

Temperaturabhängigkeit der Emissionsintensität

Die Emissionsintensität einer LED nimmt aufgrund verschiedener Faktoren mit zunehmender Temperatur ab.

- a) Nichtstrahlende Rekombination über tiefe Störstellen
- b) Oberflächenrekombination
- c) Ladungsträgerverlust über Barriere der Heterostruktur

Um Raumtemperatur kann diese Temperaturabhängigkeit phänomenologisch durch folgende Gleichung beschrieben werden.

$$I = I|_{300} \cdot \exp\left(-\frac{T - 300K}{T_1}\right)$$

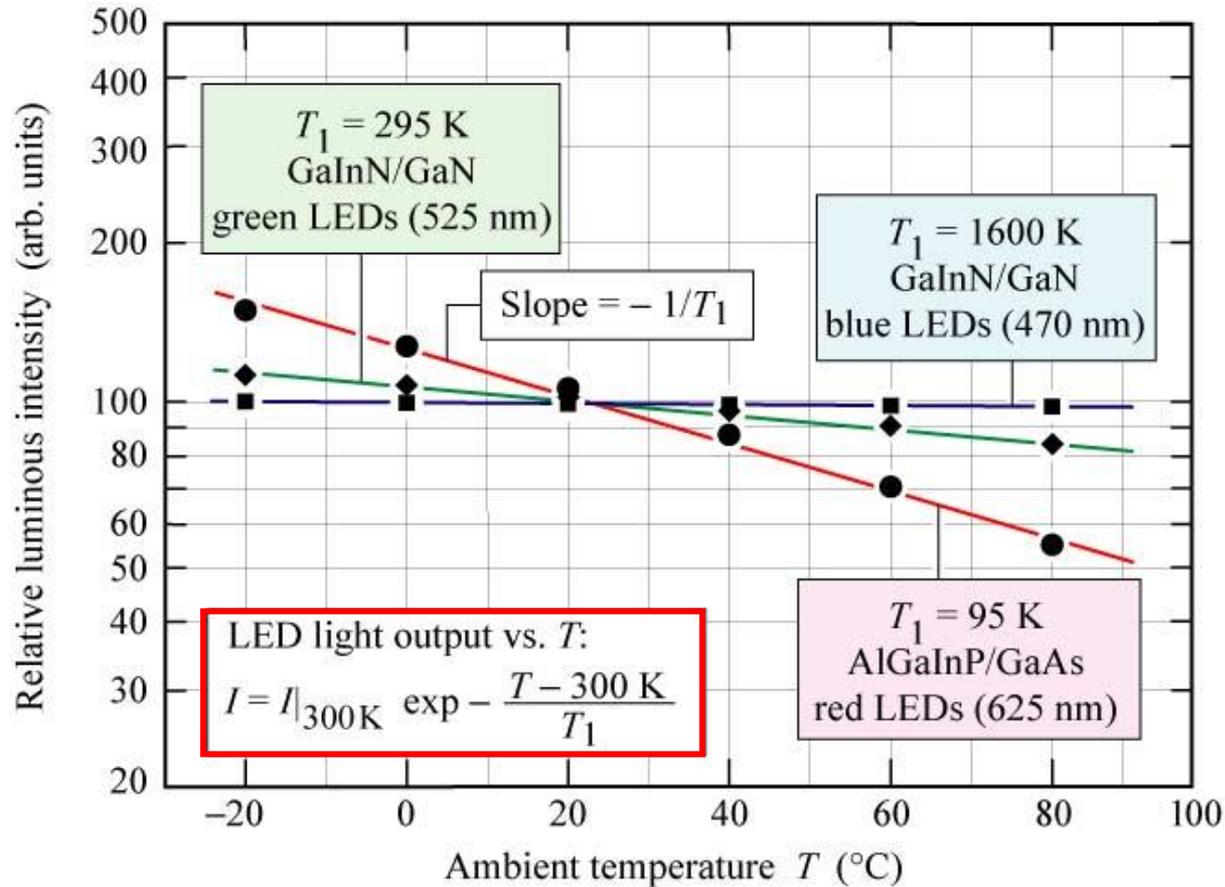
wobei T_1 als die **charakteristische Temperatur** bezeichnet wird. Eine **hohe charakteristische Temperatur** impliziert eine **schwache Temperaturabhängigkeit**.

Nebenbemerkung: In LD verschiebt sich die Stromdichte, ab der Lasen einsetzt mit der Temperatur. Es gilt die sog. Schwellstrom T_0 Gleichung für den Schwellstrom I_{th} :

$$I_{th} = I_{th}|_{300} \cdot \exp\left(\frac{T - 300K}{T_0}\right)$$

Charakteristische Temperaturen T_1 für verschiedene LEDs

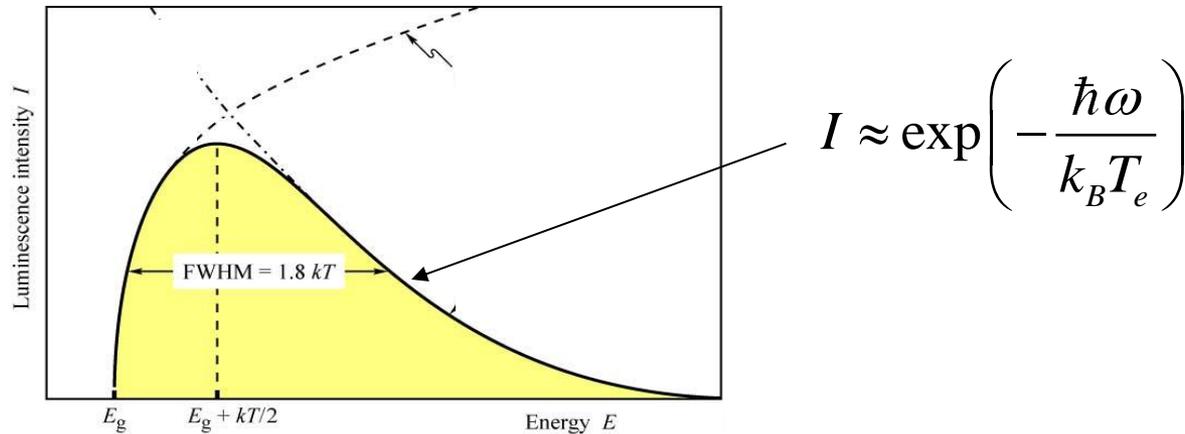
Temperaturabhängigkeit der Emissionsintensität bei konstantem Strom



- Gruppe III-Nitride haben tiefere Potentialtöpfe als III-V Phosphide

Ladungsträgertemperatur

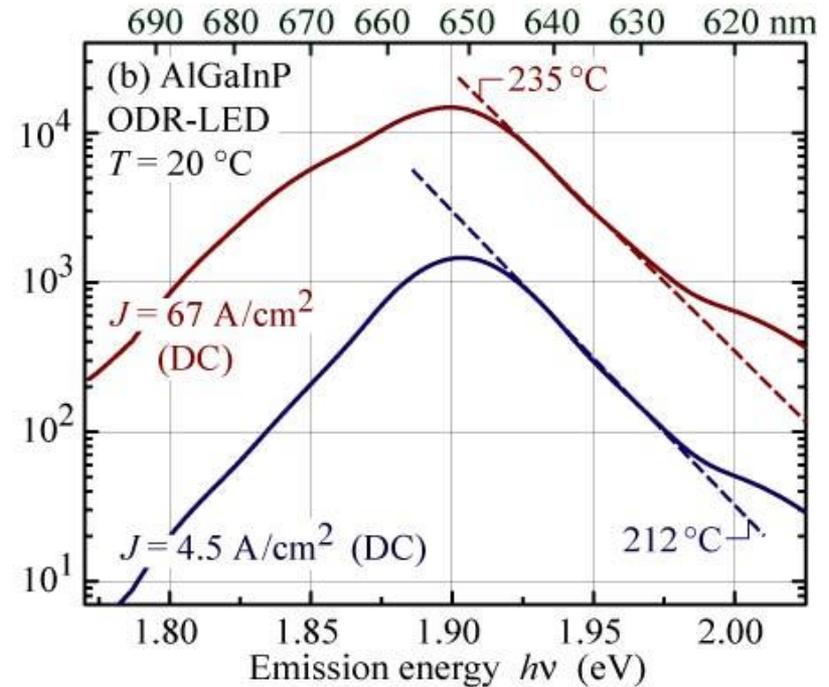
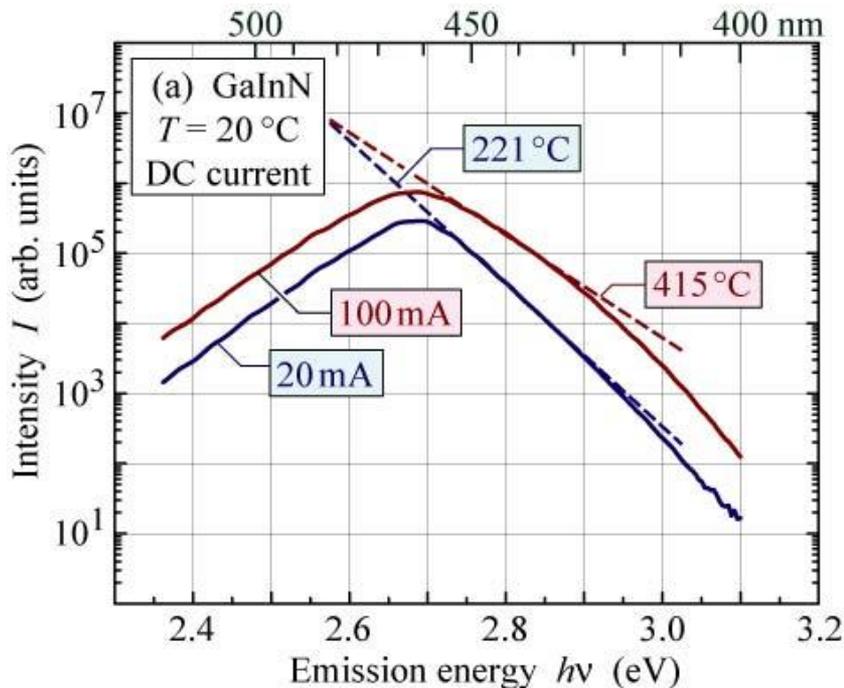
Aus dem hochenergetischen Abfall des Emissionsspektrums kann die Ladungsträgertemperatur T_e ermittelt werden.



Die Steigung auf der **hochenergetischen Seite** ist gegeben durch:

$$\frac{d(\ln I)}{d(\hbar\omega)} \approx -\frac{1}{k_B T_e} \quad \text{in [K] !}$$

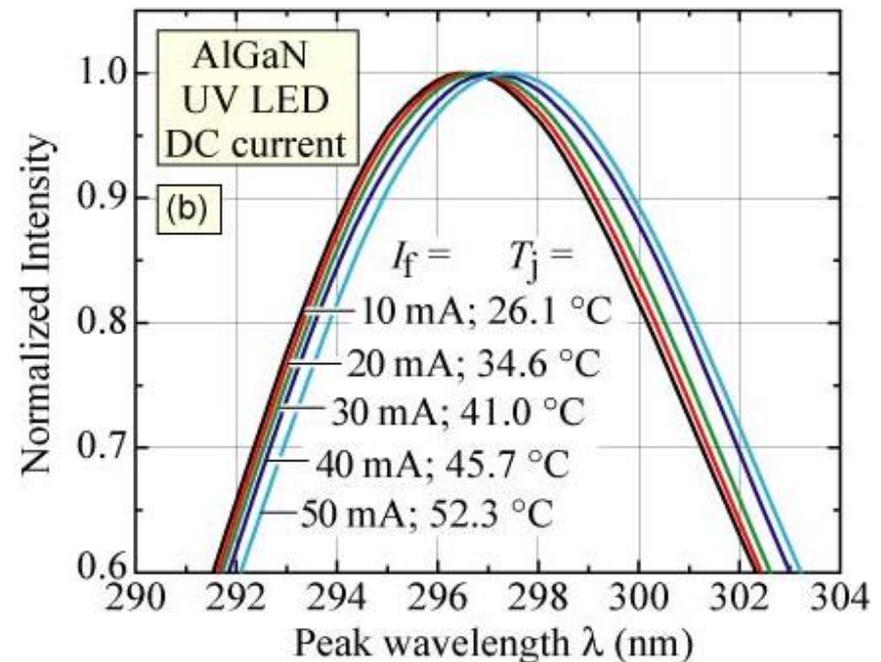
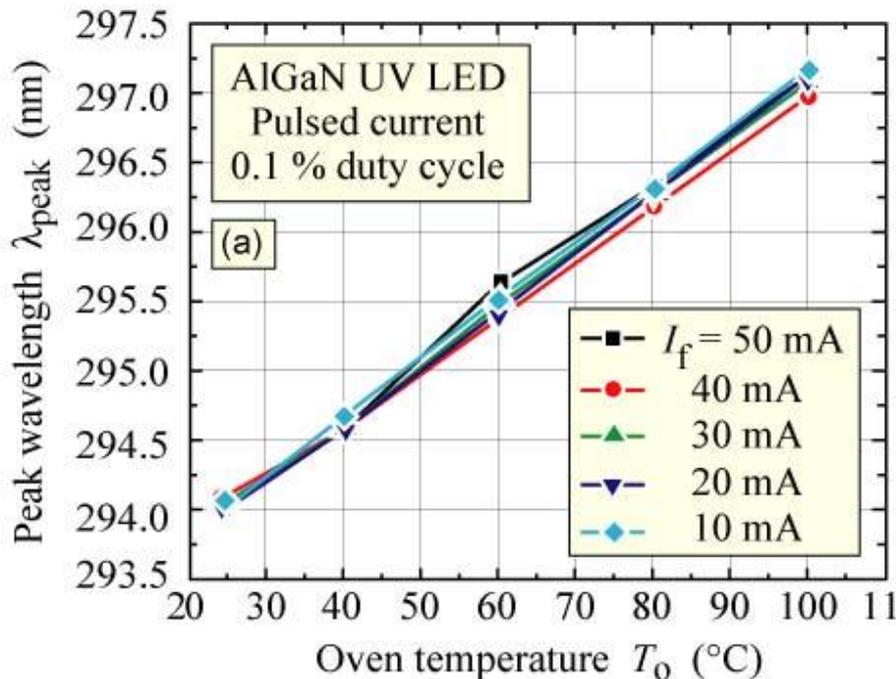
Ladungsträgertemperatur



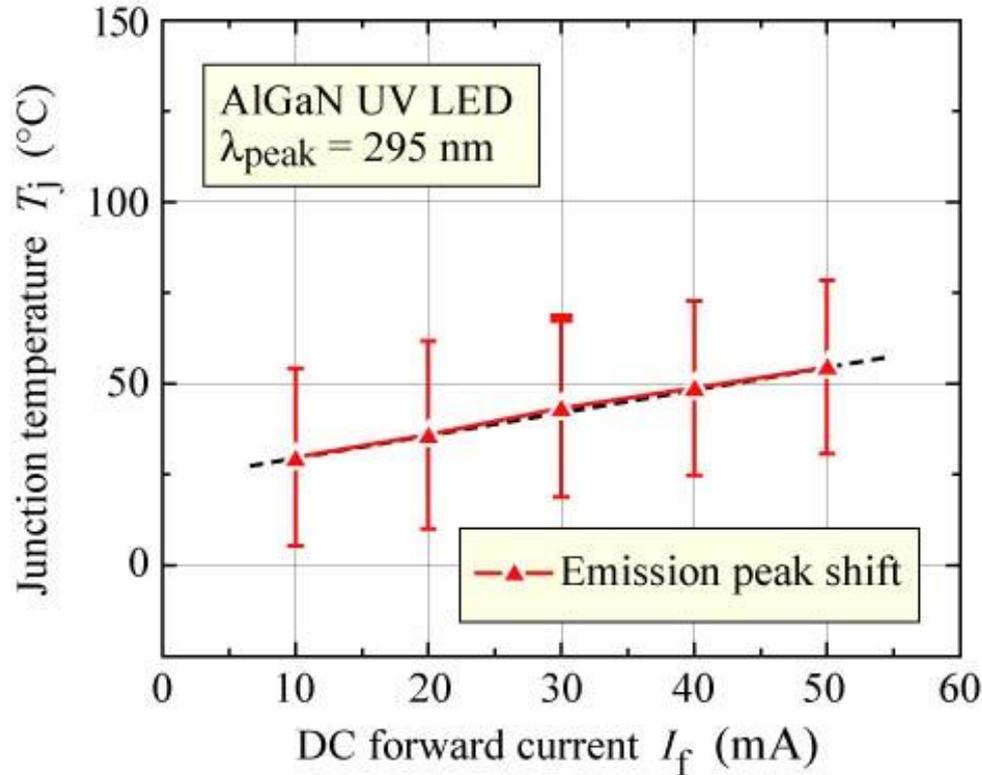
- Ladungsträgertemperatur T_e muss nicht der Temperatur des aktiven Bereiches entsprechen (Injektion heißer Elektronen)
- T_e obere Grenze für die Temperatur des aktiven Bereiches
- Alloy-broadening führt zu einer Überschätzung der Ladungsträgertemperatur.

Verschiebung der Peakwellenlänge

- Erhöhung der Diodentemperatur führt zu einer Verschiebung der Peakwellenlänge bedingt durch die Änderung der Bandlücke
- Kann zur Bestimmung der Diodentemperatur genutzt werden
- Kalibrierung durch Messung bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (und sehr kleinen Strömen (gepulst))



Aufheizen der Diode im Betrieb



Temperatur des Heteroübergangs bestimmt aus der Verschiebung der Emissionswellenlänge

Die Genauigkeit der Methode ist durch die Bestimmung der Peak-Wellenlänge begrenzt. Als Faustregel wird für den Fehlerbalken der Peakwellenlänge etwa 5-10% der FWHM Linienbreite angenommen.

Beachte: Bandauffüllevffekte sind in der Kalibrierung enthalten sind.

Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie

Die I-V Charakteristik einer idealen p-n-Diode ist durch die Shockley-Gleichung

$$J = J_s \cdot \left(e^{qV / (n_{ideal} kT)} - 1 \right)$$

gegeben mit J_s der Sättigungsstromdichte.

- Damit ist klar, dass die Kennlinie in Vorwärtsrichtung temperaturabhängig ist.
- Für einen festen Strom wird bei veränderte Temperatur eine andere Spannung benötigt (Beachte: auch J_s hängt von T ab!!).
- Für nicht entartete Halbleiter und unter Vorwärtsspannungsbedingungen $V_f \gg kT/q$, erhält man

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{d}{dT} \left[\frac{n_{ideal} kT}{q} \ln \left(\frac{J_f}{J_s} \right) \right]$$

Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{d}{dT} \left[\frac{n_{ideal} kT}{q} \ln \left(\frac{J_f}{J_s} \right) \right]$$

- Beachte: auch J_s hängt von T ab (siehe Shockley-Gleichung)
- Unter Berücksichtigung der T -Abhängigkeit des Sättigungsstromdichte, liefert die Ableitung folgende Näherung

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{qV_f - E_g}{qT} + \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_g}{dT} - \frac{3k}{q}$$

intrinsic Ladungsträgerkonzentration Bandlücke effektive Zustandsdichte

Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie

LEDs werden typischerweise unter Vorwärtsspannung in der Nähe von V_{bi} betrieben. Für nicht entartete Dotierkonzentrationen kann deshalb

$$qV_f - E_g \approx kT \cdot \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) - kT \cdot \ln\left(\frac{N_C N_V}{n_i^2}\right) = kT \cdot \ln\left(\frac{N_D N_A}{N_C N_V}\right)$$

angenommen werden.

Für den zweiten Summanden setzen wir für die T-abhängigkeit der Bandlücke die **Varshni-Formel** ein

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}$$

mit α und β als Fitparameter.

Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie

Unter Verwendung der Varshni-Formel erhält man für die T-Abhängigkeit der Vorwärtsspannung :

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{k}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_D N_A}{N_C N_V} \right) + \frac{\alpha T (T + 2\beta)}{q (T + \beta)^2} - \frac{3k}{q}$$

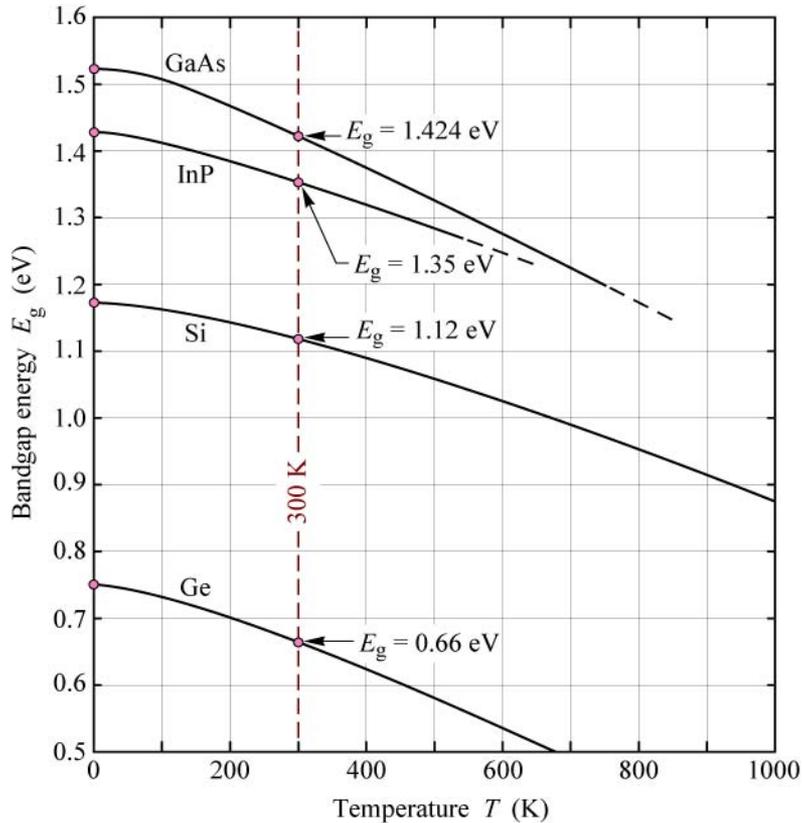
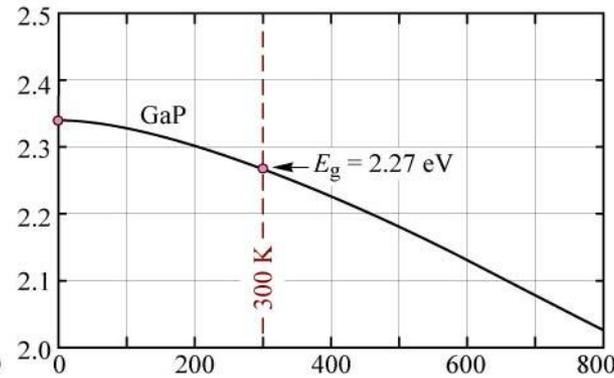
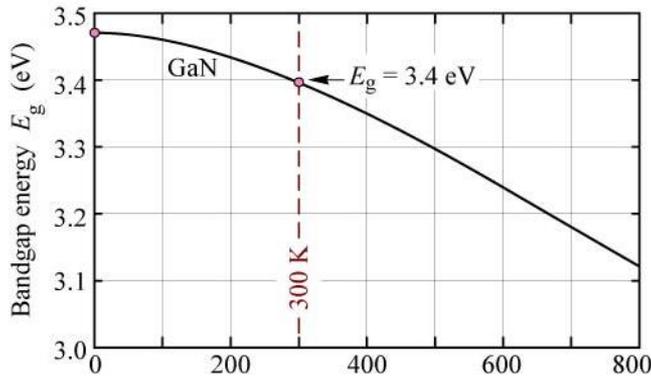
T-abhängigkeit
von n_i

$$\frac{1}{q} \cdot \frac{dE_g}{dT}$$

T-abhängigkeit von DOS

- Für einen nicht-entarteten Halbleiter sind i. d. R alle drei Summanden negativ
- Die Vorwärtsspannung für einen festen Strom sinkt mit steigender Temperatur

T- Abhängigkeit von E_g

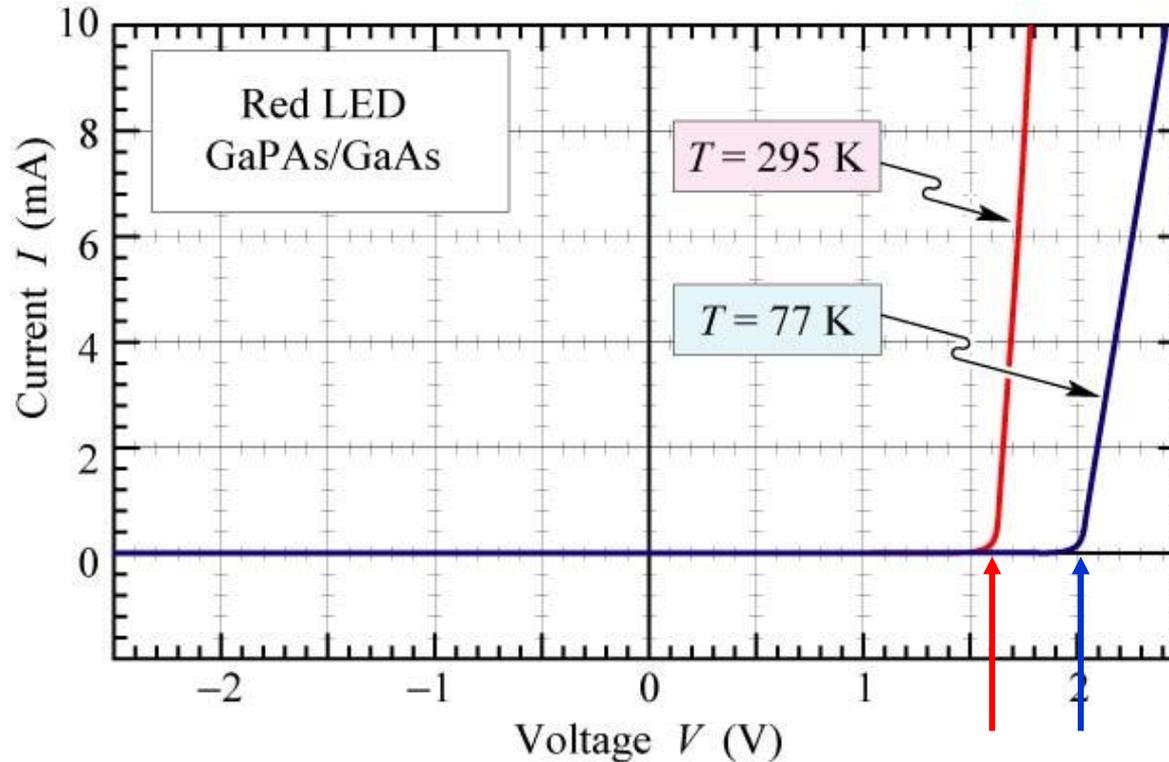


Varshni formula:

$$E_g = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

	$E_g(0K)$	$\alpha (10^{-4} \frac{eV}{K})$	$\beta (K)$
GaN	3.470	7.70	600
GaP	2.340	6.20	460
GaAs	1.519	5.41	204
InP	1.425	4.50	327
Si	1.170	4.73	636
Ge	0.744	4.77	235

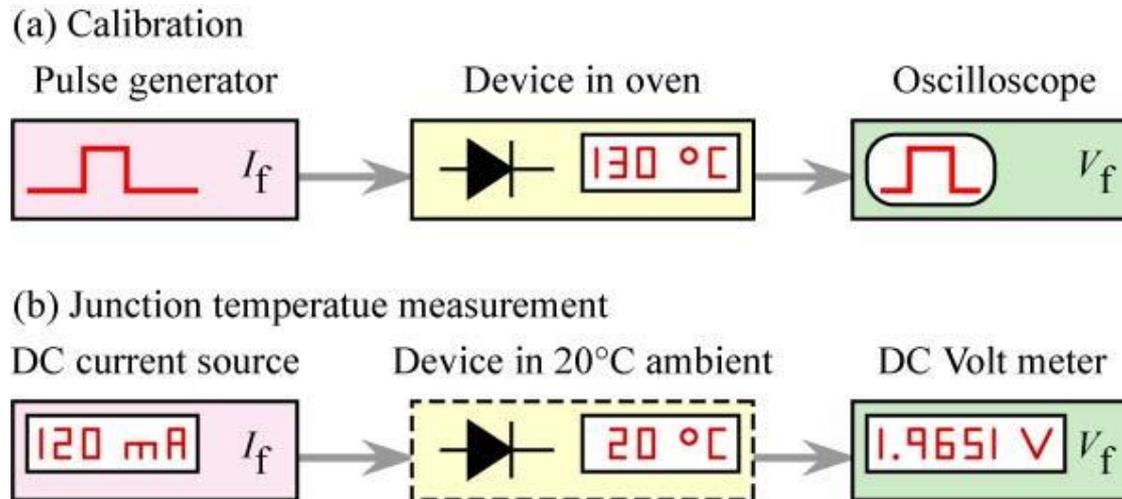
Temperaturabhängigkeit Diodenkennlinie



Sowohl die Schwellwertspannung als auch der Serienwiderstand werden durch Abkühlen größer.

Bestimmung der Diodentemperatur aus der Kennlinie

Diese Methode beruht auf einer Kalibrierungsmessung von V_f unter Pulsbedingungen und unter Gleichstrominjektion.

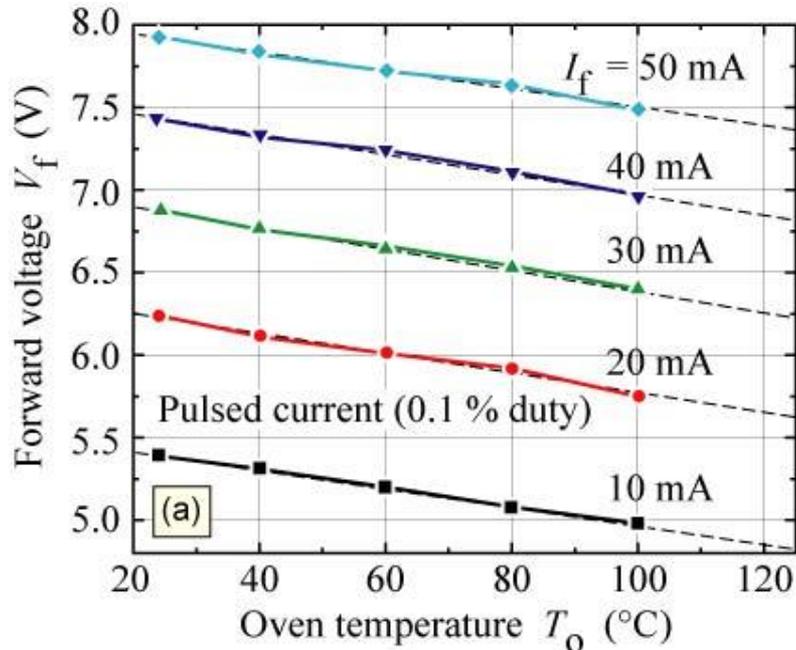


Zur Messung wird das Bauelement

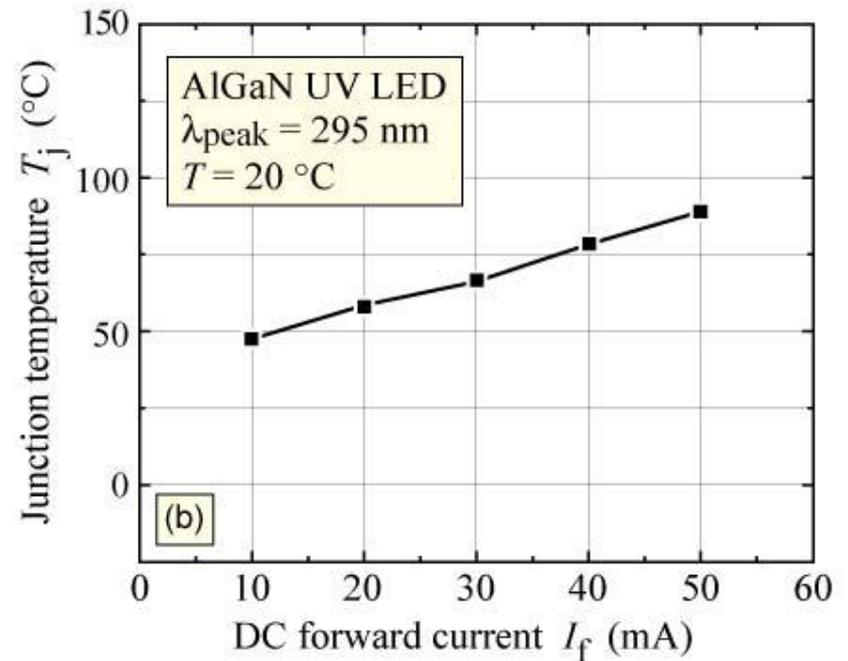
- in einem temperaturkontrollierten Ofen gelegt und unter Pulsbedingungen ($< 0.1\%$) betrieben. Die Temperatur wird zwischen 20 °C und 120 °C variiert. Die Vorwärtsspannung wird für jede Temperatur gemessen. $\rightarrow V_f$ vs. T_j
- Das Bauelemente wird bei Raumtemperatur einem Gleichstrom ausgesetzt und nach Einstellung eines thermischen Gleichgewichtes wird V_f gemessen.

Bestimmung der Diodentemperatur aus der Kennlinie

a) unter Pulsbetrieb

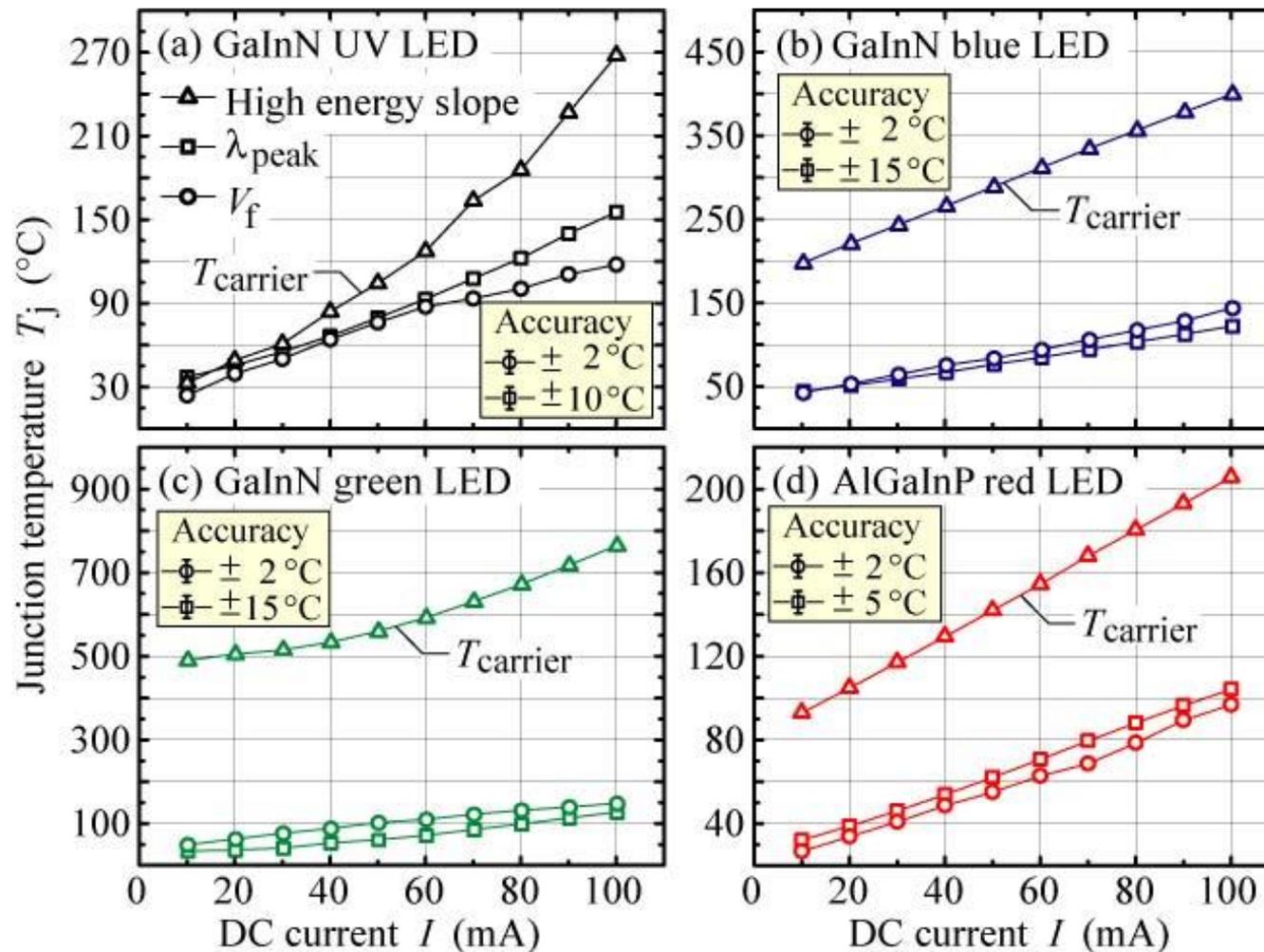


b) Diodentemperatur



(Xi et al., 2004)

Diodentemperatur für verschiedene LEDs



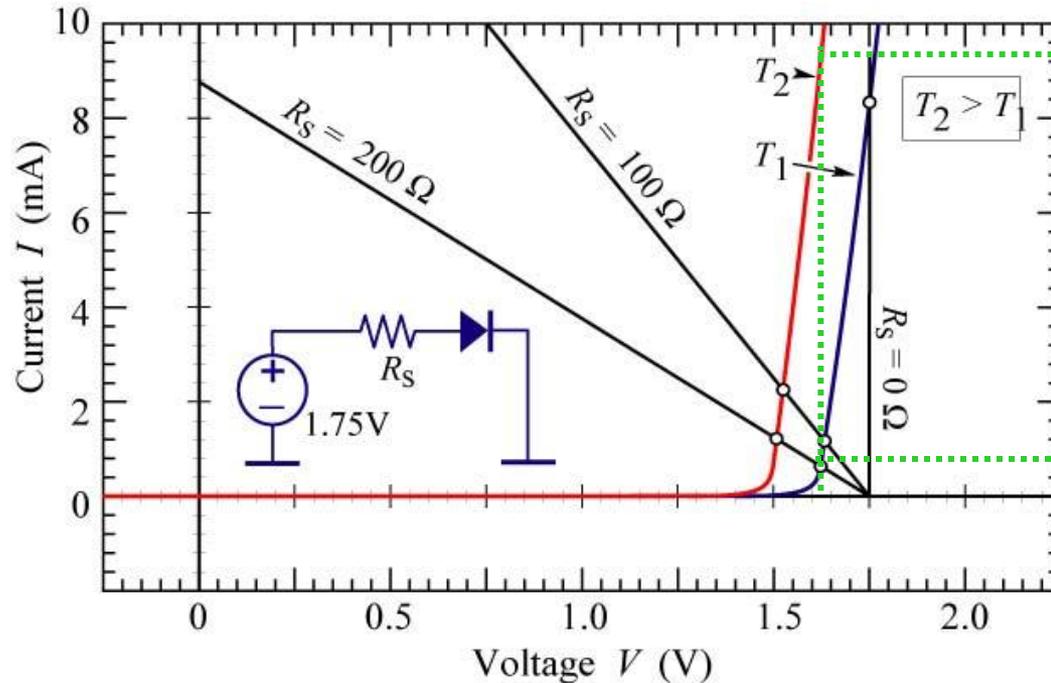
(Chhajed et al., 2004)

Die Ladungsträgertemperatur aus dem hochenergetischen Abfall überschätzt die tatsächliche Temperatur des Bauelements.

Elektrischer Betrieb einer LED

a) Konstant Spannungsbetrieb (Batterie, AC-Gleichrichter)

- Nachteile:
- Diodenstrom hängt exponentiell von Spannung ab, damit führen kleine Variationen in V zu großen Strom- und Leistungsänderung
 - die Schwellspannung V_{th} ist T -abhängig



- Wird ein Widerstand in Serie zur Diode geschaltet wird T und I -Abhängigkeit reduziert (Am Widerstand wird aber Leistung dissipiert).
- Konstante Spannung wirkt durch steigendem Strom dem Intensitätsabfall bei steigender Temperatur entgegen.

Elektrischer Betrieb einer LED

b) Konstant Strombetrieb

- Geringe Schwankungen im Strom führen auch nur zu geringen Schwankungen in der Lichtintensität (falls T stabil lässt sich so leicht eine stabile Emissionsintensität erreichen).
- Beim konstant Strombetrieb reduziert sich die Emissionsintensität mit zunehmender Temperatur, da keine Kompensation der erhöhten Verluste durch nicht-strahlende Rekombination.

Effektive LEDs

- Gewünscht ist eine möglichst hohe externe Effizienz
- Dazu können viele Teilaspekte optimiert werden:
 - Reduzierung der nicht-strahlenden Rekombination:
 - möglichst gut Materialqualität
 - Erhöhung der strahlenden Rekombination
 - QW-Strukturen (Matrixelement, Absorption)
 - Doppelheterostrukturen (Urbachtail Absorption)
 - Erhöhung der Auskoppelleffizienz
 - Form – Geometrie der LEDs
 - Kontaktierung (Transparenz, effiziente Stromzuführung)
 - Waferbonding – transparente Substrate

Effektive LEDs: Packaging

Das “Packaging“ (Verpacken) der hat eine entscheidenden Einfluss auf:

- Lichtauskoppelung (Antireflexionsbeschichten)
- Abstrahlcharakteristik
- Stromzuführung
- Wärmeabführung (Verlustwärme)!
- ESD (electrostatic discharge) Elektrostatische Entladung

Defekte als nichtstrahlende Zentren

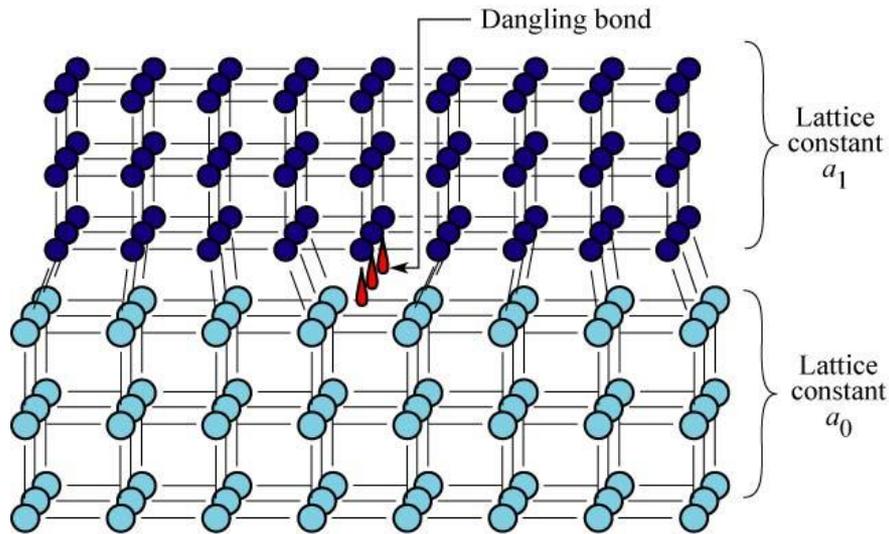


Fig. 7.12. Illustration of two crystals with mismatched lattice constant resulting in dislocations at or near the interface between the two semiconductors.

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

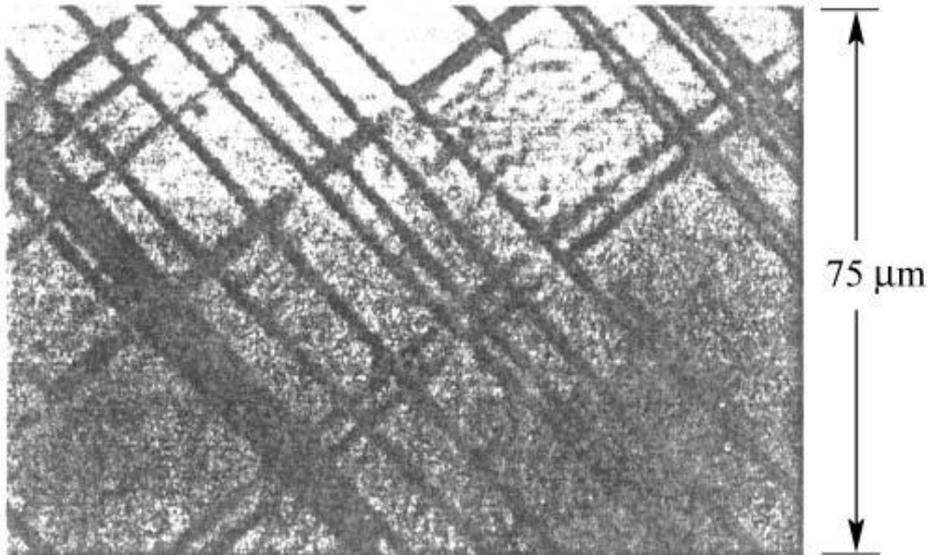
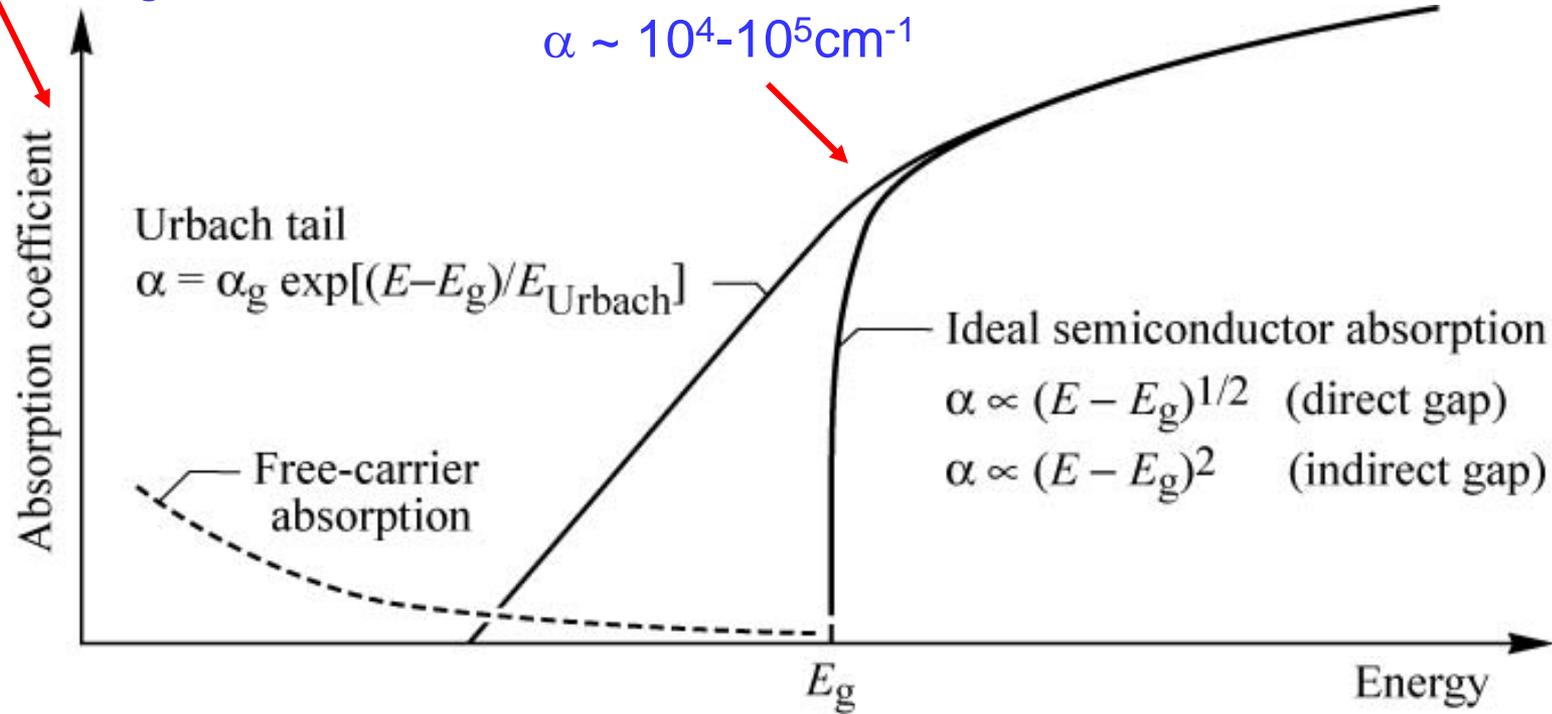


Fig. 7.13. Cathodo-luminescence image of a $0.35 \mu\text{m}$ thick $\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{As}$ layer grown on a GaAs substrate. The dark lines forming a cross-hatch pattern are due to misfit dislocations (after Fitzgerald *et al.*, 1989).

Versetzungslinien bleiben dunkel!

Absorption im Halbleiter

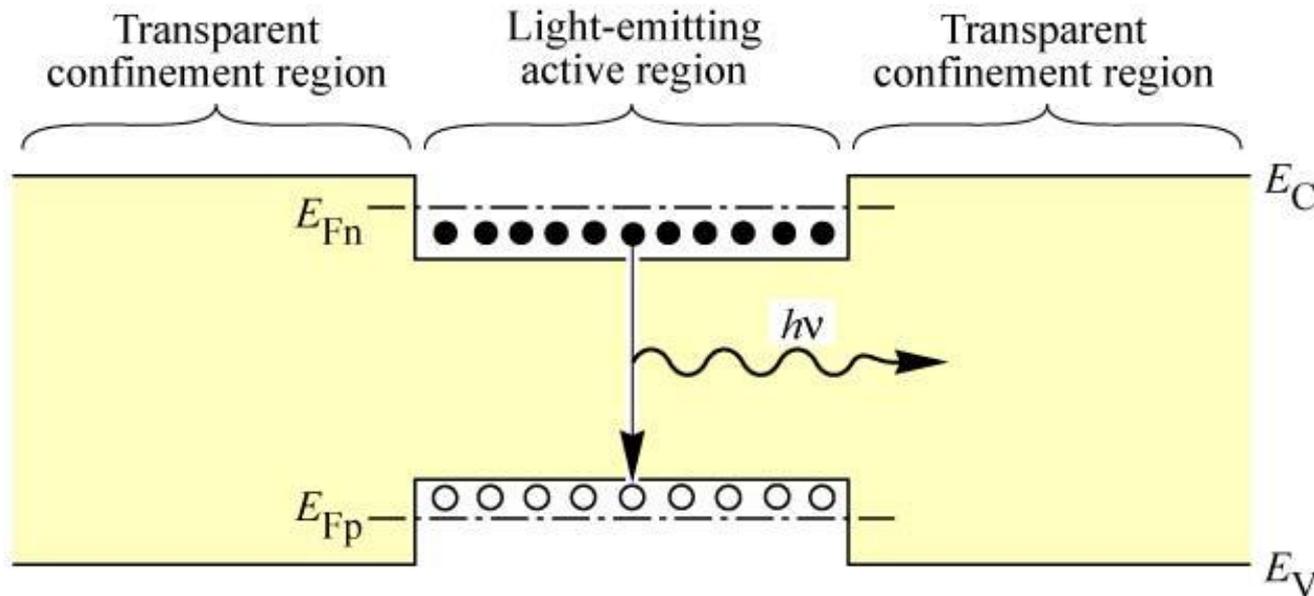
logarithmische
Darstellung



Absorptionskoeffizient eines Halbleiters mit einer Bandlücke E_g versus Energie.

- Der **“Urbach-Tail“** dominiert die Absorption knapp unterhalb der Bandlücke. Bei tieferen Energie ist die freie Ladungsträgerabsorption dominant.
- Urbach-Tail durch Unordnung im System bedingt.

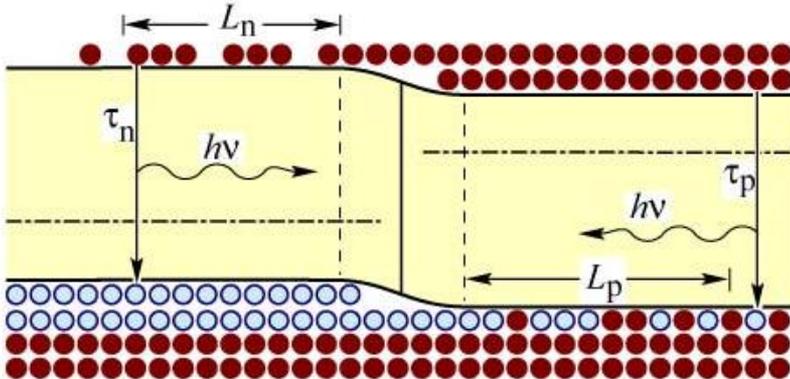
DH-Struktur mit optisch transparentem Cladding



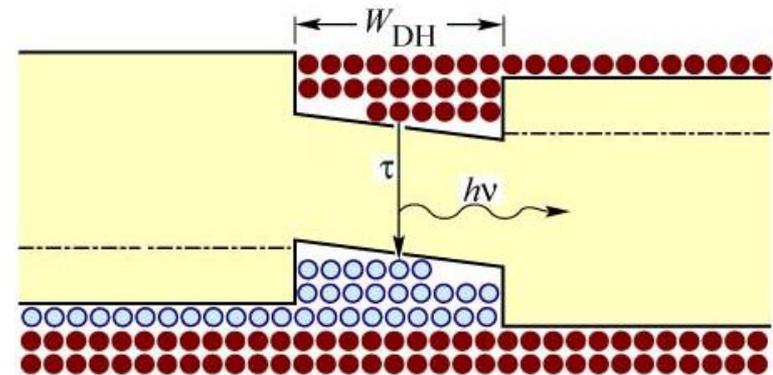
- Confinementbereiche sind recht dünn und können für Licht aus der aktiven Zone als optisch vollständig transparent angenommen werden.
- Unter normalen Injektionsbedingungen ist Reabsorption in der aktiven Zone unwahrscheinlich, wegen der hohen Ladungsträgerkonzentration und der daraus resultierenden **Burstein-Moss-Verschiebung** der Absorptionskante.
- Gute Materialqualität vorteilhaft: reabsorbiertes Photon wird mit hoher Wahrscheinlichkeit reemittiert

DH zur Erhöhung der strahlenden Rekombination

(b) Homojunction under forward bias

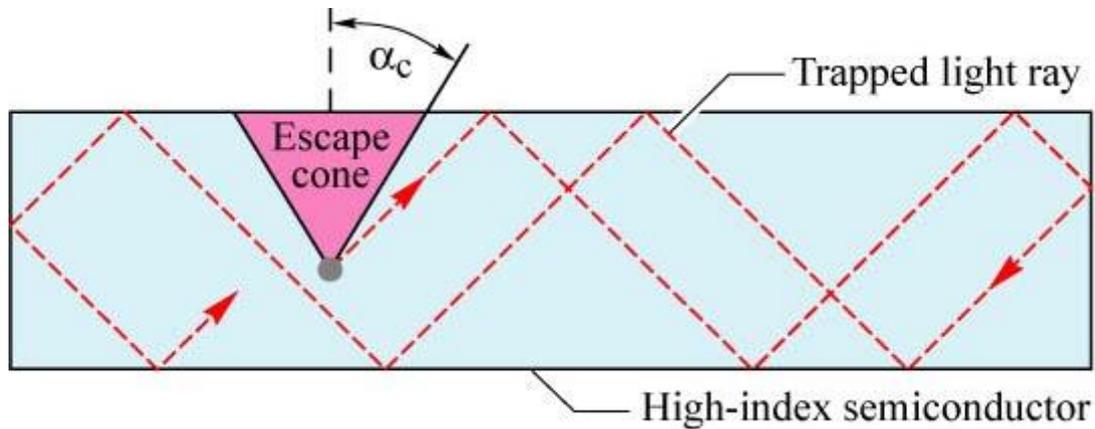


(c) Heterojunction under forward bias

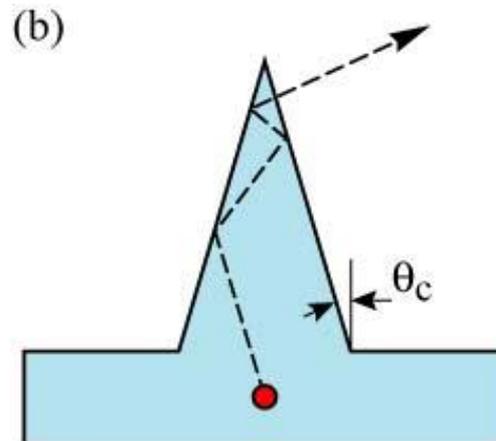
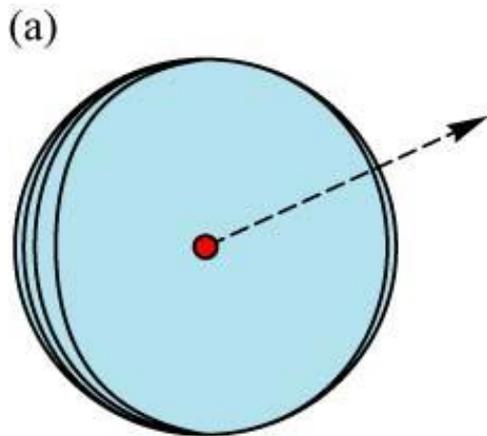


- In DH sind die Ladungsträger auf einen engeren Raumbereich beschränkt => $n p$ größer.
- $R_{\text{spont}} = B n p$ => strahlende Rekombination verbessert.
- Für LD besonders wichtig!
- Praktisch alle Hochleistungs-LED verwenden DH-Designs

Lichtauskopplung



“Trapped light” in a rectangular-parallelepiped-shaped semiconductor unable to escape for emission angles greater than α_c due to total internal reflection.



Schematic illustration of different geometric shapes for LEDs with perfect extraction efficiency. (a) Spherical LED with a point-like light-emitting region at the center of the sphere. (b) A cone-shaped LED.

Lichtauskopplung

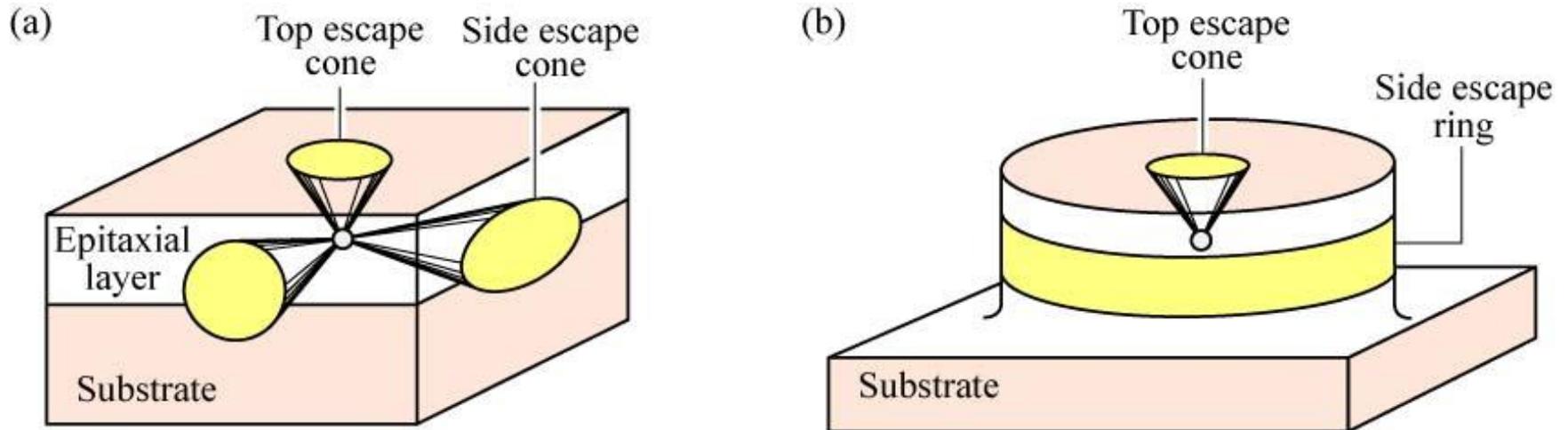
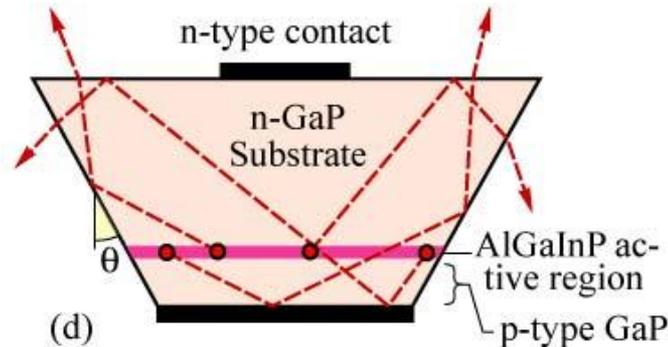
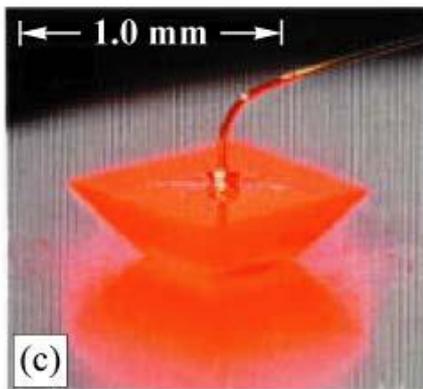
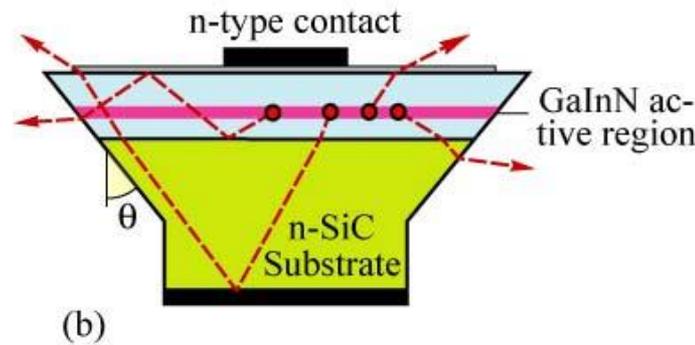
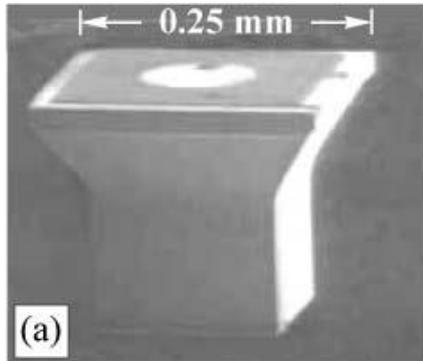


Illustration of different geometric shapes of LEDs. (a) Rectangular parallelepipedal LED die with a total of six escape cones. (b) Cylindrical LED die with a top escape cone and a side escape ring.

Kann man Licht in alle Richtungen nutzen?

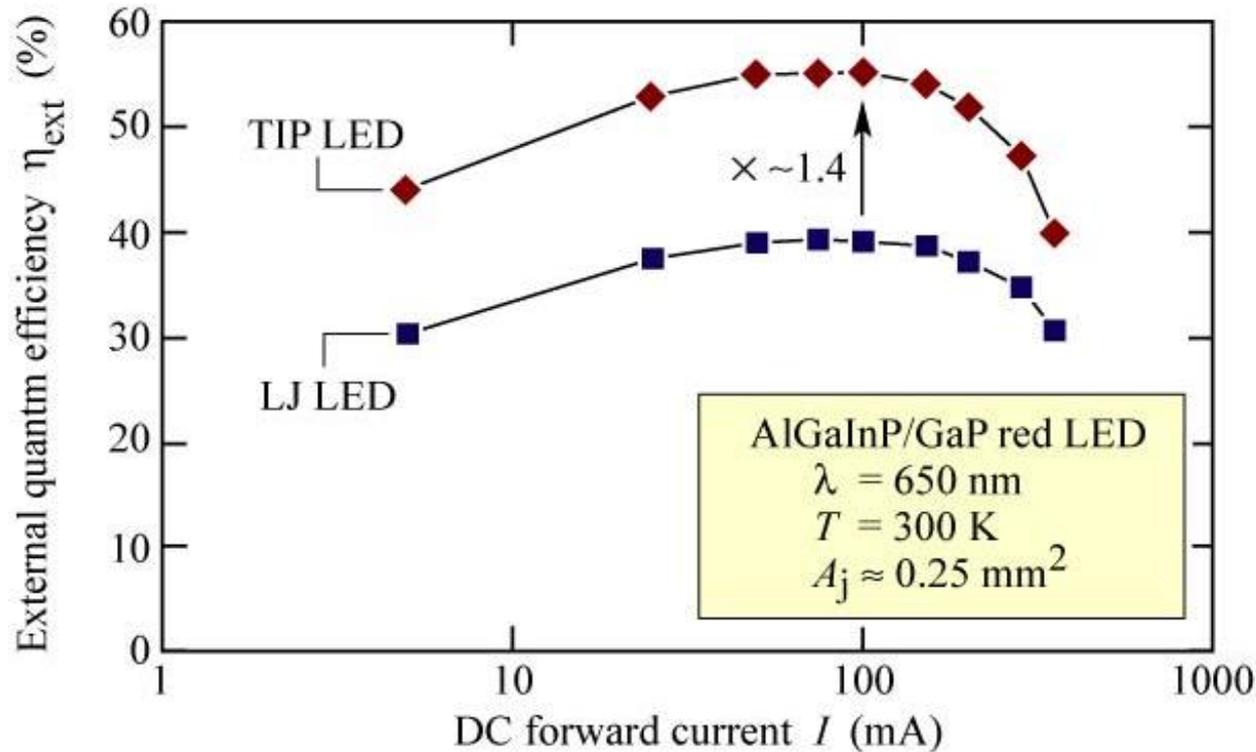
Lichtauskopplung: spezielle Bauformen



Die-shaped devices:
(a) Blue GaInN emitter on SiC substrate with trade name “Aton”. (b) Schematic ray traces illustrating enhanced light extraction. (c) Micrograph of truncated inverted pyramid (TIP) AlGaInP/GaP LED. (d) Schematic diagram illustrating enhanced extraction (after Osram, 2001; Krames *et al.*, 1999).

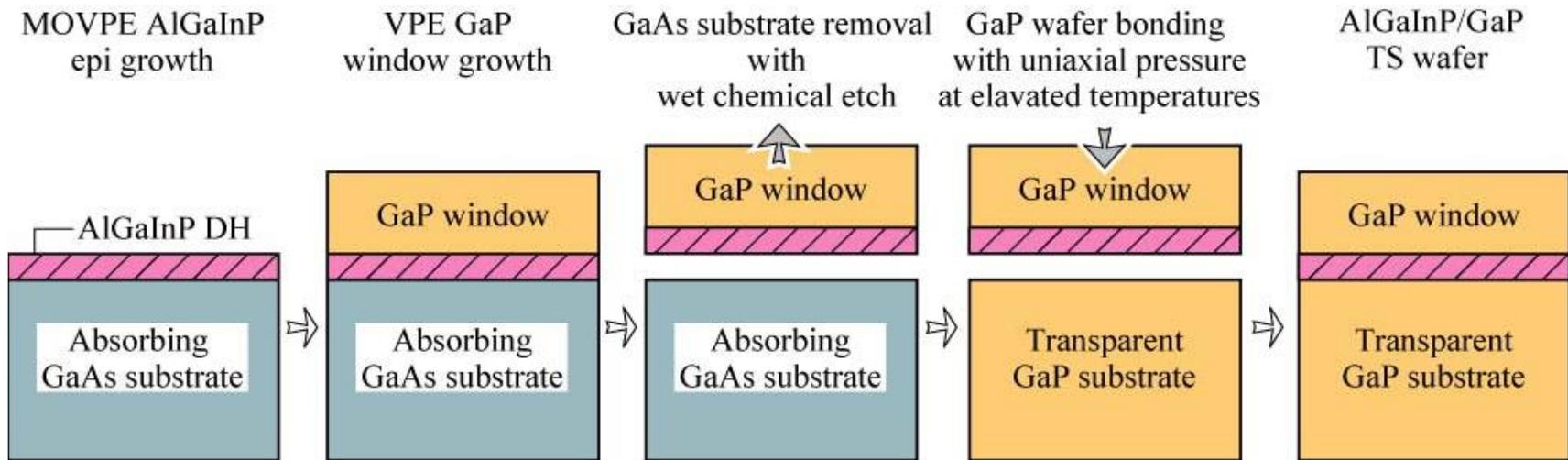
- Form wird durch „Ray-Tracing“-Rechnungen bestimmt.
- Verbesserung um ca. Faktor 2 gegenüber senkrechten Wänden
- Kann auf Waferskala hergestellt werden (Kosten)

Lichtauskopplung: spezielle Bauformen



External efficiency vs. forward current for red-emitting (650 nm) truncated inverted pyramid (TIP) LEDs and large junction (LJ) LEDs mounted in power-lamp packages. The TIP LED exhibits a 1.4 times improvement in extraction efficiency compared with the LJ device, resulting in a peak external quantum efficiency of 55% at 100 mA (after Krames *et al.*, 1999).

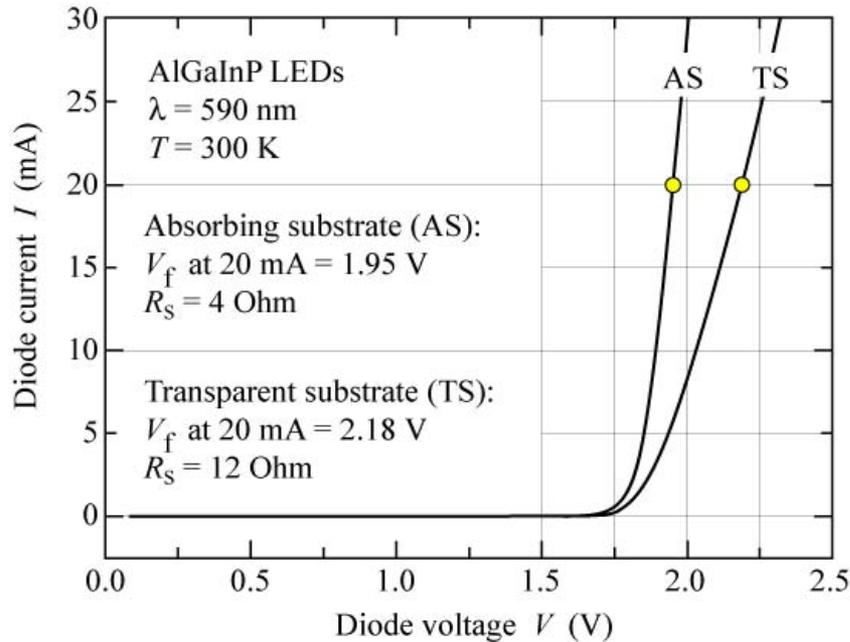
Auskoppeleffizienz: transparente Substrate



Schematic fabrication process for wafer-bonded transparent substrate (TS) AlGaInP/GaP LEDs. After the selective removal of the original GaAs substrate, elevated temperature and uniaxial pressure are applied, resulting in the formation of a single TS LED wafer (adopted from Kish *et al.*, 1994).

- Man kann auch direkt auf transparentem Substrat wachsen
- Viele transparente Substrate sind nicht leitfähig (Gitterfehlanpassung beachten!)
- Substrate ziemlich dick => auch relativ geringer Absorptionskoeffizient führt zu merklichen Verlusten

Auskoppeffizienz: transparente Substrate

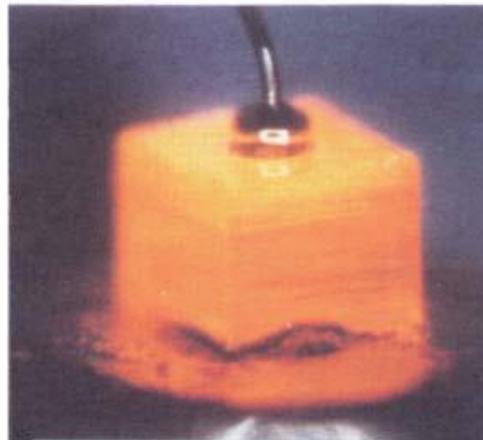


Current–voltage characteristic, forward voltage, and series resistance of absorbing-substrate (GaAs) and transparent-substrate (GaP) LEDs with AlGaInP active regions.

(a) AS LED



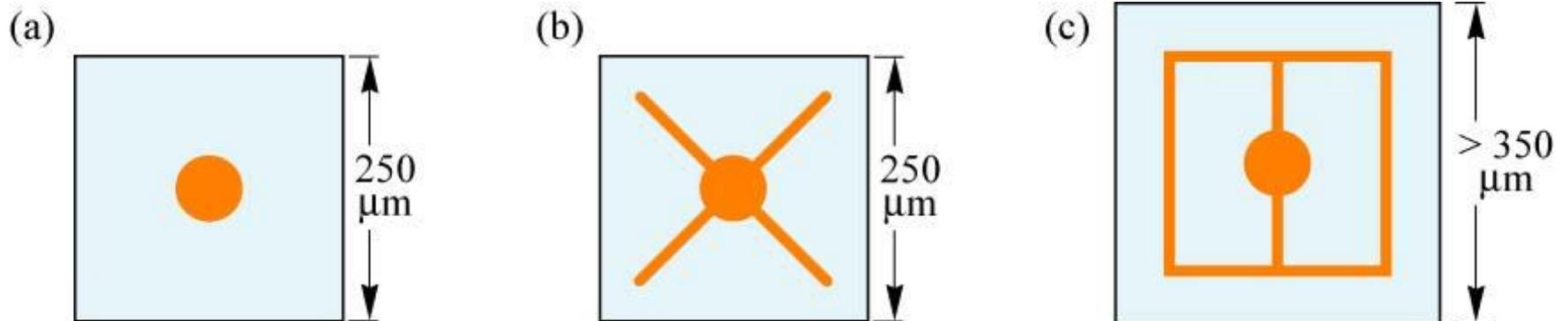
(b) TS LED



(a) Amber AlGaInP LED with a GaP window layer and absorbing GaAs substrate (AS). (b) Amber AlGaInP LED with a GaP window layer and a transparent GaP substrate (TS) fabricated by wafer bonding. Conductive Ag-loaded die-attach epoxy can be seen at bottom (after Kish and Fletcher, 1997).

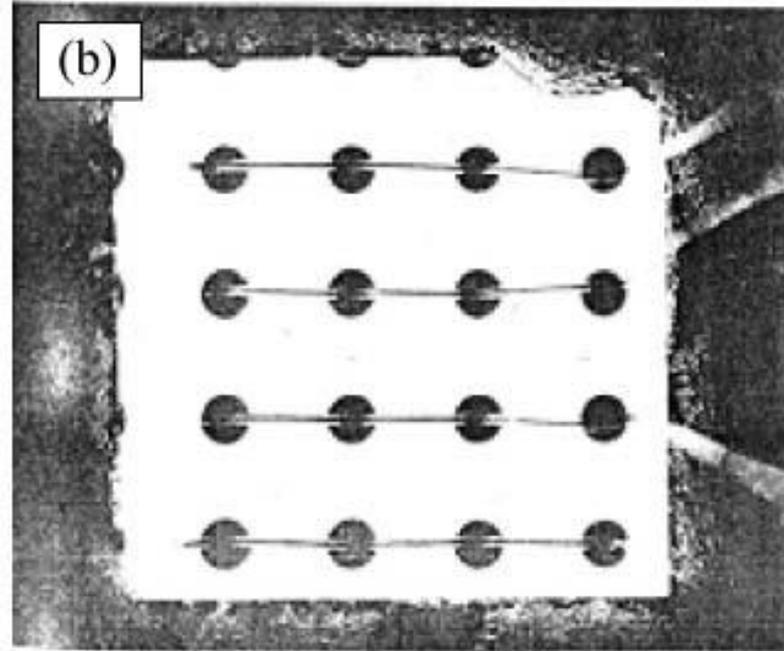
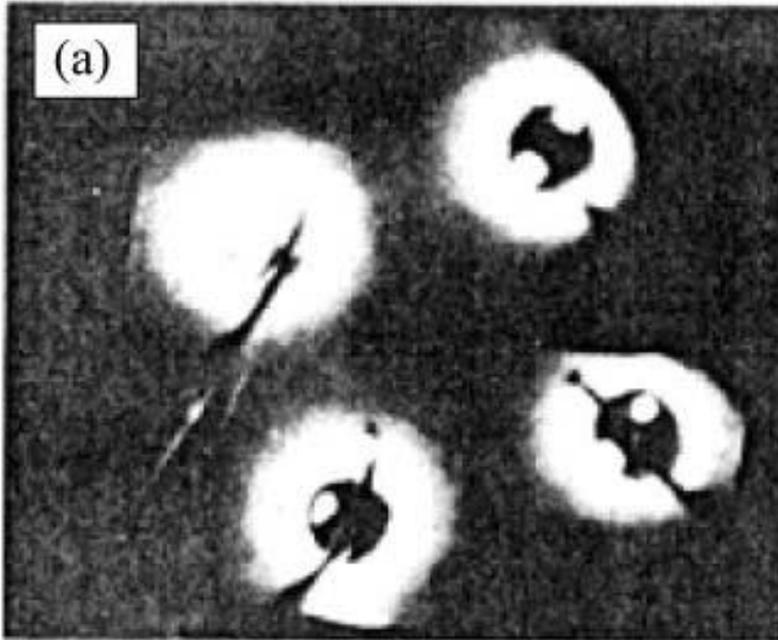
Kontaktierung von LEDs

- Unterer Kontakt kann über das möglichst leitfähige Substrat gemacht werden („kein“ Problem)
- Oberer Kontakt soll möglichst wenig „abschatten“
- Trotzdem möglichst kleiner Serienwiderstand gewünscht



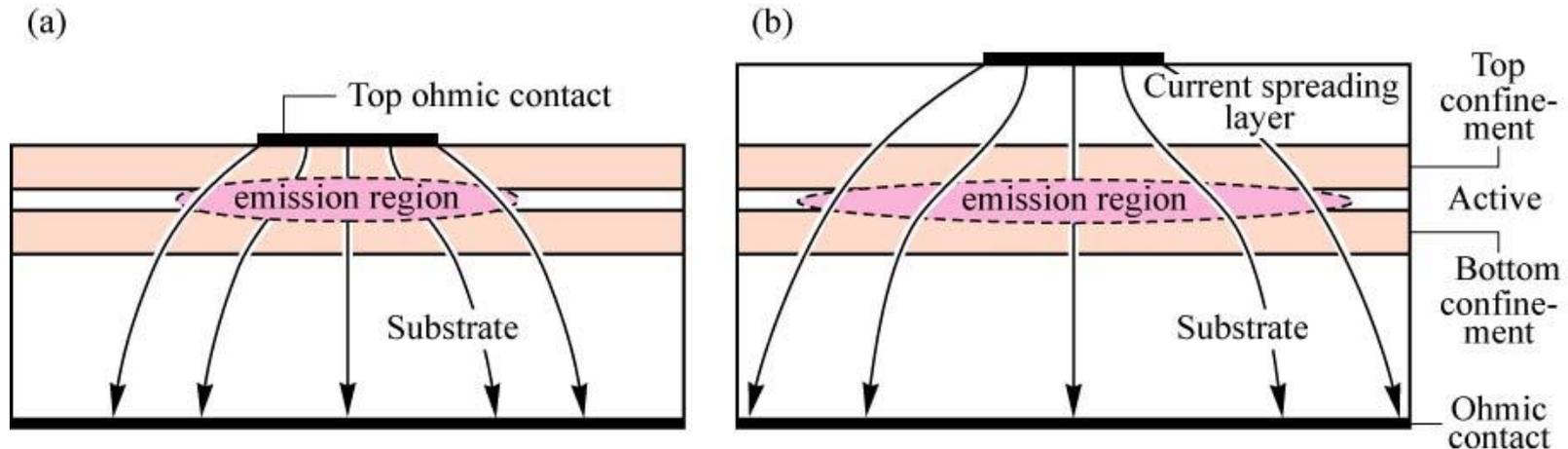
Top view on an LED die with (a) a circular contact also serving as a bond pad and (b) a cross-shaped contact with a circular bond pad. (c) Typical contact geometry used for larger LED dies.

„Current spreading“ in LED-Strukturen

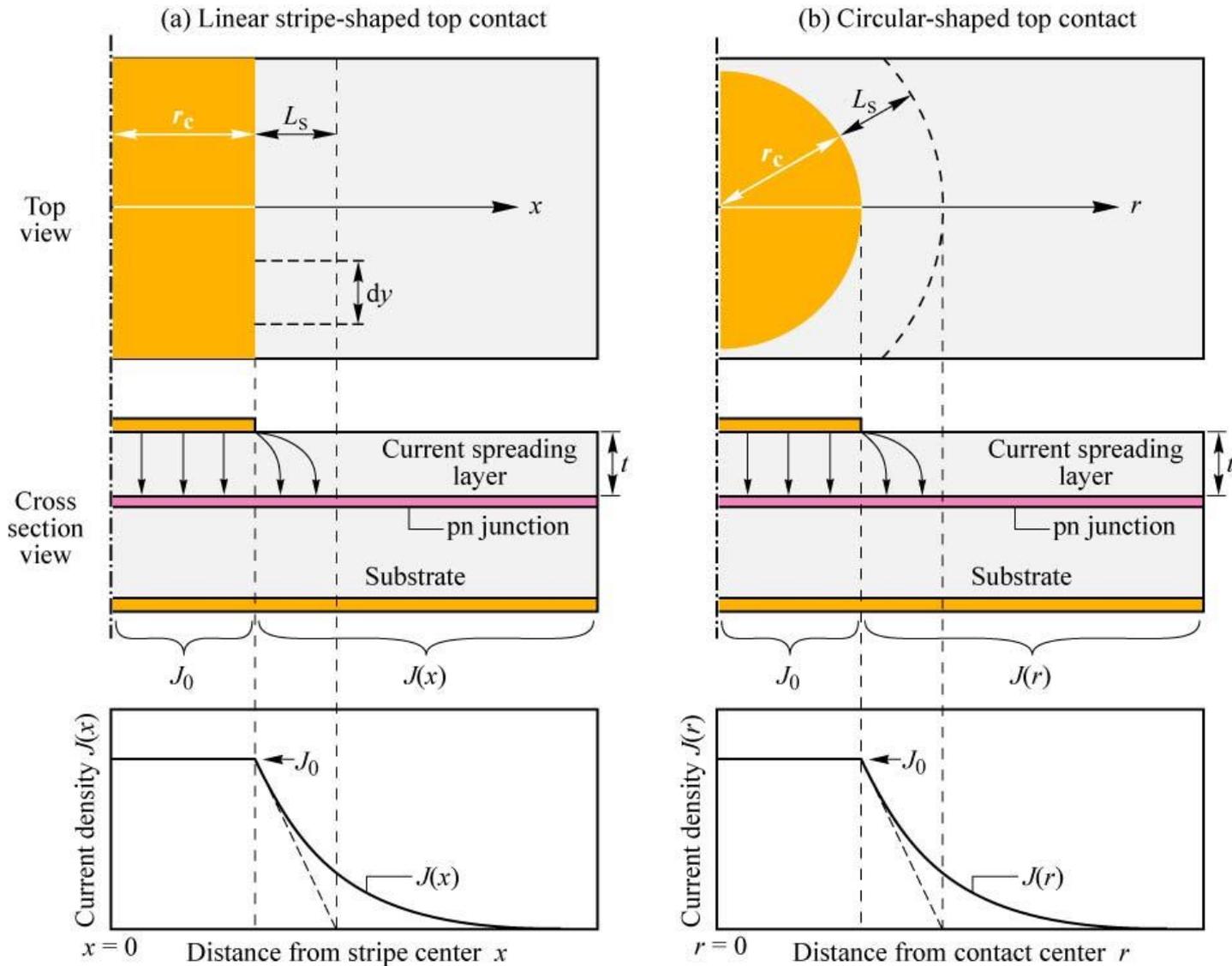


- Ohne „current spreading“ leuchtet es nur in der Nähe der Kontakte
- Strom fließt nicht durch die ganze Struktur
- Viel Licht wird durch die Kontakte absorbiert

„Current spreading“ in LED-Strukturen



- Die „current spreading layer“ verteilt den Strom lateral
- CSL sollte niedrigen Widerstand haben (Stromverteilung und kein signifikanter Beitrag zum Serienwiderstand gewünscht)
- Sie sollte für die LED-Strahlung transparent sein (wird deshalb auch als „window layer“) bezeichnet



„Current spreading“
in LED-
Strukturen

Fig. 8.6. Schematic illustration of current spreading in structures with different top contact geometries. (a) Linear stripe contact geometry. (b) Circular contact geometry.

„Current spreading“ in LED-Strukturen

Berechnung (linearer Kontakt) der Dicke t der CSL gibt folgenden Zusammenhang zum spezifischen Widerstand r , dem Strom J_0 unter dem Kontakt und der Breite der Stromausbreitung L_s

$$t = \rho L_s^2 J_0 \frac{e}{n_{ideal} kT}$$

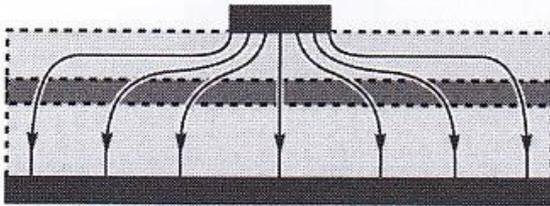
- Je dicker die Schicht, desto weiter die Stromverteilung (Beachte quadratische Abhängigkeit)
- Je kleiner der Widerstand der Schicht, desto weiter die Stromverteilung
- Je größer J_0 desto kleiner L_s für gegebenes t („current bunching“)

„Current bunching“ in LED-Strukturen

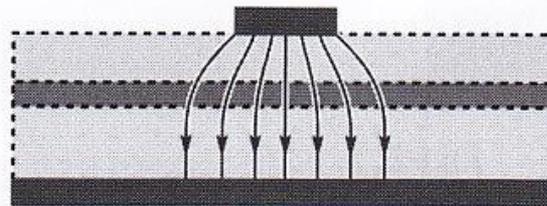
Für hohe Ströme wird die Stromverteilung schlechter!

$$t = \rho L_s^2 J_0 \frac{e}{n_{ideal} kT}$$

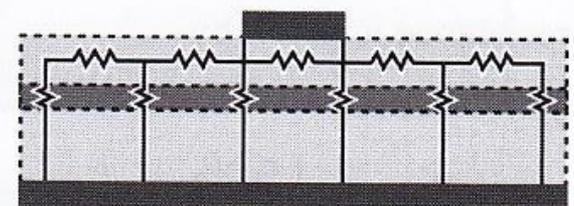
(a) Low current



(b) High current



(c) Equivalent circuit



„Current spreading“ in LED-Strukturen

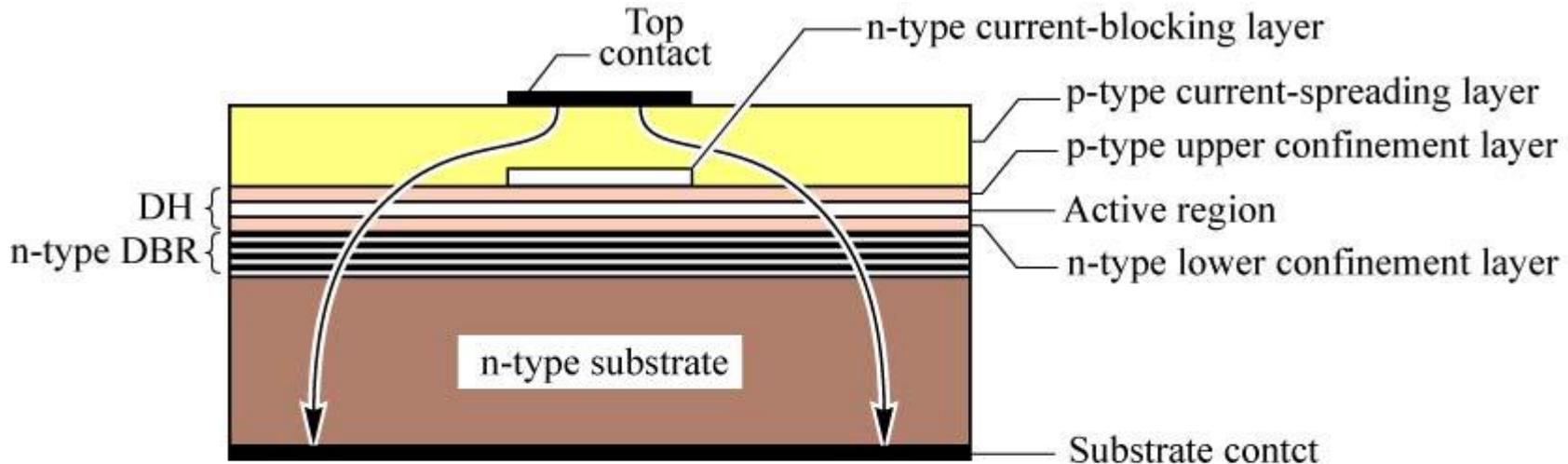


Fig. 8.9. LED with an n-type current-blocking layer located on the upper confinement layer. Light emission occurs in the regions not covered by the opaque top ohmic contact. The LED is fabricated by *epitaxial regrowth*. After growth of the current-blocking layer, the wafer is taken out of the growth system for etching. The wafer is then re-introduced into the epitaxial system for growth of the current-spreading layer.

E. E. Sakuma

- Strom lässt sich auch so führen
- Ist noch effektiver, weil kein Lichtemission unter den Kontakt
- Schwierig herzustellen

„Packaging“

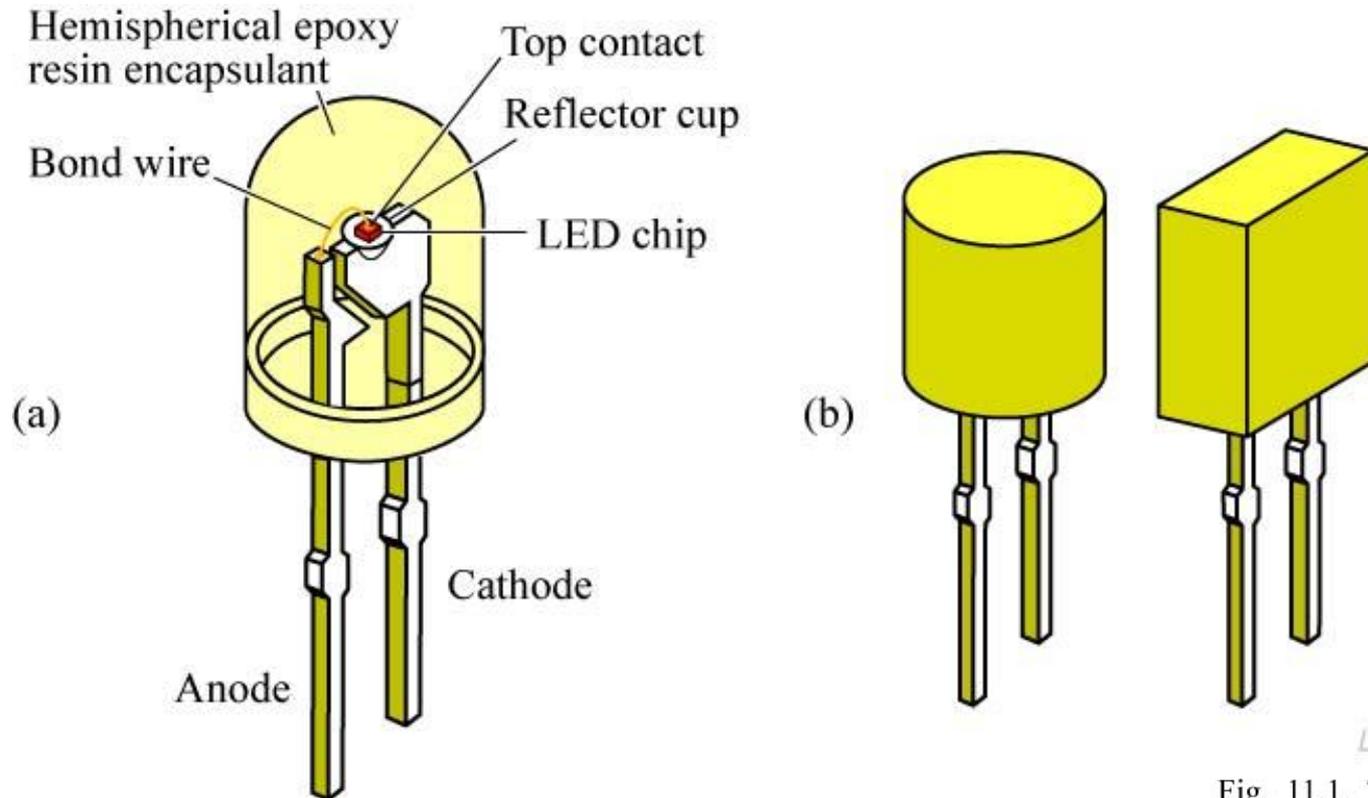
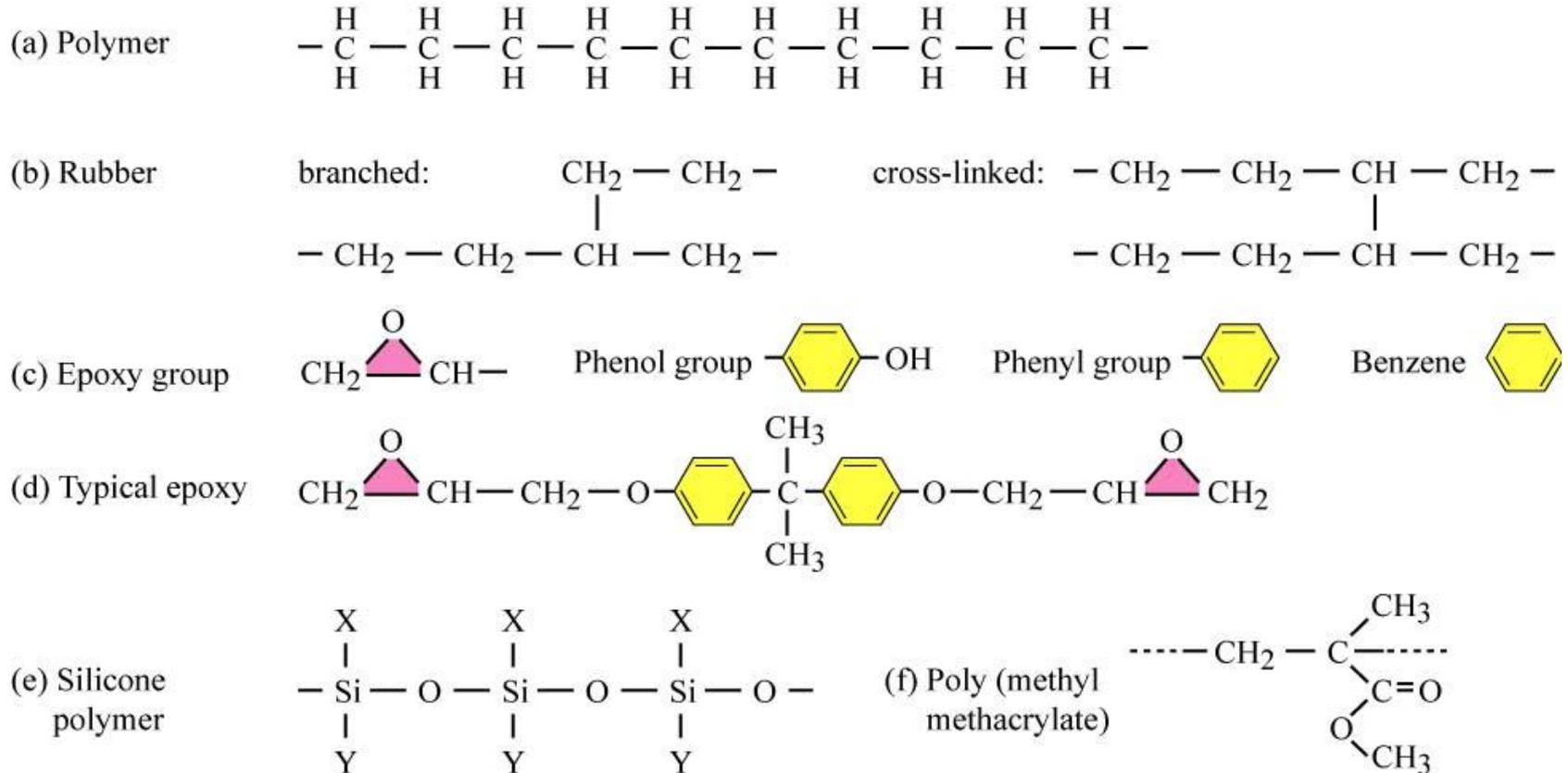


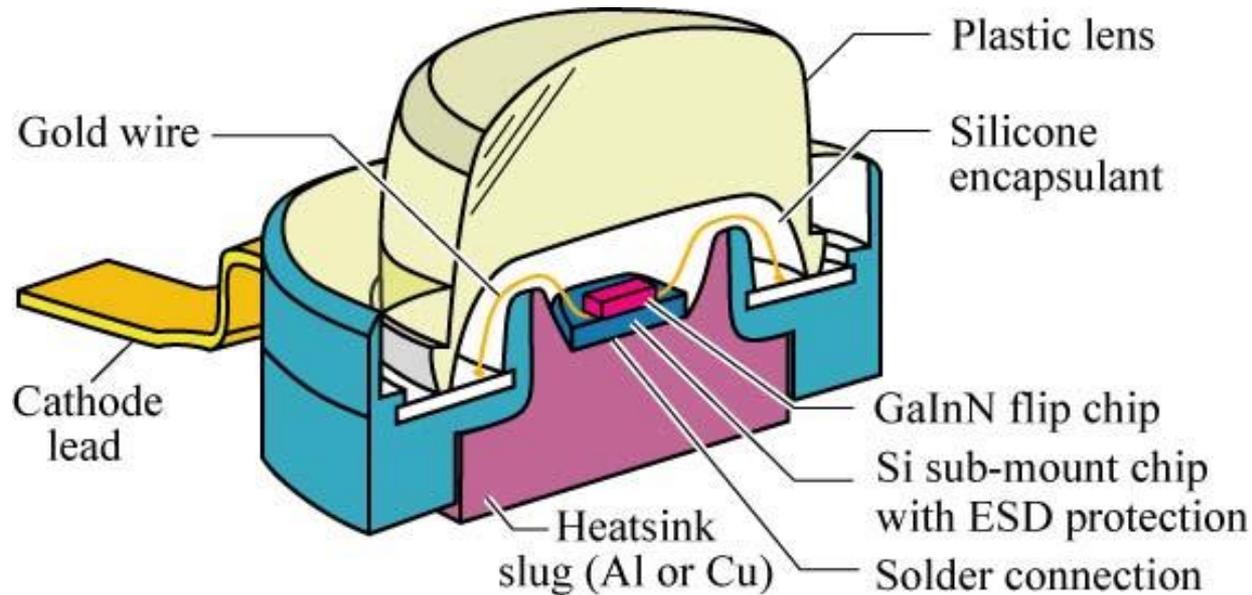
Fig. 11.1. Typical packages; (a) LED with hemispherical encapsulant; (b) LEDs with cylindrical and rectangular encapsulant.

„Packaging“



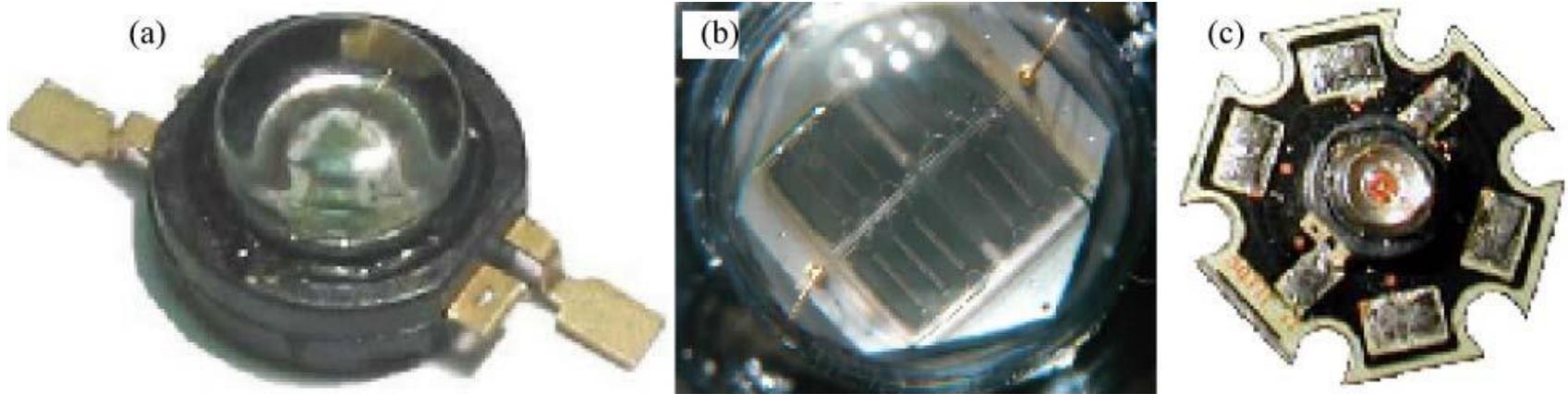
Chemical structures of polymers. Epoxy resins, silicone polymers, and poly methyl methacrylate (PMMA) are used as LED encapsulants. In the silicone structure, X and Y represent atoms or molecules such as H, CH₃ (methyl), C₆H₅ (phenyl).

Hochleistungsgehäuse



Cross section through high-power package. The heatsink slug can be soldered to a printed circuit board for efficient heat removal. This package is called *Barracuda package* which was introduced by Lumileds Corp. (adopted from Krames, 2003).

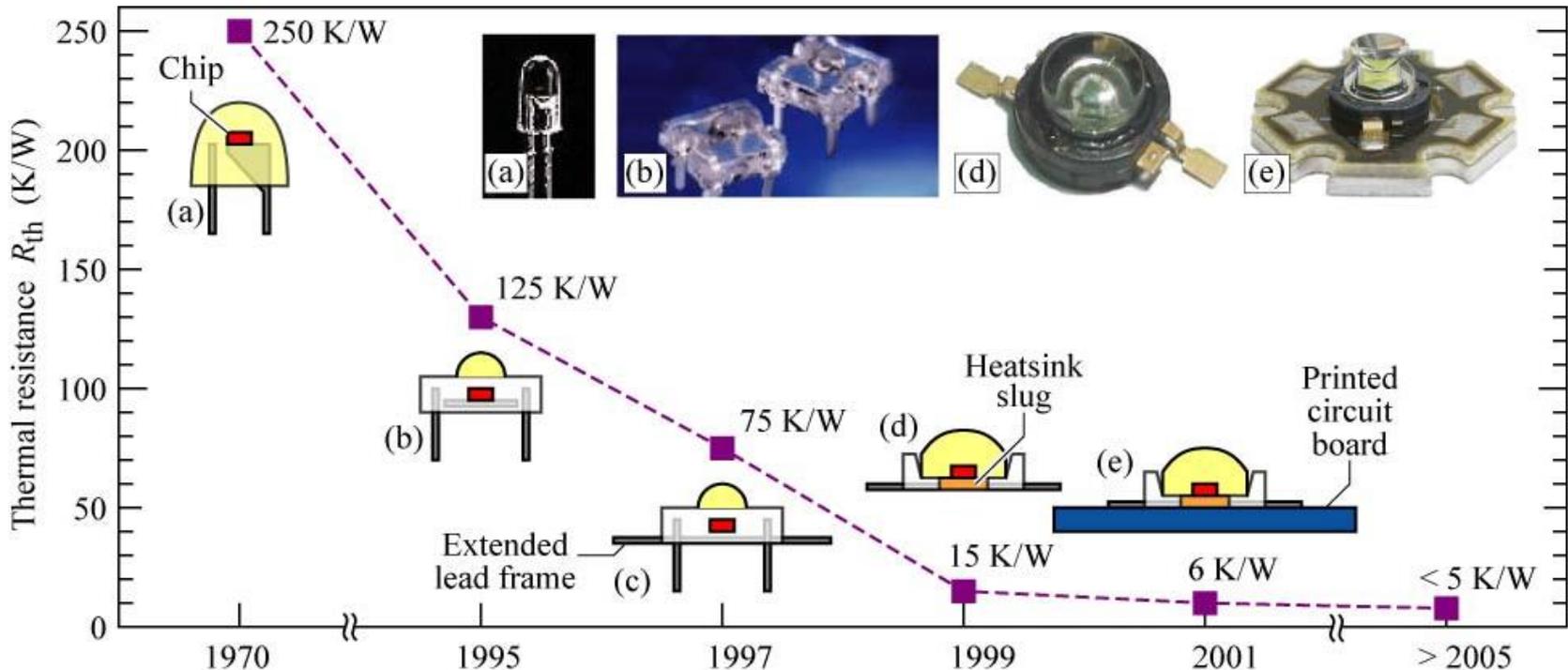
Hochleistungsgehäuse



(a) High-power package; (b) LED die in package; (c) package on printed circuit board with high thermal conductivity. ((a) after Krames, 2003; (b), (c) after after LED Museum, 2003).

LED-Gehäuse: Wärmewiderstand

- Abfuhr der entstehenden Betriebswärme ist von großer Bedeutung für effektiven Betrieb einer LED!

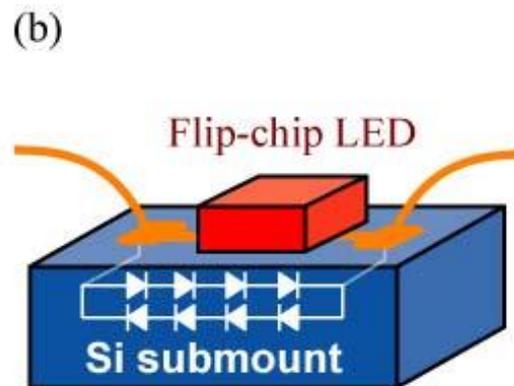
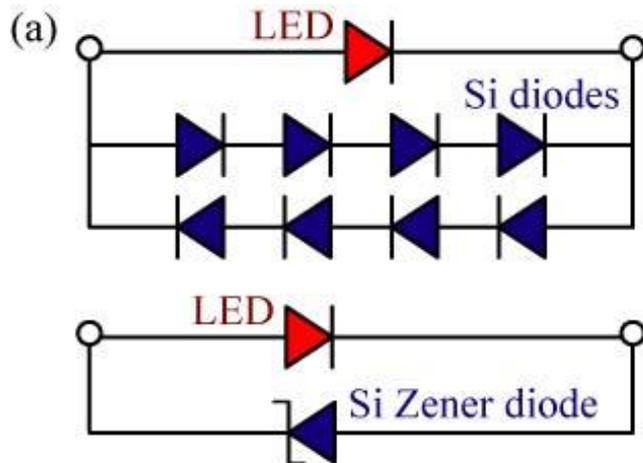


Thermal resistance of LED packages: (a) 5mm (b) low-profile (c) low-profile with extended lead frame (d) heatsink slug (e) heatsink slug mounted on printed circuit board (PCB). Trade names for these packages are “Piranha” (b and c, Hewlett Packard Corp.), “Barracuda” (d and e, Lumileds Corp.), and “Dragon” (d and e, Osram Opto Semiconductors Corp.) (adopted from Arik *et al.*, 2002).

E. F. Schubert

Elektrostatische Entladung

- Bei einer elektrostatischen Entladung wird sehr viel Energie dissipiert
- Der Effekt ist in Rückwärtsrichtung deutlich stärker (höherer Widerstand der Diode)
- vor allem für GaN-basierte Dioden von Interesse
- Schutzschaltung helfen \Leftrightarrow Entladung geschieht nicht durch die LED



(a) Electrostatic discharge (ESD) protection circuits using multiple pn junctions or Zener diodes. (b) ESD protection incorporated in Si submount.