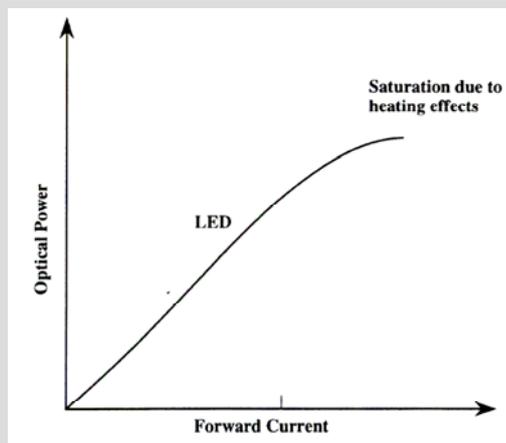


Die LED hängt von dem spontanen Emissionsprozess ab, der das Licht aus den injizierten Elektronen und Löchern erzeugt. Im Vergleich zu einer Laserdiode ist die Herstellung einer Led einfach. Dafür muss jedoch auch ein Preis in den **Leistungsmerkmalen** gezahlt werden, wie in:

- Licht-Strom Charakteristik
- spektraler Reinheit
- Zeitverhalten
- Temperaturverhalten

Wird ein Strom I durch eine in Vorwärtsrichtung gepolte Diode geschickt, so wird ein bestimmter Bruchteils des Stroms in Licht konvertiert.

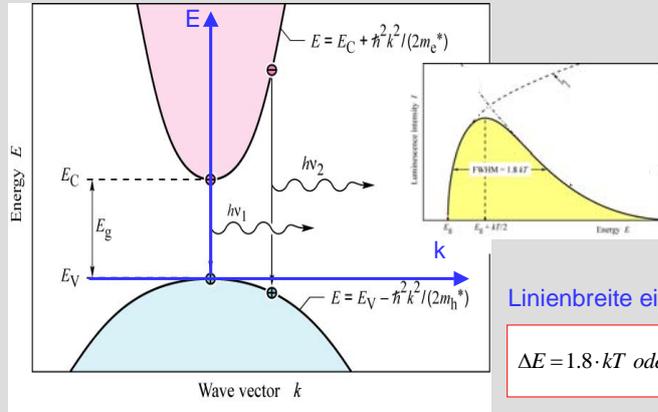


Ist η_{tot} die gesamte Effizienz dieser Konversion, dann gilt für den von der Diode emittierten Photonenstrom

$$I_{ph} = \eta_{tot} \cdot \frac{I}{q}$$

Im allgemeinen ist dabei

$$\eta_{tot} = \eta_{Qr} \cdot \gamma_{inj} \cdot \eta_{opt}$$



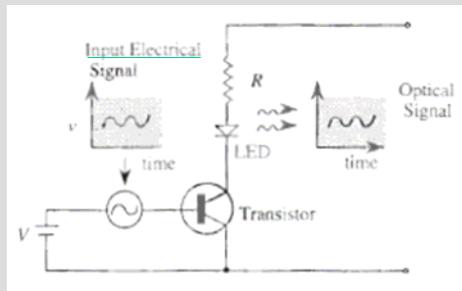
Linienbreite einer LED

$$\Delta E = 1.8 \cdot kT \text{ oder } \Delta \lambda = \frac{1.8 \cdot kT \cdot \lambda^2}{hc}$$

Für niedrige Injektionen: $FWHM \approx kT$

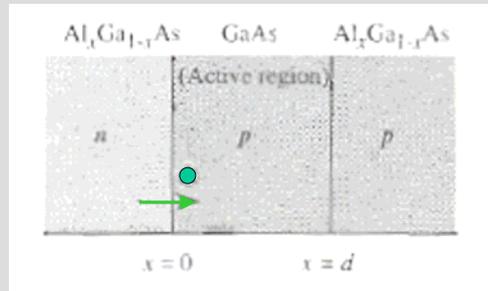
Für hohe Injektionen: $FWHM \approx \frac{n}{N_c} \cdot kT$

Wichtig für die Signalübertragung ist die Konversion eines elektrischen Signals in ein optisches Signal. Dazu ist in Folgendem Bild ein typischer Schaltkreis zur Erzeugung eines optischen Signals mit Hilfe einer LED dargestellt.



Eine LED ist grundsätzlich eine in Vorwärtsrichtung betriebene p-n Diode, in der Minoritätsladungsträger in den aktiven Bereich injiziert werden. Um das austretende Signal zu modulieren müssen deshalb die injizierten Ladungsträger moduliert werden.

Minoritätsladungsträgerinjektion



Unabhängig von externen parasitären Größen, wie RC-Konstanten etc., ist deshalb ein **entscheidendes Charakteristikum** die **Geschwindigkeit mit der Ladungsträger extrahiert bzw. injiziert werden können.**

Diese Zeit wird durch die Rekombinationszeit bestimmt.

Generell gilt: $\mu \sim \tau$ und $\mu_e \gg \mu_h$ \longrightarrow **Elektroneninjektion in p-Gebiet**

apl.Prof. Dr. D.J. As

Die Kontinuitätsgleichung für die Ladungsträger (wir betrachten nur e-Injektion)

$$\frac{dn(x)}{dt} = -\frac{n(x)}{\tau} + D_n \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2}$$

Wobei der erste Term die Rekombination der Ladungsträger ist (einschließlich der

nicht-strahlenden Prozesse $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$ und der zweite Term die Diffusions-

komponente des Teilchenstromflusses ist.

Da in einem vorwärtsbetriebenen p-n-Übergang die elektrischen Felder klein sind, kann jetzt der Driftstrom vernachlässigt werden.

Durch Anlegen eines kleinen Modulationssignals (Kleinsignalmodulation)

$$J(x,t) = J_0(x) + J_1(x) \cdot \exp(i\omega t)$$

$$n(x,t) = n_0(x) + n_1(x) \cdot \exp(i\omega t)$$

apl.Prof. Dr. D.J. As

Einsetzen in obige Gleichung liefert

$$D_n \frac{\partial^2 n_0(x)}{\partial x^2} - \frac{n_0(x)}{\tau} = 0$$

Gleichstromanteil

$$D_n \frac{\partial^2 n_1(x)}{\partial x^2} - \frac{n_1(x)}{\tau} = i\omega n_1(x)$$

Wechselstromanteil

bzw. $D_n \frac{\partial^2 n_1(x)}{\partial x^2} - \frac{(1-i\omega\tau)}{\tau} n_1(x) = 0$

Definieren wir jetzt $L_n = \sqrt{D_n\tau}$ und $L_n(\omega) = \sqrt{\frac{D_n\tau}{1+i\omega\tau}}$

So erhalten wir:

$$\frac{\partial^2 n_0(x)}{\partial x^2} = \frac{n_0(x)}{L_n^2}$$



$$n_0(x) = n \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

$$\frac{\partial^2 n_1(x)}{\partial x^2} = \frac{n_1(x)}{L_n^2(\omega)}$$

Wir können jetzt die zeitliche Antwort einer LED durch die Übertragungsfunktion $r(\omega)$

$$r(\omega) := \frac{J_{ph1}(\omega)}{J_1(\omega)} = \frac{q \cdot J_{ph1}(\omega)}{J_1(\omega) \cdot q}$$

Definieren, d.h. durch das Verhältnis des AC-Anteils der Photonenstromdichte zum AC-Anteils der Elektronenstromdichte

Unter der Annahme, daß nur Elektronen für den Stromfluß verantwortlich sind gilt:

$$n_1(x=0) = n_1(0)$$

Weiters nehmen wir an, daß die Ladungsträger rekombinieren bevor sie den Rand der aktiven Zone erreichen, d.h. $L_n \ll d$.

$$n_1(x=d) = 0$$

Damit erhalten wir als Lösung unserer Gleichung

$$n_1(x) = n_1(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right)$$

Die **Photonenstromdichte** J_{ph} erhalten wir durch Integration über die aktive Zone

$$\begin{aligned} J_{ph}(\omega) &= \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^d n_1(\omega) dx = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^d n_1(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right) dx = \\ &= \frac{1}{\tau} \cdot n_1(0) \int_0^d \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right) dx = \frac{1}{\tau} \cdot n_1(0) (-L_n(\omega)) \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right) \Bigg|_0^d \end{aligned}$$

$$J_{ph}(\omega) = \frac{n_1(0)}{\tau} L_n(\omega)$$

Für die elektrische Stromdichte J_1 gilt

$$J_1(\omega) = q \cdot D_n \cdot \frac{dn_1(x)}{dx} = -q \cdot D_n \frac{n_1(0)}{L_n(\omega)}$$

sodaß für die Übertragungsfunktion:

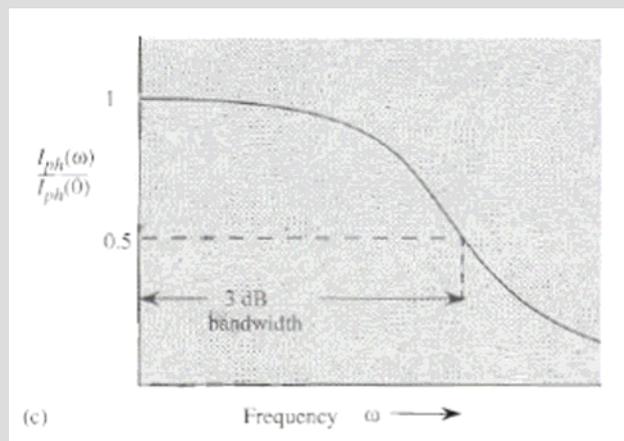
$$r(\omega) := \frac{q \cdot J_{ph1}(\omega)}{J_1(\omega)} = \frac{|L_n(\omega)|^2}{\tau D_n} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

$$L_n(\omega) = \sqrt{\frac{D_n \tau}{1 + i\omega \tau}}$$

In diesem Ausdruck sehen wir wie wichtig die **Rekombinationszeit τ** ist und **die Bandbreite einer LED limitiert**.

Die **Modulationsbandbreite f_c** ist als diejenige Frequenz f_c definiert, bei der die Leistungsamplitude die Hälfte des Wertes annimmt bei $\omega=0$ (3 dB-Bandbreite)

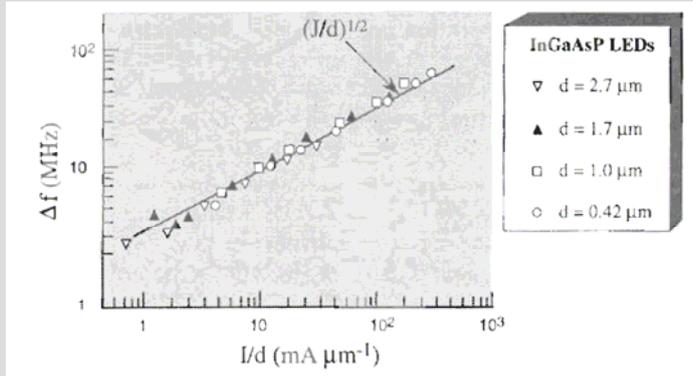
$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{\tau} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$



$$3dB \triangleq \frac{I_{ph}(\omega)}{I_{ph}(\omega \rightarrow 0)} = \frac{1}{2}$$

Bei hochwertigen Bauelementen wird $\tau \sim \tau_p$; nichtstrahlende Prozesse führen damit zu einer Verringerung der Modulationsbandbreite.

Da die strahlende Lebensdauer von der Ladungsträgerdichte oder der Dotierung der aktiven Schicht abhängt, wird jetzt durch Injektion von mehr Strom die Rekombinationszeit τ kleiner und die Modulationsbandbreite nimmt zu.



$$J = \frac{q n d}{\tau} \quad \frac{J}{d} \approx \frac{1}{\tau}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} \quad f_c \approx \frac{J}{d}$$

apl.Prof. Dr. D.J. As

Beachte auch, dass die Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone proportional zu J/d ($=I/A \cdot d = I/V$) ist, wobei J die Stromdichte und d die Dicke der aktiven Zone ist. Je dünner die aktive Schicht ist, desto höher wird bei gleichem Injektionsstrom die Ladungsträgerdichte und damit verbunden ist eine kürzere Rekombinationszeit und eine höhere Modulationsbandbreite.

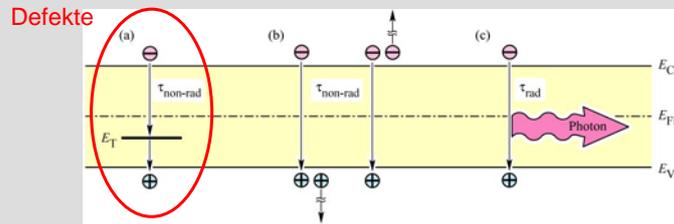
Zwei Möglichkeiten um Modulationsbandbreite zu erhöhen:

1. **Verringerung der aktiven Zone**
2. **Erhöhung der Dotierung der aktiven Schicht**

Die ultimative Bandbreite der LED ist durch die Zeit τ_0 bestimmt.

$$f_{c_max} = \frac{1}{2\pi\tau_0} = 2.65 \cdot 10^8 \text{ Hz} \approx 260 \text{ MHz}$$

apl.Prof. Dr. D.J. As



a) Über Defekte (Shockley-Read-Hall-Prozesse)

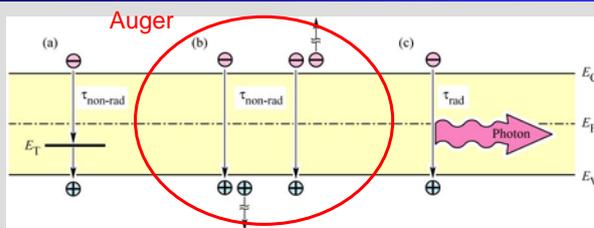
$$\tau_n = \frac{1}{N_T \cdot v_{th} \cdot \sigma_n} \quad \tau_p = \frac{1}{N_T \cdot v_{th} \cdot \sigma_p} \quad \eta = \frac{\frac{1}{\tau_r}}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r}$$

Für Rekombinationszentren gilt: $\tau_{nr} \cong \tau_n \cong \tau_p$

und die Rekombinationsrate wird $R_r = \frac{1}{\tau_{nr}} \cdot \frac{n \cdot p}{(n + p)}$

Die Zeitkonstante τ_{nr} hängt damit von der Störstellendichte N_T , dem Einfangsquerschnitt $\sigma_{n,p}$ als auch von der thermischen Geschwindigkeit v_{th} ab.

Je größer σ , je höher T und je höher N_T desto kleiner wird τ_{nr} und damit η .



CHHS CHCC

b) Über Auger-Prozesse (ca. 100 verschiedene Prozesse)

Der Auger-Prozess ist ein weiterer wichtiger Mechanismus zur Erzeugung nicht strahlender Rekombination (3-Teilchenprozess deswegen $\sim n^3$)

$$W = R_{Auger} = F \cdot n^3$$

Näherung für CHCC:

$$R_{Auger} = \frac{q^4 m_c^* (k_B T)^{3/2} \left(\frac{m_c^*}{m_0}\right)}{4\pi^{3/2} \cdot \epsilon^2 \cdot \hbar^3 \cdot (1 + \mu)^{3/2} \cdot E_g^{3/2}} \cdot \exp\left\{-\frac{(1 + \mu) \cdot E_g}{k_B T}\right\} \quad \text{wobei } \mu = \frac{m_c^*}{m_r^*} \rightarrow \tau_{Au} \sim \exp\left(\frac{E_g}{T}\right)$$

Augerprozess wichtig deshalb für Materialien mit kleiner Bandlücke, bei hohen Dotierungen und hohen Temperaturen!

Zusätzlich zur Modulationsgeschwindigkeit benötigt man für viele Anwendungen auch hohe Ausgangsleistungen (Kommunikation, Anzeigesysteme,...). Diese beiden Forderungen lassen sich aber nicht immer vereinbaren. Für hohe optische Leistung benötigt man ein Bauelement mit möglichst langer aktiver Zone wie aus folgender Überlegung ersichtlich wird.

Der Photonenstrom ist

$$I_{ph} = \eta_{tot} \cdot \frac{I}{q} = \eta_{tot} \frac{n \cdot d \cdot A}{\tau_r}$$

Die optische Leistung einer LED ist damit

$$P_{opt} = I_{ph} \cdot \hbar\omega = \eta_{tot} \cdot \frac{\hbar\omega \cdot n \cdot d \cdot A}{\tau_r}$$

Um die Ausgangsleistung zu erhöhen sollte man folgendes beachten:

apl.Prof. Dr. D.J. As

i) Injizierte Ladungsträgerdichte:

Durch Erhöhung der Ladungsträger kann die Ausgangsleistung nicht beliebig erhöht werden

- Aufwärmungsproblematik
- Augerrekombination
- Leckströme

→ maximal injizierte Ladungsträger ca. 10^{18}cm^{-3} . → $\tau_r \sim 1$ bis 2 ns

i) Bauelementfläche:

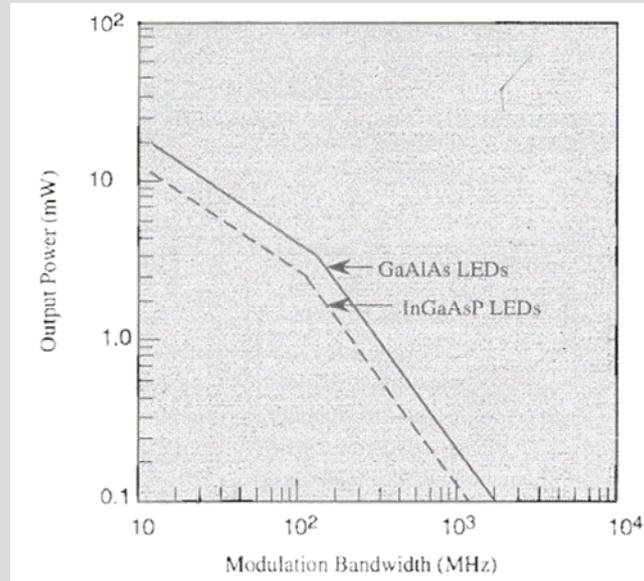
Vergrößerung der Fläche kann ebenfalls Ausgangsleistung erhöhen, dies wird jedoch durch die Herstellungstechnologie begrenzt – Zunehmende Anzahl der Defekte.

Zusätzlich wird auch die Kapazität größer – RC-Konstante begrenzt Modulationsgeschwindigkeit

i) Aktive Dicke des verstärkenden Bereichs:

Eine Verbreiterung der aktiven Schicht d führt zu einer Begrenzung der Bandbreite der LED aufgrund von Transiteffekten. Die Transitzeit ist durch Diffusionsprozesse kontrolliert und durch folgende Beziehung $t_{tr} \sim d^2/2D$ gegeben, wobei D der Diffusionskoeffizient der langsameren Ladungsträger ist (Löcher).

apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As

Lichtausgangsleistung bleibt über einen langen Zeitraum konstant erhalten.

LED-Fehler werden in 3 Kategorien unterteilt:

- Kindheitsfehler (infant failure)
Verhinderung durch anfängliche Einbrenntests (burn-in), wobei das Bauelement mit hoher Leistung über 100 h betrieben wird
- Verrückte, statistische Fehler
extreme statistische Fluktuationen in Bauelementdefekten
- Langsam fortschreitende Fehler
graduelle Degradation der Ausgangsleistung

→ große „mittlere Ausfallszeit“ (mean time to failure MTTF - 3dB drop)

GaAs basierende LEDs	> 10 ⁶ h
InP basierende LEDs	> 10 ⁹ h

Wichtiger Fehlermechanismus:

Wanderung von Versetzungslinien in die aktive Zone

→ Dark line defects

apl.Prof. Dr. D.J. As