

Grundlagen der Technischen Informatik

Dr. Wolfgang Koch

Friedrich Schiller Universität Jena

Fakultät für Mathematik und Informatik

Rechnerarchitektur

wolfgang.koch@uni-jena.de

1

Grundlagen der Techn. Informatik

Inhalt

Aufbau und Wirkungsweise von Digitalrechnern

- Information im Rechner, Signale
- Zahlendarstellung
- Logische Schaltungen
- Werke des Rechners
- Mikroprogrammsteuerwerk
- Wiederholung E-Technik, **Halbleiterbauelemente**
- Datenübertragung
- Hardwarebeschreibungssprache VHDL

2

2

Halbleitermaterialien

Stromleitung im Halbleiter

Halbleiter – Festkörper, häufig Ge-, Si- Einkristalle

Leitfähigkeit κ : $\kappa_{\text{Nichtleiter}} < \kappa_{\text{Halbleiter}} \ll \kappa_{\text{Leiter}}$

$\kappa_{\text{Halbleiter}}$ – stark abhängig von der Temperatur
 – stark abhängig von Fremdatomen (Dotierung)

$\kappa_{\text{Halbleiter}}(T=0) = 0$

$\kappa_{\text{Si, undotiert}}(T=300\text{K}) \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1}/\Omega\text{m}$ ($\kappa_{\text{AL}} \approx 36 \cdot 10^{+6} \text{ 1}/\Omega\text{m}$)

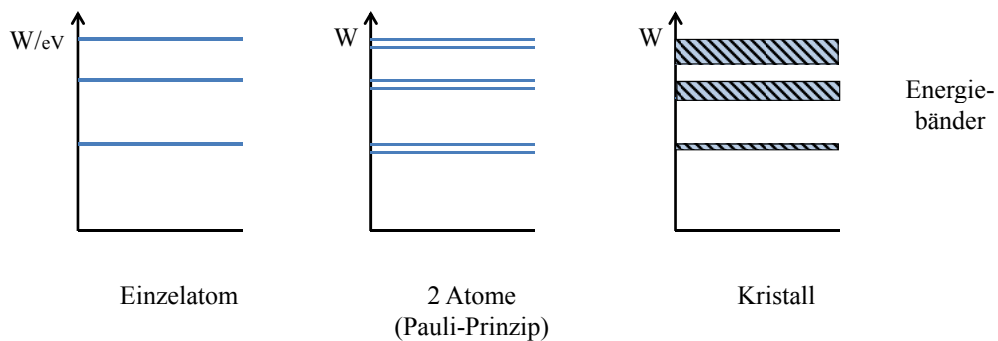
Boltzmann-
verteilung:

$$\kappa = \kappa_e \cdot e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$$

20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
$5 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$	$80 \cdot 10^{-4}$	$290 \cdot 10^{-4}$

Halbleitermaterialien, Bändermodell

Energieniveaus der Elektronen:



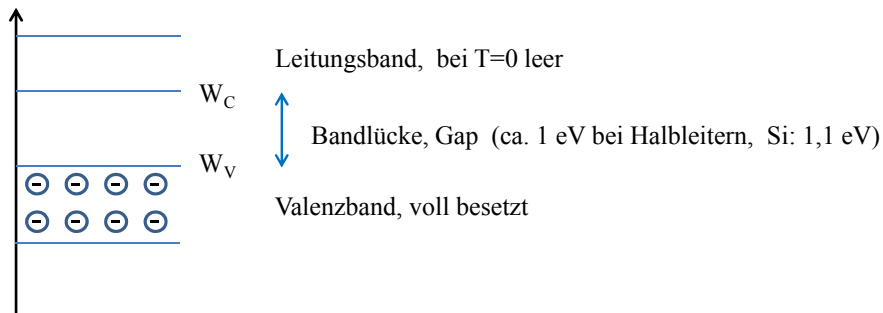
höchstes bei T=0 belegtes Band – Valenzband (für Bindung verantw.)

nächsthöheres Band – Leitungsband

Halbleitermaterialien, Bändermodell

höchstes bei $T=0$ belegtes Band – Valenzband (für Bindung verantw.)

nächst höheres Band – Leitungsband



Ein leeres Band kann nicht leiten – keine freien Ladungsträger ($\kappa = n \cdot e \cdot \mu$, $n=0$)

Ein vollbesetztes Band kann ebenfalls nicht zur Leitung beitragen – ein Elektron würde bei Beschleunigung Energie aufnehmen, aber alle Energieniveaus sind besetzt ($\mu=0$)

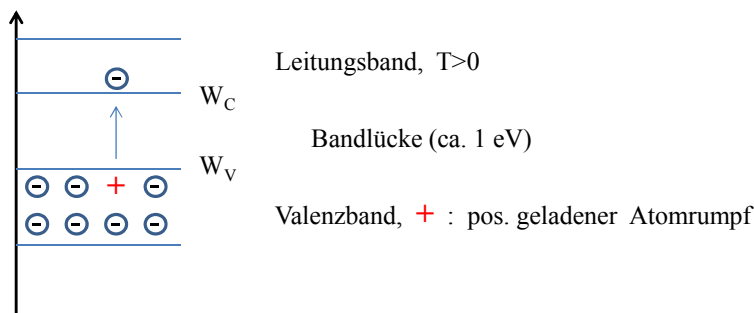
5

5

Halbleiter, Eigenleitung

Leitungsband ist bei $T=0$ nicht besetzt.

Bei $T>0$ (z.B. 300 K) erreichen einige Elektronen so hohe Energien, dass sie ihre Bindung aufbrechen, die Bandlücke überwinden und ins Leitungsband wechseln (**Anregung, Generation, Paarbildung**)



Beide Bänder können jetzt zur Leitung beitragen – freie Elektronen im LB, freie Energieniveaus im VB (→ Löcherleitung)

6

6

Halbleiter, Eigenleitung

Halbleiter: Bandlücke ca. 1 eV (Si: 1,1 eV, Ge: 0,7 eV)

Bei $T > 0$ (z.B. 300 K) erreichen einige Elektronen so hohe Energien, dass sie ihre Bindung aufbrechen, die Bandlücke überwinden und ins Leitungsband wechseln (Anregung \rightarrow Eigenleitung)
Beide Bänder können jetzt zur Leitung beitragen.

Bei **Nichtleitern** (Isolatoren) ist die Bandlücke viel größer (3 - 8 eV)

Bei Zimmertemperatur (300 K) schaffen es keine Elektronen ins LB.

Bei **Leitern** (z.B. alle Metalle) ist entweder das Valenzband nicht voll besetzt – oder VB und LB überlappen sich.

Alle Valenzelektronen sind frei – sehr gute Leitfähigkeit

$$(\kappa = n \cdot e \cdot \mu, \quad n_{\text{Leiter}} \gg n_{\text{Halbleiter}})$$

7

7

Halbleiter, Eigenleitung

Bei $T > 0$ Anregung, Generation, Paarbildung

Valenzband

+ : pos. geladener Atomrumpf



ein benachbartes Elektron kann in die + Lücke springen, hinterlässt eine neue + Lücke



Es sieht aus, als gäbe es im Valenzband **positive Ladungsträger**, ($q = +e, m \approx m_e$) man nennt sie **Defektelektronen** bzw. einfach **Löcher**.

Jedes (negative) Elektron, das durch Anregung ins LB wechselt hinterlässt im VB ein (positives) Loch \rightarrow Paarbildung $\ominus \oplus$

8

8

Halbleiter, Eigenleitung

Bei $T > 0$ Anregung, Generation, Paarbildung \rightarrow Eigenleitung

Jedes (negative) Elektron, das durch Anregung ins LB wechselt hinterlässt im VB ein (positives) Loch –

d.h. es gibt genauso viele freie Elektronen im LB wie Löcher im VB !

$n = p = n_i$ n – Dichte der freien Elektronen
 p – Dichte der Löcher
 n_i – intrinsic – d.h. Eigen(leitungs)-Dichte

$n \cdot p = n_i^2$ **MWG** - Massenwirkungsgesetz

Gelegentlich „fallen“ Elektronen ins VB zurück – und „füllen“ dabei ein Loch – **Rekombination**.

Generation und Rekombination finden gleichzeitig statt, bei konstanter Temperatur stellt sich ein **Dynamisches Gleichgewicht** ein, $n_i = f(T)$ 9

Halbleiter, Eigenleitung

$n \cdot p = n_i^2$ **MWG** - Massenwirkungsgesetz

Das MWG gilt auch später bei Störstellenleitung.

Dynamisches Gleichgewicht, $n_i = \text{const}$ (für $T = \text{const}$), $n_i = f(T)$

300 K:

Si: $n_i \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Ge: $n_i \approx 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (geringere Bandlücke)

Dichte der Atome: $\approx 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

D.h. bei Si nur 1 Leitungselektron auf $3 \cdot 10^{12}$ Valenzelektronen!
(deshalb wesentlich geringere Leitfähigkeit als Leiter)

Halbleiter, Eigenleitung

Exkurs:

Dichte der Atome ($\approx 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)

1 Mol enthält $6,022 \cdot 10^{23}$ Atome/Moleküle (Avogadro-Konstante N_A)

1 Mol Si wiegt 28,09 g (molare Masse – aus dem Periodensystem)

Die Dichte von Si ist $2,33 \text{ g/cm}^3$

d.h. 1 cm^3 Si enthält den $2,33/28,09$ fachen Teil von $6,022 \cdot 10^{23}$ Atomen

1 cm^3 Si enthält $5,00 \cdot 10^{22}$ Atome

(Ge: $4,42 \cdot 10^{22} \text{ Atome/cm}^3$ Cu: $8,49 \cdot 10^{22} \text{ Atome/cm}^3$)

11

11

Halbleiter, Störstellenleitung

Das vierwertige Si oder Ge wird an einigen Gitterstellen durch ein fünfwertiges Atom ersetzt.

Gezielter Einbau von wenigen Fremdatomen – **Dotierung** – um das vernünftig tun zu können, muss das Ausgangsmaterial äußerst rein sein! (99,99% reichen da bei weitem nicht.)

fünfwertiges Atom:

nur 4 Valenzelektronen werden zur Bindung benötigt – das 5. Elektron ist bei Zimmertemperatur abgelöst (0,01 .. 0,04 eV) und steht als Leitungselektron im LB zur Verfügung

fünfwertige Atome: P, As, Sb (Antimon) – Donatoren (Spender)

$N_D \gg n_i$ (N_D - Donatoren-Dichte)

$n \approx N_D$

n-Halbleiter, Elektronenleitung (deutlich **höher** als die Eigenleitung),
Elektronen – **Majoritätsladungsträger**

12

12

Halbleiter, Störstellenleitung

fünfwertige Atome – Donatoren → n-Halbleiter

$$N_D \gg n_i \quad (N_D - \text{Donatoren-Dichte})$$
$$n \approx N_D$$

Elektronen – **Majoritätsladungsträger**

Achtung: **Das Material ist trotzdem elektrisch neutral !!**

Es gibt ja zu jedem freien Elektron das 5-wertige Donator-Atom, dem dieses Elektron jetzt fehlt und das deshalb als einfach positiv geladener Atomrumpf (als Ion) dasteht.

Daneben gibt es weiterhin Generation und Rekombination, also auch Löcher. Wegen der Überzahl der freien Elektronen ist das dynamische Gleichgewicht aber verschoben, die Zahl der Löcher ist nur gering (**Minoritätsladungsträger**).

13

13

Halbleiter, Störstellenleitung

$n \cdot p = n_i^2$ – das **MWG** gilt auch bei Störstellenleitung

$$n_N \cdot p_N = n_i^2 \quad n_N \approx N_D \gg n_i$$

$$p_N = n_i^2 / N_D \quad p_N \ll n_i$$

(n_N, p_N – Dichte der freien Elektronen bzw. Löcher beim N-Halbleiter)

Beispiel:

$$\text{Si: } n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{Donatoren: } N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad (\text{ein Donatoratom auf } 5 \cdot 10^6 \text{ Si-Atome})$$

$$p_N = 2,25 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$(n_N = N_D + p_N = (10^{16} + 2,25 \cdot 10^4) \text{ cm}^{-3} \approx N_D)$$

14

14

Halbleiter, Störstellenleitung

Löcherleitung

Es ist auch möglich, das vierwertige Si oder Ge an einigen Gitterstellen durch ein dreiwertiges Atom zu ersetzen.

dreiwertiges Atom:

- nur 3 Valenzelektronen, aber 4 werden zur Bindung benötigt – es wird ein Elektron eines benachbarten Atoms „eingefangen“
- dieses Elektron hinterlässt ein (freies) Loch im VB

dreiwertige Atome: B, Al, Ga, In – Akzeptoren

$$N_A \gg n_i \quad (N_A - \text{Akzeptoren-Dichte})$$

$$p \approx N_A$$

p-Halbleiter, Löcherleitung (deutlich **höher** als die Eigenleitung),
Löcher – **Majoritätsladungsträger**

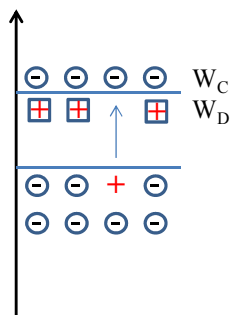
$$n_p \cdot p_p = n_i^2 \quad p_p \approx N_A \gg n_i \quad n_p = n_i^2 / N_A \quad n_p \ll n_i$$

15

15

Halbleiter, Störstellenleitung

Donatoren →
n-Halbleiter, Elektronenleitung

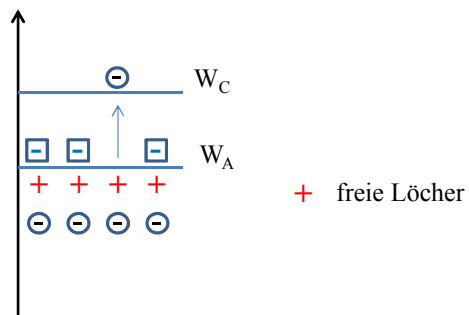


Ionisiertes Donatoratom

W_D – Energieniveau der 5. Valenzelektronen der Donatoren, bei $T=300K$ alle frei

$$n_N \gg p_N$$

Akzeptoren →
p-Halbleiter, Löcherleitung



Ionisiertes Akzeptoratom

W_A – Energieniveau der fehlenden Elektronen der Akzeptoren, bei $T=300K$ alle Akzeptoren ionisiert

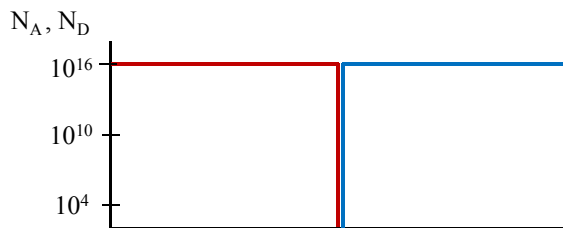
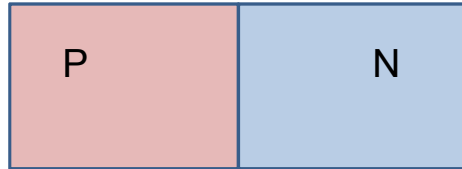
$$p_P \gg n_P$$

16

16

Halbleiter, pn-Übergang

Wir bringen ein p-dotiertes Gebiet mit einem n-dotieren Gebiet in Kontakt (innerhalb **eines** Kristalls).



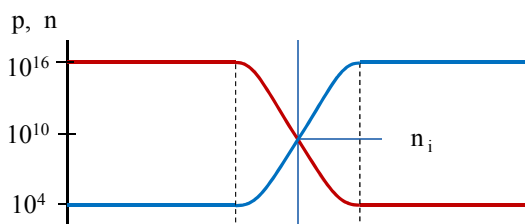
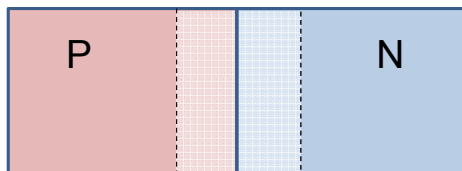
Abrupter, symmetrischer Übergang ($N_A = N_D$)
Es gibt auch allmähliche und unsymmetrische pn-Übergänge

17

17

Halbleiter, pn-Übergang

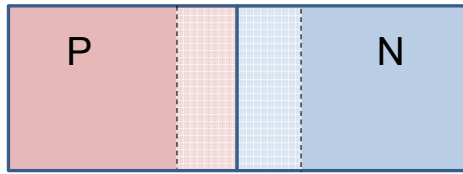
Diffusion der freien Ladungsträger über die Grenzschicht, wegen unterschiedliche Konzentration (und thermischer Wimmelbewegung)



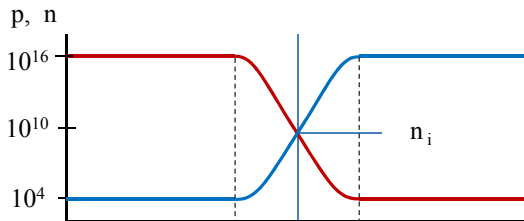
18

18

Halbleiter, pn-Übergang

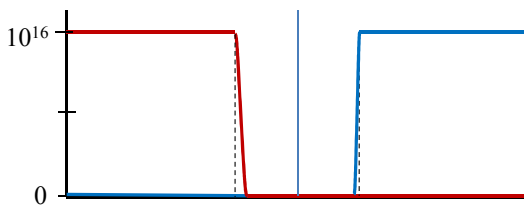


Diffusion der freien Ladungsträger, Rekombination, von freien Ladungsträgern entblößte **Sperrschicht**



Logarithmische Skala

$$2 \cdot n_i \ll p_P = n_N$$



Lineare Skala

Die Sperrschicht ist praktisch frei von freien Ladungsträgern

19

19

Halbleiter, pn-Übergang

Exkurs Diffusion

vereinfachte Anordnung:
haben links der Trennfläche n_1 und rechts n_2 Teilchen,
ziellose Wimmelbewegung,
je Zeitschritt gelangen 10% der Elemente auf die andere Seite.

n_1	n_2	$F_1 = 0,1 * (n_2 - n_1)$
100	1000	90
$100 - 10 + 100 = 190$	$1000 - 100 + 10 = 910$	72
$190 - 19 + 91 = 262$	$910 - 91 + 19 = 838$	58
$262 - 26 + 84 = 320$	$838 - 84 + 26 = 780$	46
$550 - 55 + 55 = 550$	$550 - 55 + 55 = 550$	0

Allmählicher Ausgleich der Teilchenzahl – im Halbleiter nahe der Grenzschicht Ausgleich der Ladungsträgerdichten n und p

20

20

Halbleiter, pn-Übergang

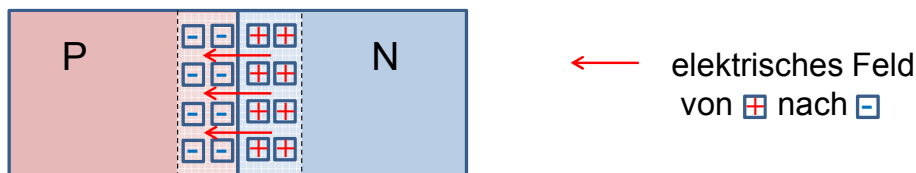
Diffusion der freien Ladungsträger über die Grenzschicht, wegen unterschiedliche Konzentration

Warum schreitet die Diffusion nicht fort, bis zum völligen Ausgleich?

Freie Elektronen aus dem n-Gebiet diffundieren ins p-Gebiet und rekombinieren mit einem Loch. Beide freien Ladungsträger verschwinden, sie hinterlassen aber einen positiv geladenen (ionisierten) **Donator-Rumpf** im n-Gebiet.

Analog diffundieren Löcher vom p- ins n-Gebiet, rekombinieren mit einem freien Elektron und hinterlassen ein **negatives Akzeptor-Ion**.

Raumladungs-Doppelschicht, Elektr. Feld, Kraft auf Ladungsträger



21

21

Halbleiter, pn-Übergang

Raumladungs-Doppelschicht, Elektrisches Feld, Kraft auf Ladungsträger

Durch das elektrische Feld wirkt auf Elektronen (neg. Ladung) eine Kraft entgegen der Feldrichtung (also ins n-Gebiet zurück).

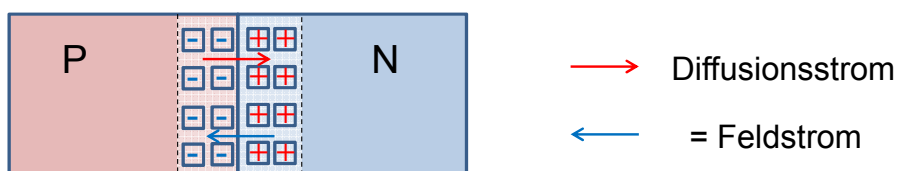
Auf Löcher (pos. Ladung) wirkt eine Kraft in Feldrichtung – ins p-Gebiet.

Dadurch kommt die Diffusion zum Erliegen – oder anders ausgedrückt:

neben dem **Diffusionsstrom** $G_D = I_D / A = e D_n dn/dx - e D_p dp/dx$

gibt es einen entgegengesetzt

gleichgroßen **Feldstrom** $G_F = I_F / A = \kappa \cdot E = (e n \mu_n + e p \mu_p) \cdot E$



22

22

Halbleiter, pn-Übergang

Über der Raumladungsdoppelschicht baut sich eine Spannung auf.

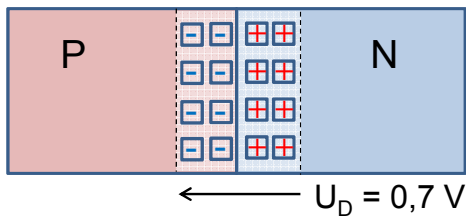
$$G_{De} + G_{Fe} = 0$$

$$e n \mu_n \cdot E + e D_n \frac{dn}{dx} = 0$$

$$E(x) dx = -D/\mu \cdot 1/n(x) dn$$

$$U_D = - \int E(x) dx = U_T \cdot \ln(n_N / n_P) \quad \text{mit } D/\mu = U_T = k \cdot T / e$$

$$\text{Si (300K, } N_A = N_D = 10^{16} \text{): } U_D = 0,7 \text{ V}$$



23

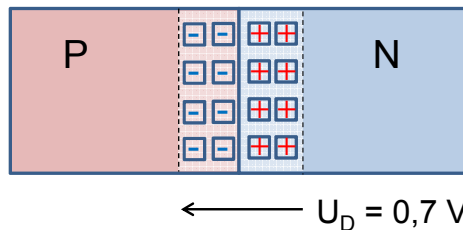
23

Halbleiter, pn-Übergang

Über der Raumladungsdoppelschicht baut sich eine Spannung auf.

$$U_D = U_T \cdot \ln(n_N / n_P) \quad \text{Diffusionsspannung}$$

$$U_T = k \cdot T / e \quad \begin{array}{l} \text{- Temperaturspannung (300K – 25 mV)} \\ \text{- Boltzmannkonstante} \end{array}$$



Die Diffusionsspannung kann von außen nicht gemessen werden.
An den äußeren Kontakten gibt es ebenfalls Diffusionsspannungen,
die der Diffusionsspannung am pn-Übergang entgegen gerichtet sind.
Die Summe aller Diffusionsspannungen ergibt 0.

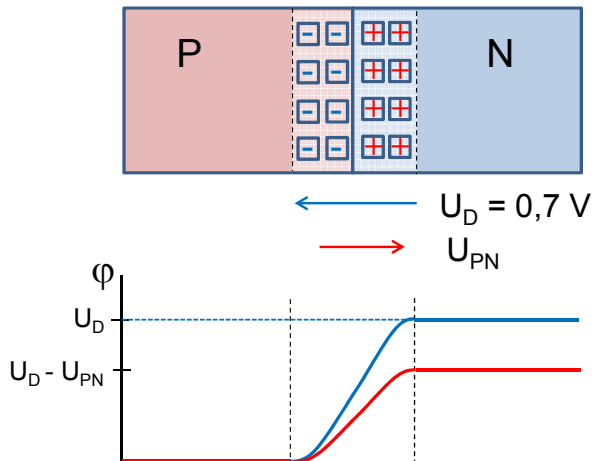
24

24

pn-Übergang - Durchlassrichtung

Bisher haben wir den pn-Übergang ohne äußere Spannung betrachtet. Jetzt legen wir eine Gleichspannung an: + an P, - an N.

Diese **äußere Spannung** wirkt der Diffusionsspannung entgegen.



25

pn-Übergang - Durchlassrichtung

Gleichspannung an: + Pol an P, - Pol an N.

Die angelegte Spannung fällt hauptsächlich über der Sperrschicht ab, nicht über den Bahngebieten (und möglichst nicht an den Kontakten) – geringes κ , hoher Widerstand der Sperrschicht.

Die angelegte Spannung wirkt der Diffusionsspannung entgegen.

Die Diffusion verstärkt sich, der Diffusionsstrom wird stärker als der Feldstrom.

Der Diffusionsstrom kann sehr groß werden, da abfließende Ladungsträger in den jeweiligen Bahngebieten als Majoritätsladungsträger in großer Zahl zur Verfügung stehen und aus der äußeren Spannungsquelle ständig nachgeliefert werden.

+ Pol an P, - Pol an N – Durchlassrichtung

26

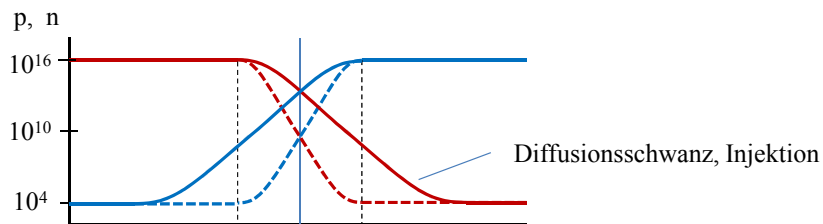
26

pn-Übergang - Durchlassrichtung

Bei der Diffusion rekombinieren Ladungsträger mit entgegengerichteten Ladungsträgern der anderen Ladungsträgerart.

Da die Grenzschicht nur schmal ist, diffundieren viele Ladungsträger bis ins gegenüberliegende Bahngebiet - wo sie Minoritätsladungsträger sind - und rekombinieren dort allmählich.

Die Minoritätsträgerdichte in den Bahngebieten nahe der Grenzschicht ist erhöht – man spricht von **Injektion**. Das MWG gilt hier nicht mehr!

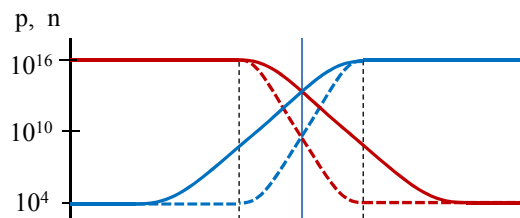


27

27

pn-Übergang - Durchlassrichtung

Im Durchlassfall wird die Sperrschicht schmaler.
(Das Integral über die Feldstärke muss nur eine geringere Spannung $U_D - U_{PN}$ ergeben.)



Der Strom wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$I_{PN} = I_S \cdot (\exp(U_{PN} / 2U_T) - 1) \quad I_S \text{ - Sättigungs-(Sperr-)Strom}$$

Dieser Strom steigt erst bei $U_{PN} > U_S \approx U_D$ stark an (U_S - Schleusensp.)

Im Durchlassfall fällt eine Spannung $U = U_S \approx U_D$ an der Diode ab. 28

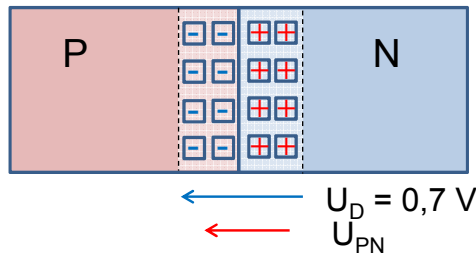
28

pn-Übergang - Sperrrichtung

Äußere Spannung:

+ Pol an N, - Pol an P – Sperrrichtung

Diese **äußere Spannung** addiert sich zur Diffusionsspannung und verstärkt diese – die Diffusion kommt zum Erliegen.



Man könnte denken, dass nun ein großer Feldstrom fließen müsste.

Der Feldstrom besteht aber aus Minoritätsladungsträgern – von diesen gibt es nur sehr wenige – der Sperrstrom ist äußerst gering (μA)

29

29

pn-Übergang - Sperrrichtung

- Pol an P, + Pol an N – Sperrrichtung

Der Sperrstrom (=Feldstrom) besteht aus Minoritätsladungsträgern – der Sperrstrom ist äußerst gering

und **von der Sperrspannung** nahezu **unabhängig!**

Die Sperrschicht verbreitert sich (Das Integral über die Feldstärke muss eine höhere Spannung $U_D + U_{PN}$ ergeben.)

Zum Sperrstrom tragen auch Ladungsträger bei, die in der Sperrschicht durch Paarbildung entstehen –

höhere Spannung – breitere Sperrschicht – mehr Volumen zur Paarbildung – mehr freie Ladungsträger – etwas größerer Sperrstrom

Minoritätsträger in den Bahngebieten, die durch thermische Bewegung in den Bereich der Feldstärke kommen, werden „abgesaugt“ (nahe der Sperrschicht: $n_P, p_N = 0$, MWG gilt nicht mehr, Extraktion)

30

30

pn-Übergang - Sperrrichtung

Der Sperrstrom (aus Minoritätsladungsträgern) ist äußerst gering
und **von der Sperrspannung** nahezu **unabhängig!**

Bei hohen Sperrspannungen werden Elektronen in der Grenzschicht stark beschleunigt – sie erreichen hohe Energien

– können andere Elektronen aus ihren Bindungen „herausschlagen“

Generation zusätzlicher Ladungsträger, auch diese werden beschleunigt → **Lawinendurchbruch** (Avalanche-Effekt)

(ohne Strombegrenzung durch einen Widerstand würde das Bauteil zerstört)

Anwendung: **Z-Diode** zur **Spannungsstabilisierung**

Z-Diode in Sperrrichtung parallel zum Bauteil, an dem die Spannung konstant gehalten werden soll, etwas höhere Spannung wird über einen Vorwiderstand angelegt.

31

31

pn-Übergang - Photodiode

Der Sperrstrom (=Feldstrom) besteht aus Minoritätsladungsträgern – der Sperrstrom ist äußerst gering.

Zum Sperrstrom tragen auch Ladungsträger bei, die in der Sperrschicht durch Paarbildung entstehen –

ev. auch durch **Lichtquanten** – $E = h \cdot \nu$

→ **Photodiode** (wird in Sperrrichtung betrieben)

fällt Licht in den Bereich des pn-Übergangs werden zusätzliche Ladungsträgerpaare generiert

– der (Sperr-) Strom steigt

Einsatz als Lichtsensor:

Belichtungsmesser, Lichtschranke, Optokoppler (zusammen mit LED)

32

32

pn-Übergang - Leuchtdiode

(Photodiode – in Sperrrichtung betrieben
Lichtquanten generieren Ladungsträger)

entgegengesetzter Effekt:

strahlende Übergänge bei Rekombination (in Durchlassrichtung)

(Material: meist eine Ga-Verbindung als III-V-Verbindungshalbleiter)

→ **Leuchtdioden - LED**

$\Delta E > h \nu = h c / \lambda$ - d.h. die Bandlücke muss groß genug sein

Rot: $\lambda = 650 - 750 \text{ nm}$, $1,65 - 1,91 \text{ eV}$ (GaP, GaAsP)

Grün: $\lambda = 490 - 575 \text{ nm}$, $2,16 - 2,53 \text{ eV}$ (GaP, AlGaP, GaN)

Blau: $\lambda = 420 - 490 \text{ nm}$, $2,53 - 2,95 \text{ eV}$ (InGaN, ZnSe)

Weiß: meist blaue oder UV-LED mit Lumineszenz-Schicht

33

33

pn-Übergang - Photovoltaik

Die Diffusionsspannung kann von außen nicht gemessen werden.

An den äußeren Kontakten gibt es ebenfalls Diffusionsspannungen,
die der Diffusionsspannung am pn-Übergang entgegen gerichtet sind.
Die Summe aller Diffusionsspannungen ergibt 0.

(Es fließt auch kein Strom wenn die Anschlüsse über einen Widerstand
verbunden werden – woher sollte auch die Energie kommen?)

Das ändert sich, wenn **Licht** in den Bereich des pn-Übergangs kommt.

Es werden Ladungsträgerpaare generiert.

Unter dem Einfluss der internen Feldstärke werden diese Ladungsträger
getrennt, an den Kontakten kann eine Spannung gemessen werden.

$$U < U_D$$

Es kann jetzt ein Strom fließen, Energie kommt aus den Lichtquanten

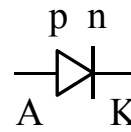
34

34

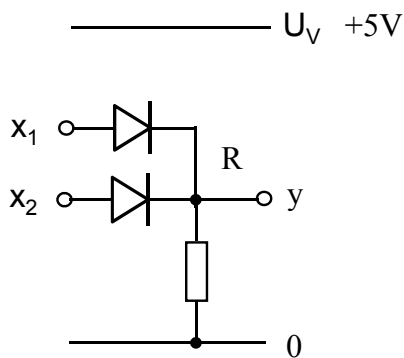
pn-Übergang - Halbleiterdiode

Anwendung von HL-Dioden:

Gleichrichter, Schutz vor falscher Polung,
Freilaufdiode parallel zu induktiver Last



auch **logische Schaltungen** AND / OR (Dioden zum Entkoppeln)



$$x_1 \text{ oder } x_2 = U_V (=1)$$

$$\rightarrow y = U_V - U_S (=1)$$

$$\text{sonst } y = 0 (=0)$$

Pegel sinkt ab! Nicht kaskadierbar.
D.h. wir brauchen auch aktive
Elemente - Transistoren

35

35

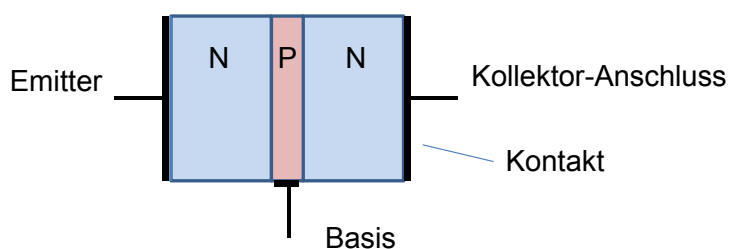
Bipolartransistor - npn

Transistor – gesteuertes Bauelement ([transfer resistor](#))

durch eine **angelegte Spannung** oder **elektrischen Strom** steuerbarer
elektrischer Widerstand

zum Schalten oder Verstärken von elektrischen Signalen

bipolar – beide Ladungsträgerarten (Elektronen und Löcher)
tragen zur Leitung bei



36

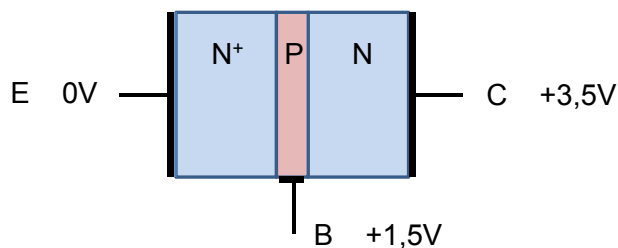
36

Bipolartransistor - npn

Bipolartransistor – wie 2 Dioden zusammen in einem Kristall
(aber so eng benachbart, dass sie sich gegenseitig beeinflussen)

der **Emitter** ist sehr hoch dotiert (wesentlich stärker als die Basis),
die Basis ist sehr schmal

die Basis-Emitter-Diode wird in **Durchlassrichtung** betrieben,
die Basis-Kollektor-Diode in **Sperrrichtung**



37

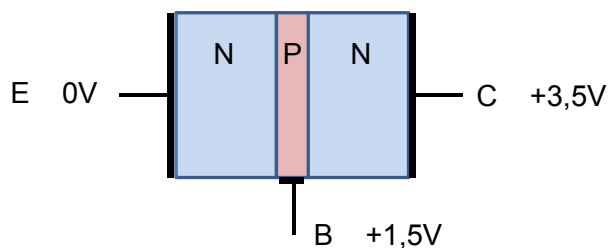
37

Bipolartransistor - npn

Die Basis-Emitter-Diode wird in **Durchlassrichtung** betrieben.
Der **Emitter** ist sehr hoch dotiert (wesentlich stärker als die Basis),
d.h. der B-E-Strom besteht ganz überwiegend aus der Ladungs-
trägerart des Emitters (Elektronen bei npn).

+ die Basis ist sehr schmal – die vom Emitter kommenden Ladungs-
träger rekombinieren nur zum geringen Teil im Basisgebiet

Die meisten dieser Ladungsträger (in die Basis injizierte Minoritäts-
Ladungsträger) diffundieren bis zur Basis-Kollektor-Sperrschicht,
wo sie von der Feldstärke ergriffen werden → **hoher Sperrstrom**



38

38

Bipolartransistor - npn

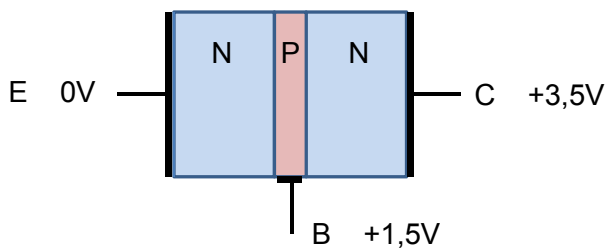
Die vom Emitter kommenden Ladungsträger rekombinieren nur zum geringen Teil im Basisgebiet.

Der effektive Basisstrom I_B besteht nur aus diesem (geringen) Anteil (plus den wenigen Löchern, die ins Emitter-Gebiet gelangen).

Die meisten Ladungsträger werden in der Basis-Kollektor-Sperrschicht von der Sperr-Feldstärke ergriffen

der Kollektorstrom I_C ist ein Vielfaches des Basisstroms

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (\beta - \text{Stromverstärkung, } \beta = 20 \dots 100)$$



39

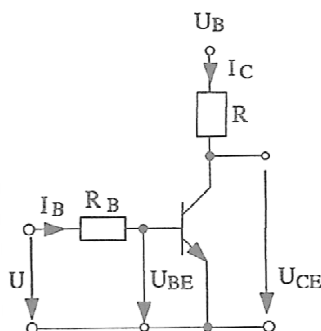
39

Bipolartransistor - npn

Bipolartransistor als Schalter (bzw. Negations-Gatter)

Als eigentlicher Schalter dient die Kollektor-Emitter-Strecke – der Schalteingang ist die Basis.

(Emitter-Schaltung)



Schalter (bzw. Negations-Gatter):

$$U > 2,5V \quad (\text{log. } 1)$$

I_B fließt, **Transistor leitet**

$$U_{CE} < 1V \quad (\text{log. } 0)$$

$$U < 0,7V \quad (\text{log. } 0)$$

$I_B = 0$, **Transistor sperrt**

$$U_{CE} > 4V \quad (\text{log. } 1)$$

40

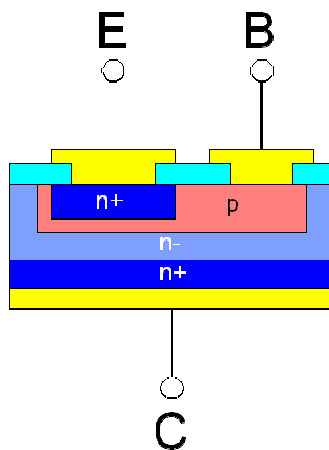
40

Bipolartransistor - npn

Bipolartransistor in **Planartechnologie**

Planartechnologie für integrierte Schaltkreise

– der Kollektor wird auch noch nach oben herausgeführt



Quelle des Bildes:

Wikipedia
Bipolartransistor

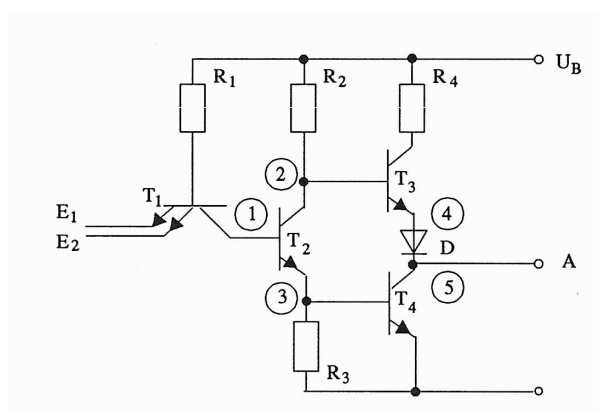
41

41

Bipolartransistor – TTL-Gatter

NAND als **TTL-Schaltkreis**

Typische Werte: $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1.6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 125 \Omega$



Normal- und Inversbetrieb von T1,
Gegentaktendstufe T3, T4, Hubdiode D

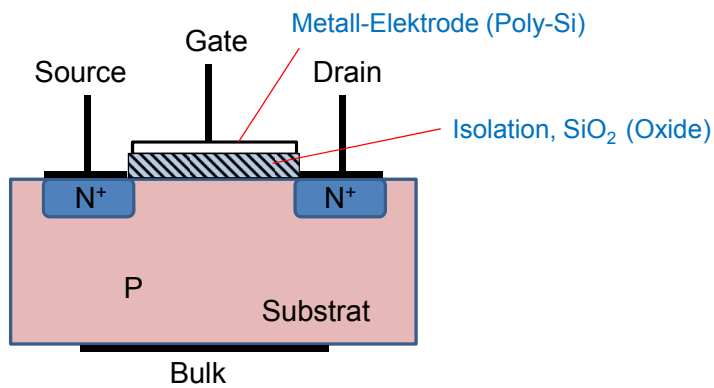
42

42

Unipolartransistor, MOS-FET

Aufbau eines MOS-FET

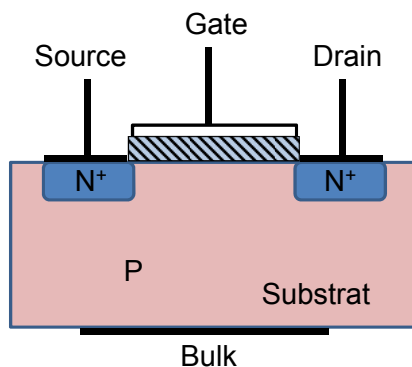
MOS – Metal-Oxide-Semiconductor (MIS – Metal-Isolator-Semic.)
FET – Feldeffekttransistor (ein elektrisches Feld bewirkt den Effekt)



43

43

Unipolartransistor, MOS-FET



Drain und Source sind eigentlich vertauschbar –

als Source bezeichnet man die Elektrode, die die Ladungsträger des „Kanals“ aussendet

Wird zwischen **Drain** und **Source** eine Spannung U_{DS} gelegt, so kann trotzdem kein Strom fließen: entweder ist der **pn-Übergang** zwischen Drain und Substrat **gesperrt** (+ an D) oder der pn-Übergang zwischen Source und Substrat (+ an S).

Einen Transistor-Effekt wie bei npn gibt es nicht – kein „Basis“-Strom

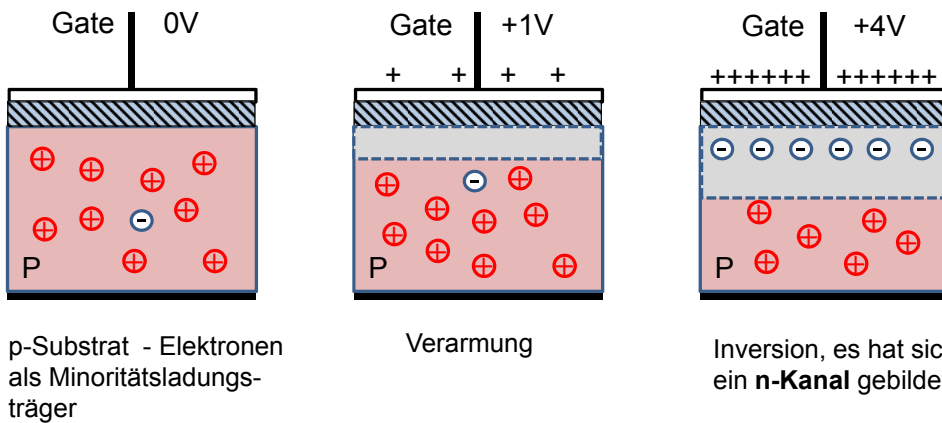
44

44

Unipolartransistor, MOS-FET

Wird an Drain und Source eine Spannung U_{DS} gelegt, so kann trotzdem kein Strom fließen – das ändert sich, wenn an das **Gate** eine (positive) Spannung gelegt wird.

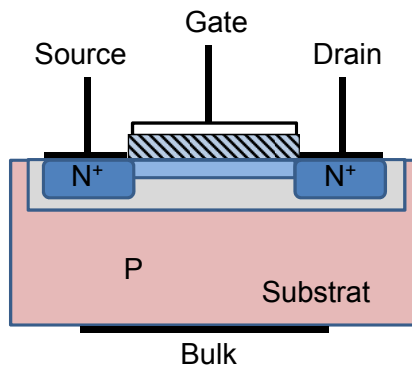
MOS-Kondensator:



45

45

Unipolartransistor, MOS-FET



an Ladungsträgern verarmte Schicht um Source, Kanal und Drain (schematisch)

Es hat sich bei $U_{GB} (=U_{GS}) > U_{th}$ ein **n-Kanal** gebildet.

p-Substrat → n-Kanal-MOSFET (und anders herum, dann $U_{GB} < 0$)

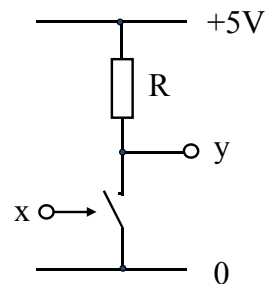
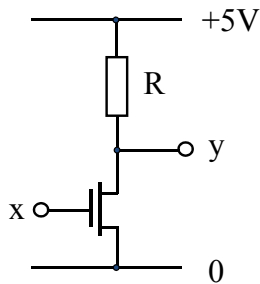
U_{th} – **Schwelspannung** (ca. 1,5V je nach Bauform)

Wird jetzt an Drain und Source eine Spannung U_{DS} gelegt, so kann ein **Strom I_D fließen**. Unser MOSFET kann als **Schalter** arbeiten.

46

46

Unipolartransistor, MOS-FET



Der n-Kanal MOSFET wirkt wie ein **Schalter**:

Eingangsspannung niedrig ($U_x < 1,5V$) → Transistor gesperrt
(Schalter offen)

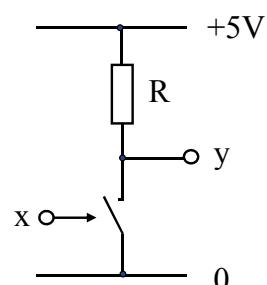
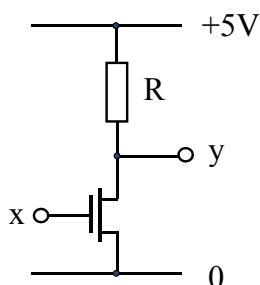
Eingangsspannung hoch ($U_x > 2,5V$) → Transistor leitend
(Schalter geschlossen)

Leistungslose Steuerung: isoliertes Gate – $I_G = 0$, $P = 0$

47

47

Unipolartransistor, MOS-FET



Der n-Kanal MOSFET wirkt wie ein **Negator**:

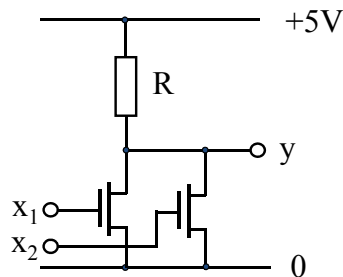
$U_x < 1,5V \leftrightarrow x=0 \rightarrow$ Transistor gesperrt, $U_y \approx 5V$, $y=1$

$U_x > 2,5V \leftrightarrow x=1 \rightarrow$ Transistor leitend, $U_y \approx 0V$, $y=0$

48

48

Unipolartransistor, MOS-FET



Durch Parallelschalten von 2 Transistoren erhält man ein **NOR**
 $x_1 = x_2 = 0 \rightarrow y = 1$, ansonsten (mind. ein Schalter zu) $y = 0$

Durch Reihenschaltung (Achtung – Bulk) erreicht man ein **NAND**

Nachteil: Strom durch R und die Transistoren, Leistungsverbrauch

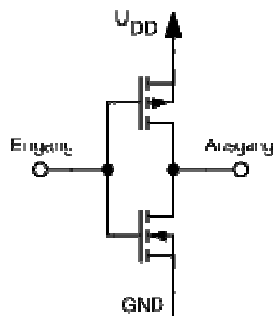
Ausweg: **C-MOS** (Complementary MOS aus n-Kanal und p-Kanal)

49

49

Unipolartransistor, CMOS

C-MOS (Complementary MOS aus n-Kanal und p-Kanal)



p-Kanal – pull up
 wenn $U_E < 2V$

n-Kanal – pull down
 wenn $U_E > 1,5V$

verbotener Bereich:

$U_E = 1,5V - 2V$ besser: $1V - 2,5V$

Da immer (außer im verbotenen Bereich) ein Transistor gesperrt ist, fließt praktisch kein Strom und es entsteht kaum Verlustleistung.

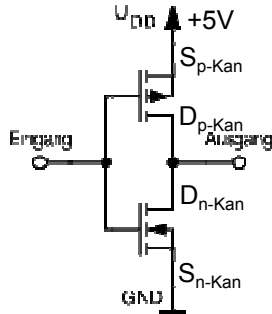
Hohe Taktrate - häufigeres Umschalten - höhere Verlustleistung.

50

50

Unipolartransistor, CMOS

C-MOS (Complementary MOS aus n-Kanal und p-Kanal)



Drain und Source sind eigentlich vertauschbar. Meist sind aber Source und Bulk (Substrat) verbunden.

Als Source bezeichnet man die Elektrode, die die Ladungsträger des „Kanals“ aussendet.

Beim p-Kanal sind das Löcher, also liegt Source am +Pol (an U_{DD}).

n-Kanal $U_{GS} > U_{th} \approx 1,5V \rightarrow$ Kanal

p-Kanal – Gate negativ

$U_{GS-p} < U_{th-p} \approx -3V \rightarrow$ Kanal

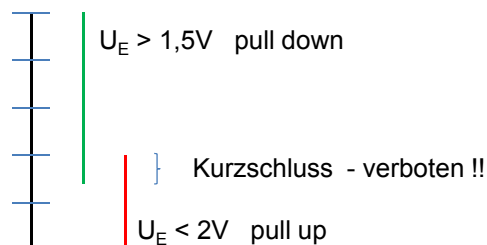
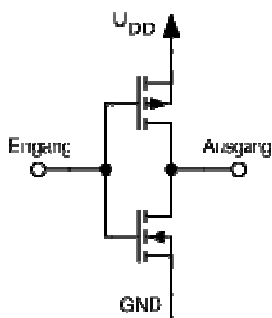
$U_{GS} = U_G - U_S = U_E - 5V < -3V \rightarrow U_E < 2V$

51

51

Unipolartransistor, CMOS

C-MOS (Complementary MOS aus n-Kanal und p-Kanal)



verbotener Bereich:

$U_E = 1,5V - 2V$ besser: $1V - 2,5V$

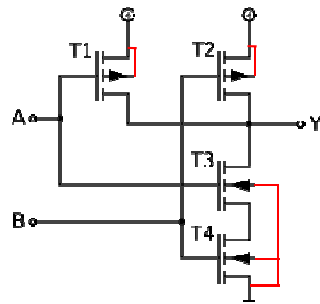
52

52

Unipolartransistor, CMOS

C-MOS (Complementary MOS aus n-Kanal und p-Kanal)

NAND-Gatter:



pull-up, $Y=1: A=0 \vee B=0$

pull-down, $Y=0: A=1 \wedge B=1$

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

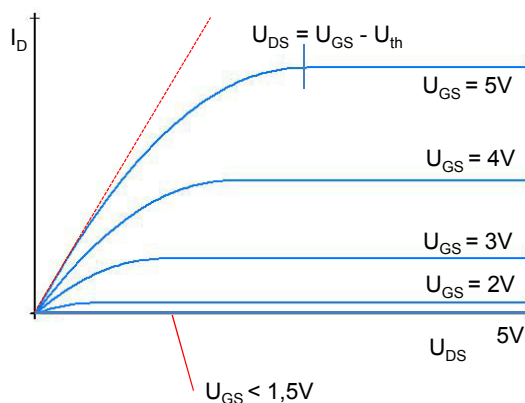
NAND

53

53

MOSFET - Kennlinien

Ausgangskennlinie $I_D = f(U_{DS})$ bei $U_{GS} = \text{const.}$ (Parameter)



Für $U_{GS} = \text{const.}$ Wächst I_D zunächst linear mit U_{DS} ($I = U/R$), dann aber immer schwächer

und für $U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$ gar nicht mehr (bzw. nur ganz wenig)

Grund:

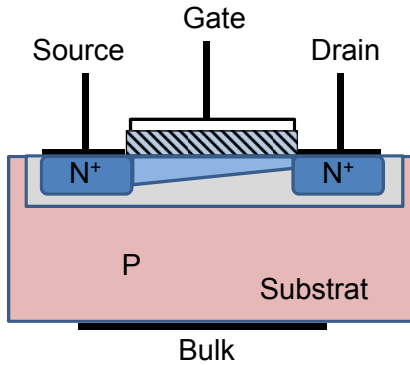
Einschnürung des Kanals,
Abschnürung bei

$$U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th}$$

54

54

MOSFET - Kennlinien



Es hatte sich bei $U_{GB} (=U_{GS}) > U_{th}$ ein n-Kanal gebildet.

Mit wachsendem U_{DS} schnürt der Kanal sich auf der Drain-Seite ein.

Grund: die Spannung U_{DS} fällt über der Länge des Kanals ab:

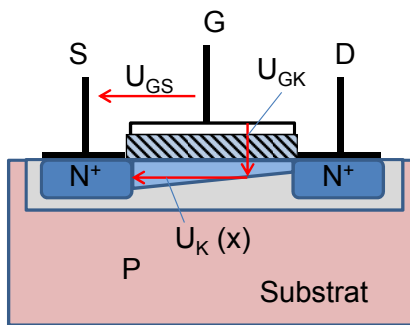
$x=0$ (Source): $U_K = 0$, $x=L/2$: $U_K \approx U_{DS}/2$, $x=L$ (Drain): $U_K = U_{DS}$

$U_{GS} = U_{GK}(x) + U_K(x)$, $U_{GK}(x)$ wird zum Drain hin immer kleiner

55

55

MOSFET - Kennlinien



$U_{GS} = U_{GK}(x) + U_K(x)$, $U_{GK}(x) > U_{th}$

$U_K(x)$ wird zum Drain hin (d.h. mit wachsendem x) immer größer, entsprechend wird $U_{GK}(x)$ immer kleiner, der Kanal wird dort dünner.

Wenn $U_{GK}(x)$ unter U_{th} absinkt ist der Kanal völlig abgeschnürt!

$U_K(L) = U_{DS}$, $U_{GK}(L) = U_{GS} - U_{DS} > U_{th}$, $U_{DS} < U_{GS} - U_{th} \rightarrow$ Kanal

56

56

MOSFET - Kennlinien

$U_{GS} \geq U_{th}$ und $U_{DS} < U_{GS} - U_{th}$ → Kanal

$U_{GS} < U_{th}$: $I_D = 0$ (kein Kanal)

$U_{GS} \geq U_{th}$ (und $U_{DS} < U_P = U_{GS} - U_{th}$):

$$I_D = K ((U_{GS} - U_{th}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2)$$

K – Steilheit, U_P – Abschnür- (Pinch-off) –Spannung

$U_{GS} \geq U_{th}$ und $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th}$ → Kanal abgeschnürt

der Strom wächst nicht weiter, setzen $U_{DS} = U_{GS} - U_{th}$ oben ein:

$$I_D = \frac{1}{2} K (U_{GS} - U_{th})^2 \quad - \text{unabhängig von } U_{DS}!$$

57

57

MOSFET - Kennlinien

$U_{GS} \geq U_{th}$ und $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th}$ → Kanal abgeschnürt

der Strom wächst nicht weiter: $I_D = \frac{1}{2} K (U_{GS} - U_{th})^2$

Aber warum kann überhaupt ein Strom fließen, wenn der Kanal doch abgeschnürt ist?

Einfache Antwort:

Würde kein Strom fließen, würde keine Spannung über dem Kanal abfallen und er wäre nicht mehr abgeschnürt.

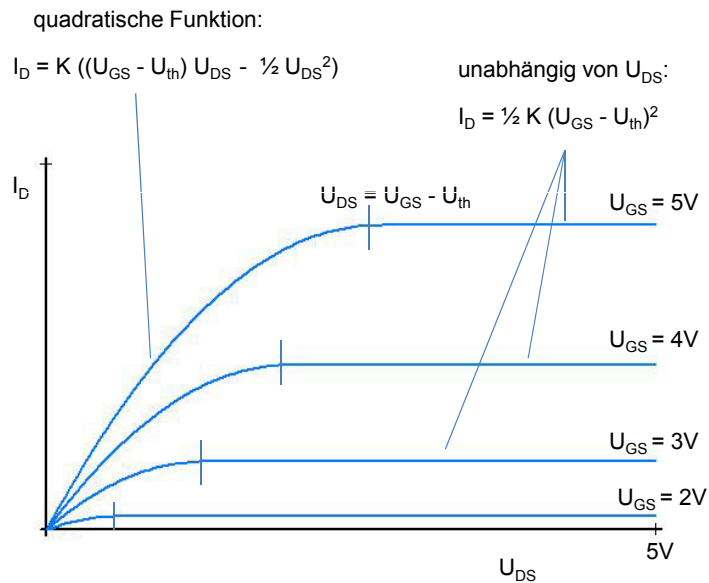
Physikalische Antwort:

Das ist wie am Kollektor eines npn-Transistors: die ganze Spannung $U_{DS} - U_P$ fällt über dem abgeschnürten Stück ab – hohe Feldstärke. Elektronen aus dem Kanal, die in den Einfluss der Feldstärke kommen, werden zum Drain gezogen, der Strom fließt also weiter.

58

58

MOSFET - Kennlinien



59

59

MOSFET - Kennlinien

Herleitung:

$$I_D = K ((U_{GS} - U_{th}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2)$$

$$G = I/A = \kappa \cdot E = e n \mu \cdot E \quad (\text{s. S. 22})$$

$$I_n = e n \mu_n A \cdot E \quad - \quad A = W \cdot h \quad (\text{Weite} \cdot \text{Höhe des Kanals})$$

$$I_n = W \mu_n \sigma(x) \cdot E(x) \quad - \quad \sigma = e n \cdot h \quad - \quad (\text{Flächen-})\text{Ladungsdichte}$$

$$Q = C \cdot U, \quad \sigma = Q/A = C/A \cdot U = c \cdot U$$

$$\sigma(x) = c_{ox} (U_{GS} - U_{th} - U_K(x))$$

$$I_n = W \mu_n c_{ox} (U_{GS} - U_{th} - U_K(x)) \cdot dU_K/dx$$

60

60

MOSFET - Kennlinien

Herleitung $I_D = K ((U_{GS} - U_{th}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2)$

$$I_n = W \mu_n c_{ox} (U_{GS} - U_{th} - U_K(x)) \cdot dU_K/dx$$

$$I_n \cdot L = W \mu_n c_{ox} ((U_{GS} - U_{th}) U_K(L) - \frac{1}{2} U_K^2(L))$$

keine Abschnürung - $U_K(L) = U_{DS}$

$$I_D = W/L \mu_n c_{ox} ((U_{GS} - U_{th}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2) \quad K = W/L \mu_n c_{ox}$$

Abschnürung - $U_K(L') = U_P = U_{GS} - U_{th}$

$$I_D = \frac{1}{2} W/L' \mu_n c_{ox} (U_{GS} - U_{th})^2$$

$L' \approx L$ (da $L' < L$ wächst I_D mit steigendem U_{DS} leicht an)

61

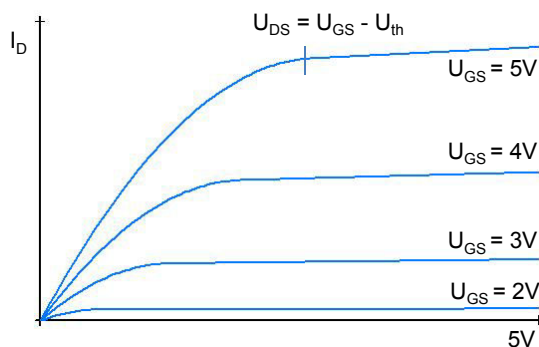
61

MOSFET - Kennlinien

$K = W/L \mu_n c_{ox}$ **Steilheit**

Enthält Weite und Länge des Kanals – in weiten Grenzen durch die Bauform beeinflussbar. Im p-Kanal: $K = W/L \mu_p c_{ox}$ ($\mu_p < \mu_n$)

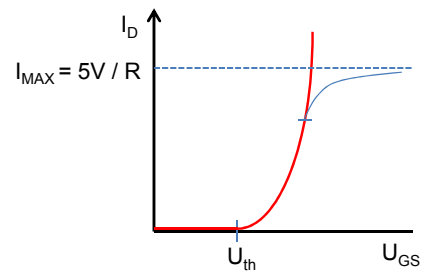
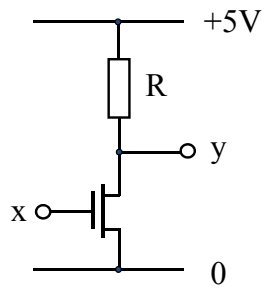
Abschnürung: $I_D = \frac{1}{2} W/L' \mu_n c_{ox} (U_{GS} - U_{th})^2$
(da $L' < L$ wächst I_D mit steigendem U_{DS} leicht an)



62

62

Unipolartransistor, MOS-FET



$U_x = U_{GS} < U_{th}$: $I_D = 0$ (kein Kanal)

$U_{GS} \geq U_{th}$ – U_{GS} sei nur wenig größer als U_{th} (I_D noch klein)
wie groß ist jetzt $U_{DS} = U_y$?

$$U_{DS} = 5V - U_R = 5V - R I_D \approx 5V > U_{GS} - U_{th}$$

der Kanal ist also schon abgeschnürt, es gilt:

$$I_D = \frac{1}{2} K (U_{GS} - U_{th})^2$$