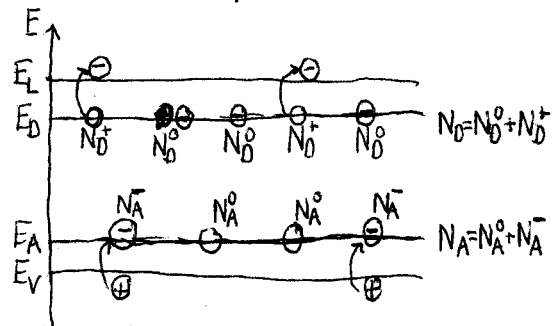


Zusammenfassung 10 - Dotierte Halbleiter, Ausgleichsvorgänge

- Bei Halbleitern kann man die Leitfähigkeit an verschiedenen Stellen des Kristallgitters durch sogenannte Dotierung gezielt einstellen und dabei über mehrere Größenordnungen variieren.
- Es gibt zwei Arten von Dotierung. Bei n-Dotierung erhöht man die Dichte der Leitungselektronen n , bei p-Dotierung die Dichte der Löcher (= Defektelektronen).
- Das Prinzip der Dotierung ist die gezielte Verunreinigung des Halbleiterkristalls (evtl. an bestimmten Stellen) durch Fremdatome, die entweder als Elektronendonatoren oder -akzeptoren wirken. Elektronendonatoren sind Atome, die ~~ein~~ (meistens) ein Valenzelektron mehr als das Halbleiteratom, aus dem das Kristall besteht, haben. Dabei gehen alle Valenzelektronen mit den Kristallatomen in kovalente Bindungen bis auf eines. Dieses zusätzliche Elektron kann dann mit relativ niedriger Energie angeregt werden und wird dann zu einem Leitungselektron, was natürlich die Leitfähigkeit erhöht. Da dabei die Elektronendichte erhöht wird, ~~ist~~ sind die mit Elektronendonatoren dotierten Halbleiter n-dotiert. Dagegen haben Elektronenakzeptoren (meistens) ein Valenzelektron weniger als das Halbleiteratom. Deshalb fehlt an den Halbleiteratomen um diesen Akzeptor eine kovalente Bindung, was durch das Wandern eines anderen Elektrons von Nachbaratomen gebildet wird. Dann fehlt aber an dem ursprünglichen Platz des wandernden Elektrons eine Bindung und diese Stelle ist jetzt positiv geladen. Dieses Defektelektron bzw. Loch kann dann im Kristall wandern und zur Leitfähigkeit beitragen. Deshalb sind mit Elektronenakzeptoren dotierte Halbleiter p-dotiert.
- Die Zahl der freien Ladungsträger hängt dabei auch von der Temperatur ab, da die Donatoren bzw. Akzeptoren ionisiert werden sollen.
- Bsp: Bei einem Si-Kristall (oder bei allen 4-wertigen HL-Kristallen) wirken P, As, Sb mit 5 Valenzelektronen als Donator, B, Ga, Al, In mit 3 Valenzelektronen als Akzeptor, da Si 4 Valenzelektronen hat.
- Bsp: Bei einem Verbundhalbleiter, bspw. beim III-V-HL GaAs hängt die Dotierungseigenschaft eines Fremdatoms von der Gitterstelle der Dotierung ab. Bspw. ist Si bei Ga-Gitterstellen ein Donator, ~~ein~~ bei As-Stellen wirkt bspw. Be ~~ein~~ Akzeptor. ~~Be~~ Deshalb ist Si amphoter, bei einem GaAs-Kristall eingebaut.

• Rechts auf dem Bild sieht man die Ionisierungsprozesse bei einem HL-Kristall-Bänderschema. Elektronendonatoren liegen auf dem Donatorenergielevel E_D , das ganz nah an E_L liegt. Daher können Zusatzelektronen mit niedriger Energie ins Leitungsband angeregt werden. Analog liegt das Akzeptorenergielevel ganz nah an E_V . Dadurch können die Elektronen im Valenzband zu E_A angeregt werden und es bleiben Löcher im Valenzband übrig.



• Abhängig von der Temperatur werden evtl. nicht alle Fremdatome ionisiert. Es gilt:

$$N_D = N_D^0 + N_D^+ \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} N_D^0: & \text{Dichte der Donatoren} \\ N_D^0: & \text{Dichte der neutralen, nicht ionisierten Donatoren} \\ N_D^+: & \text{Dichte der ionisierten Donatoren} \end{matrix} \quad \text{und} \quad N_A = N_A^0 + N_A^- \quad (\text{Definitionen sind analog})$$

• Im thermodynamischen Gleichgewicht gilt bei einem Halbleiter, egal dotiert oder intrinsisch, folgende Formel:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad ; \quad p_i = n_i^2 = p_i^2 = N_L^* N_V^* e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

→ Der Grund dafür ist, dass die Wahrscheinlichkeit für Rekombination der Elektronen mit Löchern und damit Verringerung ihrer Dichte proportional zu deren Dichte ist. D.h. je größer n oder p , desto schneller rekombinieren die, es herrscht damit ein Gleichgewicht, unabhängig von E_F und von Dotierung.

Außerdem ist die Wkheit ~~für~~ für ein neutrales Donatoratom (mit einem Zusatzelektron) $\frac{1}{1 + e^{(E_D - E_F)/k_B T}}$ und für ein ionisiertes Akzeptoratom (mit einem Zusatzelektron) $\frac{1}{1 + e^{(E_A - E_F)/k_B T}}$, d.h. Fermi-Verteilung, da Elektronen Fermi-Teilchen sind.

• Die Ladungsneutralitätsbedingung gilt auch für dotierte Halbleiter, lautet aber jetzt $n + N_A^- = p + N_D^+$. In meisten Fällen kann man dieses vereinfachen. Bspw. wenn nur n-Dotierung vorliegt, gilt $N_A = 0 \Rightarrow N_A^- = 0$, und wenn auch N_D und Temperatur groß genug sind, kann man annehmen, dass $N_D^+ \gg p$ gilt. Dann gilt: $n \approx N_D^+$. Analoge Vereinfachungen sind für p-Dotierung möglich ($N_D = 0$ usw.).

→ Im hoch n-dotierten aber nicht entarteten HL, kann man schreiben (siehe Skript für Herleitung):

$$n = \frac{2N_D}{1 + \sqrt{1 + 4 \frac{N_D}{N_A^*} e^{(E_L - E_D)/(k_B T)}}}$$

• Untersucht man diese Formel für unterschiedliche Temperaturbereiche:

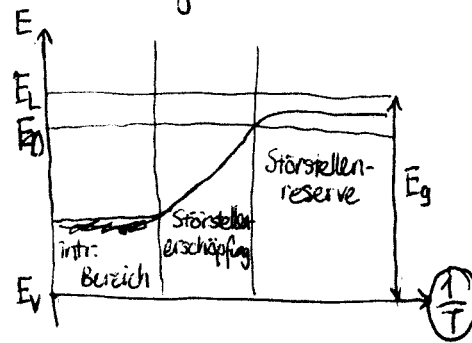
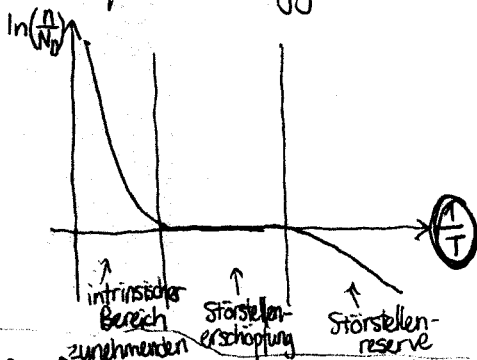
- Niedrige Temperaturen: $\Rightarrow k_B T \ll E_L - E_D \Rightarrow \frac{4N_D}{N_A^*} e^{\frac{E_L - E_D}{k_B T}} \gg 1 \Rightarrow n = \sqrt{N_D N_A^*} e^{-\frac{E_L - E_D}{2k_B T}}$

Dabei gilt natürlich $n \ll N_D$, d.h. nur wenige Donatoren liegen ionisiert vor. Man hat eine Störstellenreserve (diesen Temperaturbereich nennt man so). Erhöht man T, so werden weitere Donatoren ionisiert und n steigt.

- Mittlere Temperaturen: $k_B T \gg E_L - E_D \Rightarrow \frac{4N_D}{N_A^*} e^{\frac{E_L - E_D}{k_B T}} \ll 1 \Rightarrow n = N_D$. Damit ist $n = N_D$ für steigende Temperaturen (bis zu einer Grenze) konstant. Alle Donatoren sind ionisiert, man hat eine Störstellenerschöpfung (so heißt dieser Temperaturbereich), HL werden meistens in diesem Bereich betrieben.

- Hohe Temperaturen: Temperatur ist so hoch, dass nun Elektronen direkt vom Valenzband ins Leitungsband durch thermische Anregung angehoben werden können. Diese intrinsische Trägerdichte erreicht bzw. auch überschreitet die Dotierungsdichte. Der Einfluss der Dotierung nimmt ab, wird intrinsisch. $\Rightarrow n = \sqrt{N_A^* N_D^*} e^{-E_g/2k_B T}$

• Die Temperaturabhängigkeit der Elektronendichte und Fermienergie sieht man unten:



!!! Alle diese Überlegungen sind analog zu p-dotierten Halbleiter übertragbar!!!

• Bei ~~hohen~~ Dotierungen wird die Ionisierungsenergie der Dotieratome kleiner, da die hohe Anzahl der vorhandenen Ladungsträger das Coulombpotential der ionisierten Störstellen abschirmt.

• Bei sehr hohen Dotierungen entarten die HL, bei hohen n-Dotierungen liegt E_F über E_L , bei hohen p-Dotierungen liegt E_F unter E_V , damit wird der HL quasi ein Metall.

• Ausgleichsvorgänge

- Das Gleichgewicht und die Gleichgewichtsträgerdichten n_0 und p_0 können durch Ladungsträgerinjektion oder optische Anregung gestört werden, wobei bei optischer Anregung die Energie des einfallenden Lichts größer als die Bandlücke sein soll, um Elektron-Loch-Paare generieren zu können ($E_L = h\nu_L > E_g$). Durch diese Störung bilden sich Elektronen- und Löcherdichteerhöhungen $n - n_0$ und $p - p_0$, wobei wegen Ladungsneutralität $n - n_0 = p - p_0$ gilt. Nach der Störung versucht das System wieder zu dem ursprünglichen Gleichgewicht zurückzukehren, durch Rekombinationen. Für die Geschwindigkeit dieser Rückkehr ist die Lebensdauer der Elektronen τ_n und der Löcher τ_p entscheidend. Es gilt:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n - n_0}{\tau_n}, \quad \frac{dp}{dt} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} \Rightarrow \text{Je größer } \tau, \text{ desto langsamer findet die Rückkehr zum Gleichgewicht statt.}$$

→ Es gilt $\tau_n = \tau_p$, wegen Ladungsneutralität.

→ Wenn bei einem Halbleiter das Maximum des Leitungsbandes und das Maximum des Valenzbandes bei gleichem k-Wert liegen, dann ist dieser ein direkter HL (Bsp: GaAs), sonst ein indirekter HL (Bsp: Si, Ge). Bei direktem HL findet die Rekombination strahlend, d.h. einfach durch Emittierung eines Photons statt, wobei bei indirektem HL für die Rekombination auch ein Phonon zur Impulserhaltung benötigt wird. Da die Erzeugung eines Phonons unwahrscheinlicher ist, sind τ_i kleiner bei direktem als bei indirektem HL.

→ Die Rekombinationsrate $\frac{1}{\tau}$ kann auch durch den Einbau von Traps erhöht werden (siehe Skript).

- Ausgleich der Minoritätsträgerdichte:

Bei n-dotierten Halbleitern sind die Elektronen die Majoritätsträger und die Löcher die Minoritätsträger. Umgekehrt sind bei p-dotierten Halbleitern Elektronen die Minoritätsträger. Per Definition ist die Dichte der Majoritätsträger größer als die der Minoritätsträger (n-Typ: $n > p$, p-Typ: $p > n$). In beiden HL-Typen sind die Minoritätsträgerdichten stark temperaturabhängig ($\propto e^{-E_g/2k_B T}$) und die Majoritätsträgerdichten nahezu temperaturunabhängig und damit konstant. (n-Typ: $n \approx N_D, p = \frac{n_i^2}{N_D}$; p-Typ: $p \approx N_A, n = \frac{n_i^2}{N_A}$).

→ Im thermodynamischen Gleichgewicht herrscht bei einem HL die Gleichheit der thermischen Generation $G_T = r(T) \cdot n_i^2$ und der Rekombinationsrate $R = r(T) \cdot n \cdot p$ (im thermodyn. GG gilt $n \cdot p = n_i^2$), wobei $r(T)$ eine temperaturabhängige ~~Rekombinationsrate~~ Faktor ist. Stört man dieses Gleichgewicht mit optischer Strahlung, so bildet sich die gesamte Generationsrate aus der immer vorhandenen thermischen, und aus der optischen Generation G_L als $G = G_T + G_L$. Es gilt damit:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = G_L + G_T - R.$$

Schaltet man G_L zum Zeitpunkt $t=0$ ab, so kehrt das System zu dem Gleichgewichtszustand ^{zurück}. Dabei bleibt die Majoritätsträgerdichte nahezu konstant, die Minoritätsträgerdichte ändert sich aber wesentlich, bei n-Typ mit $\frac{dp}{dt} = -\frac{p-p_0}{\tau_p}$ ($p_0 = \frac{n_i^2}{N_D}$), bei p-Typ mit $\frac{dn}{dt} = -\frac{n-n_0}{\tau_n}$ ($n_0 = \frac{n_i^2}{N_A}$). Dabei gilt bei n-Typ: $\tau_p = \frac{1}{r(T) \cdot N_D}$ und bei p-Typ: $\tau_n = \frac{1}{r(T) \cdot N_A}$. Diese Lebensdauer sind abhängig von der Dotierung und entscheidend für das Abklingen der optischen Störung.

- Ausgleich der Majoritätsladungsträgerdichte

Stört man das Gleichgewicht bei einem HL durch Änderung der Majoritätsträgerdichte mittels Trägerinjektion, so ist für das Abklingen dieser Störung die Relaxationszeit $\tau_R = \frac{\epsilon}{\sigma}$ entscheidend, wobei ϵ die dielektrische Permittivität und σ die elektrische Leitfähigkeit bezeichnen.

→ Die Relaxationszeit ist bei üblichen Dotierungen sehr klein, etwa im ps-Bereich.

⇒ Wenn man in den HL Minoritätsträger injiziert, dann ordnen sich erst die überschüssige Majoritätsträger ganz schnell um die Minoritätsträger um (mit der sehr kleinen Relaxationszeit τ_R). Dann klingt die Störung mittels Rekombinationen ab (mit der größeren Lebensdauer τ_p oder τ_n). Da $\tau_p, \tau_n > \tau_R$ gilt, ist für diesen Prozess τ_p, τ_n entscheidend.

- Ausdehnung der Störungen

Stört man räumlich an einer Stelle des Halbleiters das Gleichgewicht, so wird diese Störung durch Diffusion und Rekombination abgebaut.

→ Für die Funktion der Bauelemente ist die Diffusion der Minoritätsträger und damit die Diffusionslängen L_p bei n-HL, L_n bei p-HL entscheidend. Es gilt:

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

→ Außerdem gelten die Einstein-Beziehungen: $D_n = \frac{k_B T}{e} \mu_n$, $D_p = \frac{k_B T}{e} \mu_p$.

$$\Rightarrow L_p = \sqrt{\frac{k_B T}{e} \mu_p \tau_p}, \quad L_n = \sqrt{\frac{k_B T}{e} \mu_n \tau_n}$$

→ Für die Ausdehnung der Raumladungszonen (pn-Übergänge usw.) ist die Debye-Länge L_D wichtig:

$$L_D = \sqrt{\frac{k_B T}{e^2} \frac{\epsilon}{N_D}}$$

→ L_n, L_p betragen einige μm , wobei L_D einige nm groß ist.