mittlere **Driftgeschwindigkeit** Elektron:   
( = effektive Masse (Berücksichtigung unterschiedl. Beschleunigung von LT als in Vakuum, da elektr. Felder in HL))  
**Beweglichkeit** Elektron: Beweglichkeit Löcher:   
🡪 Beweglichkeit abhängig v. Zeit zw. zwei Stößen () und effektiver Masse ()  
🡪 Elektronenbeweglichkeit höher als Löcherbeweglichkeit (, Beispiel Sitzreihe)

Streumechanismen: 🡪 je höher Dotierungskonzentration und/oder T, desto geringer Beweglichkeit  
🡪 **Achtung** bei hoher Dotierung: Störstellenstreuung bei niedriger T, Beweglichkeit steigt mit steigender T erstmal an (wegen Coulomb-Wechselwirkung, Kräfte zwischen zwei Ladungen)

Gesamtlöcherladung in einem Volumen:   
Löcherstrom: Löcherstromdichte:

E-Feld von Plus nach Minus 🡪 Löcher bewegen sich in Richtung E-Feld, Elektronen entgegen  
🡪 technische Stromrichtung entspricht Richtung des Löcherstroms  
🡪 Gesamtfeldstrom: (Summe aus Elektronen- und Löcherfeldstrom)

**Feldströme**

( = spez. Leitfähigkeit; )   
🡪 **Achtung**: Strom ab gewisser Feldstärke nicht mehr proportional, da gesättigt

**Spezifische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand** (Zusammenhang mit Beweglichkeit)

🡪 🡪 je höher Dotierung, desto geringer Wid.

**Diffusionsstrom** (Nettoteilchenstrom in Richtung abnehmender Konzentration)

Elektronendiffusionsstrom: ( = Diffusionskonstanten, = Injektionsrate)

Löcherdiffusionsstrom:   
🡪 proportional zu Ladungsträgergefällen 🡪 D zu T u. Beweglichkeit:

**Gesamtstrom** (im thermodyn. Gl = 0)im HL Summe aus Feldstrom u. Diffusionsstrom:

Poissongleichung: Verknüpfung elektr. Potential + Raumladungsdichte : ()

**Extraktion und Injektion** (Ladungsträgerkonz. sind unter/über ihren Gleichgewichtswerten)

Bsp Ex: RLZ eines in Sperrrichtung vorgespannten pn-Übergangs

Bsp Inj: RLZ eines in Durchlassrichtung vorgespannten pn-Übergangs, Beleuchtung (Elektronen-Loch-Paare entstehen)

schwache Injektion:

Minor.-Konzentration nur so stark erhöht, dass noch deutlich unterhalb Major.-Konzentration im Gleichgewichtsfall  
🡪 mathematische Behandlung nur der Minor. erforderlich, da dominant für Gesamtverhalten  
*Bsp (bei RT):*  🡪   
Injektion: 🡪 kaum gestiegen 🡪 stark gestiegen

**Kontinuitätsgleichungen**

und 🡪 Anzahl LT in einem Volumenelement durch zu-/abfließende Ströme, Generation od. Rekombination ändernd (im TGL: Generationsrate = Rekombinationsrate 🡪 )  
Im Nichtgleichgew.: ( Generationsüberschussrate durch: Beleuchtung, Kernstrahlung, Extraktion)

Im Nichtgleichgew.: ( Rekombinationsüberschussrate)  
🡪 und

Minoritätsträgerlebensdauer(mittlere Lebensdauer bis zu Rekombination) n-HL: , p-HL:   
(, : Zusätzlich injizierte Elektr./Löcher, = Löcher-/Elektr.-Lebensdauer) 🡪 Kontinuitätsgl.: und Diffusionslänge**:**  /   
Kontinuitätsgl. über Zeit: , über Ort: (Minor.überschuss exp. abklingend über t / L)

Minoritätsträgerüberschussdichte an Oberfläche:

, ,

**HL im Nicht-Gleichgewicht**

**Leitungsband**: Energieband, das über dem höchsten voll mit Elektronen besetzten Energieband (Valenzband) liegt. Wenn Elektronen im Leitungsband, Energieaufn. aus E-Feld möglich, dann leitfähig *(„Band“ kein Ort, sondern Energie!)*  
🡪 bei Halbleitern **Bandlücke** zwischen Valenzband und Leitungsband, Überwindung nur durch äußere Energiezufuhr (thermisch, kinetisch, photonisch)

Bandabstände: ()  
*Halbleiter*: Germanium (Ge) 0,67 eV < Silizium (Si) 1,12 eV < Galliumarsenid (GaAs) 1,43 eV

*Isolator*: Siliziumnitrid (Si3N4) 5,1 eV < Siliziumdioxid (SiO2) < 8,0 eV

alpha-Teilchen: zweifach positiv geladene Heliumkerne; äußerste vier Elektronen von Si: auf 3s- und 3p-Orbital

Silizium = Element-Halbleiter; kristallisiert in 2 um Raumdiag. verschob., kubisch-flächenzentrierte Gitter (Diamantstr.)

monokristallin: perfekter Kristall, perfekter Kristall, alle Atome auf regulären Gitterplätzen, keine Störungen

**Bändermodell**

**HL im thermodynamischen Gleichgewicht (TDG)** (T überall gleich, Gesamtstrom überall = 0, keine Beleuchtung)

thermische Ladungsträgergeneration:

thermische Gitterschwindungen 🡪 Aufbrechen von Bindungen 🡪 Wechsel Elektronen von Valenzband in Leitungsband (notwendige Mindestenergie: Bandabstand des HL)

Ladungsträger-Rekombination:

thermisch generierte Ladungsträger vorhanden 🡪 Energieabgabe der Elektronen 🡪 Wechsel zurück ins Valenzband

🡪 Gleichgewicht zwischen beidem: **Eigenleitungskonzentration** *(„Mindestwert der elektr. Leitfähigkeit“)*

Wenn HL undotiert: n = p = ni (i = intrinsisch, keine Fremdatome, n/p = Dichte der Elektronen/Löcher im TDG)  
🡪 im thermodyn. Gleichg. gilt: („Massewirkungsgesetz des HL“)

bei RT: Germanium: Silizium: Galliumarsenid:   
🡪 **je höher T, desto höher**

**Fermi-Verteilung:** Wahrscheinlichkeit für die Besetzung von Energiezuständen durch Elektronen:   
**Fermi-Niveau ():** Besetzungswahrscheinlichkeit ist 0,5; Füllstandslinie für Elektronen und Löcher; ist Materialeigenschaft; liegt bei HL in Bandlücke

Konzentration Elektronen: Konzentration Löcher:

( = Äquivalente Zustandsdichte der Elektronen/Löcher im Leitungs-/Valenzband; für Silizium: )  
🡪 🡪 exponentiell abhängig v. Bandabstand und T, NICHT abhängig von Fermi-Niveau

**Donator** *( = Donator-Konzentration, = Donator-Konzentration + elektrisch aktiv)*Dotierung mit 5-wertigem Element: Phosphor, Arsen, Antimon 🡪 Elektron löst sich und steht im Leitungsband zum Stromtransport zur Verfügung 🡪 n-leitend (Majoritätsträger: Elektronen) (Energetische Lage Fremdatom (+ Fermi-Niveau): knapp unter Leitungsband)

**Akzeptor**

Dotierung mit 3-wertigem Element: Bor, Gallium, Indium 🡪 Loch steht zum Stromtransport zur Verfügung 🡪 p-leitend

(Majoritätsträger: Löcher) (Energetische Lage Fremdatom (+ Fermi-Niveau): knapp über Valenzband)

(Leitfähigkeit des HL durch Anzahl Dotierungsatome „einstellbar“)

Undotierter HL: Eigenleitung

Dotierter HL: Störstellenleitung 🡪 fast ausschließlich, da

**Störstellenerschöpfung** (bei RT alle Fremdatome ionisiert)

(da ) und (da ) 🡪 Berechnung zB:   
🡪 n-Dot. führt auch zu Verringerung der Löcher und

Ein Bild, das Text, Shoji enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Tisch enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Berechnung Diodenkennlinie**: Verlauf Minoritätsträgerkonzentration | | |
|  | **p-Seite** | **n-Seite** |
| **an Rändern von RLZ** |  |  |
|  | 🡪 Min.konz. an Rändern um Boltzmannfaktor ( ) angehoben | |
| **in Bahngebieten** |  |  |
| 🡪 Einsetzen in Diffusionsstrom-Gleichung : | | |
| **neuer Diffusionsstrom** |  |  |
| **Gesamtstrom:** |  | |
| (mit = theoretischer Sperrsättigungsstrom; fließt bei ) 🡪 i.d.R. 🡪 | | |

**I-U-Kennlinie** ideal/real (T steigt 🡪 Kennlinie wandert nach links, da sinkt())  
kleines U: I höher, da Überangebot von Mino. in RLZ 🡪 Rekombinationen

hohes I: Steigung von U sinkt, da U über RLZ sich asymptotisch nähert 🡪 Weite RLZ gegen 0

sehr hohes I: spürbarer Spannungsabfall über Bahngebieten 🡪 Scherung der Kennlinie

Sperrkennlinie real höher, da in RLZ hin u. wieder Rekombination mgl

**Durchbruch**

thermisch: 🡪   
🡪 Sperrsättigungsstrom temperaturabhängig 🡪 hohe Temp. und hohe Sperrspannung 🡪 hoher Sperrstrom  
🡪 steigende Verlustleistung 🡪 steigende Temp. 🡪 etc.

Zener-Effekt: führt nicht zu Zerstörung! bei Zener-Diode: Höhere Dotierungskonzentration und RLZ nur oder   
ab gewisser (negativer) Sperrspannung: Valenzelektr. p-Seite haben Energieniveau **oberhalb** Leitungsbandunterkante auf n-Seite 🡪 Valenzelektr. werden aus Bindungen gerissen 🡪 durch Bandlücke auf n-Seite 🡪 „Tunnelstrom“  
🡪 steigt mit abnehmender Weite RLZ (steigende Temp., sinkender Bandabstand, sinkende Durchbruchspannung)  
🡪 da : hohe Dot.konz. erhöht E und senkt |Durchbruch-U| 🡪 Zener-Effekt einstellbar zw. -2V und -5V

Lawinen-Effekt: Durchbruch erst bei < -5V 🡪 Beschleunigung von LT in RLZ 🡪 Stöße 🡪 weitere Elektronen-Loch-Paare  
🡪 lawinenartiges Anwachsen der LT-Zahl 🡪 starker Stromanstieg  
Abhängigkeiten:   
1. hohes N bei schwächer dotierter Seite: 🡪 hohes E 🡪| Durchbruch-U| sinkt 🡪 sinkende „mittlere freie Weglänge“ 🡪 |Durchbruch-U| steigt

2. Temperatur steigt: stärkere Gitterschwingungen 🡪 sinkende „mittlere freie Weglänge“ 🡪 |Durchbruch-U| steigt

*Temp. steigt:* thermisch: nein, Zener: |Durchbruch-U| sinkt, Lawine: |Durchbruch-U| steigt

*höhere Dotierung:* thermisch: nein, Zener: |Durchbruch-U| sinkt, Lawine: |Durchbruch-U| sinkt  
*selbst-zerstörend:* thermisch: ja, Zener: nein, Lawine: nein

Temp.koeffizient: (mit = Durchbruchspannung) negativ bei Zener-Effekt, positiv bei Lawineneffekt

🡪 Kombination Zener- u. Lawinen-Effekt bei -5V: kaum temperaturabhängig!

**Kleinsignalgrößen:** Wahl eines Arbeitspunktes (AP) durch Anlegen DC-Spannung/einprägen DC-Strom und Überlagerung mit AC-Spannung (kleine Amplitude!) 🡪 Linearisierung Diodenkennlinie mit minimalem Fehler mgl

Kleinsignalleitwert: (im AP) 🡪 differentieller Leitwert; Exakt:   
🡪 steigt für hohe Frequ., da nur noch LT an RLZ-Rand der Spannung folgen können (Trägheit)

**Kapazitäten im pn-Übergang**

Diffusionskapazität (**nur** in vorwärts gepoltem pn-Übergang)

„Speicherladung“ der Mino.träger in Bahngebieten (Reservoir, Konz. am Rand von RLZ) 🡪 steigt exponentiell mit U

Frequenzabhängigkeit: sinkt mit zunehmender Frequ., da LT in Banhgebieten nicht so schnell wandern

Sperrschichtkapazität (**bei beiden Polungen wirksam**)   
🡪RLZ als Kapazität; abh. von Weite der RLZ 🡪 je kleiner U (negativer, da Sperrrichtung), desto kleiner , da steigt  
für U < 0: mit Vereinfachung, da :

Elektronen aus n-Schicht diffundieren in p-Schicht und rekombinieren mit Löchern und umgekehrt  
🡪 in n-Schicht verbleiben positiv gelad. Donator-Ionen, in p-Schicht negativ gelad. Akzeptor-Ionen 🡪 E-Feld   
🡪 wirkt Diffusion entgegen 🡪 Sperrschicht bildet sich, mit Diffusionssp.

äußeres (> ) in Durchlassrichtung (Plus an p, Minus an n): Sperrschicht von LT überschwemmt, Stromfluss

äußeres in Sperrrichtung (Minus an p, Plus an n): E-Feld wird vergrößert, pn-Übergang sperrt

**Berechnung E-Feld in RLZ** (außerhalb RLZ kein E-Feld, ladungsfrei)   
*(Dreieck-Verlauf, da Feldlinien unterschiedlich häufig; bei Vergrößerung RLZ vergrößert sich E-Feld-Dreieck nach links und rechts sowie nach unten)*

p-Seite: n-Seite: (mit „Weite in n/p-Schicht“)

bei : (da ) (Ldng außerhalb RLZ = 0: )

**Berechnung Potential**

*(bei U in Durchlassricht. Verschiebung auf p-Seite nach oben (-U), bei Sperrricht. Verschieb. auf p-Seite nach unten (+U))*da : p-Seite: n-Seite:   
🡪 bei :

Kennzeichnung Dotierung: >1019: p++, n++; >1017: p+, n+; ~1015: p, n; <1013: p-, n-; <1011: p--, n—  
🡪 falls p-Seite höher dotiert () gilt wegen : 🡪 asymmetrischer pn-Übergang

**Energiebetrachtung**

Fermi-Niveau als Bezug, da auf n-Seite oberhalb und auf p-Seite unterhalb Bandmitte  
🡪 Verbiegung der Energiebänder bei pn-Betrachtung 🡪 Energie:   
Elektronen (oberhalb ): Diffusionsstrom zu höherem (da dort geringeres (LT-Dichte)), Feldstrom zu niedrigerem (da dort höheres )

Löcher (unterhalb ): Diffusionsstrom zu niedrigerem (da dort geringeres (LT-Dichte)), Feldstrom zu höherem (da dort geringeres )

(: Elektronenkonz. in n-Schicht auf stabilem Anfangsniveau, : Elektronenkonz. in p-Schicht auf stabil. Endniveau)

**Berechnung Diffusionsspannung :**  (🡪 abhängig von Dotierungskonzentration)

Bandverbiegung u. Maximum im Potentialverlauf; = Potentialbarriere, die überwunden werden muss, um Strom fließen zu lassen

**Berechnung RLZ-Weite:**  (Gesamt)

n-Seite: p-Seite:   
🡪 begrenzt Integrationsdichte (Anzahl Transistoren pro Flächeneinheit) in ICs; beeinflusst kapazitives Verhalten im pn-Übergang und damit zeitlichen Verlauf; je höhere Dotierung einer Seite, desto kleiner RLZ-Weite dieser Seite

**Shockley’sche Vereinfachung**

da Anzahl LT in RLZ deutlich geringer als in n- od. p-Schicht fällt äußere U hauptsächlich dort ab  
Vereinfachungen: Spannung in Bahngebieten (n-/p-Schicht) komplett vernachlässigbar, stets schwache Injektion; keine Rekombination in RLZ da geringe Weite

**Anlegen einer äußeren Spannung U (in Durchlassrichtung)** 🡪 Potential verringert sich zu   
🡪 Minor.-Konz. am Rand v. RLZ größer (Reservoir nach u.a. ) 🡪 Minoritäten bestimmen Höhe des Stroms (wg. Rekombination) 🡪 RLZ-Weite reduziert: (**Achtung!** Gilt nur für )

**Anlegen einer äußeren Spannung U (in Sperrichtung)** 🡪 Potential erhöht sich zu  **🡪** Min.konz. an Rand v. RLZ geringer als in übrigem Bereich () 🡪 RLZ vergrößert sich

Sperrsättigungsstrom temp.abhängig: Verdopplung alle 6-7K (Si); Durchlassspannung temp.abhängig:   
**Stromkommutierung**

: Speicherzeit, in der Strom kurz nach Umpolen konstant ist; : reverse recovery time: Strom von Umpolzeitpunkt bis 10% des Maximalwerts (Strom bleibt leicht unter 0); beides stark an gekoppelt

**pn-Übergang**

**ESB pn-Diode:**L (Induktivität Zuleitung) und Rs in Reihe, dazu in Reihe Parallelschaltung aus gd, CD und CS

Eingangskennlinie: (Diodenkennlinie) 🡪 mit steigendem flacher, da sinkt 🡪 dyn. :   
Übertragungskennlinie: (Diodenkennlinie) 🡪 Steigung: Steilheit (direkt prop. zu im AP)  
Ausgangskennlinie(nfeld): (F, für verschiedene oder )

Stromverstärkungskennlinie: (Ursprungsgerade)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Emitterschaltung** | **Kollektorschaltung** | **Basisschaltung** |
| **Aufbau** | E auf GND, ; R oberhalb C zu | E mit R auf GND, , C auf | B auf GND, , , R oberhalb C zu |
| **I-Verstärkung** | groß, > 100 | groß, > 100 | keine, < 1 |
| **U-Verstärkung** | groß, > 100; durch einstellbar | keine, < 1 | groß, > 100 |
| **P-Verstärkung** | sehr groß | groß, > 100 | groß, > 100 |
| **dyn. Eingangswid. re** | mittel (1 – 10) | sehr groß bis 1 | klein (10 – 500) |
| **dyn. Ausgangswid. ra** | mittel (1 – 30) | klein (0,1 – 1) | groß (10 – 1000) |
| **Phasendrehung a/e** | gegenphasig 180° | gleichphasig 0° | gleichphasig 0° |
| **obere Grenzfrequenz** | mittel | hoch | sehr hoch |
| **Anwendung** | NF-Verstärker, HF-Verstärker | Impedanzwandler NF- u. HF-Verstärker | Oszillatoren  HF-Verstärker |
| **Eigenschaften** | Ausgang hochohmig, gute Stromquelle; Eingang eher hochohmig, ist diff. Wid. von (Diodenkennlinie) | Emitterfolger  Spannungsfolger  Impedanzwandler |  |
| **Kleinsignal-ESB (AC!)  ( ist nur differenzielle Größe, nicht 0,7 V!!)** | inkl. (hoch!):  mit Stromgegenkoppl. (für Temp.stabilität!) ohne Early-Eff.:   🡪 da folgt:  (klein!) (wenn vorhanden)   (mit , )  🡪 gilt nur wenn so festgelegt, dass | Kollektorschaltung:    (groß!)  mit vorgeschaltetem Spannungsteiler:  (Knotenregel, da )  🡪 (Maschenregel) 🡪 🡪 | |

**Dimensionierung Emitterschaltung**Spannungseinstellung: 1. Vcc bestimmen od. gegeb.; 2. gewünschten bestimm.; 3. ; 4. 🡪 ; 5. 🡪 ; 6. (Widerstand Spannungsteiler unten; üblich: , ); 7. (Widerstand Spannungsteiler oben); 8. ; 9. (nur wenn Early-Effekt); 10. (Spannung an muss gleich Spannung von Out zu E sein!); 11. (wenn , darf nicht berücks. werden); 12. (effektive Last; ohne Early-Effekt: );   
13. (sorgt dafür, dass hinsichtlich Vcc nicht kurzgeschlossen wird); 14. (sorgt dafür, dass keinen DC-Anteil von Vcc enthält); 15. (sorgt für Temperaturstabilität)

Stromeinstellung: (Spannungsteiler unten) entfällt 🡪 durch fließt 1-facher 🡪 ; Nachteil: nicht für Massenproduktion geeignet, da Bauteiltoleranz von zu starken Schwankungen des führt und damit Verstärkung nicht konsistent ist

Temperatur-Abhängigkeit: 🡪 🡪 zur **Stabilisierung:**

npn: Emitter *n+*, Basis *p*, Kollektor *n* Strom-Zählpfeile: B und C hin, E weg

pnp: Emitter *p+*, Basis *n*, Kollektor *p* Strom-Zählpfeile: B und C weg, E hin

npn: B niedriger dotiert als E, um Rekombinationen gering zu halten, C niedriger dotiert als E, um hohes und damit hohen zu gewähren

**npn im thermodynamischen Gleichgewicht**

Bänderverlauf: E-Seite niedrig flach, Anstieg über erste RLZBE, erhöht über B, abfallend über zweite RLZBC, C-Seite niedrig flach aber etwas höher als E-Seite

LT-Konzentration: Elektronen: sehr hoch, stark fallend zu , Anstieg zu ()

Löcher: sehr niedrig, stark steigend zu , fallend zu ()

**Aufteilung Stromanteile**

(1): von E zu B diffundierende Elektronen, erreichen basisseitiges Ende des BC-Übergangs

(2): von B zu E diffundierende Löcher (Rekombin. mit Elektronen in E) ()

(3): Elektronen aus E, die auf Weg durch B mit Löcher aus B rekombin. ()

(4): Sperrstrom BC-Übergang (Generationsstrom); Löcher fließen aus B heraus

Emitterstrom:

Summe (1) und (2): (mit , da , statt !)

Emitterwirkungsgrad: (Verhältnis Elektronendiffusionsstrom (1) zu Emitterstrom)

Transportfaktor (Anteil (1) am E-Rand von B, der C-Rand von B erreicht)

Stromanteil, der von E zu C gelangt: 🡪

Weite neutrale Basis:

Kollektorstrom: (mit )

Summe (1) und (4): ( (4) vernachlässigbar)  
🡪 steigt exponentiell mit 🡪 : Übertragungskennlinie (exp. Anstieg)

🡪 keine Abhängigkeit von (und ) 🡪 : Ausgangskennlinie(nfeld),  
 Verhalten wie ideale Stromquelle, da sobald nahezu konstant

Basisstrom:

Summe (2), (3) [und (4)]:   
oder: ()

**Early-Effekt** *(Basisweitenmodulation)* **🡪 nur vorhanden, wenn da!**

führt zu linear leicht ansteigender Ausgangskennlinie im Aktiv-Normal-Bereich  
🡪 Ausgangswiderstand sinkt, keine ideale Stromquelle mehr  
Kleinsignal-Ausgangswiderstand: ( = Early-Spannung)  
je flacher Ausgangskennlinie im Aktiv-Normal-Bereich, desto höher (da )

Vorgänge im npn-Transistor bei Erhöhung :   
 steigt 🡪 RLZBC vergrößert 🡪 neutrale Basis wB verkleinert sich; RLZEB const (da const)  
1. steigende RLZBC 🡪 wB verkleinert sich 🡪 IBB (3) sinkt 🡪 IB sinkt (minimal)  
2. wB kleiner 🡪 Minor.-Gefälle (Elektronen-Konz.) wird größer () 🡪 jD steigt 🡪 IC steigt  
3. da IB sinkt und IC steigt 🡪 Verstärkung B bzw. ß steigt

**Bipolartransistor** (Vorteil: robuster als Feldeffekttransistoren) „*Kleinsignalgröße“: Linearisierung von Kennlinien im AP*

**Kleinsignal-ESB für höhere Frequenzen (Emitterschaltung):** : Diffusionskapazität B-E-Übergang (nur in Vorwärtsrichtung wirksam) 🡪 parallel zu ; : Sperrschichtkapazität B-E-Übergang 🡪 parallel zu ; : Sperrschichtkapazität B-C-Übergang 🡪 verbindet oberes Ende und -Quelle 🡪 i.d.R. gilt: ; Kapazitäten von AP abhängig zunehmende Frequenz: Kurzschluss von durch und 🡪 sinkt 🡪 sinkt  
frequenzabh. Stromverstärkung: (mit = 3dB-Grenzfrequenz); 🡪 Transitfrequenz : Verstärkung auf 1 abgefallen (= 0 dB); es gilt: 🡪 Transitzeit : Zeit der LT zum Durchqueren von wB

**Betriebszustände, Kennlinien (n-FET, normally off)**

Sperrbetrieb: 🡪

Trioden-/Widerstandsbereich: und 🡪 nahezu linear von abhängig

n-leitender Kanal unter G; MOSFET fungiert als Schalter

Pinch-off-Punkt ( “Abschnüren”): und

n-leitender Kanal beginnt an D-Seite abgeschnürt zu werden, nur noch wenige Elektronen fließen

Sättigungsbereich: und   
🡪 konstant, nicht mehr von abhängig (außer Kanallängenmodulation, wenn endlich)

n-leitender Kanal wird weiter an D-Seite abgeschnürt; MOSFET fungiert nicht mehr als Schalter

**Temperaturabhängigkeit:** T steigt 🡪 Streuung 🡪 Beweglichkeit LT sinkt 🡪 sinkt;   
 T steigt 🡪 sinkt 🡪 steigt **(Effekt Streuung überwiegt!)**

**Ermittlung AP aus Übertragungskennlinie** (wenn vorhanden): einmal an , einmal an   
🡪 Widerstandsgerade in Übertragungskennlinie einzeichnen (andersrum) 🡪 Schnittpunkt ist AP

**Elektronenbeweglichkeit** im Kanal: (mit )

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Arbeitsbereiche** | **Aktiv-Normal** | **Sättigung** | **Gesperrt** | **Aktiv-Invers** |
| B-E-Übergang | Vorwärtsrichtung | Vorwärtsrichtung | gesperrt | gesperrt |
| B-C-Übergang | gesperrt | Vorwärtsrichtung | gesperrt | Vorwärtsrichtung |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
| Minor.-Konz. an basisseitig. Rand **RLZBE** | um Boltzmann-Faktor angehoben | um Boltzmann-Faktor angehoben | um BF abgesenkt |  |
| Minor.-Konz. an basisseitig. Rand **RLZBC** | um Boltzmann-Faktor abgesenkt | um Boltzmann-Faktor angehoben | um BF abgesenkt |  |
| Anwendung | lineare Schaltungen  hohe I-Verstärkung | Schalter („geschlossen“) | Schalter („offen“) |  |
| Sonstiges | Early-Effekt vorhanden  (🡪 leicht von abhängig) | stark von abhängig („niederohmig“) | nur Sperrströme fließen | Rollen von E und C getauscht; schlechter „Kollektorwirkungs-grad“  🡪 |

zu **Aktiv-Normal:**Minor.-Konz. an Rändern RLZBE: und 🡪 *Anhebung* um Boltzmann-Faktor  
Minor.-Konz. an Rändern RLZBC: und 🡪 *Absenkung* um Boltzmann-Faktor  
🡪 in neutraler Basis () linearer Verlauf (Absenkung) der Elektronen-Konzentration 🡪 führt zu Stromfluss!

**Ladungssteuerungs-Theorie** ( in Ausgangskennlinie berechnen; n-FET, norm. off)

( = „Oxid”)

Triodenbereich:   
🡪 für sehr kleine ist vernachlässigbar: 🡪 (linear!)

Sättigungsbereich (ab Pinch-Off-Punkt):   
🡪 Steilheit: 🡪 🡪 steigt wrzlfrm mit

Sättigungsbereich (mit Kanallängenmod.): ()  
🡪 (mit , entspricht Early-Spannung bei BPT)

**MOSFET** (Vorteil: stromlose Steuerung)

Übertragungskennlinie: (wandert nach links für steigendes (wg. Kanallängenm.), nach links für )

Ausgangskennlinie: (F, für verschiedene )

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **n-FET** (Pfeil hin) | **p-FET** (Pfeil weg) |
| **Anreicherungstyp**  (normally off, enhancement)  selbstsperrend b.  gestrichelte Linie;  geringer Energieverbrauch  langsame Schaltzeit  für Speicher geeignet | positiv; , und positiv  je positiver , desto positiver  **Übertragungskennlinie** wie bei BPT  **Ausgangskennlinie** wie bei BPT | negativ; , und negativ  je negativer , desto negativer  **Übertragungskennlinie** wie bei n-FET, nur beide Achsen ins Negative  **Ausgangskennlinie** wie bei n-FET, nur beide Achsen ins Negative |
| **Verarmungstyp**  (normally on, depletion)  selbstleitend bei  durchgezogene Linie  hoher Energieverbrauch  schnelle Schaltzeit  für Prozessoren geeignet | negativ; und positiv  wird von negativem an immer positiver (bei leitend)  **Übertragungskennlinie** wie bei n-Anreicherungstyp, aber nach links verschoben, sodass negativ  **Ausgangskennlinie** wie bei n-Anreicherungstyp | positiv; und negativ  wird von positivem an immer negativer (bei negativ leitend)  **Übertragungskennlinie** wie bei p-Anreicherungstyp, aber nach rechts verschoben, sodass positiv  **Ausgangskennlinie** wie bei p-Anreicherungstyp |

**Aufbau**

n-FET: n+-Gebiete bei S und D, darunter p—Bereich (S auf GND), G ist Metall- auf Oxid-Schicht

neben S ist p+-Gebiet auf GND (ggf. innerhalb p-Wanne); wenn p-Wanne: n+-Gebiet in n-Substrat auf VDD

**bei normally on**: n-Kanal unterhalb Oxid, für Selbstleitung

p-FET: p+-Gebiete bei S und D, darunter n—Bereich (S auf VDD), G ist Metall- auf Oxid-Schicht

neben S ist n+-Gebiet auf VDD (ggf. innerhalb n-Wanne); wenn n-Wanne: p+-Gebiet in p-Substrat auf GND

**bei normally on**: p-Kanal unterhalb Oxid, für Selbstleitung

**CMOS**  
Inverter: oben p-fet, unten n-fet (p-fet doppelte W, da und )

NAND: oben 2 p-fet parallel, unten 2 n-fet in Reihe; 4 Flächeneinheiten;

NOR: oben 2 p-fet in Reihe, unten 2 n-fet parallel; 10 Flächeneinheiten

**Source-Schaltung:** inkl. (hoch!):

**Drain-Schaltung:**

**Kleinsignal-ESB:** wie Emitterschaltung, allerdings ohne (bzw. hier ), da spannungsgesteuert

Kanallängenmodulation durch gekennzeichnet (wie Early-Effekt)

**Kapazitäten**

: zw. G und Substrat : zw. S/D u. Substrat ( wenn S u. Bulk verbund.)

: Überlappkapaz. zw. G und S/D : Kanalkapaz. zw. G und S-/D-Seite

Sperrbereich: , durch Geometrie gegeben, unwirksam, wirksam

Triodenb., kleine : , durch Geometrie gegeben,, wirksam

Triodenb., allg.: siehe oben, aber: ,

Sättigung: , durch Geometrie gegeben, , wirksam

in HL sehr viel kleinere Dichte von freien Ladungsträgern als in Metall

intrinsische LT-Dichte eines HL NICHT abhängig von Dotierung; Betrieb bei 200°C kein Problem für Silizium-Carbid

nach Implantation von Bor ist Dichte Elektronen vermindert; Ionisierungsenergie von Bor ist deutlich geringer als Bandlückenenergie; Implantation mit Phosphor: Fermi-Energie verschiebt sich Richtung Leitungsbandunterkante

thermische Bewegung der freien LT bei RT ist schneller als Driftgeschwindigkeit

Ursache Diffusionsstrom in Si ist der Konzentrationsgradient bzw.

RLZ bildet sich aus Ladungen der Ionenrümpfe; RLZ am asymmetrischen pn-Übergang insgesamt elektrisch neutral

Ausdehnung RLZ im höher dotierten Material kleiner; Inversionskanal MOSFET: „Invertieren“ = Ladungsträgertyp, Elektronen fließen bei nFET durch p-Material; „depletion type“-Transistor: normally-on

komplementäre MOSFET-Logik (CMOS) besonders energiesparend; diskreter MOSFET: kein Vertausch D und S erlaubt

Schottkydiode: Metall-HL-Übergang statt pn, nur Majoritätsträger tragen zu Stromfluss bei; bei Sperrrichtung bildet sich isolierende Sperrschicht; trr auf 100 – 10 ps verkürzt; bei