

# Halbleiter Notes III: Bipolartransistor

en. Transistor ... **Transfer-resistor**

→ Durch Anlegen einer Spannung steuerbarer Widerstand

**Bipolar:** Funktion durch **beide Ladungsträgerarten**

3 Halbleitergebiete, dotierfolge entweder **NPN** oder **PNP**

- Der Pfeil im Schaltsymbol gibt die *technische Stromrichtung im Normalbetrieb* an

## Funktion

Am Beispiel der *nnp-Dotierfolge*

- Ist die von außen anliegende Spannung  $U_{BE} = 0$ , ist sind alle pn-Übergänge gesperrt und es fließt kein Strom durch den Transistor.
- Spannung von etwa  $U_{BE} = 0.7V$  an den Basis-Emitter Übergang
- Basis-Emitter-Übergang ist in Durchlassbetrieb
- Diffusion von Löchern aus dem p- (basis) in das n- (Emitter) Gebiet (vgl. Diode: Verringerung der Breite der Raumladungszone durch äußeres Feld, Diffusionsspannung wird kompensiert, Diffusion überwiegt ggü entgegengesetztem Drift, etc.)
- *Rekombination* der Löcher aus der Basis mit den Elektronen im Emitter
- **Elektronen des Emitters** diffundieren ebenfalls in die Basis, *rekombinieren jedoch nicht*, da die Basis sehr kurz ist

- Durch äußere Spannung ist das Elektrische Feld der Raumladungszone vom Basis-Kollektorübergang so gerichtet, dass die Elektronen des Emitters sich in Richtung Kollektor bewegen (**Drift**)
- Es fließt ein *Elektronenstrom* zwischen Kollektor und Emitter
- Normalbetrieb: Basis-Emitter-Übergang in Durchlass, Basis-Kollektor-Übergang in Sperrrichtung

## Gleichungen

Annahmen: Vom Kollektor in die Basis injizierten Löcher werden vernachlässigt; Die Elektronen die nicht von der Basis in den Kollektor abgesaugt werden sondern in der Basis rekombinieren werden vernachlässigt

### Kollektorstrom:

$$I_C = I_S \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

Transfersättigungsstrom:

$$I_S = \frac{A \cdot q \cdot D_{nB} \cdot n_{B0}}{x_B}$$

( $I_S$  typ.  $10^{-17}$  A)

### Basisstrom:

Die Eingangskennlinie ( $I_B = f(U_{BE})$ ) ergibt sich als einfache Diodenkennlinie

$$I_B = \frac{A \cdot q \cdot D_{pE} \cdot p_{E0}}{L_{pE}} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

Durchlass ungefähr bei  $U_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$

Mit Stromverstärkung unten:

$$I_B = \frac{I_S}{B_N} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

## Emitterstrom

→ Kirchhoff

## Stromverstärkung

Verhältnis von *Kollektor-* zu *Basisstrom*

$$B_N = \frac{I_C}{I_B}$$

(Index N für Normalbetrieb)

$$B_N = \frac{D_{nB} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE}}{D_{pE} \cdot N_{AB} \cdot x_B}$$

$N_{DE}, N_{AB}$ ...Dotierungsdichten

$L_{pE}$ ...Diffusionslänge

Der Stromverstärkungsfaktor ist nicht konstant sondern für sehr kleine und sehr große Kollektorströme vom **Kollektorstrom abhängig**

## Inversbetrieb

Vertauschen von Kollektor und Emitter.

Basis-Kollektor-Übergang ist in Durchlassrichtung, Basis-Emitter-Übergang ist in Sperrrichtung.

Die unterschiedliche Verhaltensweise im Inversbetrieb ist auf die unterschiedlichen Dotierungen/Weiten der einzelnen Bereiche zurückzuführen. Dadurch ändert sich die Stromverstärkung.

$$B_I = \frac{I_E}{I_B} = \text{siehe oben}$$

Die Stromverstärkung im Inversbetrieb ist geringer als im Normalbetrieb

## Sättigungsbetrieb

Beide pn-Übergänge in Durchlassrichtung

**Langsameres Schaltverhalten**

Näherung:  $U_{CE,sat} \approx 0.1 \text{ V}$

## Ausgangskennlinienfeld

Darstellung des Kollektorstroms in Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung für verschiedene Werte des Basisstroms.

Das Kennlinienfeld beginnt bei fortlaufender Kollektorspannung mit dem Transistor im Sättigungsbetrieb, da die Basis-Emitter-Spannung  $> 0\text{V}$  und die Basis-Kollektorspannung ebenfalls  $> 0\text{V}$  ist; Beide pn-Übergänge sind in Durchlassrichtung gepolt, dadurch Abnahme des Kollektorstroms mit kleiner werdender CE-Spannung; Dies ist nicht der Nor-

malbetriebsfall und die Stromverstärkung  $B_N$  gilt daher nicht. Da gilt

$$U_{BC} = U_{BE} - U_{CE}$$

, sinkt die Basis-Kollektorspannung bei gleichbleibender Basis-Emitter-Spannung mit sinkender Kollektor-Emitter-Spannung, wodurch der Transistor in Sättigung geht, wenn  $U_{BC}$  positiv wird (i guess)

Der andere Bereich heißt *aktiver Vorwärtsbetrieb*

## Basisweitenmodulation (Early-Effekt)

Im theoretischen Ausgangskennlinienfeld ist der Kollektorstrom im aktiven Vorwärtsbetrieb unabhängig von der Kollektor-Emitter-Spannung (waagerechte). In der Praxis steigt der Strom jedoch mit steigender Kollektorspannung

Ursache:

Die Änderung der Kollektor-Emitter-Spannung und damit die **Änderung der Basis-Kollektor-Spannung** (Sperrspannung) führt zu einer **Änderung der Weite der Basis-Kollektor-Raumladungszone**. Die effektive Basisweite ändert sich und damit ändert sich der Kollektorstrom.

Es ergibt sich eine Gerade im aktiven Vorwärtsbetrieb, dessen Nullstelle die *Early-Spannung*  $U_{AN}$  ist. Die Steigung der Geraden ist

$$\frac{I_C|_{U_{BC}=0}}{U_{AN}}$$

## Modellierung

### Großsignalersatzschaltbild

Eingangskreis: Diode

Ausgangskreis: Gesteuerte Stromquelle

Transportmodell: Zusammenfassung von Normal- und Inversbetrieb  
→ zwei Dioden/pn-Übergänge (BC, BE) und zwei Basisströme

Für das dynamische Verhalten können noch die Kapazitäten hinzugefügt werden

### Schaltverhalten

Da der Basis-Emitter-Übergang eine Diode darstellt, muss zuerst die in der Basis befindliche Ladung ausgeräumt werden, bevor die Diode in Sperrrichtung gerät.

Trennt man die Basis-Spannungsquelle ab, kann die in der Basis befindliche Ladung nur durch Rekombination entfernt werden, wodurch der Ausschaltvorgang deutlich verlängert wird.

Schaltzeitverlängerung im Sättigungsbetrieb.

#### Schottky-Transistor

Durch parallelschalten einer Schottkydiode (Me-HL-Übergang) zum Basis-Kollektorübergang können der Sättigungsbetrieb und die Schaltzeit beim Ausschalten verringert werden

## Kleinsignalersatzschaltbild

Linearisierung der Großsignalersatzschaltung um den Arbeitspunkt (Wie bei der Diode!)

Das Kleinsignalersatzschaltbild gilt nur für den angegebenen, festen Arbeitspunkt herum bei Aussteuerung mit kleinen Signalen.

Abhängigkeit des Kollektorstroms von der Eingangsspannung: Steigung der gerade: Leitwert 'Steilheit'  $g_m = \frac{q}{k \cdot T} \cdot I_{C,A}$

Abhängigkeit des Kollektorstroms von der Kollektor-Emitter-Spannung: Ausgangsleitwert:  $g_0 = \frac{I_{C,A}}{U_{AN} + U_{CE,A}}$

Änderung des Kollektorstroms durch Änderung des Basisstroms: Kleinsignalstromverstärkung  $\beta_N = \frac{i_C}{i_B} = \frac{dI_C}{dI_B}$

Änderung des Basisstroms bei Änderung der BE-Spannung: Eingangsleitwert  $g_\pi = \frac{I_{C,A}}{\beta_N \cdot U_T}$

Änderung des Basisstroms bei Änderung der CE-Spannung: Rückwärtssteilheit: ist vernachlässigbar! = 0, für Rest siehe buch

## Frequenzverhalten

Stromverstärkung ist frequenzabhängig! Die **Transitfrequenz** gibt die Frequenz an, bei der die Stromverstärkung nur noch 1 ist. Die parasitären Kapazitäten führen zu einer Abnahme der Transitfrequenz