Anhang A

MOS-Feldeffekt-Transistor

Der MOS-Transistor stellt das Grundbauelement der CMOS-Schaltungstechnik dar. Er ist in den verschiedenen Lehrbüchern ausführlich beschrieben worden - angefangen von seinen physikalischen Grundlagen [22, 65] bis hin zu seinen verschiedenen von dem Arbeitspunkt abhängigen Betriebsarten [72, 77, 83, 90]. Hier wird im groben auf die für diese Arbeit relevante Funktionsweise und das Verhalten des MOS-Transistors eingegangen. Dafür wird im folgenden ein n-Kanal MOS-Transistor (in weiteren NMOS) betrachtet, wobei die ganzen Überlegungen auch für einen p-Kanal MOS-Transistor (PMOS) gültig sind, wenn das Vorzeichen aller relevanten Ströme und Spannungen geändert wird.

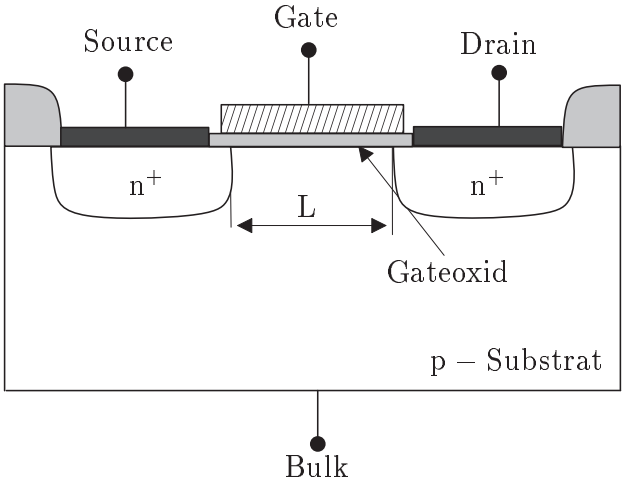

Abbildung A.1: Schematischer Aufbau eines MOS-Transistors.

Die Funktionsweise dieses vierpoligen aktiven Bauelementes (siehe Abbildung A.1) bzw. seines Ausgangs-Drainstroms hängt davon ab, wie die angelegten Potentiale an seinen vier Klemmen (Drain, Gate, Source, Bulk) aussehen. Durch das Anlegen einer Steuerspannung zwischen Gate und Bulk U_{gb} bildet sich an der Halbleiteroberfläche an der Grenze zum Gate-

oxid eine Gegenladung, falls diese Spannung U_{gb} viel kleiner als die Gate-Source-Spannung U_{gs} und die Gate-Drain-Spannung U_{gd} ist. Das bedeutet, daß es zur Verarmung kommt und daß der Transistor sperrt. Mit der zunehmenden Spannung U_{gb} bildet sich an der Halbleiteroberfläche in diesem Fall eine geringere Anzahl an Minoritätsträgern, die diffundieren können. Überschreitet die Spannung U_{gs} eine bauteilspezifische Schwellenspannung, so entsteht ein leitfähiger Kanal von Minoritätsträgern. Die zwei zuletzt beschriebenen Zustände sind in der Literatur als Bereiche schwacher und starker Inversion bzw. der Übergang dazwischen als ein Bereich der moderaten Inversion bekannt. Alle diese Arbeitsbereiche sind in der Literatur [65] durch gut modellierte Gleichungen des Drainstroms beschrieben. Dabei ist der Bereich der moderaten Inversion von geringerem Interesse für ein Schaltungsdesign.

Für die Unterscheidung der Arbeitsbereiche eines MOS-Transistors ist die Schwellenspannung wichtig, die wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$U_t = U_{t0} + \gamma \left(\sqrt{2\,\Phi_f + U_{sb}} - \sqrt{2\,\Phi_f} \right) . \tag{A.1}$$

Dabei sind Φ_f das Fermi-Potential[1], U_{t0} die Schwellenspannung für $U_{sb} = 0$ V und γ die Substratkonstante, die als

$$\gamma = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2\,q\,\epsilon\,N_{sub}} \tag{A.2}$$

ausgedrückt werden kann, mit $C'_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$ als Kapazitätsbelag des Gateoxids (mit einer Dicke t_{ox}) und N_{sub} als Dotierungskonzentration des Substrats. Ein typischer Wert für einen NMOS-Transistor beträgt $\gamma \approx 0.5\,\sqrt{\mathrm{V}}$.

Für den Entwurf von CMOS-Bildsensoren ist der Betrieb des MOS-Transistors sowohl in schwacher als auch in starker Inversion von Interesse. Dabei wird der MOS-Transistor in der schwachen Inversion für den Entwurf von logarithmischen CMOS-Bildsensoren verwendet. Da sich für Hochgeschwindigkeitsanwendungen der Einsatz von logarithmischen Sensoren nicht lohnt (für die Erklärung siehe das Unterkapitel 3.1.1), wird der Arbeitsbereich des MOS-Transistors in schwacher Inversion [22, 52] nicht weiter behandelt.

Für die Anwendung in der Hochgeschwindigkeitskinematographie ist daher die starke Inversion des MOS-Transistors von Interesse, die für $U_{gd} \geq U_t$ vorliegt. Gilt zudem $U_{ds} \leq U_{gs} - U_t$, ist die gesamte Halbleiteroberfläche unter dem Gateoxid invertiert, so daß bewegliche Minoritätsträger einen leitenden Kanal zwischen Drain und Source bilden. Der MOS-Transistor arbeitet im sogenannten Ohmschen- oder Triodengebiet, bei dem für den Ausgangsdrainstrom der folgende Zusammenhang gilt:

[1] Das Fermi-Potential ist eine halbleiterspezifische Größe, die sich aus der Differenz der intrinsischen und extrinsischen Fermienergie zu $\Phi_f = (E_i - E_f)/q$ ergibt und beträgt für einen NMOS-Transistor typischerweise 0.35 V.

$$I_d = \mu\, C'_{ox}\, \frac{W}{L} \left[(U_{gs} - U_t)\, U_{ds} - \frac{U_{ds}^2}{2} \right]. \tag{A.3}$$

Dabei bezeichnet μ die Beweglichkeit der Minoritätsträger, C'_{ox} den Kapazitätsbelag des Gateoxids, W die Kanal-Weite und L die Kanal-Länge des MOS-Transistors. Das Produkt $\mu\, C'_{ox}$ wird üblicherweise durch $\beta = \mu\, C'_{ox}$ abgekürzt, wobei β den sogenannten Verstärkungsfaktor darstellt (β_n für NMOS- und β_p für PMOS-Transistor).

Wächst die Spannung U_{ds} (bei $U_{gd} \geq U_t$), so daß die Beziehung $U_{ds} \geq U_{gs} - U_t$ erfüllt ist, schnürt der leitende Kanal an seinem (Drain-) Ende ab. Der MOS-Transistor arbeitet im Sättigungsgebiet, für das der folgende Zusammenhang des Ausgangsdrainstroms gilt:

$$I_d = \frac{1}{2}\, \mu\, C'_{ox}\, \frac{W}{L}\, (U_{gs} - U_t)^2\, (1 + \lambda\, U_{ds}). \tag{A.4}$$

Die mit wachsendem U_{gs} zunehmende Abschnürung im Sättigungsgebiet führt zu einer Reduktion der effektiven Kanallänge. Dieser als Kanallängemodulation bekannte Effekt ist durch den Faktor $(1 + \lambda\, U_{ds})$ modelliert, wobei λ den Kanallängemodulationsfaktor bezeichnet.

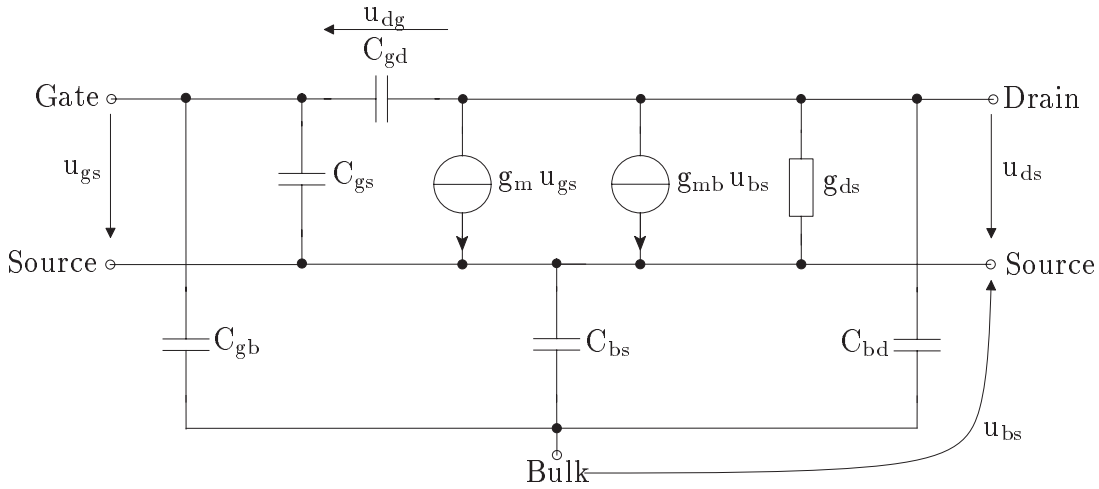

Abbildung A.2: Kleinsignalersatzschaltbild eines MOS-Transistors.

Die obigen Gleichungen beschreiben das Großsignalverhalten oder den Arbeitspunkt des MOS-Transistors. Wenn ein MOS-Transistor als ein Verstärkerbauelement arbeitet, überlagert sich am Eingang einer anliegenden Gleichspannung des Großsignal-Arbeitpunkts ein zu verstärkendes Wechselsignal. Für genügend kleine Signalamplituden des Wechselsignals lassen sich die Kennlinien des Transistors in der Umgebung des Arbeitspunktes linearisieren. Das dynamische oder Kleinsignalverhalten des MOS-Transistors wird dann durch Größe wie beispielsweise die Steigung der Kennlinie, Ausgangsleitwert, usw. im Arbeitspunkt

beschrieben. Diese Vorgehensweise führt zu einem in Abbildung A.2 gezeigten Kleinsignalersatzschaltbild des MOS-Transistors.

Die Komponenten des Kleinsignalersatzschaltbildes sind parasitäre Kapazitäten, der differenzielle Ausgangsleitwert und verschiedene spannungsgesteuerte Stromquellen. Der Einfluß der Gate-Source-Spannung auf den Ausgangsdrainstrom wird dabei durch die Transkonduktanz g_m modelliert zu:

$$g_m = \frac{\partial I_d}{\partial U_{gs}}\Big|_{Arbeitspunkt}. \tag{A.5}$$

Der Substrat-Effekt wird durch eine spannungsgesteuerte Stromquelle modelliert, wobei die zugehörige Transkonduktanz g_{bm} den Einfluß der Source-Bulk-Spannung auf den Ausgangsstrom beschreibt:

$$g_{mb} = \frac{\partial I_d}{\partial U_{bs}}\Big|_{Arbeitspunkt}. \tag{A.6}$$

Der differentielle Ausgangsleitwert g_{ds} beschreibt die Steigung der Ausgangskennlinie des Transistors wie

$$g_{ds} = g = \frac{\partial I_d}{\partial U_{ds}}\Big|_{Arbeitspunkt}. \tag{A.7}$$

Für die oben beschriebenen Größen wird wiederum zwischen dem Trioden- und dem Sättigungsgebiet unterschieden. Wenn die Ausdrücke für den Drainstrom aus den Gleichungen (A.3, A.4) entsprechend in die Gleichungen (A.5 - A.7) eingesetzt werden, ergeben sich die in Tabelle A.1 zusammengefaßten Werte der Transkonduktanz, der Steilheit (die die effektive Substrat-Stromquelle bestimmt) und der Ausgangsleitwerte. Zudem gibt die gleiche Tabelle die für das Schaltungsdesign wichtigsten Kapazitätswerte an.

	Triodengebiet	Sättigungsgebiet
g_m	$\mu\, C'_{ox}\, \frac{W}{L}\, U_{ds}$	$\sqrt{2\,\mu\, C'_{ox}\, \frac{W}{L}\,(1+\lambda\, U_{ds})\, I_d}$
g_{mb}	$-g_{mb}\,\gamma/(2\,\sqrt{2\,\Phi_f + U_{sb}})$	
g_{ds}	$\mu\, C'_{ox}\, \frac{W}{L}\,(U_{gd} - U_t)$	$\lambda\, I_d/(1+\lambda\, U_{ds})$
C_{gs}	$\frac{1}{2}\, C_{ox}$	$\frac{2}{3}\, C_{ox}$
C_{gd}	$\frac{1}{2}\, C_{ox}$	$W\,\Delta L\, C'_{ox}$

Tabelle A.1: Kleinsignalparameter des MOS-Transistors in der starken Inversion.

Dabei stellen C_{ox} die Kapazität des Gateoxids bzw. C'_{ox} ihr Kapazitätsbelag und ΔL die Überlappung zwischen dem Gateoxid und dem Drain- bzw. Sourcediffusionsgebiet dar.

Anhang B

Abkürzungen und Formelzeichen

a	Exponent im 1/f-Rauschmodell
APS	Active-Pixel-Sensor
A_0	Leerlaufverstärkung
A_{D}	Fläche einer Photodiode
c	Lichtgeschwindigkeit
C'	Kapazitätsbelag oder flächenbezogene Kapazität
CCD	Charge-Coupled Device
CDS	Correlated-Double-Sampling
C_D	Sperrschichtkapazität einer Photodiode
C_{col}	parasitäre Kapazität an der Spaltenleitung
C_{bd}	Bulk-Drain-Kapazität
C_{bs}	Bulk-Source-Kapazität
C_F	Kapazität im Gegenkopplungszweig
C_{gd}	Gate-Drain-Kapazität
C_{gs}	Gate-Source-Kapazität
C_I	serielle Kapazität am Eingang des Operationsverstärkers
C_{int}	gesamte Kapazität, auf der integriert wird
C_L	Lastkapazität am Ausgang des Operationsverstärkers
C'_{ox}	flächenbezogene Kapazität des Gateoxids
C_S	Speicherkapazität
$\mathrm{DR}_{\mathrm{dB}}$	Dynamikbereich in dB
E	Bestrahlungsstärke
E_g	Bandabstand
FhG IMS	Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme
FPGA	Field programmable gate array
FPN	Fixed Pattern Noise
FIT-CCD	Frame-Interline Transfer CCD

FT-CCD	Frame Transfer CCD
f_{3dB}	3dB-Eckfrequenz
f_{oben}	obere Grenzfrequenz des 1/f-Rauschens
f_{samp}	Abtastfrequenz
f_{unten}	untere Grenzfrequenz des 1/f-Rauschens
f_x	Ortsfrequenz
g	ohmischer Leitwert
g_{bs}	Substratsteilheit
g, g_{ds}	Ausgangsleitwert eines MOS-Transistors
g_L	differentieller Leitwert einer Last
g_m	Steilheit (Transkonduktanz)
$g_{m,op}$	Steilheit (Transkonduktanz) eines Operationsverstärkers
g_{mD}	Ausgangsleitwert einer Diode
h	Plancksches Wirkungsquantum $6.62 \cdot 10^{-34}$ J s
$H(f)$, $H(z)$, $H(s)$	Übertragungsfunktionen
i	Kleinsignalstrom oder i-ter Wert
I_{bias}	Biasstrom
I_d	Drainstrom
I_{dark}	Dunkelstrom
I_D	Diodenstrom
IL-CCD	Interline Transfer CCD
$\overline{i_n^2}$	mittlerer quadratischer Rauschstrom
$\overline{i_{n,dark}^2}$	mittlerer quadratischer Rauschstrom des Dunkelstromrauschens
I_{ref}	Referenzstrom
I_{pix}	Pixelstrom
I_{photo}	Photostrom
j	imaginäre Einheit
k	Boltzmannkonstante $1.38066 \cdot 10^{-34}$ J/K
K	Proportionalitätsfaktor im 1/f-Rauschmodell
k_f	Proportionalitätsfaktor im 1/f-Rauschmodell des MOS-Transistors
L	Gatelänge
MCP	Multi channel plate
MTF	Modulationsübertragungsfunktion
NEP	Noise equivalent power
n_{sig}	Signalelektronen
n_{dark}	Rauschelektronen des Dunkelstromrauschens
n_{kTC}	Rauschelektronen des kTC-Rauschens
n_{FPN}	Rauschelektronen des FPN
ND_e	äquivalente Anzahl von Dekaden
PD	Photodiode

q	Elementarladung
$\overline{Q_{n,photo}}$	durch Photokonversion generierte Signalladung
$\overline{Q_n^2}$	mittlere quadratische Rauschladung
r_D	differenzieller Widerstand
$\mathcal{R}$	Responsivität
$\mathcal{R}_\lambda$	spektrale Responsivität
RLZ	Raumladungszone
$\mathcal{S}$	Empfindlichkeit
$S_{i,a}$	spektrale Leistungsdichte eines Rauschstromes am Ausgang
$S_{n,w}$	spektrale Leistungsdichte des weißen Rauschens
$S_{n,1/f}$	spektrale Leistungsdichte des $1/f$-Rauschens
$S_{u,e}$	spektrale Leistungsdichte einer Rauschspannung am Eingang
S_n	spektrale Rauschleistungsdichte
$\mathcal{S}_\lambda$	spektrale Empfindlichkeit
SNR	Signal-Rausch-Abstand
$\mathrm{SNR_{dB}}$	Signal-Rausch-Abstand in dB
$\mathrm{SNR_{dB,max}}$	maximal erzielbarer Signal-Rausch-Abstand in dB
T	Temperatur oder Zeitintervall
T_{int}	Integrationszeit
U	Spannung, häufig auch Spannung über eine Diode in Flußrichtung
$U_{aus,pix}$	Spannung am Ausgang des Pixels
$U_{aus,op}$	Spannung am Ausgang des Operationsverstärkers
U_{ds}	Drain-Source-Spannung
U_D	Diffusionsspannung
U_{gs}	Gate-Source-Spannung
U_{int}	aufintegrierte Spannung im Pixel
U_{max}	maximaler Spannungshub
$\overline{u_{n,ph1}}, \overline{u_{n,ph2}}$	mittlere Rauschspannung der Phase 1 und 2
$\overline{u_n^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung
$\overline{u_{n,1/f}^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung des $1/f$-Rauschens
$\overline{u_{n,dark}^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung des Dunkelstromrauschens
$\overline{u_{n,kTC}^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung des kTC-Rauschens
$\overline{u_{n,op}^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung des Operationsverstärkerrauschens
$\overline{u_{n,out}^2}, \overline{u_{n,out}^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung am Ausgang der Schaltung
$\overline{u_{n,ph}^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung des Photonenrauschens
$\overline{u_{n,th}^2}$	mittlere quadratische Rauschspannung des thermischen Rauschens
U_{off}	Offsetspannung
U_{pix}	Pixelspannung
U_{ref}	Referenzspannung
U_{sb}	Source-Bulk-Spannung

U_t	Schwellenspannung
U_T	Temperaturspannung
W	Gateweite
z	komplexe Frequenzvariable der Z-Transformation
β	Verstärkungsfaktor oder Steilheit eines MOS-Transistors
β_n, β_p	Verstärkungsfaktor eines NMOS- bzw. PMOS-Transistors
η	Quantenwirkungsgrad
γ	Substrateffektkonstante und Rauschmodellparameter des MOS-Transistors
λ	Wellenlänge oder Kanallängenmodulationsfaktor
μ	Beweglichkeit der Minoritäten im Kanal
ω	Kreisfrequenz
ω_0	untere Grenzkreisfrequenz des 1/f-Rauschens
Φ_0	Strahlungsfluß
Φ_f	Fermipotential
$\varphi, \Delta\varphi$	Phasenverschiebung
σ_β^2	Varianz der Steilheit
σ_u^2	Varianz einer Rausch-Spannung
τ	Zeitkonstante oder Pulsdauer