

Physikalische Grundlagen (phybasics)

Halbleiter - Motivation

- Die Entwicklung der Computertechnik ist eng mit den Fortschritten der Integrierten Schaltungstechnik verknüpft
 - Ohne die Erfolge in der Hochintegration wäre die elektronische Geräte, die wir heute als selbstverständlich erachten nicht möglich
 - Die hohe Integration von Mikrochips haben wir den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Halbleiter zu verdanken
 - Halbleiter sind der Grundstoff mikroelektronischer Schaltungen
 - Aus Halbleiter gefertigte Transistoren spielen in der Computertechnik die gleiche wichtige Rolle wie Nukleotide in der Genetik
-

Halbleiter - Reine Halbleiter

- Halbleiter sind spezielle Festkörper, die sowohl als Isolator als auch als elektrischer Leiter auftreten können
- Für den Bau elektronischer Schaltungen spielen insbesondere Silizium (Si) (und auch Germanium (Ge)) eine Rolle
- In beiden Fällen kann die Leitfähigkeit durch äußere Einflüsse vergleichsweise einfach beeinflusst werden

Halbleiter - Reine Halbleiter - Spezifischer Widerstand (R)

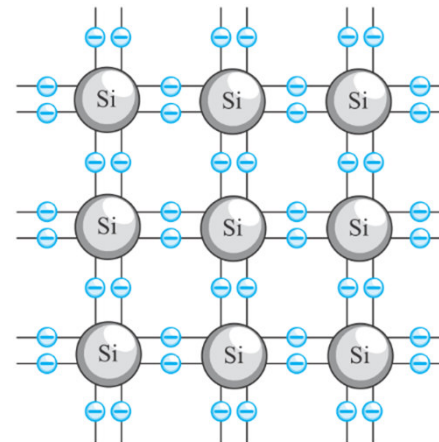
- Die Einteilung von Materialien und Leiter, Halbleiter und Isolatoren erfolgt anhand des spezifischen Widerstands
- spezifischer Widerstand $< 10^{-6} \Omega\text{m}$ -> Leiter
- spezifischer Widerstand $> 10^{10} \Omega\text{m}$ -> Isolator

Einheit $\Omega\text{m} = \Omega \cdot (\text{mm})^2 / \text{m}$

Isolatoren	
Material	Widerstand
Hartgummi	$10^{16} \Omega\text{m}$
Bernstein	$10^{14} \Omega\text{m}$
Halbleiter	
Material	Widerstand
Silizium (rein)	$10^2 \Omega\text{m}$
Germanium (rein)	$10^0 \Omega\text{m}$
Germanium (dotiert)	$10^{-4} \Omega\text{m}$
Leiter	
Material	Widerstand
Platin	$10^{-7} \Omega\text{m}$
Silber	$10^{-8} \Omega\text{m}$

Halbleiter - Reine Halbleiter - Silizium Kristallgitter

- Für die folgenden Betrachtungen sind die Elektronen der äußersten Atomschale, die sog. Valenzelektronen besonders wichtig
- Silizium hat 4 Valenzelektronen und ist bestrebt, den besonders stabilen Zustand von 8 Valenzelektronen zu erreichen
- Daher ordnen sich Silizium Atome im Verbund so an, dass die durch gemeinsames Teilen der Valenzelektronen diese Anzahl von 8 Valenzelektronen erreichen



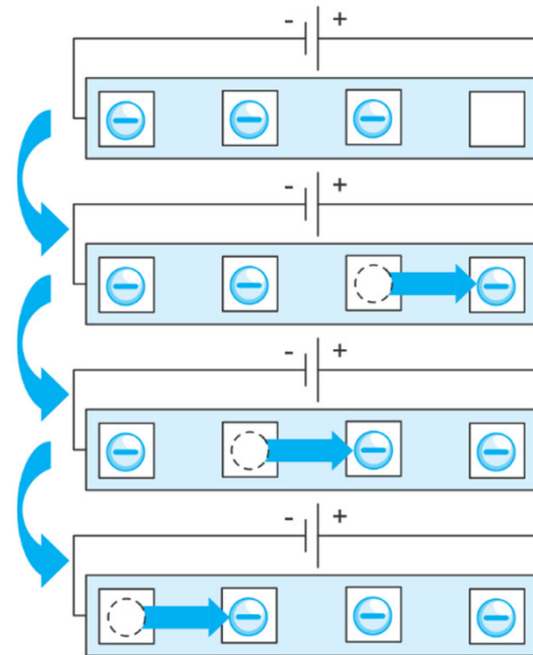
- Es bildet sich dabei die Form des Kristallgitters
 - Jedes Siliziumatom ist von 4 weiteren Atomen umgeben, die jeweils 2 Elektronen gemeinsam benutzen

Halbleiter - Reine Halbleiter - Begriffe

- Die Freisetzung von Elektronen bestimmt die Leitfähigkeit des Halbleiterkristalls
 - Für jedes herausgetrennte Elektron entsteht eine Bindungslücke (auch Elektronenloch oder Defektelektron bezeichnet)
 - Die gleichzeitige Entstehung von Leitungselektronen und Löchern nennt man Paarbildung
 - Ein freigesetztes Elektron hinterlässt ein positiv geladenes Ion, das auf Elektronen anziehend wirkt
 - Wird ein Loch durch ein freies Leitungselektron wieder aufgefüllt nennt man den Vorgang Rekombination
-

Halbleiter - Reine Halbleiter - Beschaltung Stromfluss

- Legt man an den Halbleiterkristall Spannung an, so findet ein gerichteter Stromfluss statt
- Elektronen werden in Richtung des Pluspols getrieben
- Elektronenlöcher kann man als positive Ladungsträger interpretieren
 - Elektronenlöcher bewegen sich zum Minuspol
- Auch wenn die positiv geladenen Ionen in Wirklichkeit fest sind, ist es für die Anschauung vollkommen korrekt sich den Löcherstrom als Fluss positiv geladener Ladungsträger vorzustellen

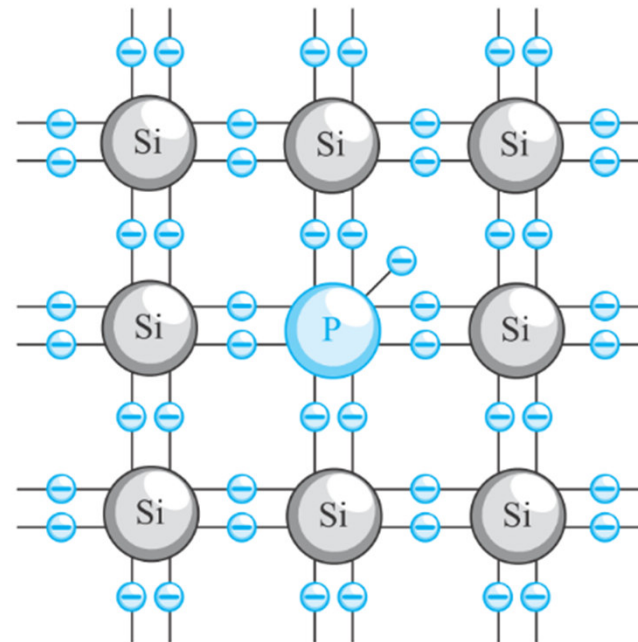


Halbleiter - Dotierte Halbleiter

- In reinem Silizium kommen Elektronen und Defektelektronen in gleicher Anzahl vor
- Stört man dieses Gleichgewicht durch eine gezielte Verunreinigung, so wird die Leitfähigkeit erheblich verbessert
- Man nennt den Vorgang des Verunreinigens Dotieren und den dadurch entstehenden Kristall dotierter Halbleiter

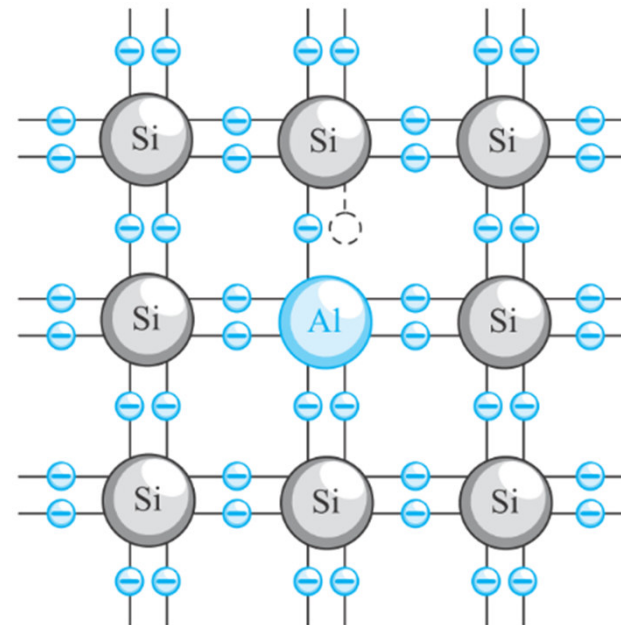
Halbleiter - Dotierte Halbleiter - n-dotierter Halbleiter

- Elektronenüberschussleiter (n-dotierter Halbleiter) entstehen, wenn man Fremdatome einbaut, die über ein zusätzliches Valenzelektron verfügen
- Beispiel Silizium n-dotiert mit Phosphor mit 5 Valenzelektronen
- Elektronen sind hier die Majoritätsträger und die Löcher die Minoritätsträger



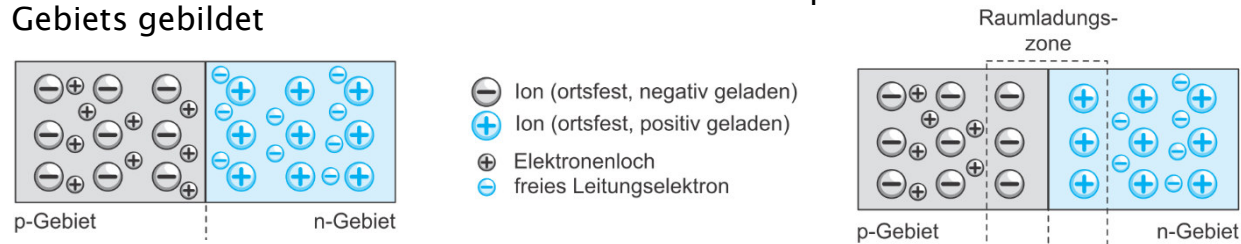
Halbleiter - Dotierte Halbleiter - p-dotierter Halbleiter

- Elektronenmangelleiter (p-dotierter Halbleiter) entstehen, wenn man Fremdatome einbaut, die über ein Valenzelektron weniger verfügen (Bor, Indium, Aluminium, Gallium)
- Beispiel Silizium p-dotiert mit Aluminium mit 3 Valenzelektronen



Halbleiter - Dioden - Funktionsprinzip und Aufbau

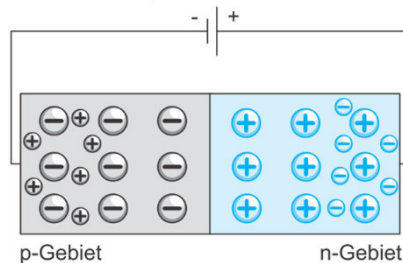
- Dioden= spezielle Schaltelemente, die für den Strom in eine Richtung als Leiter, in die andere Richtung als Isolator wirken
- Dioden werden durch den Zusammenschluss eines p-dotierten und n-dotierten Gebiets gebildet



- Nach dem Zusammenbringen des p-Gebiet and ein n-Gebiet, beginnen sich die freien Leitungselektronen in den p-Leiter zu drängen
- An dem pn-Übergang bildet sich eine Grenzschrift aus
- Dieses Gebiet nennt man auch Raumladungszone
 - Nach etwas Zeit bildet sich ein Gleichgewicht
 - Die positiven Ionen im n-Gebiet und die negativen Ionen im p-Gebiet verhindern nachdrängende Elektronen und damit ein Ausweiten der Zone
 - Diese Zone hat nur noch wenige freie Ladungsträger und wirkt als Isolator

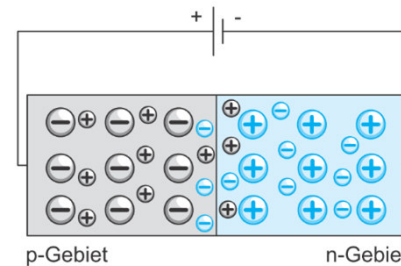
Halbleiter - Dioden - Beschaltung

- **Anlegen einer Spannung in Sperrrichtung** (p-Gebiet Minus, n-Gebiet Plus)



- Die freien Elektronen des n-Leiters wandern zum Pluspol und die Elektronenlöcher des p-Leiters zum Minuspol
- Der Anschluss am p-Gebiet wird oft als Anode bezeichnet und der Anschluss am n-Gebiet Kathode

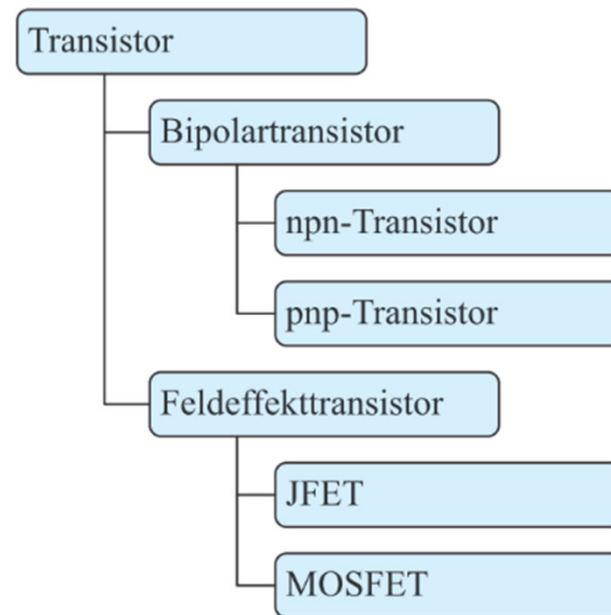
- **Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung** (p-Gebiet Plus, n-Gebiet Minus)



- Der Minuspol drängt zusätzliche Elektronen in den n-Leiter und der Pluspol drängt zusätzliche Löcher in den p-Leiter
- Diese Zusätzlichen Ladungsträger dringen in die Sperrschicht und verringern diese
- Ab einer bestimmten Schwelle ist die Sperrschicht abgebaut und ermöglicht ein nahezu ungehinderter Stromfluss

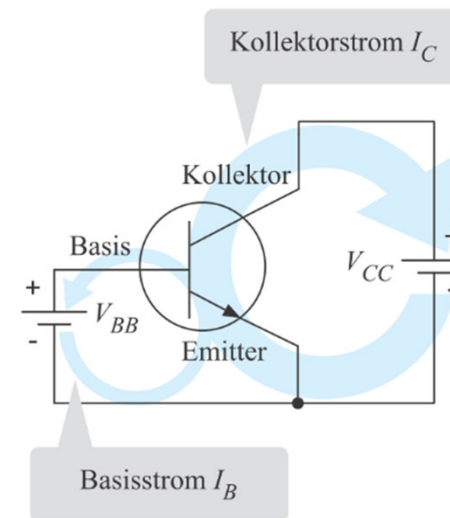
Halbleiter - Transistoren

- Das Herzstück aller modernen Computer sind Transistoren
- In der Digitaltechnik werden Transistoren je nach Ansteuerungssignal entweder leitend (1) oder sperrend geschaltet (0)
- Transistor= Kunstwort aus Transfer und Resistor
-> "steuerbarer" Widerstand
- Transistoren lassen sich auf unterschiedliche Arten realisieren



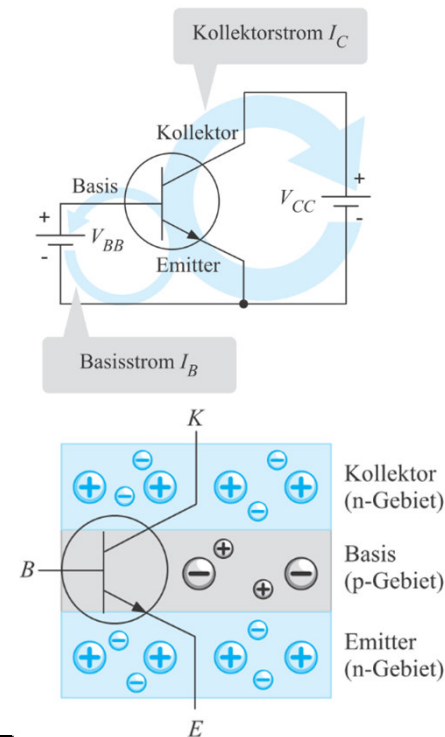
Halbleiter - Transistoren - Bipolartransistoren - npn- Transistor - Funktionsprinzip

- Der Transistor besitzt die 3 Anschlüsse Basis, Emitter und Kollektor
- Emitter und Kollektor dienen dem Zufluss und Abfluss von Elektronen
- Die Basis ist der Steueranschluss und regelt den Stromfluss zwischen Emitter und Kollektor
- Eine geringe Änderung des Stromflusses auf der Emitter-Basis-Strecke bewirkt eine große Änderung auf der Emitter-Kollektor Strecke



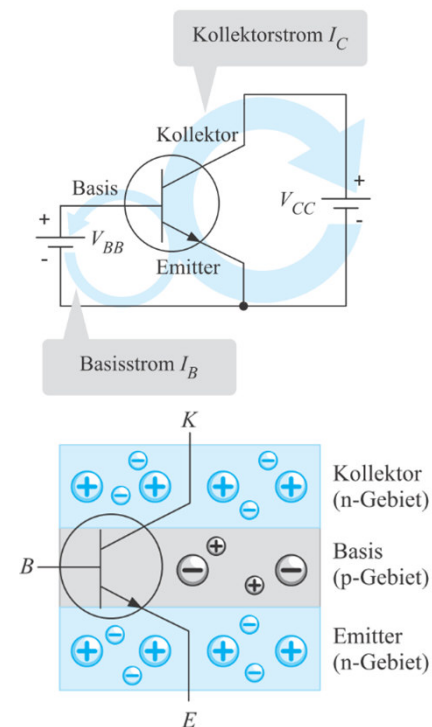
Halbleiter - Transistoren - Bipolartransistoren - npn-Transistor - Aufbau

- Der npn-Transistor hat im Gegensatz zur Diode eine zweite n-Schicht
- Die Schichten sind jedoch im Gegensatz zur Diode unterschiedlich stark dotiert (n-Leiter höher als p-Leiter)
- Der Emitter wird an den Minuspol angeschlossen (Diode EB in Durchlassrichtung)
- Der Kollektor wird an den Pluspol angeschlossen (Diode KB in Sperrrichtung)



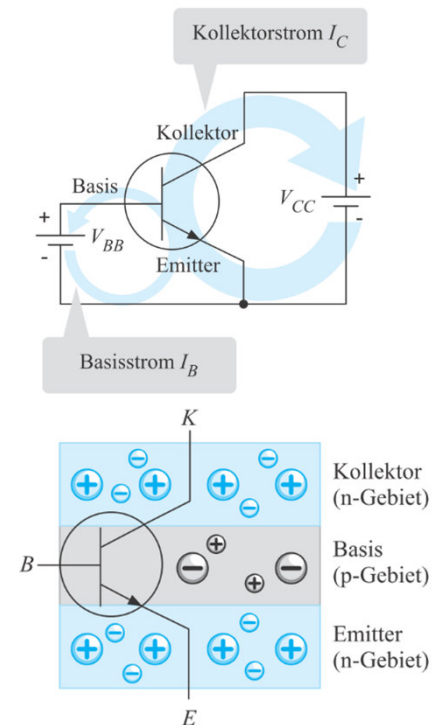
Halbleiter - Transistoren - Bipolartransistoren - npn- Transistor - Beschaltung I/II

- Basis $V_{BB} = 0V$
 - Der Minuspol am Emitter treibt Elektronen durch den n-Leiter zur Rekombination im p-Gebiet
 - (Achtung Vorstellung: Innerhalb des Kristalls wird der Ladungstransport durch die Majoritätsträger übernommen; Elektronen können nicht über die Basis abfließen; Es werden keine Löcher gebildet)
 - Ein nennenswerter Stromfluss wird verhindert



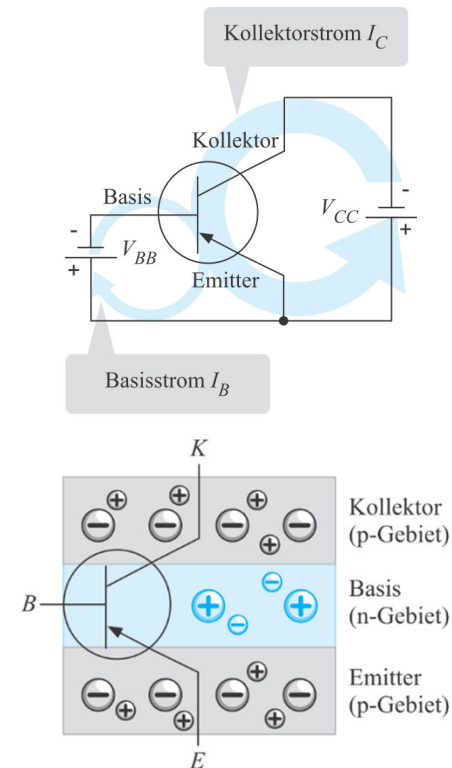
Halbleiter - Transistoren - Bipolartransistoren - npn- Transistor - Beschaltung II/II

- Basis $V_{BB} > 0V$
 - Der Minuspol am Emitter treibt Elektronen durch den n-Leiter zur Rekombination im p-Gebiet
 - Die anliegende Spannung zieht einige Elektronen aus dem p-Gebiet heraus
 - Es fließt ein schwacher Strom auf der Basis-Emitter-Stecke
 - Die starke Dotierung des n-Gebiets führt dazu dass mehr Elektronen in das p-Gebiet eindringen als über die Basis abfließen können
 - Der große Kollektorspannung überwindet die Sperrrichtung der Diode BC saugt die Mehrheit der Elektronen zum Kollektor ab



Halbleiter - Transistoren - Bipolartransistoren - pnp Transistor

- Der pnp-Transistor hat im Gegensatz zum npn statt der zweiten n-Schicht eine zweite p-Schicht
- Der pnp Transistor funktioniert ähnlich wie der npn-Transistor; aber die Majoritätsladungsträger sind vertauscht
- Der Emitter wird an den Pluspol angeschlossen (Diode EB in Durchlassrichtung)
- Der Kollektor wird an den Minuspol angeschlossen (Diode KB in Sperrrichtung)
- Basis $V_{bb} < 0V$
 - Die positive Spannung am Emitter pumpt Elektronenlöcher aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet
 - Die kleine negative Spannung an der Basis sorgt für einen kleinen Stromfluss der Löcher über die Basis
 - Die große negative Kollektorspannung überwindet die Sperrrichtung der Diode BK saugt die Mehrheit der Löcher zum Kollektor ab

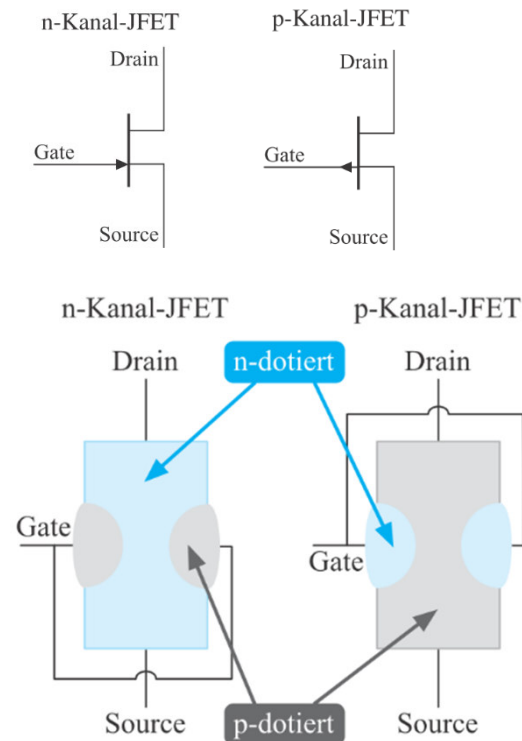


Halbleiter - Feldeffekttransistoren

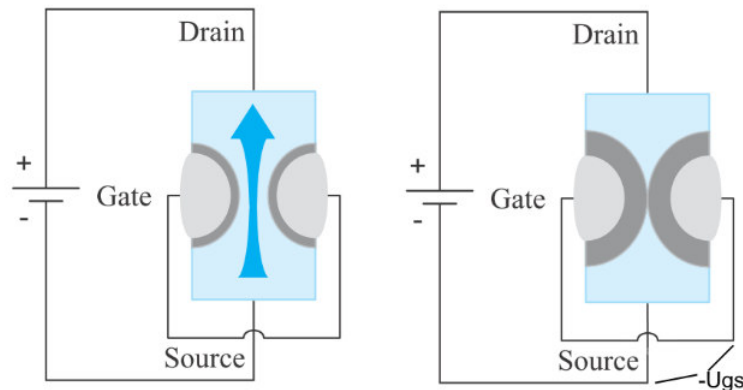
- Das Funktionsprinzip der Bipolartransistoren ist, dass ein kleiner Basisstrom einen großen Kollektorstrom steuert
- Bei Feldeffekttransistoren (FETs) steuert ein kleines elektrisches Feld (Spannung) einen großen Strom
 - Es fließt also kein Steuerstrom mehr

Halbleiter - Feldeffekttransistoren - Junction- Feldeffekttransistoren (JFETs) - Aufbau

- Der Basis entspricht beim JFET das Gate, dem Drain der Kollektor und der Source der Emitter
- Source und Drain sind durch einen dotierten Halbleiterkanal miteinander verbunden, der in der Mitte durch das komplementäre Gate-Gebiet eingeschnürt wird
- Wenn der Kanal n-dotiert ist (Gate p-dotiert) spricht man vom n-Kanal JFET
- Wenn der Kanal p-dotiert ist (Gate n-dotiert) spricht man vom p-Kanal JFET

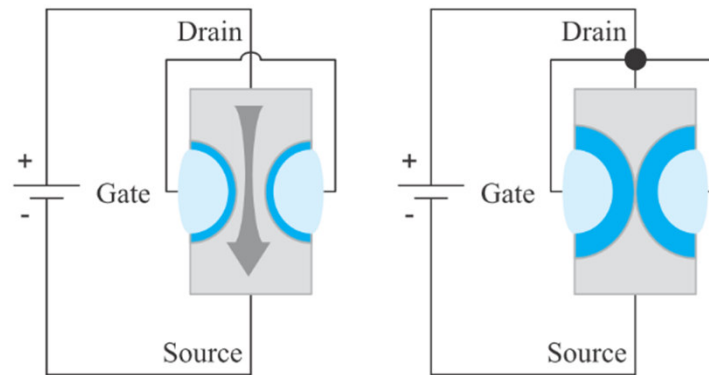


Halbleiter - Feldeffekttransistoren - Junction- Feldeffektranistoren (JFETs) - n-Kanal Beschaltung



- N-Kanal JFET mit $V_{gs} = 0$:
 - An den pn-Übergängen bildet sich eine Sperrschicht/Raumladungszone, die den Kanal verengt, aber nicht vollständig schließt
- N-Kanal JFET mit $V_{gs} < 0$:
 - Die negative Spannung bewirkt eine Vergrößerung der Sperrschicht
 - Vorstellung Diode pn mit negativer Spannung an p in Sperrrichtung betrieben
 - Ab einer gewissen Spannung ist der n-Kanal komplett geschlossen

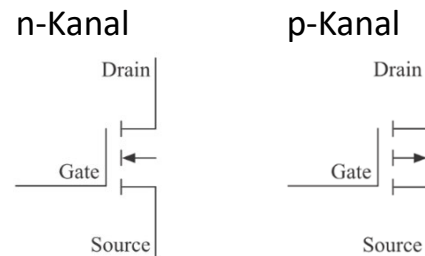
Halbleiter - Feldeffekttransistoren - Junction- Feldeffektranistoren (JFETs) - p-Kanal Beschaltung



- P-Kanal JFET mit $V_{gs} = 0$:
 - An den pn-Übergängen bildet sich eine Sperrschicht/Raumladungszone, die den Kanal verengt, aber nicht vollständig schließt
- P-Kanal JFET mit $V_{gs} > 0$:
 - Die positive Spannung bewirkt eine Vergrößerung der Sperrschicht
 - Vorstellung Diode pn mit positiver Spannung an n in Sperrrichtung betrieben
 - Ab einer gewissen Spannung ist der p-Kanal komplett geschlossen

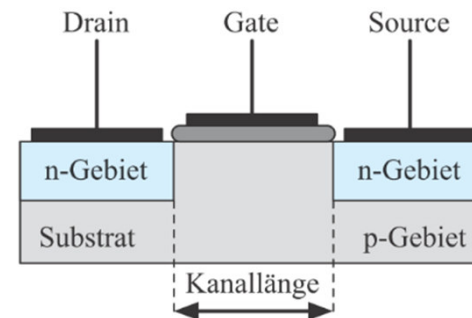
Halbleiter - Feldeffekttransistoren - MOSFETs

- Die größte Bedeutung im Bereich der integrierten digitalen Schaltungen haben die MOSFET-Transistoren (Metall Oxide Semiconductor)



- Ähnlich wie beim JFET wird der Stromfluss zwischen Source und Drain durch ein elektrisches Feld (Spannung) beeinflusst
- Das Gate arbeitet hier jedoch nicht nach dem Sperrschicht-Prinzip

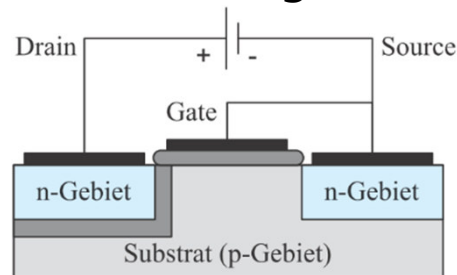
- Beispiel: n-Kanal - Aufbau



- Das Gate ist hier eine dünne Metall- oder Polysiliziumschicht, die durch ein isolierendes Dielektrikum vom Substrat getrennt ist
- Das Gate verhält sich also hier wie ein kleiner Kondensator

Halbleiter - Feldeffekttransistoren - MOSFETs - n-Kanal - Beschaltung I/III

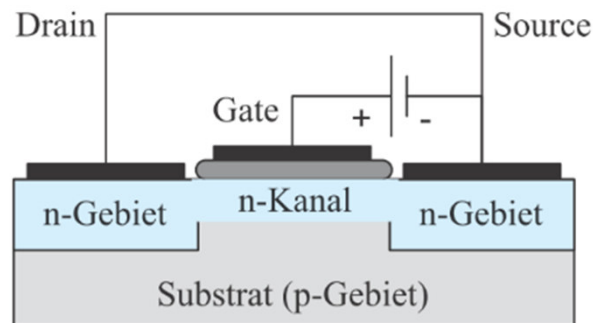
- Verhalten $V_{gs}=0$ (und $V_{ds} > 0$)



- Der Halbleiterkristall verhält sich exakt wie zwei PN-Übergänge (zwei entgegengesetzte Dioden) und sperrt
- Egal wie die Spannung an Drain und Source angeschlossen werden, eine Diode sperrt immer

Halbleiter - Feldeffekttransistoren - MOSFETs - n-Kanal - Beschaltung II/III

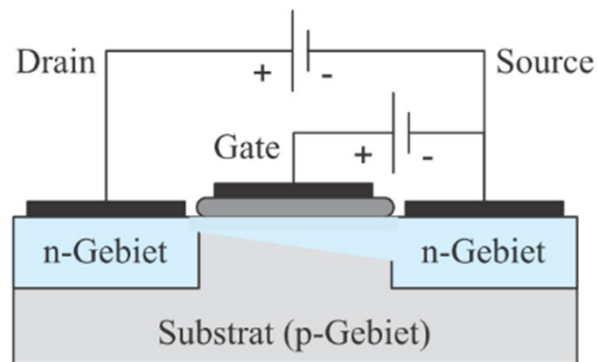
- Verhalten $V_{gs} > 0$ und $V_{ds} = 0$



- Beim Anlegen einer positiven Spannung am Gate gegenüber Source, werden die Minoritätsladungsträger des Substrats nach oben gezogen und rekombinieren
- Ab einer gewissen Schwellspannung werden mehr Elektronen in die Grenzschicht gezogen, als für eine vollständige Rekombination nötig wäre
- Diese überschüssigen Elektronen bilden nun unter Isolierschicht des Gates einen n-Kanal, der den n-dotierten Source und Drain miteinander verbindet
- Je größer die angelegte Gate-Spannung desto breiter ist dann auch der n-Kanal

Halbleiter - Feldeffekttransistoren - MOSFETs - n-Kanal - Beschaltung III/III

- Verhalten $V_{gs} > 0$ und $V_{ds} > 0$



- Das Anlegen einer positiven Spannung am Gate gegenüber Source, führt auch hier ab einer gewissen Schwelle zu einen n-Kanal, der den n-dotierten Source und Drain miteinander verbindet

- Das Anlegen einer positiven V_{ds} lässt den Strom im geöffneten Kanal fließen
- Beim erhöhten der V_{ds} wird der n-Kanal in Richtung Drain eingeschnürt

Halbleiter - Feldeffekttransistoren - MOSFETs - p-Kanal

- Der p-Kanal MOSFET funktioniert analog zum n-Kanal MOSFET
- Lediglich die Dotierungen und die (Gate-)Spannung müssen invertiert werden
 - d.h. der p-Kanal MOSFET benötigt zum Öffnen eine negative V_{gs}
- Eine negative Spannung wird nicht durch eine extra negative Spannung sondern wird dadurch erreicht, dass das Substrat/Source an die Versorgungsspannung gelegt wird
 - Ein Gate mit 0V ist dann negativ gegenüber einer Source von 5V

Halbleiter - Feldeffekttransistoren - MOSFETs - Vorteile und Bedeutung

- Die hier vorgestellten (Anreicherungs-/Enhancements-) MOSFETs verfügen eine verhältnismäßig geringe Leistungsaufnahme und lassen sich relativ leicht fertigen
- Dies ist der Grund, warum MOSFET Technologie alle anderen vorgestellten Arten von Transistoren im Bereich der integrierten Halbleiterfertigung überwiegt

Backup

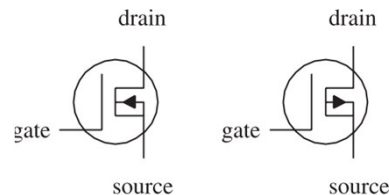
Backup Reserve

Backup Übungen Lösungen

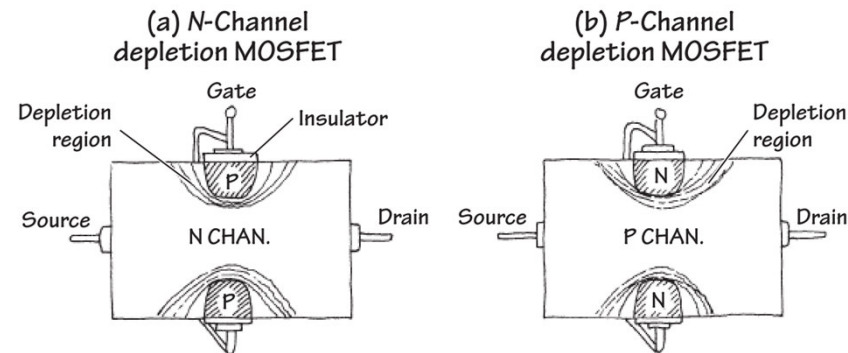
Backup Inhalte

Halbleiter - Feldeffekttransistoren - MOSFETs - Verarmungstyp (B)

- Neben den Anreicherungs/enhancement MOSFETs gibt es noch die etwas weniger bedeutenden Verarmungs-/depletion-MOSFETs



- Im Gegensatz zum Anreicherungs-MOSFET ist der Verarmungs-MOSFET wie der JFET im Ruhezustand selbstleitend



- N-Kanal:
 - Eine negative Gate-Spannung verringert die Leitfähigkeit des Drain-Source-Kanals
- P-Kanal:
 - Eine positive Gate-Spannung verringert die Leitfähigkeit des Drain-Source-Kanals

Backup Übungen