1. Konstanten

k= 8,617x10^-5 (eV/K)=1,38x10^-23(J/K); **h**= 4,13x10^-15(eVs)=6,62x10^-34(Js); **e**=1,6022x10^-19(C); **m$_e$**= 9,109x10^-31(kg); **ε$_0$**=8,854x10^-12(C/Vm)=8,854x10^-14(C/Vcm); **U$_T$**=kT/q=25,852(mV)

2. Ladungsträger im Halbleiter

2.1 Debye-Länge

$$L_D=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}kT}{q^2 n_0}}\approx\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}kT}{q^2 N_D}}$$ $n-$Gebiet

$$L_D=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}kT}{q^2 p_0}}\approx\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}kT}{q^2 N_A}}$$ $p-$Gebiet

2.2 Diffusionskonstante

$D_n=U_T\mu_n$ $\quad D_p=U_T\mu_p$

2.3 Diffusionslänge

$L_n=\sqrt{D_n\tau_n}$ $\quad L_p=\sqrt{D_p\tau_p}$

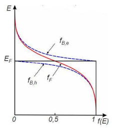
2.4 Zustandsdichte

$$N_n(E)=\frac{4\pi(2m_h^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3}\sqrt{E_V-E}$$ e im LB

$$N_e(E)=\frac{4\pi(2m_e^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3}\sqrt{E-E_C}$$ h im VB

2.5 Fermi-Dirac-Statistik

$$f(E)=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}$$



2.6 Boltzmann-Näherung

$$f_{B,e}(E)=\exp\left(-\frac{E-E_F}{kT}\right)\qquad f_{B,h}(E)=1-\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)$$

2.7 Intrinsische Ladungsträgerkonzentration

$$n_0=\int_{E_C}^{\infty}N_e(E)f(E)\,dE\approx N_C\exp\left(-\frac{E_C-E_{Fi}}{kT}\right)$$ Elektronen

$$p_0=\int_{-\infty}^{E_V}N_h(E)(1-f(E))\,dE\approx N_V\exp\left(-\frac{E_{Fi}-E_V}{kT}\right)$$ Löcher

$n_0p_0=n_i^2$

$$N_C=2\left(\frac{2\pi m_e^*kT}{h^2}\right)^{3/2}\qquad N_V=2\left(\frac{2\pi m_h^*kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

Nur im intrinsischen Fall: $n_0=p_0=n_i$

$$n_i=\sqrt{n_0p_0}=\sqrt{N_CN_V}\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)\sim T^{\frac{3}{2}}\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

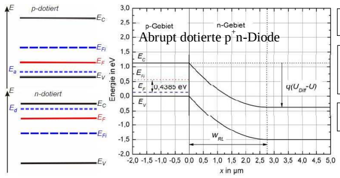
2.8 Fermi-Niveau für intrinsischen Fall

Oft mit E$_V$ als Bezugsgröße angegeben

$$E_{Fi}=\frac{E_C+E_V}{2}+\frac{1}{2}kT\ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right)=\frac{1}{2}E_g+\frac{3}{4}kT\ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$$

$\frac{E_C+E_V}{2}=E_V+\frac{E_g}{2}$

2.9 Ladungsträgerkonzentration bei Dotierung mit D o. A



$n_0\neq p_0$ $\quad n_0p_0=n_i^2$

$E_C-E_{Fi}=\frac{E_g}{2}$

$E_V=E_C-E_g$

$$N_D\approx n_0=N_C\exp\left(\frac{E_F-E_C}{kT}\right)=n_i\exp\left(\frac{E_F-E_{Fi}}{kT}\right)$$ Elektronen-Dichte n$_0$

$$N_A\approx p_0=N_V\exp\left(\frac{E_V-E_F}{kT}\right)=n_i\exp\left(-\frac{E_F-E_{Fi}}{kT}\right)$$ Löcher-dichte p$_0$

Wenn Anzahl der Majoritätsladungsträger >> Anzahl Minoritätsladungsträger

$p_0\approx N_A$ und $n_0\approx n_i^2/N_A$ im p-HL für $N_A\gg N_D\wedge N_A\gg n_i$

$n_0\approx N_D$ und $p_0\approx n_i^2/N_D$ im n-HL für $N_D\gg N_A\wedge N_D\gg n_i$

2.10 Fermie-Niveau bei Dotierung

$$E_F=E_{Fi}+kT\ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right)\qquad E_F=E_{Fi}-kT\ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$$

2.11 Ladungsträgerkonzentration bei Dotierung mit D+A

$$n_0=\frac{N_A^--N_D^++\sqrt{(N_A^--N_D^+)^2+4n_i^2}}{2}$$

$n_0p_0=n_i^2$

Ladungsneutralität: $p_0+N_D^+=n_0+N_A^-$

$$p_0=\frac{N_D^+-N_A^-+\sqrt{(N_D^+-N_A^-)^2+4n_i^2}}{2}$$

2.11.1 Anzahl inonisierter Dotieratome

$$N_D^+=N_D\frac{1}{\frac{1}{2}\exp\left(\frac{E_F-E_D}{kT}\right)+1}\qquad N_A^-=N_A\frac{1}{\frac{1}{4}\exp\left(\frac{E_A-E_F}{kT}\right)+1}$$

2.12 Vollständige Ionisation

$N_A^-=N_A$ und $N_D^+=N_D$

$p-HL: N_A>>N_D\Rightarrow p_0\approx N_A$ $\quad n-HL: N_D>>N_A\Rightarrow n_0\approx N_D$

2.13 Transporteigenschaften

$\rho=\frac{1}{\sigma}=\frac{1}{q(p\mu_p+n\mu_n)}$ Spez. Widerstand $\quad R=\frac{\rho l}{A}$ ohm. Widerstand

$\sigma=qN\mu$ spez. Leitf.

$R_{ges}=R_n+R_p=\frac{D_n}{\sigma_nA}+\frac{D_p}{\sigma_pA}$ $\quad j_{Drift}=\sigma E$ ohm. Gesetz

$j_{Drift}=q(pv_p-nv_n)=q(p\mu_p+n\mu_n)E$ Stromdichte

$\mu=\frac{q\tau_{Flug}}{m^*}$ Beweglichkeit $\quad v=\sqrt{\frac{2|QU|}{m}}$ Geschw. von geladenen Teilchen

$F_e=QE$ $\quad F_m=Qv\times B$ $\quad E_H=U_H/b=R_Hj_xB_z$ $\quad F_z=mv^2/r$

2.14 Diffusionsstrom

$D_{n,p}=\frac{kT}{q}\mu_{n,p}=U_T\mu_{n,p}$ $\quad U_T=\frac{kT}{q}$ $\quad n_{p,0}=\frac{n_i^2}{N_A}$ $\quad p_{n,0}=\frac{n_i^2}{N_D}$

$$j_{n,Diff}=\frac{qD_nn_{p,0}}{L_n}\left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)-1\right)\qquad j_{p,Diff}=\frac{qD_pp_{n,0}}{L_p}\left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)-1\right)$$

2.15 Ausgleich von Ladungsträgerüberschuss

$R=bnp$ $\quad G_{th}=bn_i^2$ $\quad U=R-G_{th}$ $\quad \tau_d=RC=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r}{\sigma}$ Relaxationszeit

$$U=\frac{\sigma v_{th}(pn-n_i^2)N_T}{n+p+2n_i}\qquad U=\frac{\Delta p(t)}{\tau_p}\qquad \tau_r=\tau_p=\frac{1}{bn_0}$$

$np=(n_0+\Delta n)(p_0+\Delta p)\neq n_i^2$

Dichte überschüssiger Löcher(e analog): $\Delta p(t)=\Delta p(0)\exp(-t/\tau_p)$

Konz. injez. Löcher: $\Delta p(x)=\Delta p(x=0)\exp(-x/L_p)$

2.16 Kontinuitätsgl./Haynes-Sh.

Verteilung der Überschussladungsträger

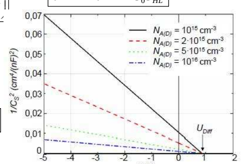
$$\Delta p(x,t)=\frac{P_0}{2A}\frac{1}{\sqrt{\pi D_pt}}\exp\left(-\frac{(x-\mu_pE_0t)^2}{4D_pt}\right)\exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)\qquad v_p=\frac{d}{\Delta t}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=E_0\mu_p$$

3. Halbleiterdioden

Diffusionskoeff.: $D=\frac{kT}{q}\mu$ $\quad$ Potential: $\Phi(x)=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_A}{p(x)}\right)$

3.1 Poissongleichung

$$\frac{dE}{dx}=-\frac{d^2\Phi}{dx^2}=\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}$$



3.2 Diffusionsspannung

$$U_{Diff}=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_AN_D}{n_i^2}\right)$$

$q(U_{Diff}-U)$ Bandverbiegung

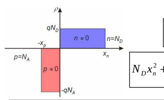
Minoritätsladungsträgerdichten am Rand der RLZ

$$n(-x_p)=\frac{n_i^2}{p}\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)=n_{p,0}\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)\qquad p(x_n)=\frac{n_i^2}{n}\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)=p_{n,0}\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

3.3 Raumldngsdichte

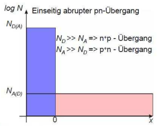
$\rho(x)=q[N_D^+(x)-N_A^-(x)+p(x)-n(x)]$

3.4 Weite der Raumladungszone

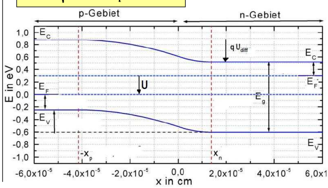


$N_Ax_p=N_Dx_n$

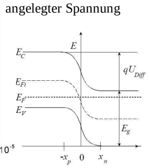
$N_Dx_n^2+N_Ax_p^2=\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}U_{Diff}}{q}$



$$w_{RL}=\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}(U_{Diff}-U)}{qN}}$$ N = N$_D$ für einen p$^+$n-Übergang; N = N$_A$ für einen n$^+$p-Übergang



<Abrupter pn-Übergang bei angelegter Spannung



Falls keine Sperrspannung angelegt: U=0

$$x_n=\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}(U_{Diff}-U)}{qN_D}\frac{N_A}{N_A+N_D}}=L_{D,n}\sqrt{\frac{2q(U_{Diff}-U)}{kT}\frac{N_A}{N_D+N_A}}$$

$$x_p=\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}(U_{Diff}-U)}{qN_A}\frac{N_D}{N_A+N_D}}=L_{D,p}\sqrt{\frac{2q(U_{Diff}-U)}{kT}\frac{N_D}{N_D+N_A}}$$

$$w_{RL}=x_n+x_p=\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}(U_{Diff}-U)}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)}\qquad \frac{x_n}{x_p}=\frac{N_A}{N_D}$$

3.5 Debye-Länge

$$L_{D,n(p)}=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}kT}{q^2N_{D(A)}}}$$

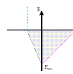
3.6 Sperrschichtkapazität

$$C_S=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{w_{RL}}A=A\sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{2(U_{Diff}-U)}\left(\frac{N_AN_D}{N_A+N_D}\right)}$$

$$C_S==A\sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_{HL}N}{2(U_{Diff}-U)}}$$ bei einseitig aprutem pn-Übergang; N = Dotierkonz. des niedriger dot.

3.7 Maximale Feldstärke in RLZ

$|E_{max}|=2\frac{U_{diff}-U}{w_{RL}}$



3.8 Sperrsättigungsstromdichte

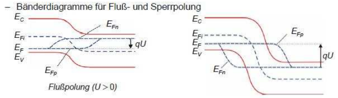
$$J_S=q\left(\frac{D_nn_{p,0}}{L_n}+\frac{D_pp_{n,0}}{L_p}\right)=qn_i^2\left(\frac{D_n}{L_nN_A}+\frac{D_p}{L_pN_D}\right)=qn_i^2\left(\frac{L_n}{\tau_nN_A}+\frac{L_p}{\tau_pN_D}\right)$$

$$j=\frac{I}{A}=J_S\left(\exp\left(\frac{Uq}{kT}\right)-1\right)$$

$\sigma_{n(p)}$: Einfangquerschnitt für Elektronen (Löcher)
v_{th}: thermische Geschwindigkeit der Ladungsträger
E_T: Energieniveau der Störstelle
N_T: Konzentration der Störstelle

3.9 Generations-/Rekombinationsstrom

– Bänderdiagramme für Fluß- und Sperrpolung



$\tau_G=\tau_R=(\sigma v_{th}N_T)^{-1}$

Sperrbereich: $U=-\frac{\sigma v_{th}n_iN_T}{2}=-\frac{n_i}{2\tau_G}$

Flussbereich: $U=\frac{\sigma v_{th}npN_T}{n+p}=\frac{n_i}{2\tau_R}\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)$

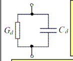
Gen.strom: $j_G=-\frac{qn_i}{2\tau_G}w_{RL}$ $\quad$ Rek.strom: $j_R=\frac{qn_i}{2\tau_R}w_{RL}\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$ $\quad$ Flussstrom: $I=I_0\left(\exp\left(\frac{Uq}{kT}\right)-1\right)$

3.10 Lawinendurchbruch

$$U_B=\frac{1}{2}w_{RL}E_B=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{qN}E_B^2=60V\left(\frac{E_g}{1{,}1eV}\right)^{3/2}\left(\frac{N}{10^{16}cm^{-3}}\right)^{-3/4}$$

3.11 Kleinsignalparameter

Diffusionsleitwert und Diffusionskapazität



$$C_d=\frac{q}{kT}\left(\frac{qL_nn_{p,0}}{2}+\frac{qL_pp_{n,0}}{2}\right)\exp\left(\frac{qU_0}{kT}\right)$$

$$G_d=\frac{q}{kT}\left(\frac{qD_nn_{p,0}}{L_n}+\frac{qD_pp_{n,0}}{L_p}\right)\exp\left(\frac{qU_0}{kT}\right)=\frac{q}{kT}J_S\exp\left(\frac{qU_0}{kT}\right)$$

4. Feldeffekttransistoren

4.1 MOS-Kondensator

$\phi_S=\frac{E_{Fi}(\infty)-E_{Fi}(0)}{q}$ $\quad \phi_B=\frac{E_{Fi}-E_F}{q}$

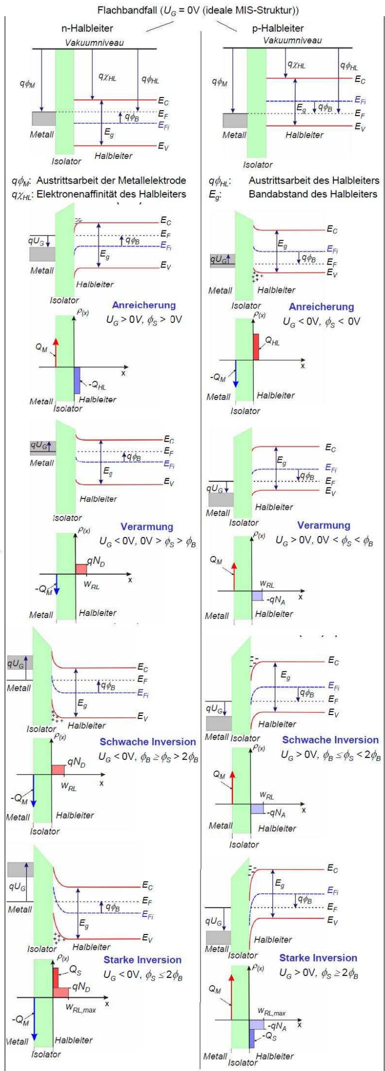
4.1.1 Bandverbiegung

$$\phi(x)=\frac{E_{Fi}(\infty)-E_{Fi}(x)}{q}=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{n(x)}{n_0}\right)=\frac{kT}{q}\ln\frac{p_0}{p(x)}$$ allgmein

$\phi_B=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i}$ p−HL $\quad \phi_B=\frac{kT}{q}\ln\frac{n_i}{N_D}$ n−HL

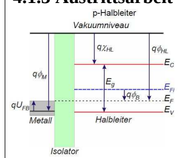
Bereich	Beschreibung	U_G p-HL	U_G n-HL
Akkumulation	Anhäufung von Majoritätsladungsträgern an Halbleiter-Isolator Grenzfläche	< U_{FB}	> U_{FB}
Flachbandfall	Ladungsträgerkonzentrationen an Halbleiter-Isolator Grenzfläche sind identisch mit denen im Volumen	U_{FB}	U_{FB}
Verarmung	Majoritätsladungsträgerkonzentration an Halbleiter-Isolator Grenzfläche ist geringer als im Volumen	> U_{FB}	< U_{FB}
schwache Inversion	Minoritätsladungsträgerkonzentrationen an Halbleiter-Isolator-Grenzfläche ist größer als die der Majoritäten an der Halbleiter-Isolator-Grenzfläche	> U_{FB}	< U_{FB}
starke Inversion	Minoritätsladungsträgerkonzentration an Halbleiter-Isolator Grenzfläche ist größer als die der Majoritäten im Volumen des Halbleiters	> U_{FB}	< U_{FB}

4.1.2 Betriebszustände



Beginn der starken Inversion: $\phi_S=2\phi_B$
Verarmung->schw. Inversion: $\phi_S=\phi_B$

4.1.3 Austrittsarbeit



$$q\phi_{HL}=q\chi_{HL}+\frac{E_g}{2}+q\phi_B$$

Austrittsarbeitdifferenz: $q\phi_{MHL}=q(\phi_M-\phi_{HL})$

4.1.4 Flachbandspannung

$U_{FB}=\phi_{MHL}$ Ohne Isolatorladung

$U_{FB}=\phi_{MHL}-\frac{Q_{IS}}{C_{IS}}$ $\quad Q_{IS}=Q_{OT}+Q_{SS}$

Q$_{OT}$= effektive Isolatorladung
Q$_{SS}$= Ladung an HL/IS-Grenzfl.

$$Q_{OT}=\frac{1}{x_{IS}}\int_0^{x_{IS}}x\rho_{OT}(x)\,dx=\frac{1}{2}\rho_{IS}x_{IS}$$

4.1.5 Weite der RLZ

$|\phi_S|=|2\phi_B|$

$$w_{RL}=\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{qN}|\phi_S|}\qquad w_{RL,max}=\sqrt{\frac{4\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{qN}|\phi_B|}$$

n-HL (p-Kanal) -> (N=N$_D$); p-HL (n-Kanal) -> (N=N$_A$)

p-HL -> unter Wurzel + ; n-HL -> -

4.1.6 Einsatzspannung

$$U_{Th}=\underbrace{\phi_{MHL}-\frac{Q_{IS}}{C_{IS}}}_{U_{FB}}+2\phi_B-\frac{Q_{HL,RLZ}}{C_{IS}}$$

4.1.7 Ladung der RLZ

n-HL (p-Kanal) -> + (N=N$_D$); p-HL (n-Kanal) -> - (N=N$_A$)

$$Q_{HL,RLZ}=\pm\sqrt{4\varepsilon_0\varepsilon_{HL}qN|\phi_B|}=\pm qNw_{RL,max}$$

4.1.8 Kapazitäten

C$_{min}$ mit w$_{RL,max}$ berechnen

$C=\frac{C_{IS}C_{HL}}{C_{IS}+C_{HL}}$ $\quad C_{max}=C_{IS}$ $\quad C_{min}=\frac{C_{IS}C_{HL,min}}{C_{IS}+C_{HL,min}}$

4.1.8.1 Isolatorkapazität:

$C_{IS}=\frac{\varepsilon_{IS}\varepsilon_0}{x_{IS}}A$ bzw. flächenbezogen: $C_{IS}=\frac{\varepsilon_{IS}\varepsilon_0}{x_{IS}}$

4.1.8.2 Halbleiterkapazität:

$C_{HL}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{w_{RL}}$

Anreicherung: $C_{HL}\rightarrow\infty\ \Rightarrow C=C_{is}$

Flachbandfall:

- Idealfall: $w_{RL}=0\Rightarrow C_{HL,FB}\rightarrow\infty\ \Rightarrow C=C_{FB,ideal}=C_{is}$
- Realfall: $w_{RL}=L_D=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}kT}{q^2N}}=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{qN}U_T}$

$$C_{HL,FB}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{L_D}=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}qN}{U_T}}\Rightarrow C=C_{FB,real}=\left(\frac{x_{is}}{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}+\frac{U_T}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}qN}}\right)^{-1}$$

Verarmung und schwache Inversion:

$$C_{HL}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{w_{RL}}=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}qN}{2|\phi_S|}}\quad für\ 0\le|\phi_S|\le|2\phi_B|$$

Starke Inversion:

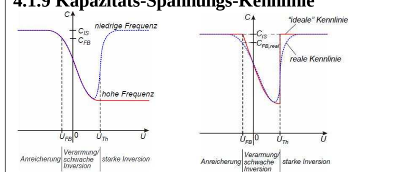
- hohe Frequenzen (Inv.lad. kann Meßfrequ. nicht folgen:

$$C_{HL,min}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{w_{RL,max}}=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}qN}{4|\phi_B|}}$$

- niedrige Frequenzen (Inv.lad. kann Meßfrequ. folgen:

$C_{HL}\rightarrow\infty\ \Rightarrow C=C_{is}$

4.1.9 Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie

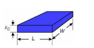


4.2 MOS-Transistor

Stromfluß kommt nur zustande, wenn der MOS-Kondensator sich in starker Inversion befindet: n-Kanal Transistor (p-Substrat): Stromfluß für $U_G\ge U_{Th}$; p-Kanal Transistor (n-Substrat): Stromfluß für $U_G\le U_{Th}$

Die Source-Substrat und Drain-Substrat pn-Übergänge dürfen nicht in Flußrichtung gepolt werden. Dies ist bei kurzgeschlossenem Source-Substrat-Übergang erfüllt, wenn: n-Kanal Transistor (p-Substrat): $U_D\ge0V$; p-Kanal Transistor (n-Substrat): $U_D\le0V$

4.2.1 Strom-Spannungs-Beziehung



$I_D=\frac{U_D}{R_C}$ $\quad R_C=\rho\frac{L}{x_CW}=\frac{L}{\mu_i|Q_n|W}$ $\quad Q_n=-(U_G-U_{Th})C_{IS}$

n-Kanal (p-Substrat)

Lin. Bereich: $für\ 0\le U_D\ll U_G-U_{Th}$

$I_D=\beta(U_G-U_{Th})U_D$

Triodenber. $für\ 0\le U_D\le U_G-U_{Th}$

$I_D=\beta\left((U_G-U_{Th})U_D-\frac{U_D^2}{2}\right)$

Triode−> Sätt.: $U_D=U_G-U_{Th}$

Sättigung: $für\ 0\le U_G-U_{Th}\le U_D$

$I_D=\frac{\beta}{2}(U_G-U_{Th})^2$

$\beta=\mu_nC_{IS}\frac{W}{L}$

p-Kanal (n-Substrat)

$für\ 0\ge U_D\gg U_G-U_{Th}$

$I_D=-\beta(U_G-U_{Th})U_D$

$für\ 0\ge U_D\ge U_G-U_{Th}$

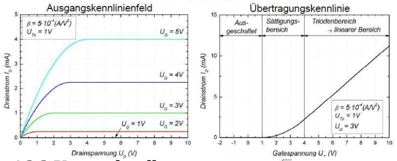
$I_D=-\beta\left((U_G-U_{Th})U_D-\frac{U_D^2}{2}\right)$

$für\ 0\ge U_G-U_{Th}\ge U_D$

$I_D=-\frac{\beta}{2}(U_G-U_{Th})^2$

$\beta=\mu_pC_{IS}\frac{W}{L}$

Kennlinien eines n-Kanal MOSFET mit $\beta = 5\cdot10^{-4}$A/V² und U_{Th} = 1V

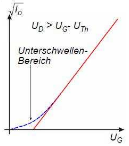


4.2.2 Unterschwellenstrom

$$I_D = \frac{\beta x_C q U_T n_i^2}{C_{IS} N_A} \exp\left(\frac{\phi_S}{U_T}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{U_D}{U_T}\right)\right)$$

$$I_D = I_{Th} \exp\left(\frac{U_G - U_{Th}}{n U_T}\right) \qquad n = \frac{C_{IS}+C_{HL}}{C_{IS}}$$

I_{th} = Drainstrom bei $U_G=U_{th}$



4.2.3 Substratsteuerfaktor γ

$$Q_{HL,RLZ} = \pm\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL} q N |2\phi_B - U_B|}$$

+: p-Kanal Transistor ($N = N_D$)
- : n-Kanal Transistor ($N = N_A$)

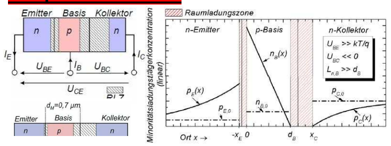
U_B=Sperrspannung

$$U_{Th} = U_{FB} + 2\phi_B + \gamma\sqrt{|2\phi_B - U_B|}$$

- : p-Kanal Transistor ($N = N_D$)
+: n-Kanal Transistor ($N = N_A$)

$$\gamma = \mp\frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL} q N}}{C_{IS}}$$

5. Bipolartransistoren

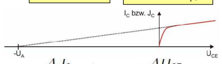


$$p_{E,0} = \frac{n_i^2}{N_{D,E}} \qquad n_{B,0} = \frac{n_i^2}{N_{A,B}} \qquad p_{C,0} = \frac{n_i^2}{N_{D,C}}$$

5.1 Neutrale Basisweite

$$\Delta d_B = \Delta x_{p,BC} \qquad d_B = l_B - x_{p,BC}$$

5.2 Early-Spannung



Geradengleichung: $J_C = (U_{CE}+U_A)\frac{\Delta J_C}{\Delta U_{CE}} \rightarrow U_A = J_C\frac{\Delta U_{CE}}{\Delta J_C} - U_{CE}$

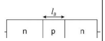
5.3 Kollektorstrom

$$I_C = \frac{q n_i^2 A}{Q_B / D_{n,B}} \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right) \approx \frac{q D_{n,B} n_i^2 A}{dB\, N_{A,B}} \exp\left(\frac{qU_{B,E}}{kT}\right)$$

5.4 Raumladungszone im n-dotierten Kollektor

$$x_{p,BC} = siehe\ 3.4\ mit\ 3.1$$

$$x_{p,BC} = l_B - d_B \qquad x_{n,BC} = x_{p,BC}\frac{N_{A,B}}{N_{D,C}}$$



5.5 Groß- und Kleinsignalparameter

(Stromverstärkungfaktor)

(Basisschaltung) (Emitterschaltung)(Basisschaltung)(Emitterschaltung)

$$A = \frac{I_C}{I_E} = \frac{B}{1+B} \qquad B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{A}{1-A} \qquad \alpha = \frac{\partial I_C}{\partial I_E} = \frac{\beta}{1+\beta} \qquad \beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

5.6 Betriebszustände

Operationsmodus	Emitter/Basis-Übergang	Basis/Kollektor-Übergang	Anwendung
Normalbetrieb	Flußpolung ($U_{BE} >> kT/q$)	Sperrpolung ($U_{BC} << 0$)	Analog, *Verstärkung*
Sättigungsbetrieb	Flußpolung	Flußpolung	Digital, *Ein*
Cutoff-Betrieb	Sperrpolung	Sperrpolung	Digital, *Aus*
Inversbetrieb	Sperrpolung	Flußpolung	(Analog)

	U_{BE}	U_{BC}
Normal	>0	<0
Sättigung	>0	>0
Cutoff	<0	<0
Invers	<0	>0

5.7 Gummelzahlen

$Q_B = N_{A,B} d_B$ flächenbezogene Basis-Gummelzahl

$Q_{E,eff} = N_{D,E} L_{p,E}$ flächenbezogene Emitter-Gummelzahl

mit $N_{A,B}/N_{D,E}$ Akzeptorkonzentration Basis / Donatorkonz. Emitter

$$I_C \approx \frac{qAn_i^2}{Q_B/D_{n,B}}\exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\} \qquad I_E \approx \left(\frac{qAn_i^2}{Q_B/D_{n,B}} + \frac{qAn_i^2}{Q_{E,eff}/D_{p,E}}\right)\exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

$$I_B \approx \frac{qAn_i^2}{Q_{E,eff}/D_{p,E}}\exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

damit z.B: $\frac{I_C}{I_B} \approx \frac{Q_{E,eff} D_{n,B}}{Q_B D_{n,E}}$

5.8 Str-Sp-Beziehungen im Normalbetrieb

$$I_E = -Aq\left(D_{n,B}\frac{dn_B}{dx}\bigg|_{x=0} - D_{p,E}\frac{dp_E}{dx}\bigg|_{x=-x_E}\right) \approx Aq\left(\frac{D_{n,B} n_{B,0}}{d_B} + \frac{D_{p,E} p_{E,0}}{L_{p,E}}\right)\exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

$$I_C = -Aq\left(D_{n,B}\frac{dn_B}{dx}\bigg|_{x=d_B} - D_{p,C}\frac{dp_C}{dx}\bigg|_{x=-x_C}\right) \approx \frac{Aq D_{n,B} n_{B,0}}{d_B}\exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

$$I_B = I_E - I_C = \frac{Aq D_{p,E} n_{E,0}}{L_{p,E}}\exp\left\{\frac{qU_{BE}}{kT}\right\}$$

5.9 Ladungsträgerkonz. am Rand der RLZ

$$p(-x_E) = p_{B,0}\exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right) \qquad n(0) = n_{B,0}\exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

$$n(d_B) = n_{B,0}\exp\left(\frac{qU_{BC}}{kT}\right) \qquad p(x_C) = p_{C,0}\exp\left(\frac{qU_{BC}}{kT}\right)$$

5.10 Gesamtlaufzeit

$$\tau_{EC} = \tau_E + \tau_B + \tau_D + \tau_C = \frac{kT}{qI_E}C_E + \frac{d_B^2}{2D_{n,B}} + \frac{x_C - d_B}{v_x} + R_C(C_C + C_S)$$

5.11 Laufzeit durch Basis

$$\tau_B = \frac{d_B^2}{2D_{n,B}}$$

5.12 Grenz-/ Transitfreq.

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{EC}}$$

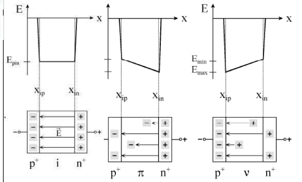
6. Leistungsbauelemente

6.1 Sperrspannung

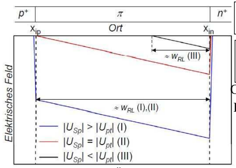
pπn- oder pvn-Struktur

Ideale pin-Struktur

$$U_{Sp} \approx E_{pin}(x_{in} - x_{ip}) \qquad U_{Sp} \approx \frac{1}{2}(E_{max} + E_{min})(x_{in} - x_{ip})$$



6.2 Punchtrough-Spannung



$$|E_{min}|\, l_\pi = |U_{Sperr} - U_{Pt}|$$

$$E_{Pt} = \frac{2|U_{Pt}|}{l_\pi} \qquad l_\pi = A\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{C_{S,min}}$$

$C_{S,min}$ aus Graphik in 6.3 ablesen

Für pvn: $l_\pi = l_v$; $N_A = N_D$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qN_{A,\pi}}{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}} = \frac{|E_{max}| - |E_{min}|}{l_\pi}$$

Formel für abrupten Übergang

$$l_\pi = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}(U_{Diff} - U_{Pt})}{qN_{A,\pi}}}$$

Für pvn: $l_\pi = l_v$; $N_A = N_D$

$$l_\pi = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{HL}(U_{Diff} - U_{Pt})N_{A,\pi}}{qN_{D,\pi}(N_{A,\pi} + N_{D,\pi})}}$$

Wenn die Sperrspannung die Punchthrough-Spannung erreicht, bildet sich die RLZ genau über die gesamte π- bzw. v-Schicht aus. Dann gilt: $U_{pt} \approx U_{Sperr}$

Ab $U_{Sperr} \geq U_{pt}$ ändert sich im V / (1 / C²) – Diagramm die Sperrschichtkapazität nicht mehr, da die gesamte „i-Schicht" dann näherungsweise der RLZ entspricht.

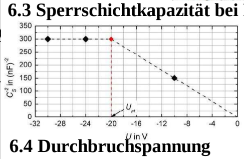
Bei einer (ideal intrinsischen) pin-Struktor gilt $U_{pt} = 0V$

z. B. in einer pvn – Struktur gilt für die Weite der v-Schicht

$$l_v = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{HL}(U_{Diff} - U_{pt})N_A}{qN_{D,v}(N_A + N_{D,v})}} \qquad l_v = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{HL}\cdot(U_{Diff} - U_{pt})}{qN_{v/\pi}}} \qquad \frac{dE}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_{HL}} = \frac{|E_{max}| - |E_{min}|}{l_v}$$

(= einseitig abprupter Übergang)

6.3 Sperrschichtkapazität bei Pt-Spannung



$$C_{Pt} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{HL}}{l_{v/\pi}}A$$

6.4 Durchbruchspannung

$$U_B = \begin{cases} E_B(x_{in} - x_{ip}) & pin-Struktur \\ \frac{1}{2}(E_B + E_{min})(x_{in} - x_{ip}) & pvn-bzw.\ p\pi n-Str. \end{cases}$$

7. Optoelektronische Bauelemente

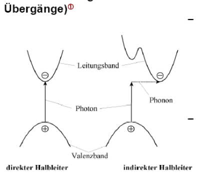
Wellenlänge Energie Impuls k-Wert

$$\lambda = \frac{c}{v} \qquad E = hv = \frac{hc}{\lambda} \qquad p_{PH} = \frac{h}{\lambda} \qquad k_{Ph} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Photowiderstand

$$R(\Phi_{Ph}) = \frac{L}{Wd(\sigma_0 + \Delta\sigma_{Ph})}\ mit\ \Delta\sigma_{Ph} = q\Delta n(\mu_n + \mu_p)$$

Wechselwirkung von Photonen und Halbleiter (Direkte und indirekte Übergänge)



- optische Übergänge verlaufen senkrecht im *E(k)*-Raum → bei indirekten Band-Band Übergängen ist zur Impuls-erhaltung die Beteiligung eines dritten Partners (Phonon: Quasiteilchen der Gitterschwingung mit der Energie $E_p << hv$) notwendig (→ Übergänge wenig wahrscheinlich)
- neben den Band-Band Übergängen sind auch Übergänge unter Beteiligung von Störstellen, d.h. Zuständen im verbotenen Band möglich (z.B. Dotieratomzustände, isoelektronische Haftstellen)

β	Transkondukanz	$A\ V^{-2}$
γ	Substratsteuerfaktor	√V
μ	Ladungsträgerbeweglichkeit	$cm^2 V^{-1} s^{-1}$
ρ	Raumladungsdichte	$C\ cm^{-3}$
σ	Spez. Leitfähigkeit	$S\ cm^{-1}$
τ	Lebensdauer	s
ϕ	Potential	V
ϕ_S	Oberflächenpotential	V
ϕ_B	Bulk-Potential	V
qϕ	Austrittsarbeit	eV
qχ	Elektronenaffinität	eV
C	Kapazität	F=As/V
D	Diffuionskoeffizient	$cm^2 s^{-1}$
E	Elektr. Feldstärke	$V\ m^{-1}$
E	Energie	eV
f(E)	Fermi-Verteilungsfunktion	
$F_B(E)$	Boltzmann-Verteilungsfunktion	
G	Generationsrate	$cm^{-3} s^{-1}$
j	Stromdichte	$A\ cm^{-2}$
n	Elektronenkonzentration	cm^{-3}
$N_{(V/C)}$	(effektive) Zustandsdichte	cm^{-3}
$N_{D/A}$	Donator-/Aksezptordichte	cm^{-3}
p	Löcherkonzentration	cm^{-3}
Q	Ladung	C = As
Q	Flächenbezogene Gummelzahlen	cm^{-2}
R	Rekombinationsrate	$cm^{-3} s^{-1}$
S	Swing	V
U	Nettokombinationsrate	$cm^{-3} s^{-1}$
v_p	Geschw. des Wellenmax.	