

Halbleiter-Elektronik  
Herausgegeben von W. Heywang und R. Müller  
Band 14



K. Horninger

# Integrierte MOS-Schaltungen

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 189 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo 1987

Dr. techn. KARLHEINRICH HORNINGER  
Fachgruppenleiter, Siemens AG,  
Zentrale Aufgaben Informationstechnik, München

Dr. rer. nat. WALTER HEYWANG  
Leiter der Zentralen Forschung und Entwicklung der Siemens AG,  
München  
Professor an der Technischen Universität München

Dr. techn. RUDOLF MÜLLER  
Professor, Inhaber des Lehrstuhls für Technische Elektronik  
der Technischen Universität München

ISBN-13:978-3-540-17035-8      e-ISBN-13:978-3-642-82905-5  
DOI: 10.1007/978-3-642-82905-5

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek.  
Horninger, Karlheinz:  
Integrierte MOS-Schaltungen / K. Horninger. - 2., überarb. u. erw. Aufl. -  
Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springer, 1987.  
(Halbleiter-Elektronik; Bd. 14)  
1. Aufl. u. d. T.: Weiss, Herbert: Integrierte MOS-Schaltungen  
ISBN-13:978-3-540-17035-8

NE: GT

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die »Verwertungsgesellschaft Wort«, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1982 and 1987

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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.

2362/3020-543210

## Vorwort zur zweiten Auflage

Getragen durch das große Interesse an integrierten MOS-Schaltungen und den dazugehörigen Grundlagen war die erste Auflage dieses Buches im Zeitraum von ca. 2,5 Jahren ausverkauft.

In dieser Zeit hat sich in fast allen Bereichen der MOS-Technik die CMOS-Technologie als leistungsarme MOS-Technologie durchgesetzt. Neuentwicklungen, seien es Speicher, Mikroprozessoren oder Analog-Schaltungen, werden heutzutage fast ausschließlich in der CMOS-Technik realisiert. Die Neuauflage versucht diesem Trend Rechnung zu tragen und hat vornehmlich im Abschnitt 4 eine Vielzahl von Schaltungsbeispielen in CMOS-Technik. Darüberhinaus wurde auch der Abschnitt über kundenspezifische integrierte Schaltungen, die immer mehr an Bedeutung gewinnen, erweitert.

Ich hoffe, daß auch diese überarbeitete Auflage einen breiten Interessenkreis finden wird und für viele Anfänger der erste Kontakt mit dieser faszinierenden Technik ist. Gleichzeitig möchte ich mich auch bei vielen meiner Kollegen bedanken, die mir Ideen und Anregungen für Ergänzungen und Erweiterungen dieses Buches gegeben haben. Für das Schreiben des Manuskripts möchte ich mich bei Frau Scherbarth, für die sorgfältige Drucklegung beim Springer-Verlag sehr herzlich bedanken.

München, im Sommer 1986

K. Horninger

# Vorwort

Innerhalb von etwa 20 Jahren seit dem Erscheinen der ersten integrierten Schaltungen auf dem Markt erreicht die MOS-Technik heute den höchsten Grad der Integration in der Halbleitertechnik. Die Gründe für diese stürmische Entwicklung sind neben der Möglichkeit, MOS-Transistoren sehr dicht zu packen, auch das einfache Prinzip und der einfache Aufbau des MOS-Transistors.

Der Zweck dieses Buches ist es, einen Überblick über die MOS-Technik sowie die mit ihr verbundenen Möglichkeiten zu geben. Es wendet sich gleichermaßen an den Technologen wie an den Schaltungsingenieur, die gemeinsam eine integrierte Schaltung entwickeln und herstellen. Mit steigendem Integrationsgrad wird es jedoch möglich, ganze Systeme auf dem Chip zu integrieren. Das Buch wendet sich daher auch an den Systemarchitekten, der eine Schaltung konzipiert, und der über die technologischen und schaltungstechnischen Grundlagen Bescheid wissen sollte, da die Voraussetzung zum Gelingen eines hochkomplexen VLSI Schaltkreises die Kenntnis der Probleme des Partners ist.

Das Buch wendet sich aber auch an Studenten der Physik, der Elektrotechnik und der Informatik, die sich neu in das Gebiet der integrierten MOS-Schaltungen einarbeiten wollen. Besonders für sie werden daher nach einer eingehenden Betrachtung des MOS-Kondensators die Grundstruktur des MOS-Transistors sowie die aus diesem abgeleiteten Bauelemente beschrieben. Die Herstellungstechniken sowie die dabei auftretenden Probleme werden erläutert. Anschließend werden die Schaltungstechniken von integrierten MOS-Schaltungen und ihre Entwurfstechniken eingehend behandelt.

Den Herren E. Musil, R. Hezel, N. Lieske, H. Klar und H.-J. Pfeleiderer sowie Prof. K. Goser danke ich auch im Namen meines verstorbenen Koautors für wertvolle Anregungen und kritische Anmerkungen zum Manuskript. Den Damen H. Berger, R. Röhrich und G. Voikmann sowie meiner Frau möchte ich an dieser Stelle für das Schreiben des Manuskripts danken. Dem Springer-Verlag sei für die Betreuung und Sorgfalt bei der Drucklegung des Buches besonderer Dank gesagt.

München, im Sommer 1982

K. Horninger

# Inhaltsverzeichnis

<u>Bezeichnungen und Symbole</u> . . . . .	11
<u>1 Einleitung</u> . . . . .	15
Literatur zu 1 . . . . .	22
<u>2 MOS-Bauelemente</u> . . . . .	23
2.1 Arten von MOS-Transistoren . . . . .	25
2.2 MOS-Kondensator . . . . .	28
2.3 Kapazität des MOS-Kondensators . . . . .	34
2.4 Kennlinien des MOS-Transistors . . . . .	45
2.5 Verfeinerte Theorie . . . . .	54
2.6 Dynamisches Verhalten . . . . .	69
2.7 Ladungsverschiebeelemente (CCD) . . . . .	76
2.8 Transistoren mit veränderlicher Schwellenspannung . . . . .	85
2.9 Rauschen des MOS-Transistors . . . . .	89
2.10 Temperaturverhalten des MOS-Transistors . . . . .	91
Literatur zu 2 . . . . .	92
<u>3 MOS-Techniken</u> . . . . .	95
3.1 Aluminium-Gate-Technik mit p-Kanal . . . . .	95
3.2 Silizium-Gate-Technik mit n-Kanal . . . . .	104
3.3 Komplementäre Techniken . . . . .	108
3.4 Ionenimplantation . . . . .	114
3.5 DMOS- und VMOS-Technik . . . . .	119
3.6 Herstellung der Masken . . . . .	122
3.7 Feine Strukturen . . . . .	125
Literatur zu 3 . . . . .	133

<u>4 MOS-Grundsaltungen</u> .....	135
4.1 Der Inverter in statischer Technik .....	135
4.1.1 Übertragungsfunktionen des Inverters .....	137
4.1.2 Schaltzeiten des MOS-Inverters .....	152
4.1.3 Störsicherheit .....	163
4.1.4 Vergleich der verschiedenen Inverterarten .....	165
4.1.5 Der MOS-Transistor als Transferelement (Transfergatter) .....	167
4.2 Der Inverter in dynamischer Technik .....	169
4.2.1 Der Inverter mit getakteten Lastelementen .....	169
4.2.2 Der Bootstrap-Inverter .....	170
4.3 Bistabile MOS-Schaltungen .....	175
4.4 MOS-Logik in statischer Technik .....	183
4.4.1 Einfache Gatter in MOS .....	183
4.4.2 Addierstufen in statischer Technik .....	191
4.5 MOS-Logik in dynamischer Technik .....	198
4.6 MOS-Schieberegister .....	203
4.6.1 Schieberegister in dynamischer Technik .....	204
4.6.2 Schieberegister in statischer Technik .....	211
4.6.3 Zähler .....	213
4.6.4 Schieberegister für Analogsignale .....	215
4.7 Speicherschaltungen .....	225
4.7.1 Speicher mit dynamischer Informations- speicherung .....	227
4.7.2 Speicher mit statischer Informations- speicherung .....	233
4.7.3 Speicher mit nichtflüchtiger Informations- speicherung .....	236
4.7.4 Peripherieschaltung für Halbleiterspeicher .....	238
4.7.5 Strahlungsempfindlichkeit .....	255
4.8 MOS-Analogschaltungen .....	257
4.8.1 Das Kleinsignalersatzschaltbild .....	259
4.8.2 MOS-Analogverstärker .....	262
4.8.3 MOS-Operationsverstärker .....	266
4.8.4 Filterschaltungen .....	268
Literatur zu 4 .....	278



<u>5 Entwurfstechnik für integrierte MOS-Schaltungen</u> . . . . .	280
5.1 Rechnerunterstützte Analyseverfahren und -programme . . .	280
5.2 Entwurfsunterlagen . . . . .	289
5.3 Geometrischer Entwurf (Layout). . . . .	291
5.3.1 Erstellen des Layouts . . . . .	291
5.3.2 Hilfsmittel für die Erstellung des Layouts . . . . .	297
5.4 Datenaufnahme . . . . .	297
Literatur zu 5 . . . . .	298
<u>6 Schaltungsarten</u> . . . . .	300
6.1 Festverdrahtete Schaltungen. . . . .	300
6.2 Programmierbare Schaltungen . . . . .	306
6.3 Programmgesteuerte Schaltungen . . . . .	309
6.4 Entwicklungsablauf bei den verschiedenen Schaltungsarten . . . . .	313
6.5 Die Bedeutung der Software. . . . .	316
6.6 Abgrenzung der Lösungswege . . . . .	317
6.7 Entwicklungstrends . . . . .	320
6.8 Ausbeute und Redundanz . . . . .	321
6.9 Prüffreundlicher Entwurf . . . . .	327
6.9.1 Gründe für das Prüfproblem . . . . .	328
6.9.2 Grundprinzipien für einen prüffreundlichen Entwurf . . . . .	329
6.10 Analyse integrierter Schaltkreise mit dem Elektronenstrahl . . . . .	335
6.10.1 Eigenschaften der Elektronensonde. . . . .	336
6.10.2 Abbildung mit Hilfe des Elektronenstrahls . . . . .	336
6.10.3 Messung mit Hilfe des Elektronenstrahls . . . . .	340
6.10.4 Übersicht über Prüfmethode n . . . . .	341
Literatur zu 6 . . . . .	342
<u>7 Ausblick</u> . . . . .	345
Literatur zu 7 . . . . .	350
<u>Sachverzeichnis</u> . . . . .	351

## Bezeichnungen und Symbole

a	Konstante	
$C_{\text{ox}}$	spezifische Kapazität der $\text{SiO}_2$ -Schicht	$\text{AsV}^{-1}\text{m}^{-2}$
$C_{\text{Si}}$	spezifische Kapazität der Raumladungsschicht im Si	$\text{AsV}^{-1}\text{m}^{-2}$
D	Drain	
$\Delta E$	Breite der verbotenen Zone	eV
$d_{\text{R}}$	Dicke der Raumladungsschicht im Halbleiter	m
$d_{\text{ox}}$	Dicke der $\text{SiO}_2$ -Schicht	m
G	differentieller Leitwert: $df_{\text{D}}/dU_{\text{DS}}$	$\text{AV}^{-1}$
$I_{\text{D}}$	Drainstrom	A
K	Transistorkonstante (2.20)	$\text{AV}^{-2}$
$K_{\text{p}}$	für p-Kanal: $5 \cdot 10^{-6}$	$\text{AV}^{-2}$
$K_{\text{n}}$	für n-Kanal: $15 \cdot 10^{-6}$	$\text{AV}^{-2}$
L	Länge des Kanals eines MOS-Transistors	m
$n_{\text{a}}$	Konzentration der Akzeptoren im Si	$\text{m}^{-3}$
$n_{\text{d}}$	Konzentration der Donatoren im Si	$\text{m}^{-3}$
$n_{\text{f}}$	Dichte der festen Ladungen im $\text{SiO}_2$	$\text{m}^{-2}$
$n_{\text{ss}}$	Dichte der umladbaren Grenzflächenzustände	$\text{m}^{-2}\text{V}^{-1}$
n	Elektronenkonzentration	$\text{m}^{-3}$
$n_0$	Elektronenkonzentration im thermischen Gleichgewicht	$\text{m}^{-3}$

$n_i$	Eigenleitungskonzentration: bei Raumtemperatur $1,5 \cdot 10^{16}$	$m^{-3}$
$p$	Löcherkonzentration	$m^{-3}$
$p_0$	Löcherkonzentration im thermischen Gleichgewicht	$m^{-3}$
$Q_f$	Dichte der festen Ladungen im Oxid	$Asm^{-2}$
$Q_i$	Dichte der beweglichen Ladungen in der Inversionsschicht	$Asm^{-2}$
$Q_{Si}$	Dichte der Ladungen im Halbleiter; bezogen auf die Oberfläche	$Asm^{-2}$
$Q_{SS}$	Ladungsdichte der umladbaren Oberflächenzustände	$, Asm^{-2}V^{-1}$
$R_L$	Lastwiderstand	$VA^{-1}$
$S$	Source	-
$S$	Steilheit: $dI_D/dU_{GS}$	$AV^{-1}$
Sub	Substrat	-
$T_L$	Lasttransistor	-
$T_S$	Schalttransistor	-
$U$	Spannung	$V$
$U_A$	Ausgangsspannung beim Inverter	$V$
$U_D$	Drain-Spannung	$V$
$U_{DS}$	Spannung zwischen Drain und Source	$V$
$U_E$	Eingangsspannung beim Inverter	$V$
$U_{FB}$	Flachbandspannung	$V$
$U_G$	Gate-Spannung	$V$
$U_{GS}$	Spannung zwischen Gate und Source	$V$
$U_I$	Spannung über der Isolatorschicht	$V$
$U_M$	Spannung über der MOS-Struktur (Diodenspannung)	$V$
$U_S$	Source-Spannung	$V$

$U_{\text{Sub}}$	Substratspannung	V
$U_{\text{T}}$	Schwellenspannung	V
$W$	Breite des Kanals eines MOS-Transistors	m
$x$	Koordinate parallel zur Halbleiteroberfläche in Stromrichtung	m
$y$	Koordinate senkrecht zur Halbleiteroberfläche	m
$\epsilon_0$	Influenzkonstante des Vakuums: $8,854 \cdot 10^{-12}$	$\text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$
$\epsilon_{\text{Si}}$	Dielektrizitätszahl des Siliziums: 12	-
$\epsilon_{\text{ox}}$	Dielektrizitätszahl des $\text{SiO}_2$ : 3,7	-
$\rho$	Ladungsdichte	$\text{Asm}^{-3}$
$\varphi(x,y)$	Potential, bezogen auf das Halbleiterinnere	V
$\varphi_{\text{F}}$	relatives Fermipotential: $\phi_i - \phi_{\text{F}}$	V
$\varphi_{\text{S}}$	Oberflächenpotential des Siliziums	V
$\phi$	Potential	V
$\phi_{\text{F}}$	Fermipotential	V
$\phi_{\text{FM}}$	Fermipotential im Metall	V
$\phi_{\text{FSi}}$	Fermipotential im neutralen Silizium	V
$\phi_i$	Fermipotential im eigenleitenden Silizium	V
$\phi_{\text{M}}$	Austrittspotential des Metalls	V
$\phi_{\text{Si}}$	Austrittspotential des Siliziums	V
$\beta$	$W/L$	-
$\beta_{\text{R}}$	$W_{\text{S}}/L_{\text{S}}$ (Index S: Schalttransistor) $\overline{W}_{\text{L}}/L_{\text{L}}$ (Index L: Lasttransistor)	-
$\beta^*$	$(K_{\text{p}}/K_{\text{n}}) \cdot \beta_{\text{R}}$	-
$\phi_{\text{L}}$	Potential des unteren Randes des Leitungsbandes	V

$\phi_V$	Potential des oberen Randes des Valenzbandes	V
$X_{Si}$	Elektronenaffinität des Siliziums	V
$\mu_n$	Elektronenbeweglichkeit	$m^2 V^{-1} s^{-1}$
$\mu_p$	Löcherbeweglichkeit	$m^2 V^{-1} s^{-1}$
$\gamma$	Substratsteuerfaktor	$V^{1/2}$
$\lambda$	Kanallängenverkürzungsfaktor	$V^{-1}$