}$
ω_L	untere Grenzfrequenz	$rad\ s^{-1}$
ω_T	Transitfrequenz	$rad\ s^{-1}$

Sonstige Symbole

Name **Bedeutung**

//	Parallelschaltung
·	logische UND-Verknüpfung
+	logische ODER-Verknüpfung

Physikalische Konstanten

Name	Bedeutung	Wert
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2,997 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$
h	Planck'sches Wirkungsquantum	$4,135 \times 10^{-15} \text{eVs}$
q	Elementarladung	$1,6 \times 10^{-19} \text{As}$
k	Boltzmann-Konstante	$1,38 \times 10^{-23} \text{J K}^{-1}$
ε_0	Dielektrizitätszahl des Vakuums	$8,854 \times 10^{-12} \text{AsV}^{-1} \text{m}^{-1}$

Materialeigenschaften von Silizium

Name	Bedeutung	Wert bei $T = 300 \text{K}$
W_G	Bandabstand	1,1 eV
ε_r	relative Dielektrizitätszahl von Si	11,9
ε_{ox}	relative Dielektrizitätszahl von SiO_2	3,9
n_i	Intrinsicdichte	$1,5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$
N_C	Äquivalente Zustandsdichte	$2,8 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$
N_V	Äquivalente Zustandsdichte	$1,04 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$
μ_n	Beweglichkeit der Elektronen	$0,135 \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
μ_p	Beweglichkeit der Löcher	$0,048 \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$