



Elektronik I, Foliensatz 8

3.1 Halbleiter

G. Kemnitz

Institut für Informatik, Technische Universität Clausthal

14. Januar 2015



Inhalt des zweiten Foliensatzes

Halbleiter

- 1.1 Bewegliche Elektronen
- 1.2 Leiter und Nichtleiter
- 1.3 Dotierte Halbleiter

pn-Übergang

- 2.1 Spannungsfrei
- 2.2 Sperrbereich
- 2.3 Durchlassbereich
- 2.4 Durchbruchbereich

Bipolartransistor

- 3.1 Transistoreffekt
- 3.2 Übersteuerung

MOS-Transistor

- 4.1 Feldeffekt
- 4.2 Aktiver Bereich
- 4.3 Einschnürbereich

Aufgaben



Halbleiter



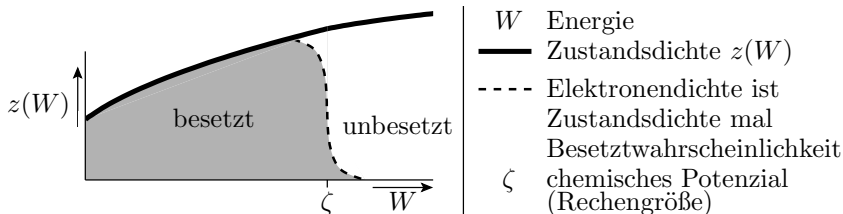
Die elektrischen Leitungsvorgänge in einem Halbleiter werden im Wesentlichen von der Dichte der beweglichen Ladungsträger bestimmt. Diese Dichte hängt von den möglichen Elektronenzuständen, deren Energie und deren Besetzungswahrscheinlichkeiten ab.



Bewegliche Elektronen

Welleneigenschaften von Elektronen

- Wellenzustand eines Elektrons: 3D-Ortsfrequenz + Spin.
- Jeder Wellenzustand kann nur mit einem Elektron besetzt sein und hat eine bestimmte Energie.
- Bei einer Temperatur $T = 0\text{ K}$ sind alle Zustände mit einer Energie $W < \zeta$ besetzt und alle anderen frei.
- Bei $T > 0$ sind auch Zustände mit $W > \zeta$ besetzt und gleichviele Zustände mit $W < \zeta$ frei.





Besetzungswahrscheinlichkeit

- Die Besetzungswahrscheinlichkeit

$$p(W, T, \zeta) = \left(e^{\frac{W-\zeta}{k_B \cdot T}} + 1 \right)^{-1}$$

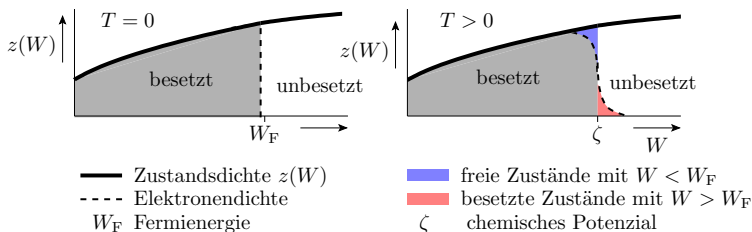
(W – Energie; T – Temperatur; ζ – chemisches Potential; k_B – Boltzmannkonstante) gehorcht der Fermiverteilung.

- $k_B \cdot T$ ist die mittlere thermische Energie der Elektronen bei einer Temperatur T . Bei Raumtemperatur (300 K) ca. 26 meV.

$\frac{W-\zeta}{k_B \cdot T}$	-20	-10	0	10	20
$p(W, T, \zeta)$	$1 - 2 \cdot 10^{-9}$	$1 - 4,5 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-9}$

- Zustände mit $W < \zeta - 20 \dots - 30 \cdot k_B \cdot T$ sind besetzt.
- Zustände mit $W > \zeta + 20 \dots 30 \cdot k_B \cdot T$ sind unbesetzt.
- Die Zustände dazwischen sind teilweise besetzt.

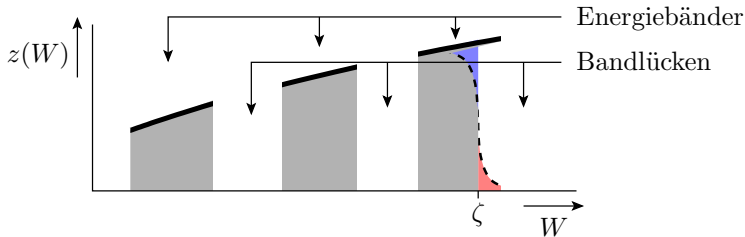
Elektronendichte in Abhängigkeit von der Energie



- $T = 0$ (Zustand der minimalen Energie): Zustände mit $W \leq W_F$ besetzt, höherenergetische Zustände unbesetzt.
- $T > 0$: Freie Zust. mit $W < W_F$, besetzte Zust. mit $W > W_F$
- Das chemische Potential ζ stellt sich so ein, dass die besetzten Zustände oberhalb der Fermi-Energie W_F gleich der unbesetzten Zustände unterhalb der Fermi-Energie sind. Weicht für $T > 0$ geringfügig von der Fermi-Energie ab.

Energiebänder und Bandlücken

- Die Zustandsdichte $z(W)$ ist nur in einem Raum ohne zusätzliche Ladungen stetig.
- In Kristallen mit einem regelmäßiges Gitter aus ortsfesten Ladungen gibt es Energiebereiche mit besetzbaren Elektronenzuständen (Bänder) getrennt durch Energiebereiche ohne besetzbare Zustände (Bandlücken).





Bewegliche Ladungsträger

- Bei einem Driftstrom ist der thermischen Bewegung der Elektronen eine feldgetriebene gerichtete Bewegung überlagert. Thermische und Driftbewegungen bestehen aus Energieaufnahme (Beschleunigung) und Energieabgabe an das Gitter oder andere Elektronen (Abbremsen).
- Elektronen können ihre Energie nur ändern, wenn in energetischer Nachbarschaft Zustände frei sind. Nur solche Elektronen nehmen an der thermischen und der Driftbewegung teil.

Bewegliche Elektronen gibt es folglich max. in zwei Bändern:

- Valenzband (energetisch höchstwertiges, bei $T = 0$ vollbesetztes Band), wenn bei $T > 0$ ein geringer Anteil der Zustände frei ist (bewegliche Löcher).
- Leitungsband (darauffolgendes bei $T = 0$ leeres oder teilweise besetztes Band), mit bei $T > 0$ besetzten Zuständen.

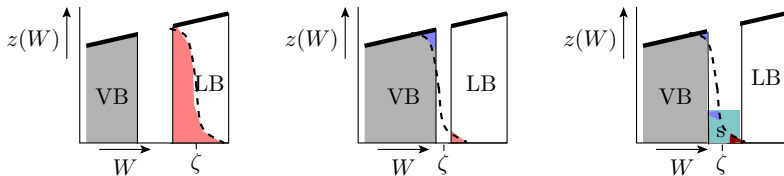


Leiter und Nichtleiter

Leiter

Leitfähig sind Materialien mit

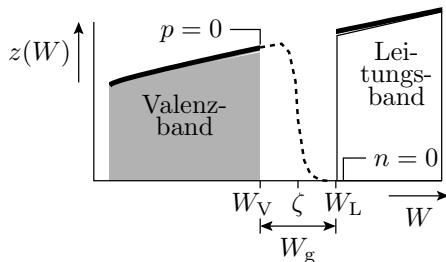
- teilweise besetztem Leitungsband,
 - Kupfer hat z.B. ein bewegliches Elektron pro Atom. Aus der Dichte von $8 \cdot 10^{22}$ Atomen pro cm^3 ergibt sich eine Dichte von $n \approx 8 \cdot 10^{22}$ beweglichen Elektronen pro cm^3 .
- schmaler Bandlücke, zusätzl. Zuständen in der Bandlücke¹.



VB	Valenzband	■	Dichte der beweglichen Löcher (p)
LB	Leitungsband	■	Dichte der beweglichen Elektronen (n)
■	zusätzliche Zustände in der Bandlücke		

¹durch Verunreinigungen, Fehler in der Kristallstruktur, ...

Isolator



W_V maximale Energie der Elektronen im Valenzband

W_L minimale Energie der Elektronen im Leitungsband

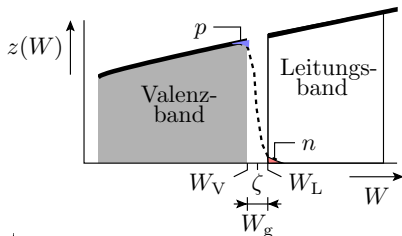
W_g Bandabstand

Ein Isolator hat

- bei $T = 0$ ein leeres Leitungsband und
- eine Bandlücke deutlich breiter $50 \cdot k_B \cdot T$. (Valenzband voll besetzt und Leitungsband leer.)
- Kaum Störstellen in der Bandlücke.

Bei ausreichender Energiezufuhr (hohe Temperatur/Feldstärke, hochenergetische Strahlung) werden Isolatoren zu Leitern.

Halbleiter



Ein Halbleiter hat

- bei $T = 0$ ein leeres Leitungsband und
- eine Bandlücke von ca. $1 \dots 2 \text{ eV}$, so dass das Valenzband nur ganz wenig Löcher und das Leitungsband nur ganz wenig Elektronen enthält. Silizium hat z.B.
 - eine Bandlücke von $W_g \approx 1,1 \text{ eV}$,
 - eine Atomdichte von $\approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ und
 - bei 300 K eine Leitungsbandelektronen- und Valenzbandlöcherdichte von $n = p \approx 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.
 - Die Dichten n und p nehmen mit $\approx 7\%/K$ zu.

Undot. HL eignen sich zur Temperaturmessung, sonst fast nichts.



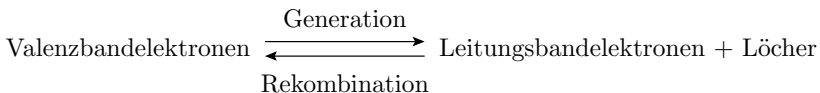
Dotierte Halbleiter



Generation und Rekombination

Die Bildung beweglicher Elektronen und Löcher ist ein Gleichgewichtsprozess, der dem Massenwirkungsgesetz gehorcht.

- Generation: thermische Anregung
- Rekombination: Energieabgabe



- $(n \cdot p) \uparrow \rightarrow \text{Rekombinationsrate} \uparrow \rightarrow (n \cdot p) \downarrow$
- $(n \cdot p) \downarrow \rightarrow \text{Rekombinationsrate} \downarrow \rightarrow (n \cdot p) \uparrow$

Gleichgewichtskonstante:

$$n \cdot p = n_i \cdot p_i = n_i^2$$

(n_i – instrinsische Ladungsträgerdichte, für Si bei 300K
 $n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$)



Dotierung

Halbleiter sind Kristalle mit einem regelmäßigen Gitter. Die technisch wichtigsten Halbleitermaterialien, Silizium und Germanium, besitzen vier Außenelektronen mit kovalenten Bindungen zu Nachbaratomen (Diamantgitter).

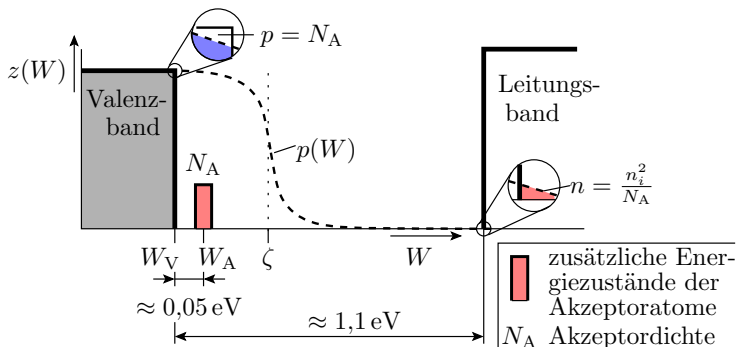
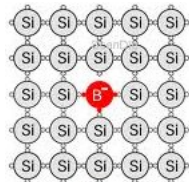
- Das Bändermodell setzt einen idealen Kristall voraus.
- Fremdatome, Gitterfehler verursachen zusätzliche Energiezustände in der Bandlücke.

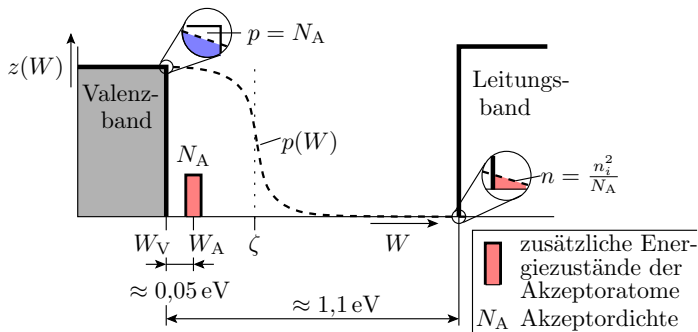
Fakt 1

Dotierung ist der gezielte Einbau von Fremdatomen zur Erzeugung zusätzlicher ortsgebundener besetzbarer Elektronenzustände in der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband.

Herstellung von p-Gebieten

- Dotierung mit Akzeptoren (Fremdatome mit 3 Außenelektronen).
- Die Energie, ein viertes Außenelektron aufzunehmen, ist nur unerheblich größer als die max. Energie im Valenzband W_V .





- Das elektrochemischen Potenzial ζ stellt sich so ein, dass die Löcherdichte gleich der Akzeptordichte

$$p = N_A$$

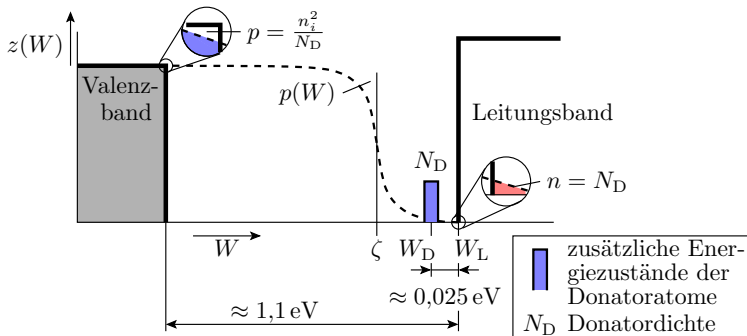
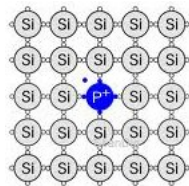
- und die Dichte der beweglichen Elektronen gleich

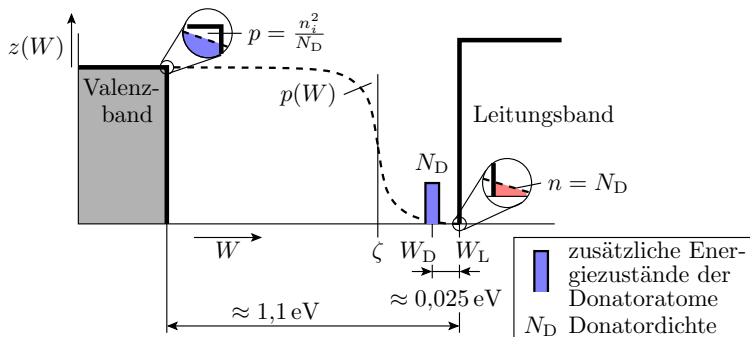
$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \ll n_i$$

ist.

Herstellung von n-Gebieten

- Dotierung mit Donatoren (Fremdatome mit 5 Außenelektronen).
- Die Energie, das fünfte Außen-
elektron abzugeben, ist
 $\approx q \cdot U_T$ kleiner als die min. Energie im Leitungsband W_L .





- Das elektrochemischen Potenzial ζ stellt sich so ein, dass die Elektronendichte im Leitungsband gleich der Donatordichte

$$n = N_D$$

- und die Dichte der Löcher gleich

$$n = \frac{n_i^2}{N_D} \ll n_i$$

ist.



In einem p-Gebiet

- sind die Löcher mit der eingestellten Dichte $p = N_A$ die Majoritätsladungsträger.
- Die Akzeptoratome mit vier besetzten Außenelektronen bilden ortsfeste negative Ladungen.
- Die beweglichen Elektronen mit der Dichte $n = n_i^2/N_A$ sind die Minoritätsladungsträger.

In einem n-Gebiet

- sind die beweglichen Leitungsbandelektronen mit der eingestellten Dichte $n = N_D$ die Majoritätsladungsträger.
- Die Donatoratome mit einem abgegebenen Außenelektron bilden ortsfeste positive Ladungen.
- Die Löcher im Valenzband mit der Dichte $p = n_i^2/N_A$ sind die Minoritätsladungsträger.

typische Dotierdichten: $10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

■ Majoritätsdichte: $10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

■ Minoritätsdichte bei 300 K: $4 \cdot 10^5 \dots 4 \text{ cm}^{-3}$

$$\left(n_i \approx \frac{2 \cdot 10^9}{\text{cm}^3} \right)$$



Beispiel

Dotierung eines Halbleitergebiets mit 10^{18} Phosphoratomen je Kubikzentimeter.

- Dichte der beweglichen Elektronen bei $T = 300$ K?
- Dichte der beweglichen Löcher bei $T = 300$ K?

Lösung:

- Phosphor: fünf Außenelektronen, Donator.
- Majoritätsladungsträger: Elektronen

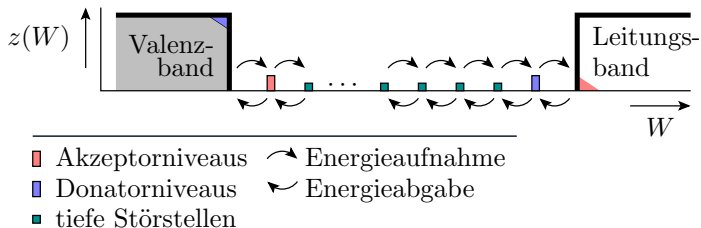
$$n = N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

- Minoritätsladungsträger: Löcher

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2}{10^{18} \text{ cm}^{-3}} = 4 \text{ cm}^{-3}$$

Tiefe Störstellen

In der ganzen Bandlücke verteilte ungewollte Energiezustände durch Gitterfehler, Verunreinigungen, ...



- In der Regel erfolgt die Energieaufnahme und -abgabe in kleinen Schritten über die tiefen Störstellen.
- Je größer die Dichte der tiefen Störstellen, desto schneller werden Gleichgewichtsstörungen $n \cdot p \neq n_i^2$ abgebaut.



- Gleichgewichtsstörungen entstehen z.B. durch Zu- oder Abfluss beweglicher Ladungsträger.
- Wichtige Kenngrößen von Halbleiterbauteilen, z.B.
 - hohe Stromverstärkung von Bipolartransistoren,
 - geringe Sperrströme von Dioden und
 - lange Datenhaltezeiten in DRAMs

verlangen, dass die Gleichgewichtsstörungen lange (bis zu Millisekunden) erhalten bleiben. Das verlangt eine hohe Reinheit.

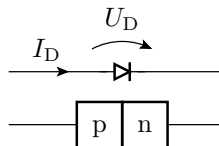
- Die Reinheit des Halbleiters lässt sich fertigungstechnisch schwer einstellen. Das ist eine der Ursachen für die großen Streuungen bestimmter Bauteileigenschaften.



pn-Übergang



pn-Übergang



- Ladungsträgerdichte/Dotierdichte
- p-Gebiet (Löcher/Akzeptoren):

$$p = N_A \approx 10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

- Ladungsträgerdichte/Dotierdichte n-Gebiet (Elektronen/Donatoren):

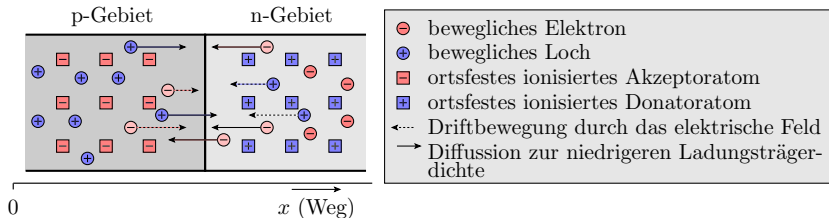
$$n = N_D \approx 10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

- Arbeitsbereiche:
 - Sperrbereich
 - Durchlassbereich
 - Durchbruchbereich.



Spannungsfrei

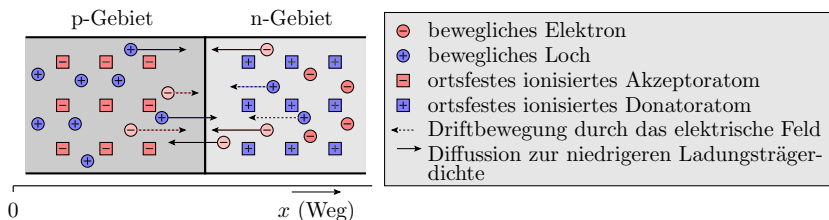
Spannungsfreier pn-Übergang



In einem spannungsfreien pn-Übergang

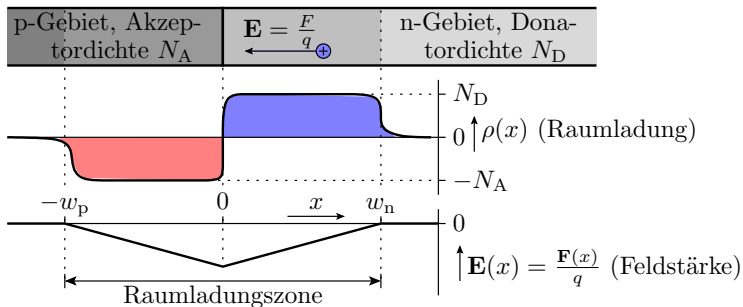
- diffundieren die beweglichen Ladungsträger in Richtung niedrigerer Konzentration, d.h. in das andere Gebiet und
- hinterlassen im p-Gebiet ortsfeste negativ geladene Akzeptor- und im n-Gebiete negativ geladenen Donatoratome.

Die Raumladung verursacht ein elektrisches Feld, das einen zur Diffusion entgegengerichteten Driftstrom zur Folge hat.



- Ohne einen von außen eingespeisten Strom ($I_D = 0$) lädt sich der Übergangsbereich so auf, dass der Driftstrom den Diffusionsstrom kompensiert.
- Die theoretisch bei der Kontaktierung des p- mit dem n-Gebiet entstehende Gleichgewichtsstörung $n \cdot p \gg n_i^2$ ist nach kurzer Zeit durch Rekombination abgebaut.
- Entlang des gesamten Übergangs gilt $n \cdot p = n_i^2$.
- Im Übergangsbereich $p \approx n \approx n_i$ sind die Dichten der beweglichen Ladungsträger um viele Zehnerpotenzen kleiner als die Dotierdichten.

Raumladung und Feldstärke

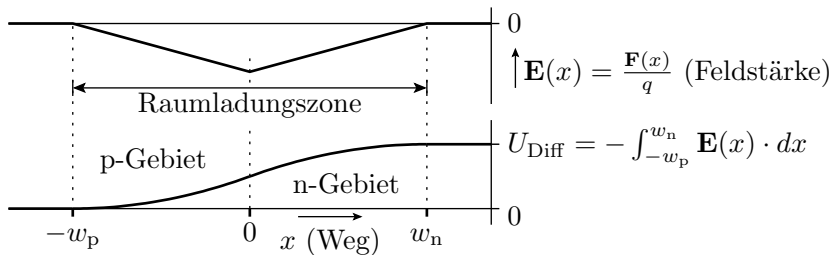


- Die Raumladungszone ist durch Diffusion und Rekombination fast frei von beweglichen Ladungsträgern. Raumladung näherungsweise gleich Akzeptor- bzw. Donatordichte:

$$\text{p - Gebiet : } \rho \approx N_A; \text{ n - Gebiet : } \rho \approx N_D$$

- Die Feldstärke nimmt zum Übergang zu und ist dort max.

Potenzial und Diffusionsspannung



- Bei der Überwindung des elektrischen Feldes vom p- zum n-Gebiet durch die Raumladungszone nimmt ihr Potential der Ladungsträger um die Diffusionsspannung

$$U_{\text{Diff}} = \int_{-w_p}^{w_n} \mathbf{E}(x) \cdot dx$$

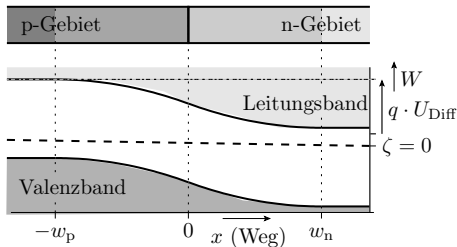
zu.

Bänderverbiegung

Ohne Herleitung sei darauf verwiesen, dass im Gleichgewicht aus Diffusions- und Feldstrom die Feldstärke gleich der Änderung der Differenz des elektrochemischen Potentials ζ zu den Bandkanten ist. Üblicherweise dienen nicht die Bandkanten, sondern das elektrochemische Potenzial als Bezugspunkt der Energieachse.

Aus dieser Darstellung sind die Potentiale der Ladungsträger direkt und indirekt über die Boltzmannverteilung auch die Ladungsdichten ablesbar. Die Diffusionsspannung ist die Differenz der chemischen Potentiale von n- und p-Gebiet geteilt durch die Elementarladung q :

$$U_{\text{Diff}} = \int_{-w_p}^{w_n} \mathbf{E}(x) \cdot dx = \frac{\zeta_n - \zeta_p}{q}$$

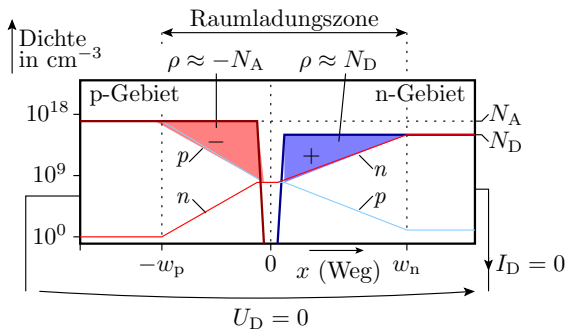




Sperrbereich



Sperrbereich



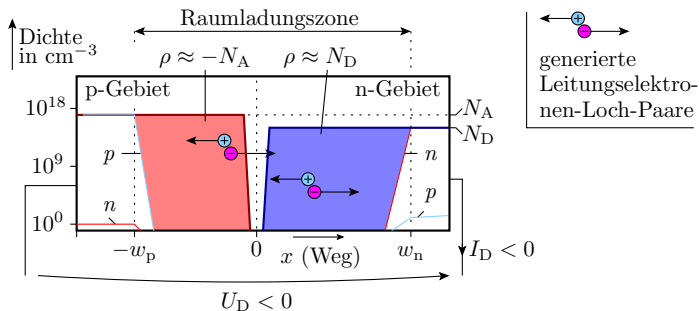
Ohne äußere Spannung

- heben sich Diffusions- und Driftstrom gegenseitig auf.
- Die Leitungsbandelektronen- und Löcherdichten sind im Gleichgewicht:

$$n \cdot p = n_i^2$$

Eine äußere Sperrspannung $U_D < 0$

- vergrößert die Raumladungen und das elektrische Feld.



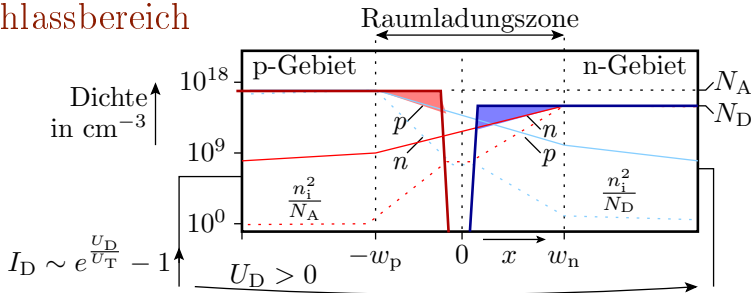
- Die Raumladungszone verbreitert sich.
- Das Ungleichgewicht $n \cdot p \ll n_i^2$ erhöht die Nettogeneration.
- Die generierten Ladungsträger werden durch das Feld in der Sperrschicht abgesaugt und bilden einen Sperrstrom $I_D < 0$.
- Der Sperrstrom nimmt proportional zur Breite der Raumladungszone zu.
- Bei sehr reinen Halbleitern mit wenig tiefen Störstellen ist der Sperrstrom vernachlässigbar.



Durchlassbereich



Durchlassbereich

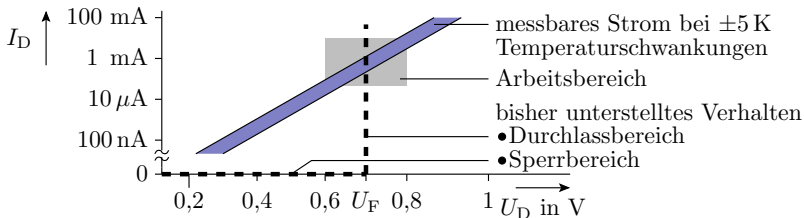


Eine Spannung in Durchlassrichtung $U_D > 0$

- schwächt das Feld, verringert den Driftstrom und
- lässt Ladungsträger als Minorität bis zum Ende der Raumladungszone im anderen Gebiet diffundieren.
- Bei der Weiterdiffusion in die Bahnggebiet Abbau von $n \cdot p \gg n_i^2$ durch Rekombination².

²Spätestens an den Kontakten, an denen es eine hohe Dichte von Gitterfehlern (tiefe Störstellen) gibt.

Strom-Spannungs-Beziehung



- I_D nimmt in Durchlassrichtung näherungsweise exponentielle mit der Spannung zu:

$$I_D \approx I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \quad \text{mit} \quad U_T = \frac{k_B \cdot T}{q}$$

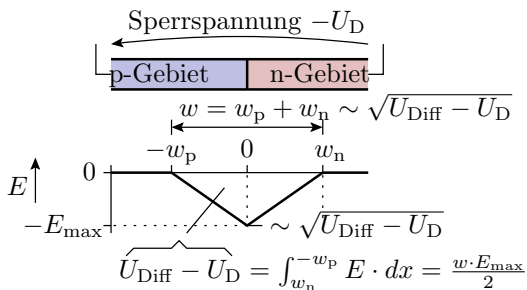
(U_T – Temperaturspannung; I_S – Bauteilparameter; q – Elementarlad.) und hat eine hohe Temperaturabhängigkeit.

- Das bisherige Modell $U_D = U_F$ für den Durchlassbereich und $I_D = 0$ für den Sperrbereich ist nur eine grobe Näherung.



Durchbruchbereich

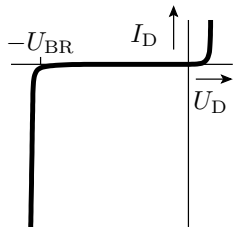
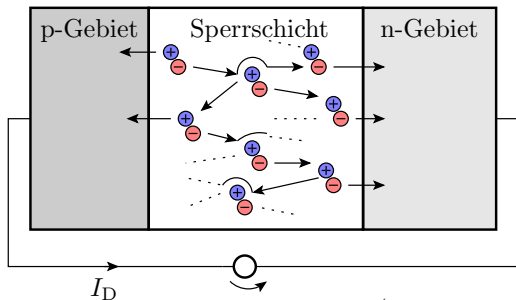
Durchbruchbereich (Lawinendurchbruch)



Mit Zunahme der Sperrspannung $-U_D$ nimmt die Sperrschichtbreite und die maximale Feldstärke in der Sperrschicht zu.

Ab einer Sperrspannung größer der Durchbruchspannung U_{BR}

■ ...



$$U_D < -U_{BR} \quad (U_{BR} \text{ typ. } 10 \text{ bis } 100 \text{ V})$$

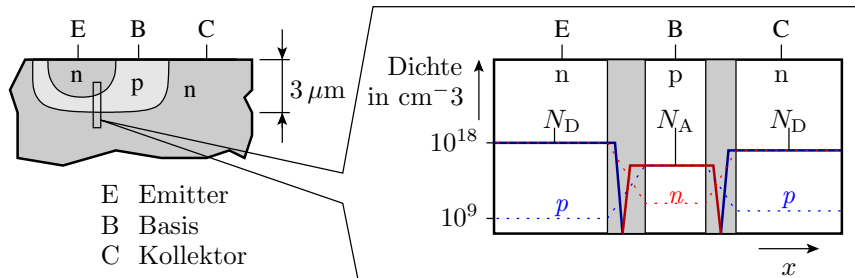
Ab $-U_D > U_{BR}$

- nehmen die generierten Ladungsträger bei Bewegung so viel Energie auf, dass bei Zusammenstößen mit dem Gitter neue Elektronen-Loch-Paare generiert werden.
- Lawinenartige Vervielfachung der Ladungsträgerdichte.
- Exponentielle Stromzunahme mit einer weiteren Erhöhung von $|U_D|$ in Sperrrichtung.



Bipolartransistor

Aufbau



Merkmale eines Bipolartransistors:

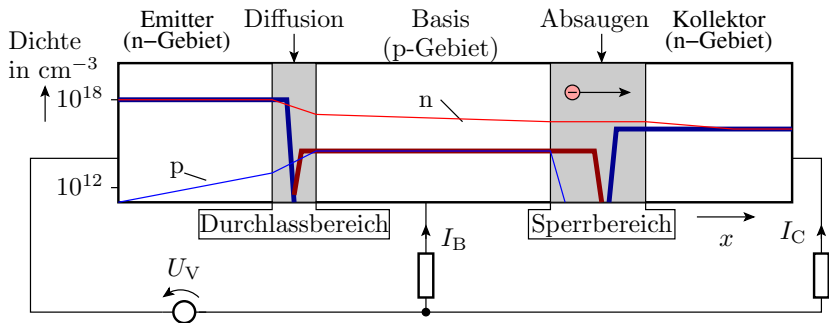
- Schichtfolge p-n-p oder n-p-n.
- Geringe Basisbreite.
- Der Emitter ist um Zehnerpotenzen höher als die Basis dotiert.

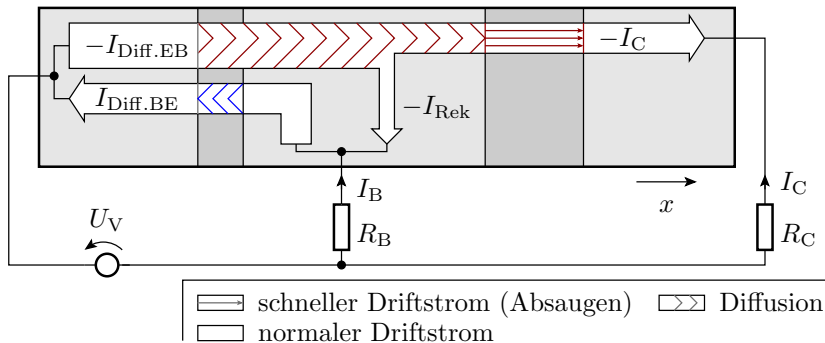


Transistoreffekt

Transistoreffekt (npn-Transistor)

- Aus dem Emitter diffundieren Elektronen in die Basis,
- diffundieren als Minoritätsladungsträger durch das Basisgebiet zum gesperrten Basis-Kollektor-Übergang und
- werden durch das dort herrschende Feld abgesaugt.





Der überwiegende Teil der in die Basis diffundierenden Ladungsträger kommt am Kollektor an. Zu Aufrechterhaltung von U_{BE} für die Diffusion vom Emitter zu Basis müssen an der Basis zwei Stromanteile nachgeliefert werden:

- der Strom $I_{\text{Diff.BE}}$ durch die von der Basis zum Emitter diffundierenden Ladungen und
- der Strom I_{Rek} durch die Rekombination in der Basis.



Diffusionsströme verhalten sich proportional zu ihren Dotierungen:

$$\frac{I_{\text{Diff.BE}}}{N_B} = - \frac{I_{\text{Diff.EB}}}{N_E}$$

(N_B - Basisdotierung; N_E - Emitterdotierung). Der Anteil der in der Basis rekombinierenden Ladungsträger ist das Verhältnis aus der mittleren Transitzeit t_{Tr} durch die Basis und der mittleren Lebensdauer τ_L des Minoritätsüberschusses in der Basis:

$$I_{\text{Rek}} \approx - \frac{t_{\text{Tr}}}{\tau_L} \cdot I_{\text{Diff.EB}}$$

Die Summe beider Basisströme beträgt:

$$I_B = -I_{\text{Diff.EB}} \cdot \left(\frac{t_{\text{Tr}}}{\tau_L} + \frac{N_B}{N_E} \right)$$

Mit der Näherung $I_C \approx -I_{\text{Diff.EB}}$ ist die Stromverstärkung:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \approx \frac{1}{\frac{N_B}{N_E} + \frac{t_{\text{Tr}}}{\tau_L}} \quad (1)$$

Hohe Stromverstärkung verlangt

- kurze Transitzeit t_{Tr} durch die Basis,
- Hohe Lebensdauer τ_L der Minoritätenüberschüsse in der Basis und
- eine deutlich schwächer als der Emitter dotierte Basis $N_B \ll N_E$.

Inversbetrieb

Prinzipiell können Kollektor und Emitter ihre Funktion tauschen.
Wenn

- der Basis-Kollektor-Übergang in Durchlassrichtung und
- der Emitter-Basis-Übergang in Sperrrichtung betrieben wird

kommt es auch zum Transistoreffekt. Die vom Kollektor in die Basis diffundierenden Ladungsträger diffundieren überwiegend weiter zum Emitter. Die Stromverstärkung beträgt in Analogie zu Gl. 1:

$$\beta_I = \frac{I_E}{I_B} \approx \frac{1}{\frac{N_B}{N_C} + \frac{t_{Tr}}{\tau_L}}$$

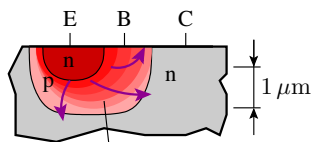
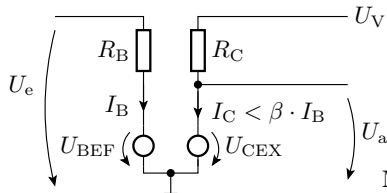
Im Inversbetrieb ersetzt die deutlich niedrigere Kollektordotierung N_C die Emitterdotierung N_E . Die Stromverstärkung ist entsprechend deutlich geringer (Richtwert: $\beta_I \approx 0,05 \cdot \beta$).



Übersteuerung

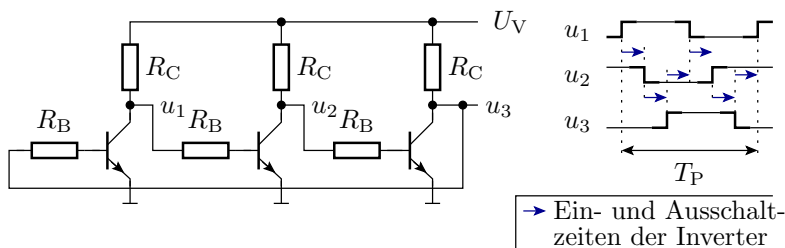
Übersteuerungsbereich

Bei Übersteuerung liegt über dem Basis-Kollektor-Übergang eine schwach positive Durchlassspannung an. Die vom Emitter in die Basis diffundierenden Ladungsträger werden nicht mehr am BC-Übergang abgesaugt. Ein Teil diffundiert zum Kollektor und die Mehrheit überflutet das Basisgebiet und rekombiniert dort.



Die hohe Minoritätsdichte in der Basis hält beim Abschalten des Basisstroms den Kollektorstrom noch deutlich länger als für die Transitzeit t_{Tr} aufrecht.

Übersteuerung und Schaltgeschwindigkeit

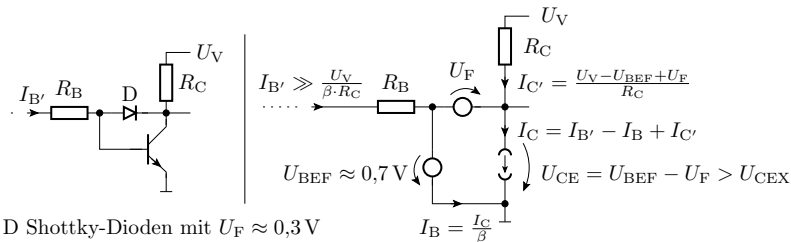


In der Beispielschaltung sind drei einfache Transistorinverter zu einem Ringinverter verschaltet. Die Periode des Ausgangssignals ist die Summe der drei Ein- und Ausschaltzeiten.

Nimmt T_P ab oder zu:

- wenn R_B vergrößert wird?
- wenn U_V erhöht wird?

Schottky-Transistor



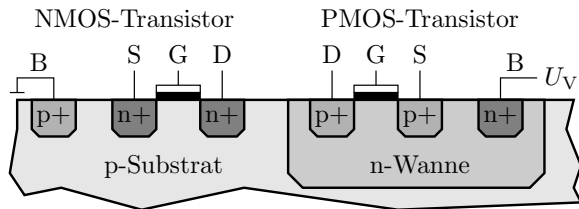
Ein Schottky-Transistor hat eine zusätzliche Schottky-Diode zum Basis-Emitter-Übergang. Eine Schottky-Diode ist ein Metall-Halbleiter-Übergang und hat etwa nur die Hälfte der Flussspannung eines pn-Übergangs (typ. 0,3 V). Bei einem Basisstrom $I_{B'} > \frac{I_C}{\beta}$ fließt nur so viel Strom in die Basis, dass $U_{CE} > U_{CEX}$ bleibt. Der Rest fließt über die Schottky-Diode in den Kollektor. Das erhöht die Schaltgeschwindigkeit erheblich.



MOS-Transistor



Aufbau



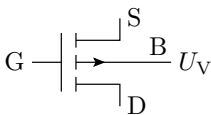
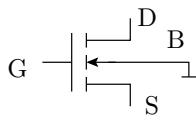
Anschlüsse

S Source

G Gate

D Drain

B Substrat (Bulk)



Die Source-Bulk- und die Drain-Bulk-Übergänge müssen gesperrt sein, sonst Funktion wie Bipolartransistor³.

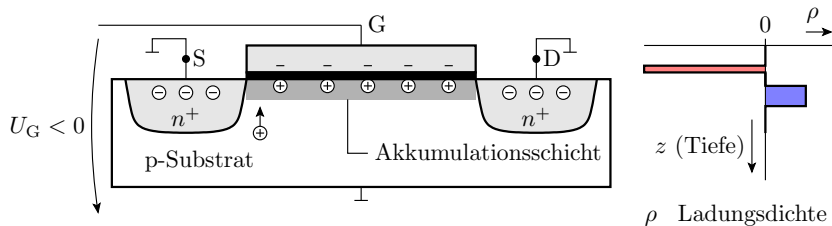
³Mit dem Substratanschluss als Basis und Source und Drain als Emitter und Kollektor.



Feldeffekt

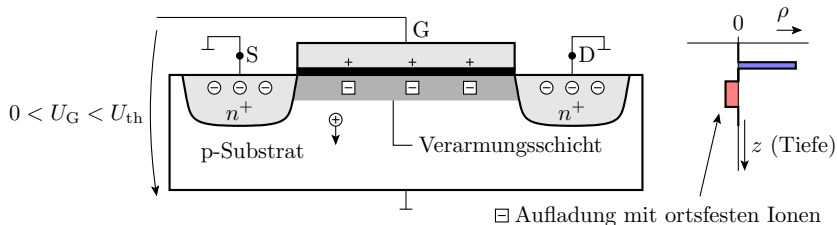
Feldeffekt (NMOS-Transistor)

- Die Gate-Isolator-Halbleiter-Struktur bildet einen Plattenkondensator.
- Eine negative Gateladung führt zur Ansammlung positiver beweglicher Ladung unter dem Gate.
- Die pn-Übergänge von Source und Drain zum Kanal/Substrat sind gesperrt.



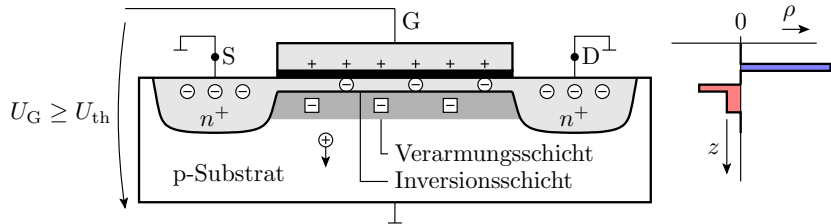
Bei positiver Gate-Kanal-Spannung kleiner der Einschaltspannung U_{th}

- driften die Löcher weg und hinterlassen die ortsfesten negativ geladenen Akzeptoratome.
- Die pn-Übergänge zum Kanal bleiben gesperrt.



Bei einer Gatespannung größer der Einschaltspannung U_{th}

- sinkt die Energie des Leitungsbands im Kanal unter die der Leitungsbandelektronen des Source-Gebiets.
- Vom Source diffundieren bewegliche Elektronen in den Kanal.
- Die Dichte der bewegliche Elektronen im Kanal wächst proportional zur Gate-Kanal-Spannung abzüglich der Einschaltspannung.





Einschaltspannung

Die Einschaltspannung U_{th} eines MOS-Transistors hängt von mehreren Parametern ab, u.a.

- von der Kontaktspannung zwischen dem Gatematerial und dem Silizium,
- den Dotierungen und auch
- von Ladungen im Gateoxid und an den Grenzfläche zwischen Oxid und Halbleiter.

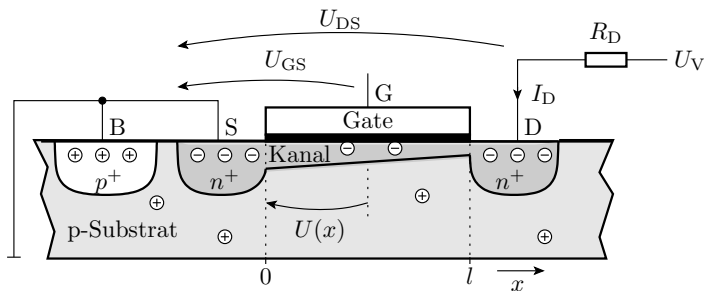
Bei Transistoren in CMOS-Gattern wird Einschaltspannung U_{th} i.Allg. fertigungstechnisch auf ungefähr 20% Versorgungsspannung U_V eingestellt:

- NMOS: $U_{th} \approx 0,2 \cdot U_V$
- PMOS: $U_{th} \approx -0,2 \cdot U_V$



Aktiver Bereich

Stromgleichungen – aktiver Bereich



Beweglichen Ladung im Kanal

$$Q_1(x) = C_1 \cdot (U_{GK}(x) - U_{th}) = C_1 \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x))$$

($Q_1(x)$ – bewegliche Ladung für ein Wegstück dx ; C_1 – Gate-Kanal-Kapazität für Wegstück dx ; $U_{GK}(x)$ – Gate-Kanal-Spannung an der Stelle x ; $U(x)$ – Spannung von der Stelle x zum Source.)



Der Drainstrom als Driftstrom ist das Produkt aus Flächenladung $Q_1(x)$ und Driftgeschwindigkeit

$$I_D = Q_1(x) \cdot v$$

Die Driftgeschwindigkeit ist das Produkt aus Beweglichkeit μ_n und der Feldstärke E_x in Bewegungsrichtung:

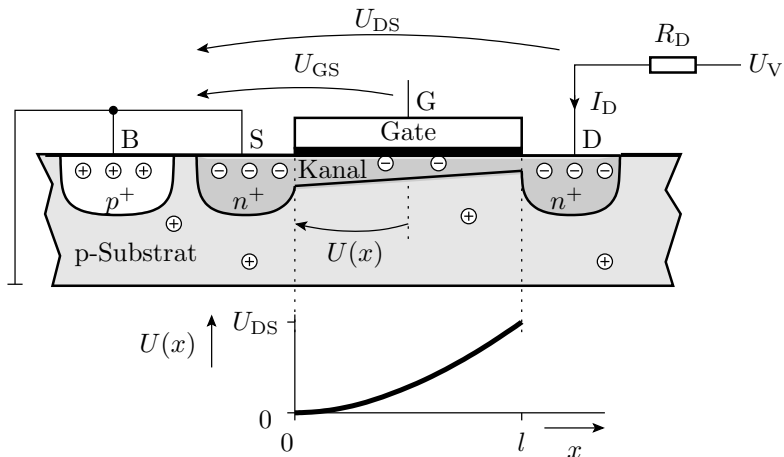
$$v = \mu_n \cdot E_x$$

Die Feldstärke ist gleich der Spannungsänderung in Bewegungsrichtung:

$$E_x = \frac{dU(x)}{dx}$$

Alle Gleichungen zusammen ergeben die nachfolgende Differentialgleichung:

$$I_D = C_1 \cdot \mu_n \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$



$$I_D = C_1 \cdot \mu_n \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$



$$I_D = C_1 \cdot \mu_n \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$

Die Integration beider Gleichungsseiten über die gesamte Kanallänge

$$I_D \cdot \int_0^l dx = C_1 \cdot \mu_n \cdot \int_0^l (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx} \cdot dx$$

ergibt links die Kanallänge und rechts das Integral des Spannungsabfalls über dem Kanal:

$$I_D \cdot l = C_1 \cdot \mu_n \cdot \int_{\varphi(0)}^{\varphi(l)} (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot dU(x)$$

Mit $\varphi(0) = 0$ und $\varphi(l) = U_{DS}$ ergibt sich die bereits genutzte Gleichung für den aktiven Bereich

$$I_D = \frac{C_1 \cdot \mu_n}{l} \cdot \left((U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right)$$

mit der Steilheit:

$$K = \frac{C_1 \cdot \mu_n}{l}$$

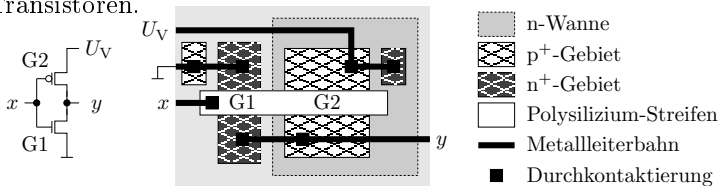
Gate-Kanal-Kapazität C_1 für ein Wegstück dx beträgt nach dem Plattenkondensatormodell

$$C_1 = \frac{\epsilon_{\text{ox}} \cdot w}{d_{\text{ox}}}$$

(ϵ_{ox} – Dielektrizitätskonstante des Gateoxids; d_{ox} – Dicke des Gateoxids; w – Kanalbreite). Eingesetzt in die Gleichungen zuvor:

$$K = \mu_n \cdot \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{d_{\text{ox}}} \cdot \frac{w}{l}$$

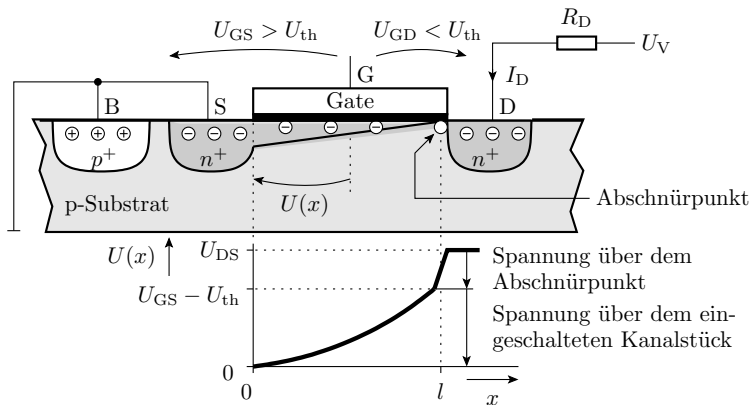
verhält sich die Steilheit proportional zum Breite-zu-Länge-Verhältnis w/l . Ein PMOS-Transistor verhält sich fast genauso wie ein NMOS-Transistor, nur das der Drainstrom und alle Spannungen negativ sind und dass die Löcherbeweglichkeit nur etwa halb so groß wie die Beweglichkeit der Leitungsbandelektronen ist. In einem CMOS-Gatter sind deshalb die PMOS-Transistoren doppelt so breit wie die NMOS-Transistoren.





Einschnürbereich

Einschnürbereich



Wenn der Kanal auf der Source-Seite ein- und auf der Drainseite ausgeschaltet ist, fällt die restliche Spannung $U_{DS} - U_{GS} + U_{th}$ über dem eingeschnürten Kanalstück ab.



Die Länge des Einschnürbereichs regelt sich so ein, dass die ankommenden Ladungsträger zum Drain abfließen können.

Der ankommende Strom I_D hängt nicht von der Spannung über dem Einschnürpunkt ab, sondern ist für alle $U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$ genauso groß wie am Bereichsumschaltunkt $U_{DS} = U_{GS} - U_{th}$:

$$\begin{aligned} I_D &= K \cdot \left((U_{GS} - U_{th}) \cdot (U_{GS} - U_{th}) - \frac{(U_{GS} - U_{th})^2}{2} \right) \\ &= \frac{K}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2 \end{aligned}$$

Die bisher verwendeten Stromgleichungen

$$I_D = \begin{cases} 0 & U_{GS} \leq U_{th} \\ K \cdot \left((U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right) & (U_{GS} > U_{th}) \wedge (U_{DS} \leq U_{GS} - U_{th}) \\ \frac{K}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2 & (U_{GS} - U_{th}) \wedge (U_{DS} > U_{GS} - U_{th}) \end{cases}$$

basieren auf der Annahme, dass die Breite des Einschnürbereichs gegenüber der Kanallänge l vernachlässigbar ist.



Aufgaben



Halbleiter

- 1 Unter welchen Bedingungen ist ein Elektron in einem Festkörper beweglich?
- 2 Was ist ein bewegliches Loch?
- 3 Wie wird die Dichte der beweglichen Elektronen in einem n-Gebiet eingestellt?
- 4 Welche Akzeptordichte und welche Dichte von beweglichen Elektronen besitzt ein p-Gebiet mit einer Löcherdichte von $p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ bei $T = 300 \text{ K}$?



Bipolartransistor

- 1 Warum wird das Basisgebiet eines Bipolartransistors um mehrere Zehnerpotenzen schwächer als das Emittergebiet dotiert?
- 2 Warum muss das Basisgebiet eines Transistor sehr dünn sein?
- 3 Welchen Nachteil hat die Übersteuerung von Bipolartransistoren?