

Übersicht über die Vorlesung

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
 - IV.1 Elektrisches Verhalten
 - IV.2 Emissionseigenschaften von LEDs
 - IV.3 Effizienzen
 - IV.4 Auskoppelverluste
 - IV.5 Erhöhung der Auskoppelleffizienz
 - ...
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

5. Foliensatz
SS 2016
01.06.2016

pn-Übergang bei Vorspannung

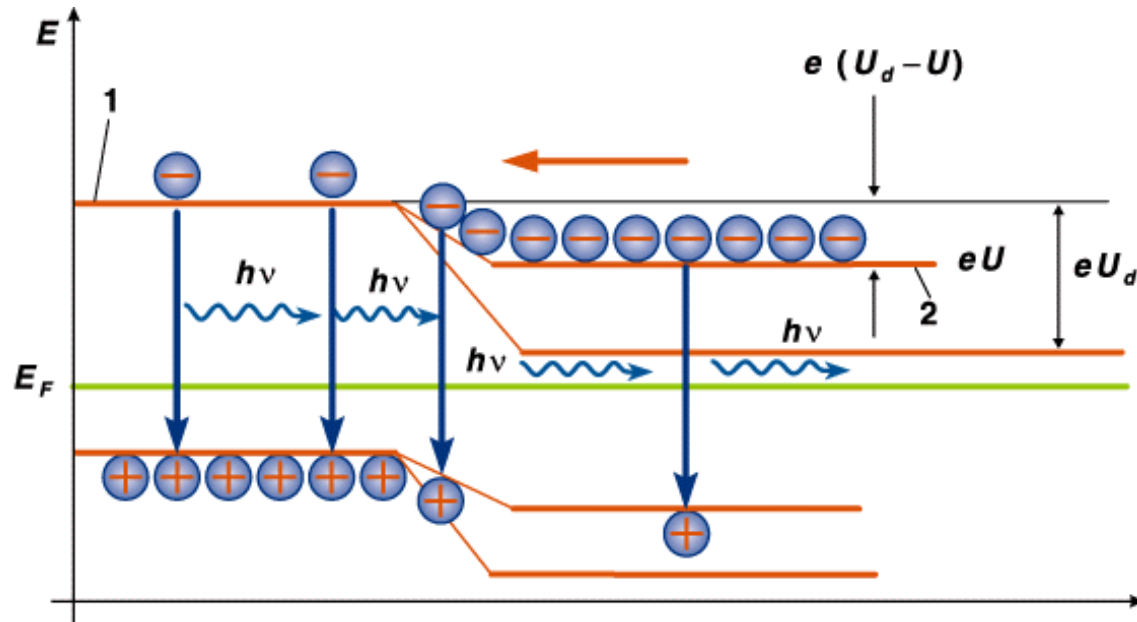


Abb.: Schema der Lichterzeugung in einer pn-Diode

- Rekombination von Elektronen und Löchern

Die ideale Diodenkennlinie

Quantitativ:

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad (J_s: \text{Sperrsättigungsstromdichte})$$

$$J_s = e \left(\frac{D_n}{L_n} n_p + \frac{D_p}{L_p} p_n \right)$$

($D_{n,p}$: e,h-Diffusionskonstante; $L_{n,p}$: e,h-Diffusionslängen;
 n_p, p_n : Minoritätsladungsträgerdichten)

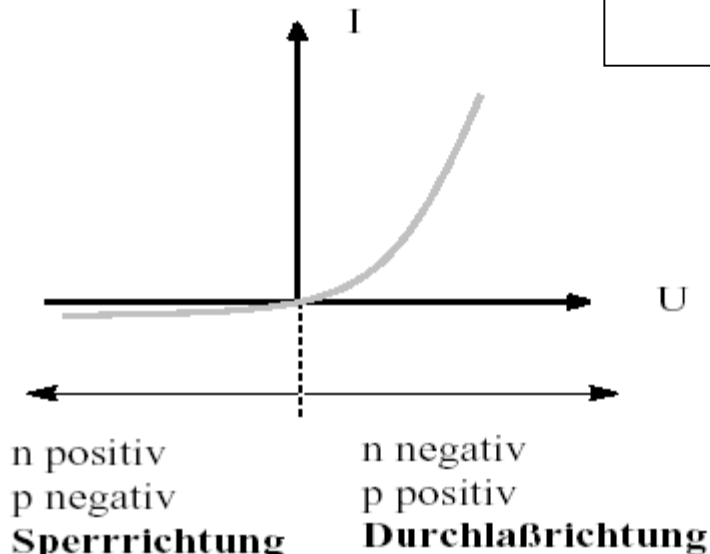


Abb.: Kennlinie einer pn-Diode

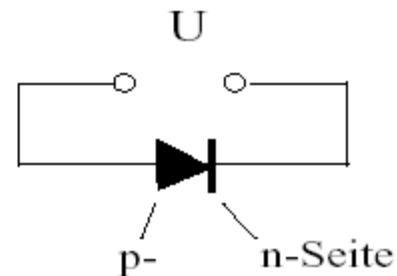


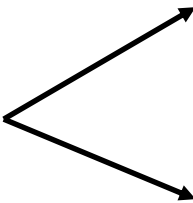
Abb.: Schaltkreissymbole

LED ohne/mit Vorspannung

Optische Übergänge sind ohne Vorspannung im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung:

→ Anzahl der Absorptionsübergänge = Anzahl der Emissionsvorgänge

Vorspannung sorgt für einen thermodynamischen Nichtgleichgewichtszustand:

Aufspaltung des Fermi-Niveaus  Quasi-Ferminiveau Elektronen E_F^e
Quasi-Ferminiveau Löcher E_F^h

————→ zusätzliche Rekombinationsvorgänge

LED operation

Carrier distribution in pn homo- and heterojunctions

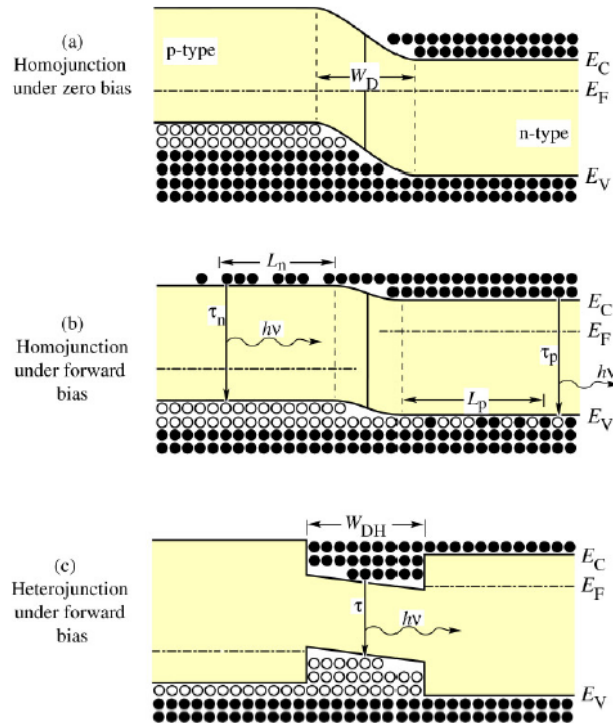
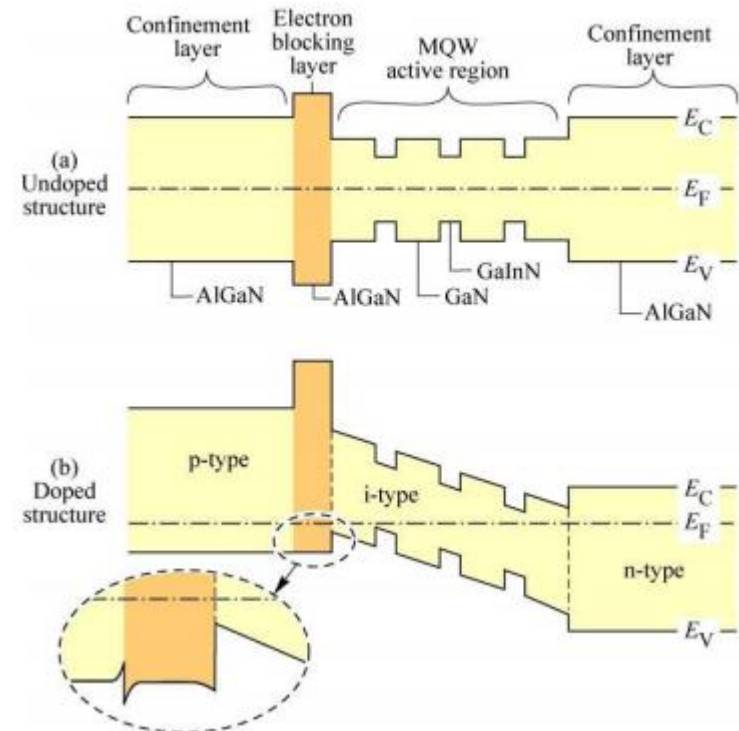
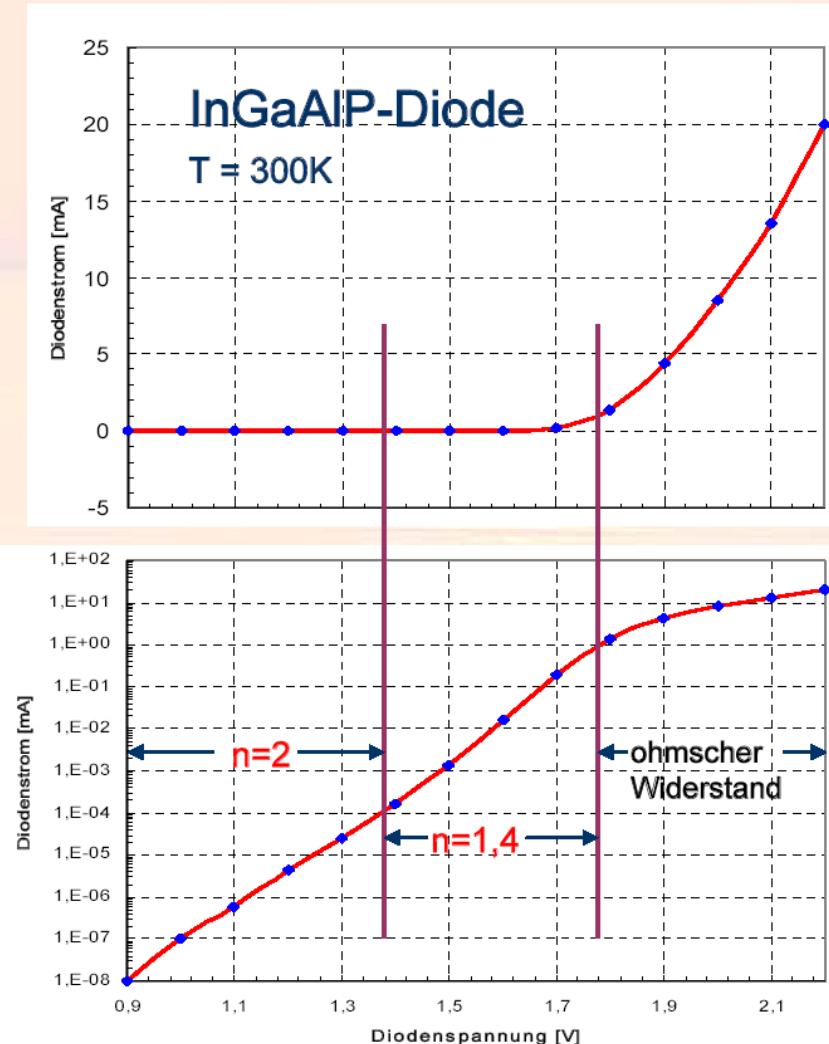


Fig. 4.6. P-N homojunction under (a) zero and (b) forward bias. P-N heterojunction (c) under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse, on average, over the diffusion lengths L_n and L_p before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterojunction barriers.

Band diagram of a MQW-LED



Die elektrische Kennlinie einer LED



Ideale Shockley-Gleichung:

$$I(V) = I_s \cdot \left[\exp \frac{eV}{k_B T} - 1 \right]$$

Reale Shockley-Gleichung:

$$I(V) = I_s \cdot \left[\exp \frac{eV - eR_s I}{n k_B T} - 1 \right]$$

I_s = Sättigungsstrom

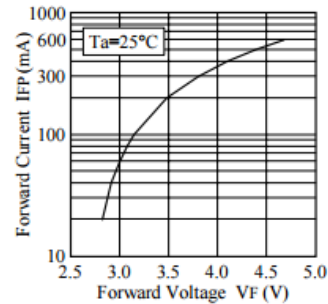
R_s = Serienwiderstand

n = Dioden Idealitätsfaktor

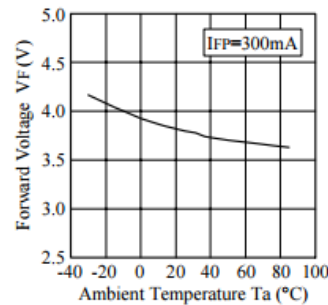
$n=2$: nichtstr. Rekomb. überwiegt bei kleinen Strömen

$n=1,4$: strahlende Rekombination beginnt zu überwiegen

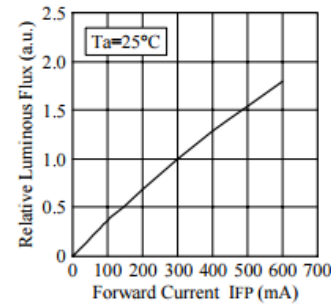
■ Forward Voltage vs.
Forward Current



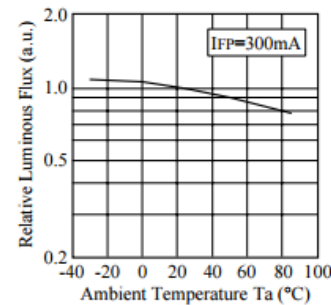
■ Ambient Temperature vs.
Forward Voltage



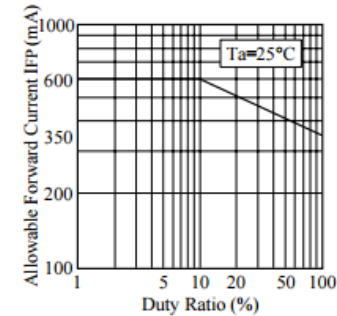
■ Forward Current vs.
Relative Luminous Flux



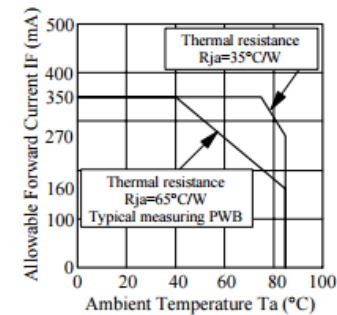
■ Ambient Temperature vs.
Relative Luminous Flux



■ Duty Ratio vs.
Allowable Forward Current



■ Ambient Temperature vs.
Allowable Forward Current



NICHIA CORPORATION

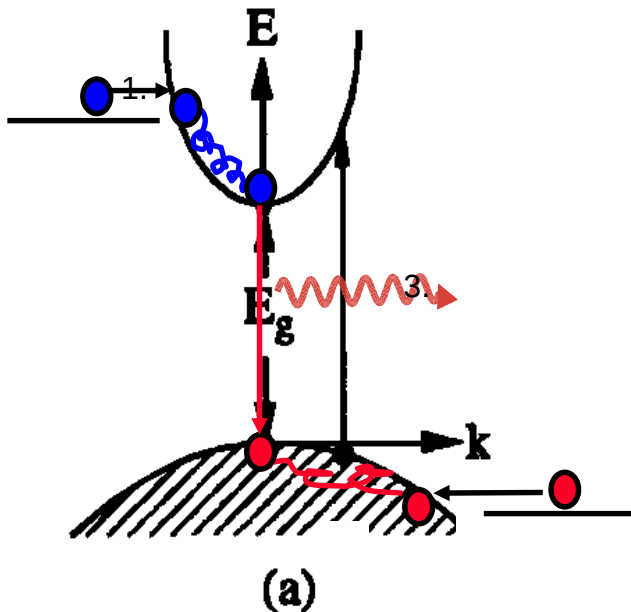
Model	NS6L083A
Title	CHARACTERISTICS
No.	070703768111

Nichia STSE-CC7136A
<Cat.No.070706>

Übersicht über die Vorlesung

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
 - IV.1 Elektrisches Verhalten
 - IV.2 Emissionseigenschaften von LEDs
 - IV.3 Effizienzen
 - IV.4 Auskoppelverluste
 - IV.5 Erhöhung der Auskoppelleffizienz
 - IV.6 Weisse LEDs
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
- VII. Betrieb von Leucht- und Laserdioden
- VIII. Modulatoren
- IX. Weitere Quantenbauelemente

Emissionsspektren



Eine Emission bei einer bestimmten Photonenenergie $h\nu$ kann stattfinden, wenn

- der Ausgangszustand bei der Energie E_i im Leitungsband mit einem Elektron besetzt ist,
- der Endzustand bei der Energie E_f unbesetzt ist.

Daher bestimmen die Besetzungsfunktionen für Elektronen und Löcher und die Zustandsdichten das Emissionsspektrum.

Emission spectrum

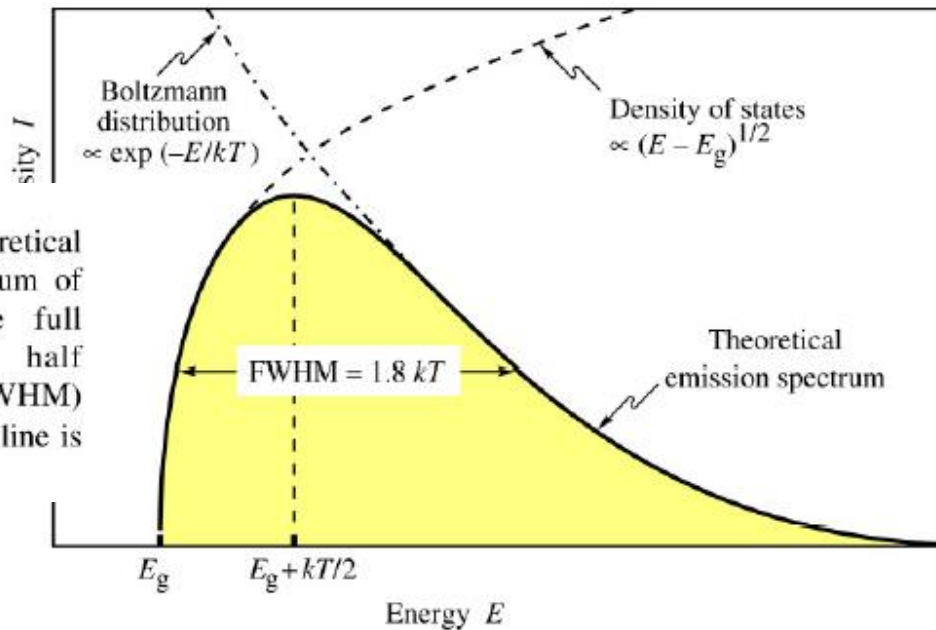


Fig. 5.2. Theoretical emission spectrum of an LED. The full width at half maximum (FWHM) of the emission line is $1.8 kT$.

Das Spektrum der LED wird (theoretisch) bestimmt durch die spektrale Abhängigkeit von Zustandsdichte und Besetzungsfunktionen von Elektronen und Löchern.

$$I(E) \propto \sqrt{E - E_g} e^{-E/(kT)}$$

$I(E)$ = emission spectrum

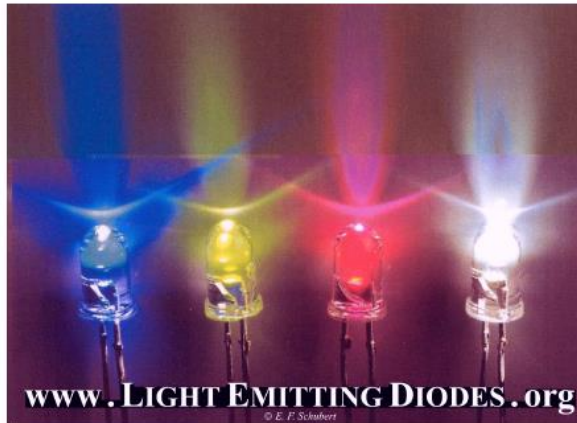
$$E = E_g + \frac{1}{2} kT$$

Energy of maximum emission intensity

$$\Delta E = 1.8 kT$$

Spectral width

Emissionseigenschaften von Leuchtdioden



Vorsicht bei der Umrechnung von Linienbreiten bei einer Auftragung gegen die Photonenenergie und die Wellenlänge.

$$E = \hbar\omega = h\nu = h\frac{1}{T} = \frac{hc}{\lambda}$$

$$dE = -\frac{hc}{\lambda^2} d\lambda; \Delta\lambda = \left| \frac{\lambda^2}{hc} \right| \Delta E$$

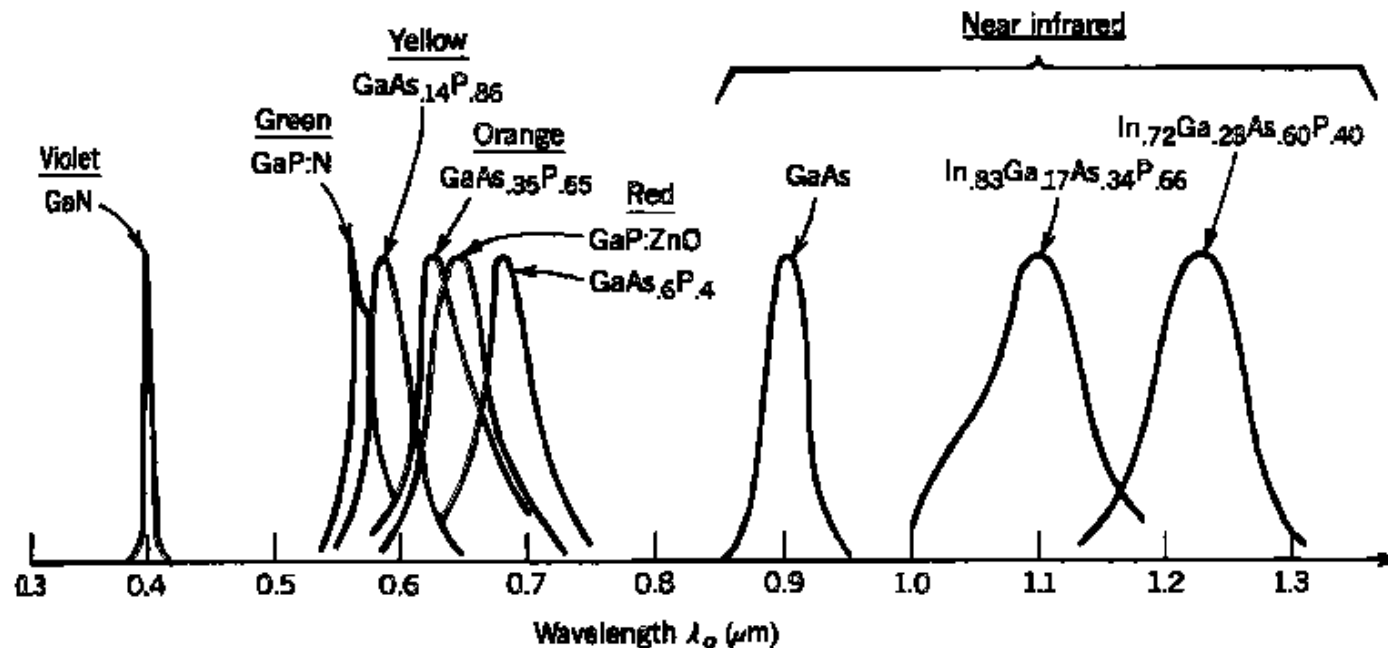


Abb. : Emissionsspektren verschiedener LEDs

Übersicht über die Vorlesung

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
 - IV.1 Elektrisches Verhalten
 - IV.2 Emissionseigenschaften von LEDs
 - IV.3 Effizienzen
 - IV.4 Auskoppelverluste
 - IV.5 Erhöhung der Auskoppelleffizienz
 - IV.6 Weisse LEDs
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
- VII. Betrieb von Leucht- und Laserdioden
- VIII. Modulatoren
- IX. Weitere Quantenbauelemente

Quanteneffizienzen bei LEDs

Internal, extraction, external, and power efficiency

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\text{\# of photons emitted from active region per second}}{\text{\# of electrons injected into LED per second}} = \frac{P_{\text{int}} / (h\nu)}{I / e}$$

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{\text{\# of photons emitted into free space per second}}{\text{\# of photons emitted from active region per second}}$$

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{\# of photons emitted into free space per sec.}}{\text{\# of electrons injected into LED per sec.}} = \frac{P/(h\nu)}{I/e} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extraction}}$$

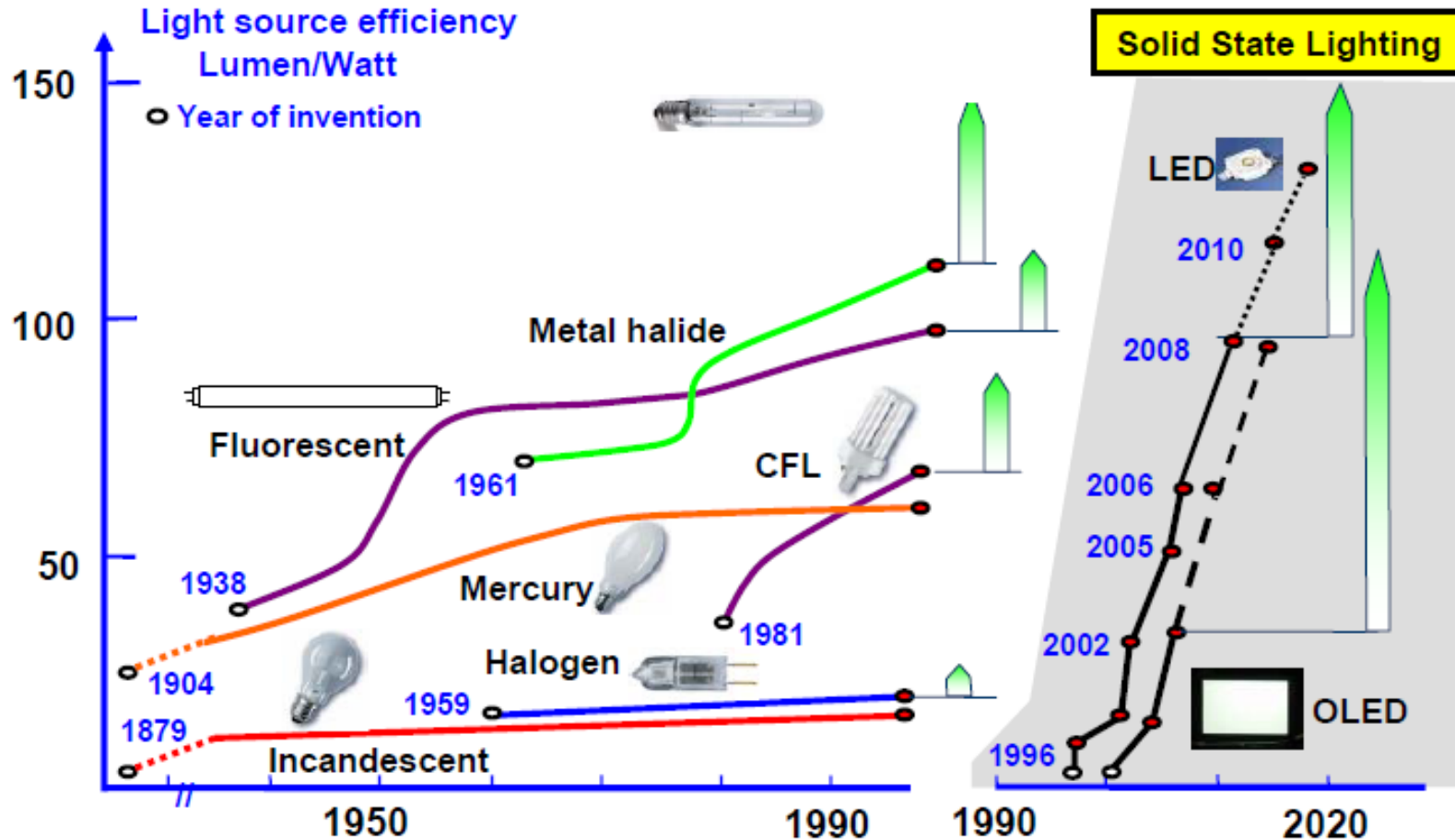
$$\eta_{\text{power}} = \frac{P}{IV}$$

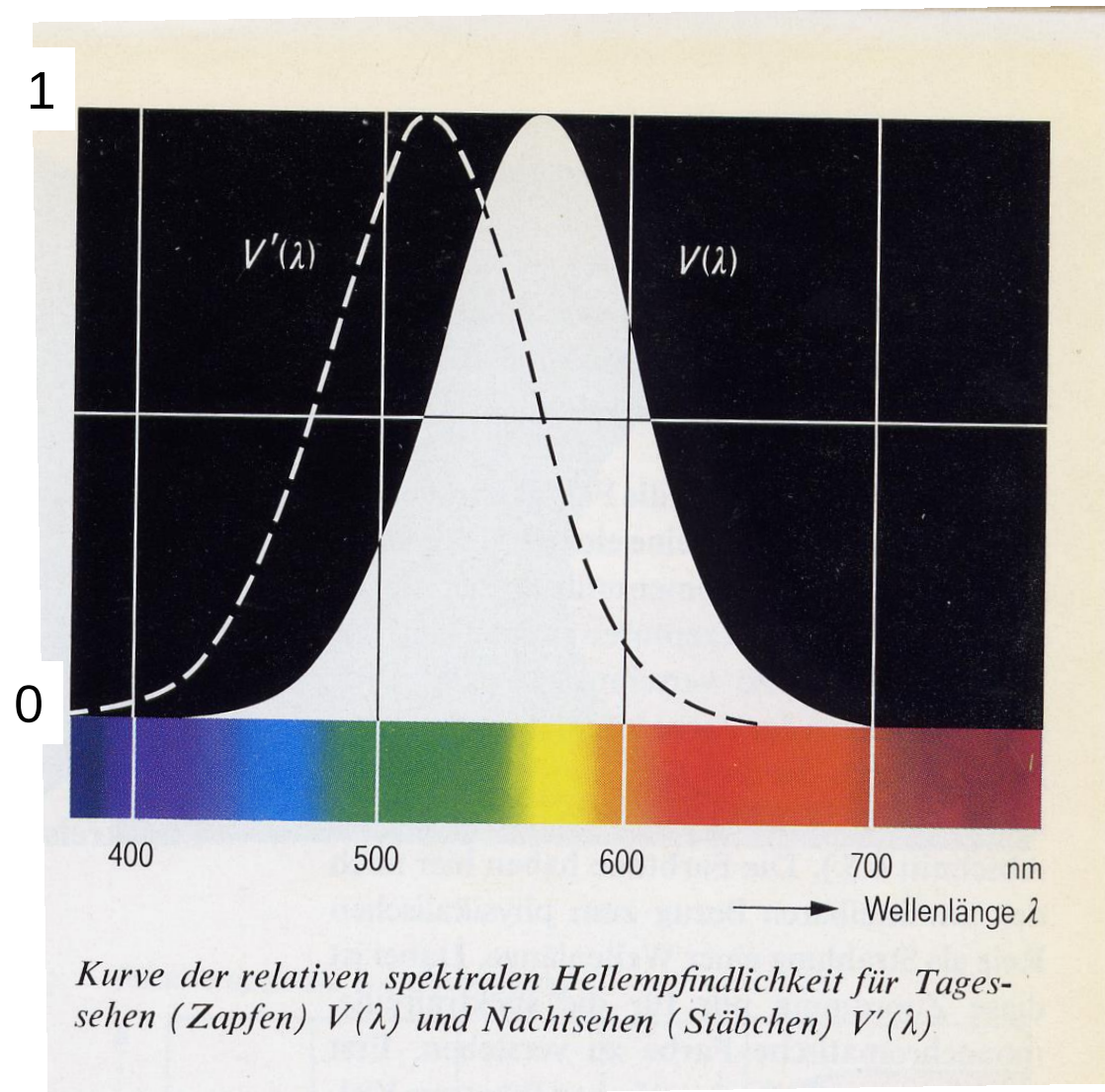


Noch wichtiger für jegliche Beleuchtungsanwendung ist die Lichtausbeute

Solid State Lighting

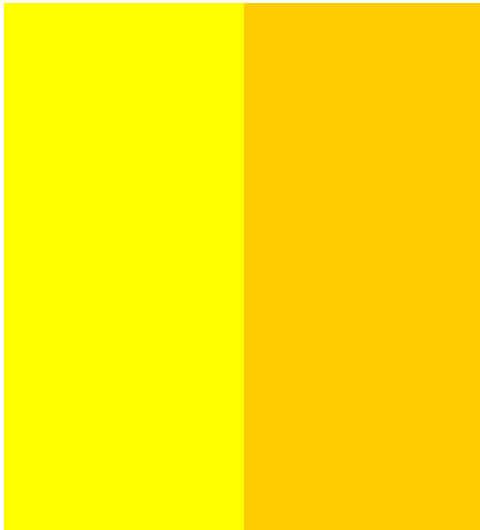
Efficiency Comparison with Classical Technologies





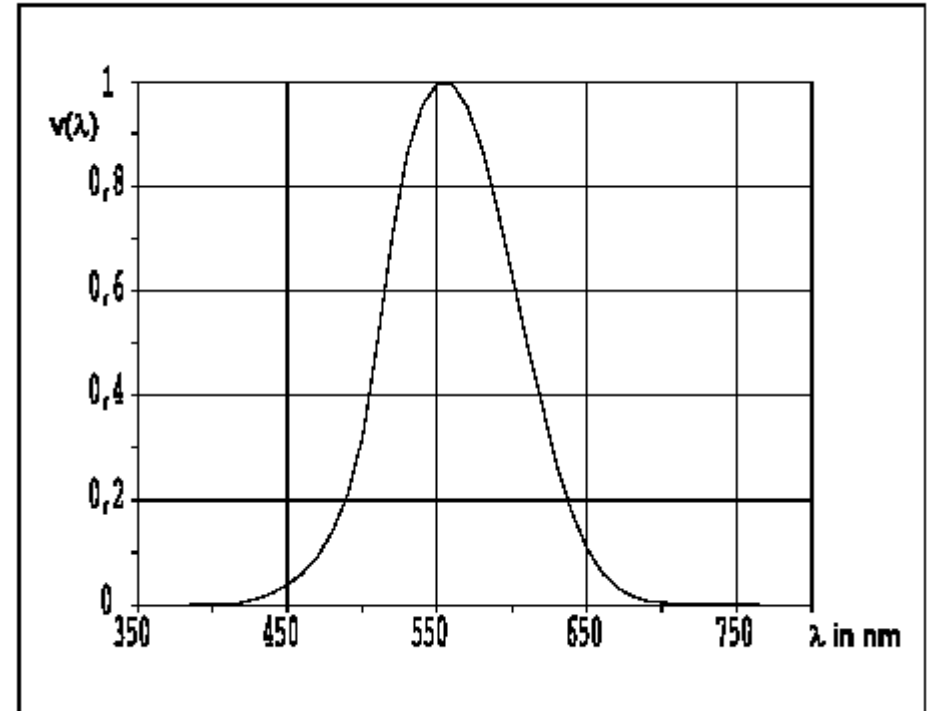
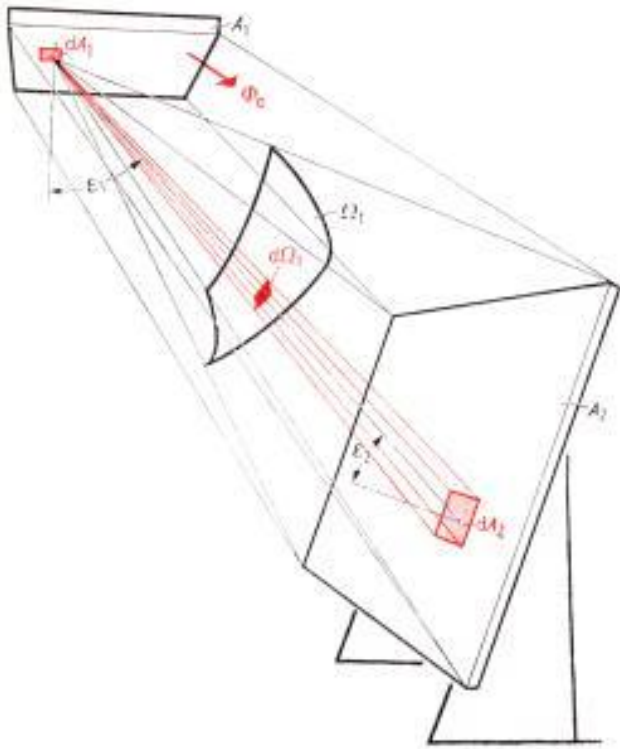
→ Maximum der Hellempfindlichkeit bei $\lambda_0=555$ nm (Hellsehen) bzw. 507 nm (Nachtsehen)

Hellempfindlichkeit



- bei gleicher physikalischer Strahldichte erscheinen andersfarbige Bereiche unterschiedlich hell
- aus Messungen mit vielen farbnormalsichtigen Beobachtern entstand 1924 die spektrale Hellempfindlichkeitskurve

Strahlungsfluss und Lichtstrom



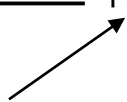
Strahlungsfluss

(Energiefluss von einer Fläche durch eine andere)

Vom Strahlungsfluß zum Lichtstrom

Bewertung des Strahlungsflusses durch Leistungsmessgerät:

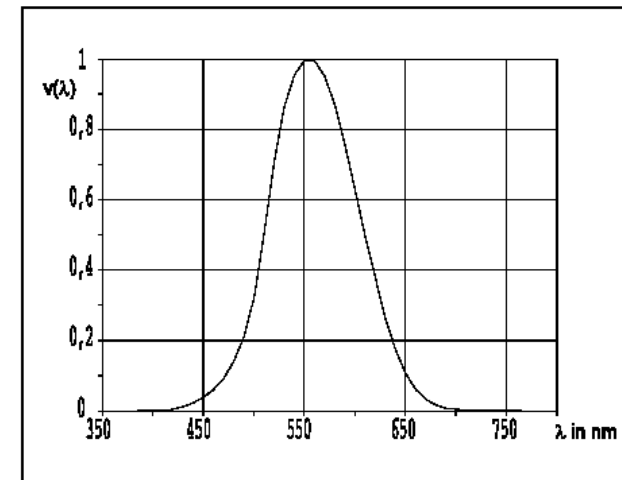
Strahlungsfluß ϕ_e $[\phi_e] = W$



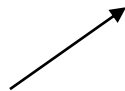
Index e wie energetisch

Bewertung des Strahlungsflusses durch das Auge:

Übergang zum Lichtstrom ϕ_v



$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \int_{380nm}^{780nm} v(\lambda) \frac{d\Phi_e}{d\lambda} d\lambda \quad [\Phi_v] = lm \quad (\text{das Lumen})$$



Index v wie visuell

Lichtausbeute: $\eta = \frac{\Phi_v}{P_{el}} \left[\frac{lm}{W} \right]$

Übersicht über die Vorlesung

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
 - IV.1 Elektrisches Verhalten
 - IV.2 Emissionseigenschaften von LEDs
 - IV.3 Effizienzen
 - IV.4 Auskoppelverluste
 - IV.5 Erhöhung der Auskoppelleffizienz
 - IV.6 Weisse LEDs
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
- VII. Betrieb von Leucht- und Laserdioden
- VIII. Modulatoren
- IX. Weitere Quantenbauelemente

Optische Verluste in LEDs: 1. Absorption

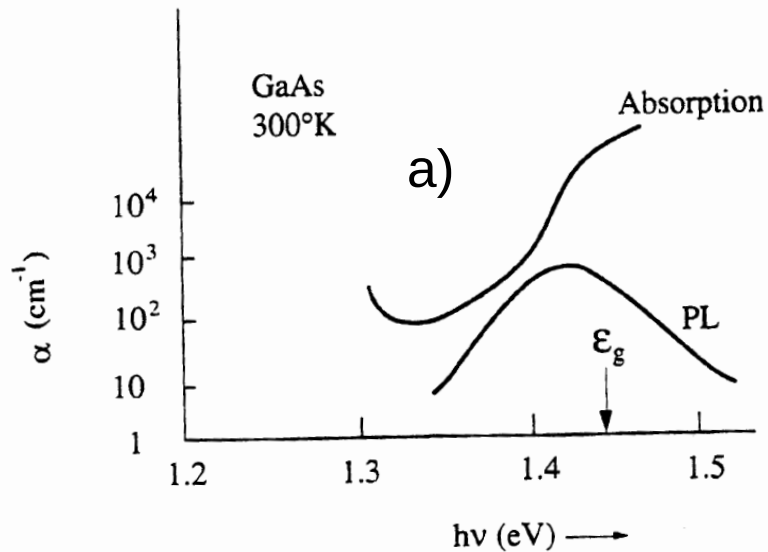
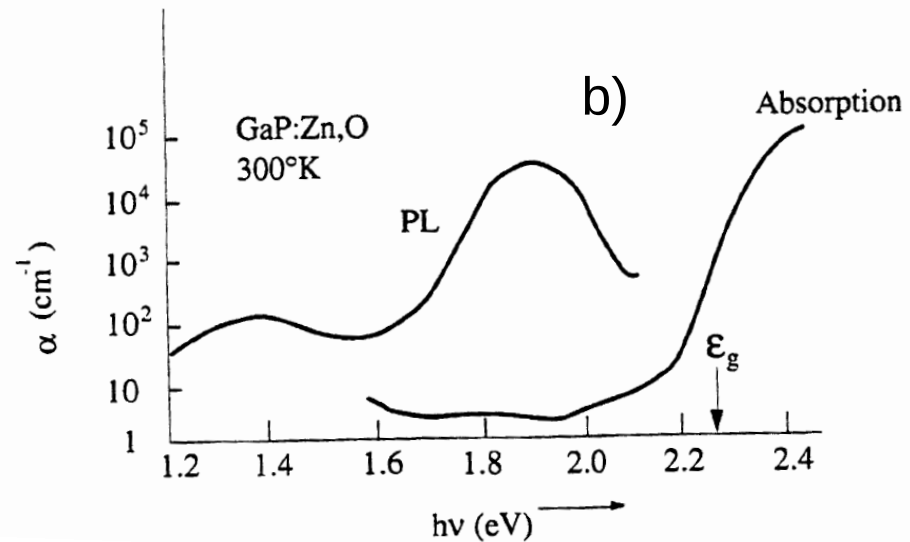


Figure 5.3 Absorption and luminescence spectra of (a) GaAs and (b) GaP:Zn,O at room temperature.

- Licht muss genügend nahe an der Oberfläche des HL-Materials erzeugt werden



Optische Verluste in LEDs: 2.: Fresnel-Verluste

- Fresnel-Reflexion an der Oberfläche (senkrecht)

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2$$

$$R_{\text{III-V}} \approx \left| \frac{3.6 - 1}{3.6 + 1} \right|^2 \approx 32\%$$

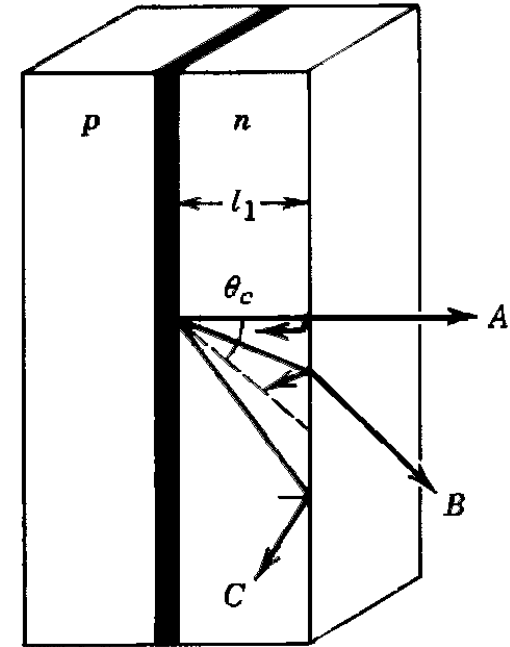


Abb.: Optische Verluste in LEDs

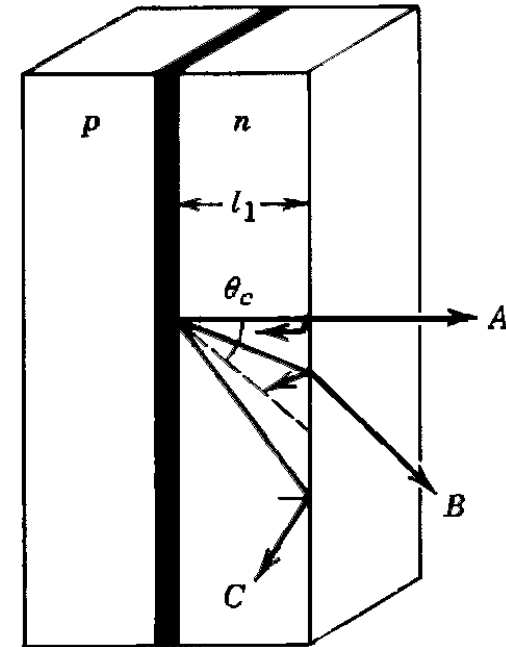
→ ca. 1/3 des Lichtes wird zurückreflektiert

Optische Verluste in LEDs: 3.: Totalreflexion

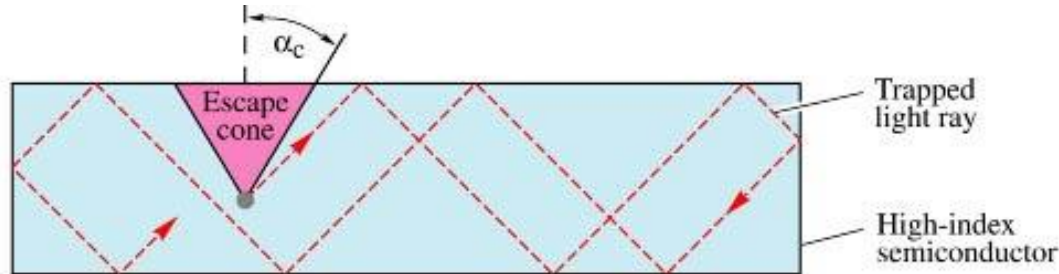
-Totalreflexion tritt auf für Winkel größer als der kritische Winkel θ_c

$$\sin(\theta_c) = \frac{1}{n} \quad \theta_c(n=3.6) = 16^\circ$$

→ das meiste Licht bleibt im Halbleiter

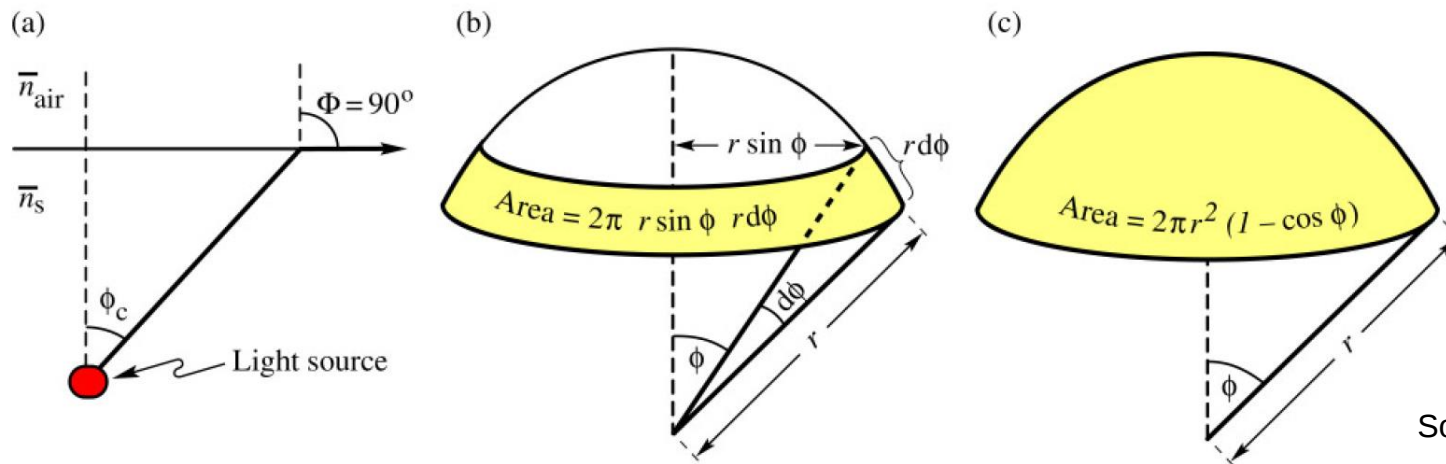


Totalreflexion führt zu geringer Extraktion



$$\sin(\phi_C) = \frac{1}{n}$$

Fig. 6.3. Illustration of "trapped light" that cannot escape from a cube-shaped semiconductor for emission angles larger than α_c due to total internal reflection.



Source: E.F. Schubert

Fig. 5.3. (a) Definition of the escape cone by the critical angle ϕ_c . (b) Area element dA . (c) Area of calotte defined by radius r and angle ϕ_c .

Für eine quantitative Berechnung muss der Raumwinkel des Austrittskegels ins Verhältnis zum gesamten Raumwinkel gesetzt werden.

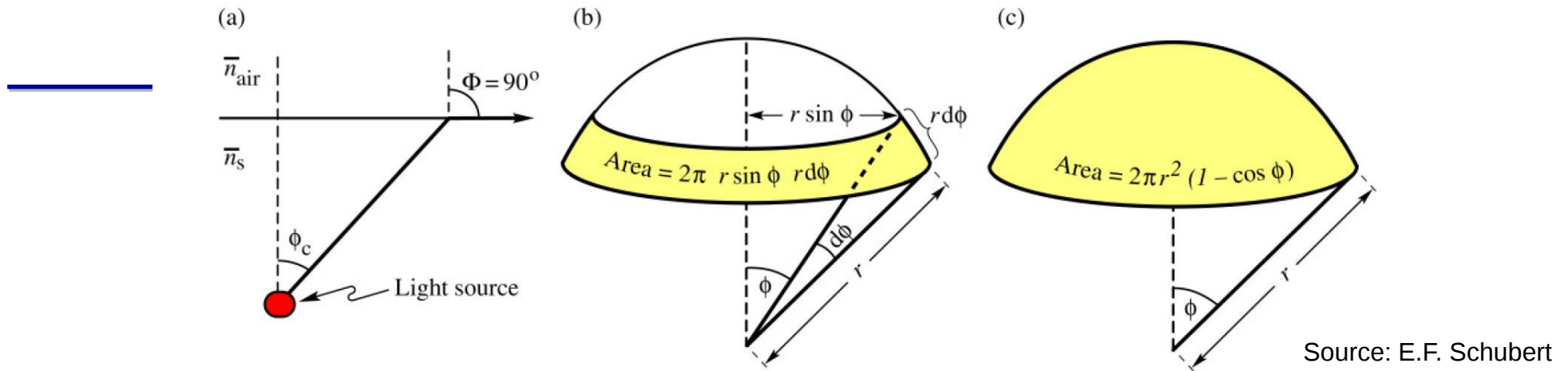


Fig. 5.3. (a) Definition of the escape cone by the critical angle ϕ_c . (b) Area element dA . (c) Area of calotte defined by radius r and angle ϕ_c .

Die Oberfläche der Austrittskalotte ist:

$$A = \int dA = \int_0^{\phi_c} 2\pi r \sin \phi r d\phi = 2\pi r^2 (1 - \cos \phi_c)$$

Bei isotroper Emission ergibt sich damit für das Verhältnis:

$$\frac{P_{\text{esc}}}{P_{\text{total}}} = \frac{2\pi r^2 (1 - \cos \phi_c)}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_c)$$

Bei einem Brechungsindex $n=3.6$ (GaAs) ergibt sich damit ein Wert von nur 2 % !!

Auskoppeleffizienzen in LEDs

Für Hochindexmaterialien und damit kleine kritische Winkel kann der Kosinus entwickelt werden:

$$\frac{P_{\text{esc}}}{P_{\text{total}}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_C) = \frac{1}{2} \left(1 - \left(1 - \frac{\phi_C^2}{2} + \dots \right) \right) = \frac{1}{2} \left(1 - 1 + \frac{1}{2} \left(\arcsin \frac{1}{n} \right)^2 + \dots \right)$$

$$\approx \frac{1}{4} \frac{1}{n^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{4} \frac{n_{\text{ext}}^2}{n_{\text{int}}^2}$$

Die Verbesserung der Auskoppelung war/ist ein Schlüssel zum Erfolg für den Einsatz von LEDs in der Allgemeinbeleuchtung.

Übersicht über die Vorlesung

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
 - IV.1 Elektrisches Verhalten
 - IV.2 Emissionseigenschaften von LEDs
 - IV.3 Effizienzen
 - IV.4 Auskoppelverluste
 - IV.5 Erhöhung der Auskoppelleffizienz
 - IV.6 Weisse LEDs
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
- VII. Betrieb von Leucht- und Laserdioden
- VIII. Modulatoren
- IX. Weitere Quantenbauelemente

Backside mirror: Photonen über Bande

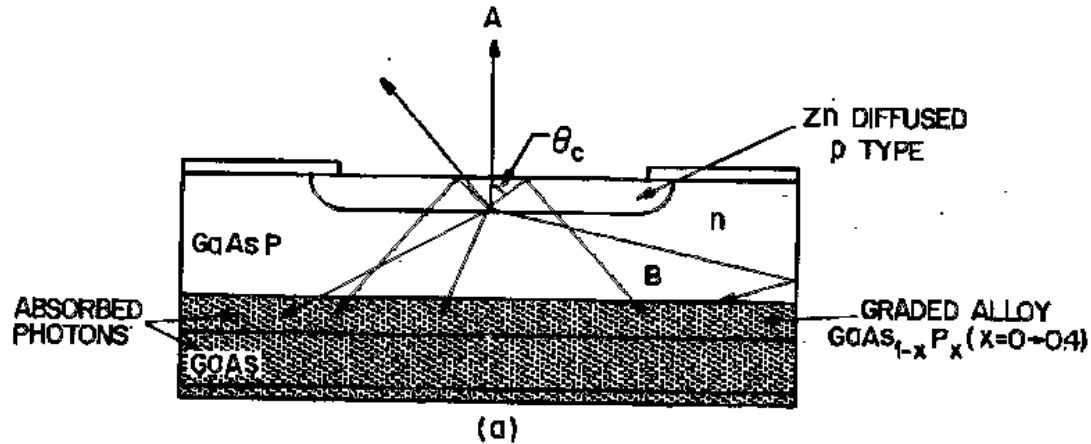


Abb.: LED mit
absorbierendem Substrat

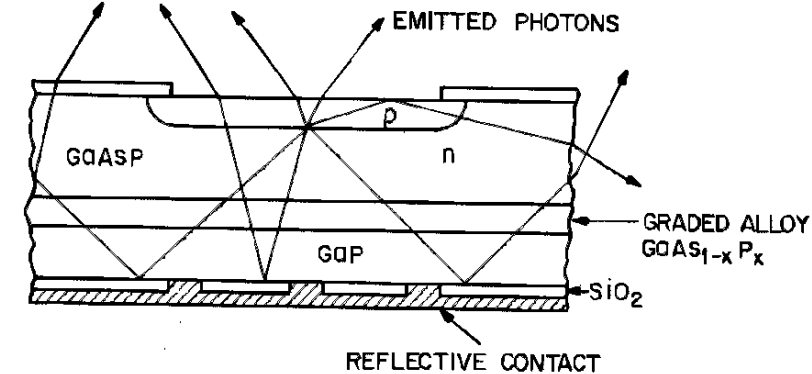


Abb.: LED mit
reflektierendem Substrat

- Vermeidung der Absorption in einem Substrat niedriger Bandlücke
- dielektrische oder metallische Spiegelschichten

The role of an epoxy dome

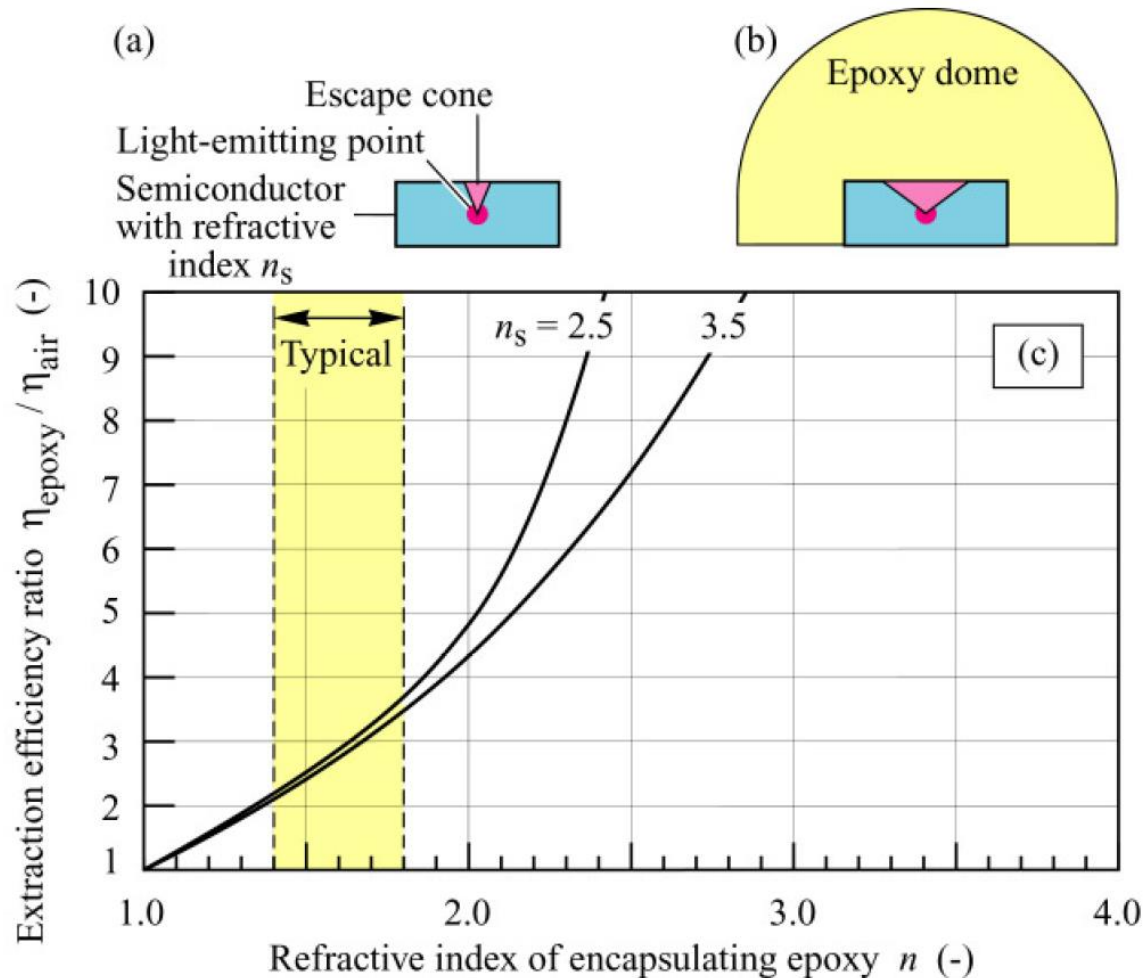


Fig. 5.6. (a) LED without and (b) with dome-shaped epoxy encapsulant. A larger escape angle is obtained for the LED with an epoxy dome. (c) Calculated ratio of light extraction efficiency emitted through the top surface of a planar LED with and without an epoxy dome. The refractive indices of typical epoxies range between 1.4 and 1.8 (adopted from Nuese *et al.*, 1969).

Spezielle Oberflächengeometrien

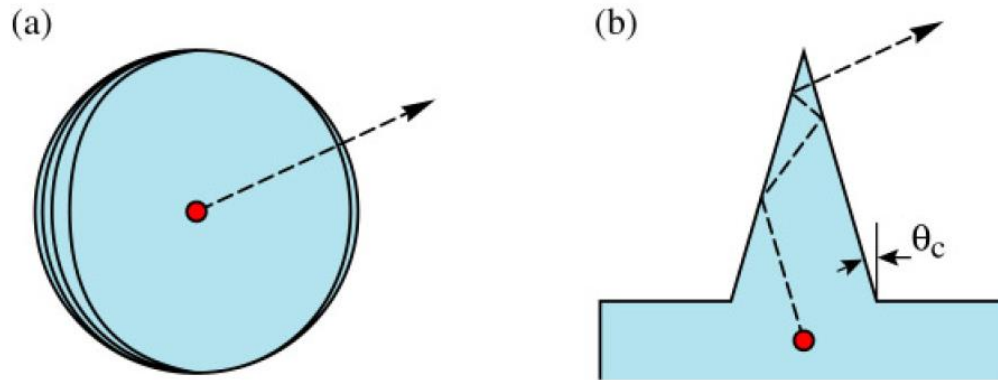


Fig. 7.4. Schematic illustration of different geometric shapes for LEDs with perfect extraction efficiency. (a) Spherical LED with point-like light-emitting region in the center of the sphere. (b) Cone-shaped LED.

- Kugelförmige LEDs wären eigentlich ideal
- leider sehr aufwändig/nicht machbar in der Herstellung
- kegelförmige LEDs sind ebenfalls aufwändig aber im Prinzip kompatibel mit Lithographie- und Ätzprozessen

Hocheffiziente Geometrien: Die TIP(Truncated inverted pyramid)

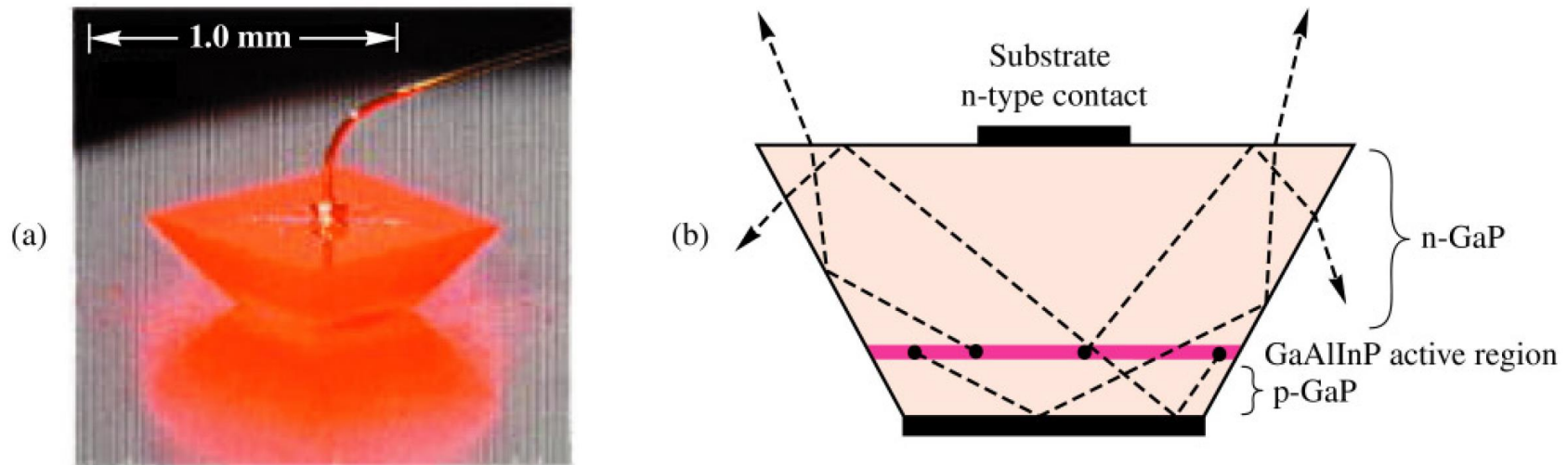
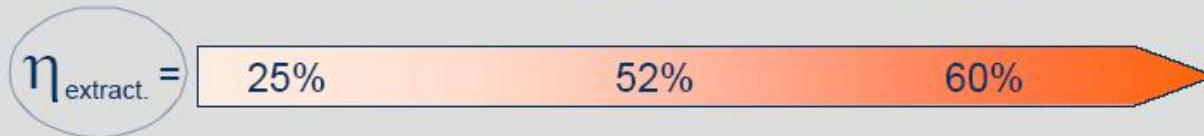
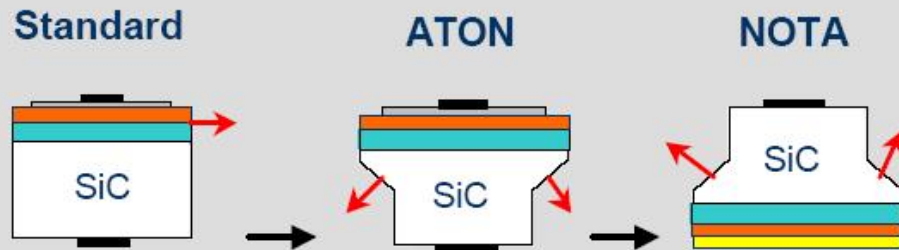


Fig. 7.6. Truncated inverted pyramid (TIP) AlInGaP/GaP LED. (a) LED driven by an electrical injection current. (b) Schematic diagram of the LED illustrating the enhanced light extraction efficiency (after Krames *et al.*, 1999).

- erstmaliger Nachweis einer 100 lm/W-LED im Jahre 1999
- Numerische Optimierung der Struktur durch Ray-Tracing (Strahlverfolgung)
- Verwendung von transparenten GaP-Schichten

Optimierte blaue LEDs

OSRAM's InGaN Chip Concepts



- TIP-ähnliche Strukturen wurden von OSRAM-OS in der Folge realisiert

-Verwendung von SiC als transparentes Substrat

Microstructured Surfaces

- Microstructuring surface area increases the external quantum efficiency, since most of the light escapes at the edges.

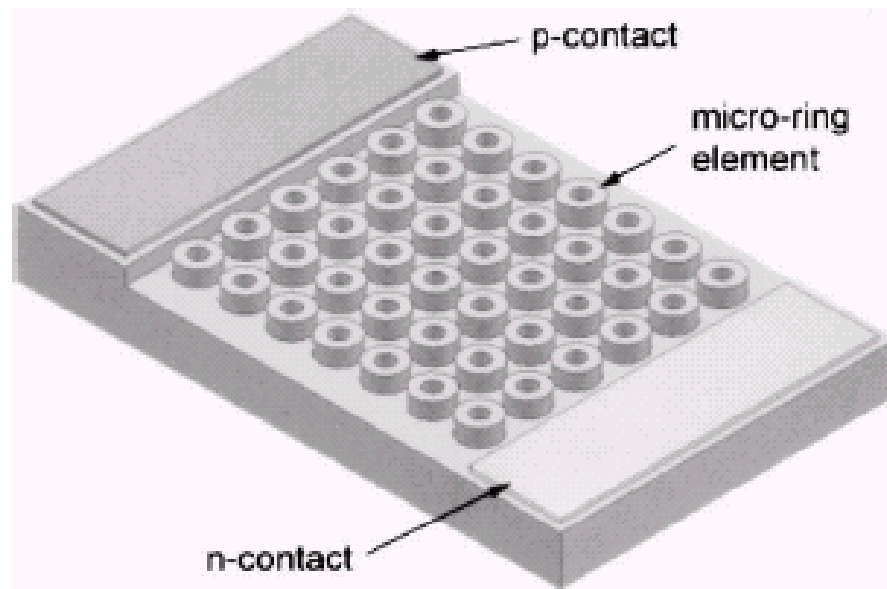
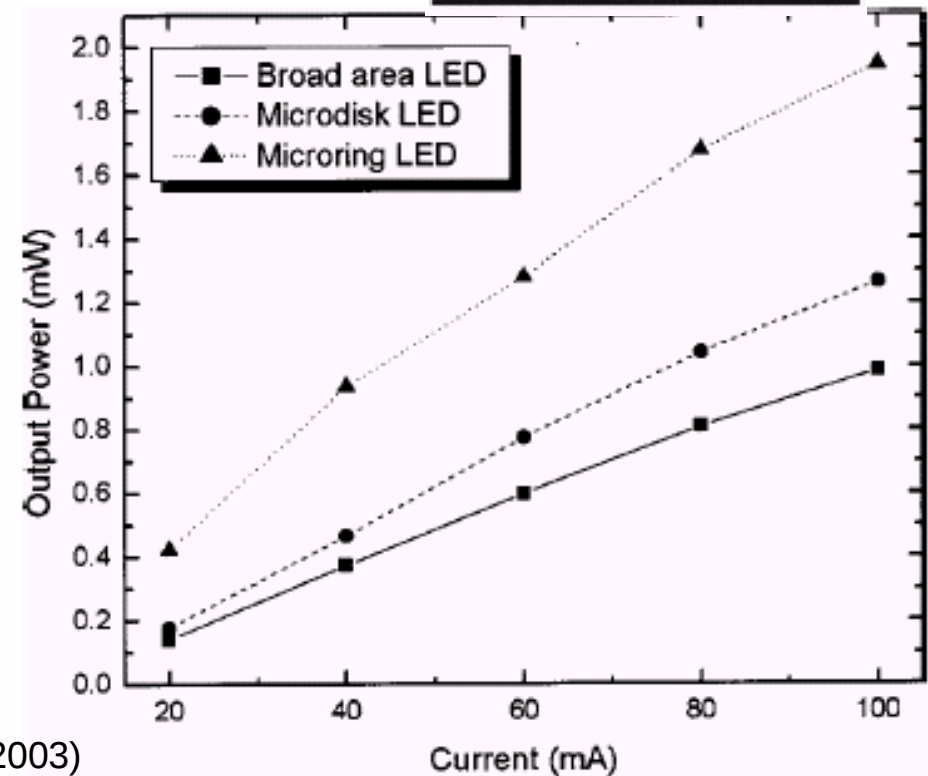
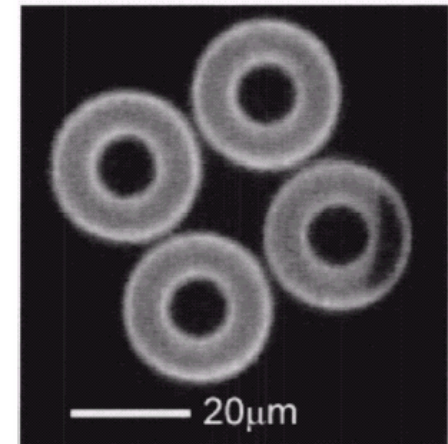


FIG. 1. Schematic diagram of a micro-ring LED (not to scale)

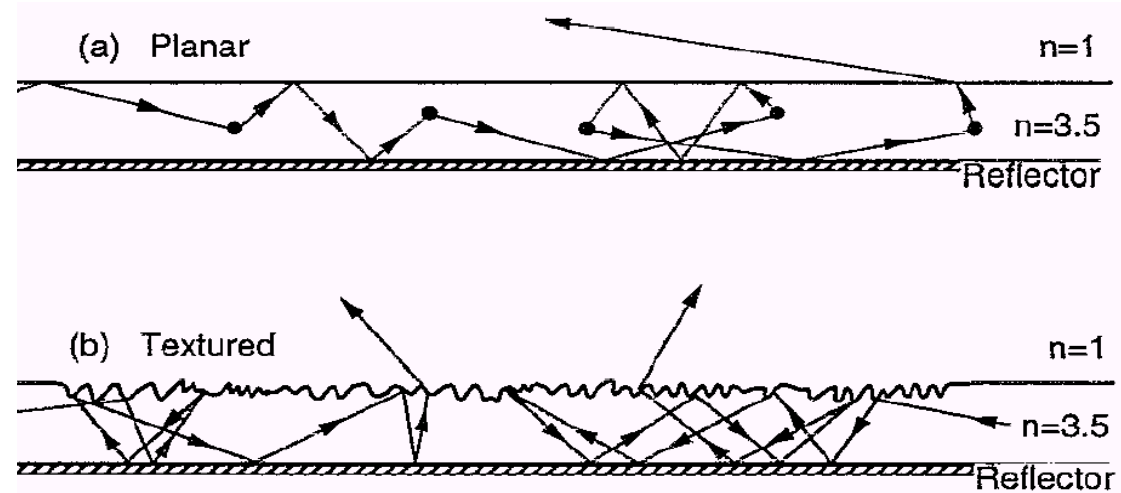


Texturierte Oberflächen

Textured surfaces randomize the propagation direction of photons and thus increase the escape probability.

External quantum efficiency increased from 9 % to 30 %.

Natural lithography: Polystyrene spheres, $0.2\text{--}\mu\text{m}$ diam, coat the surface of the LED in a randomly close-packed array. The spheres then act as an etch mask for Cl , assisted Xe + ion beam etching, about $0.17\mu\text{m}$ deep.



Current spreading

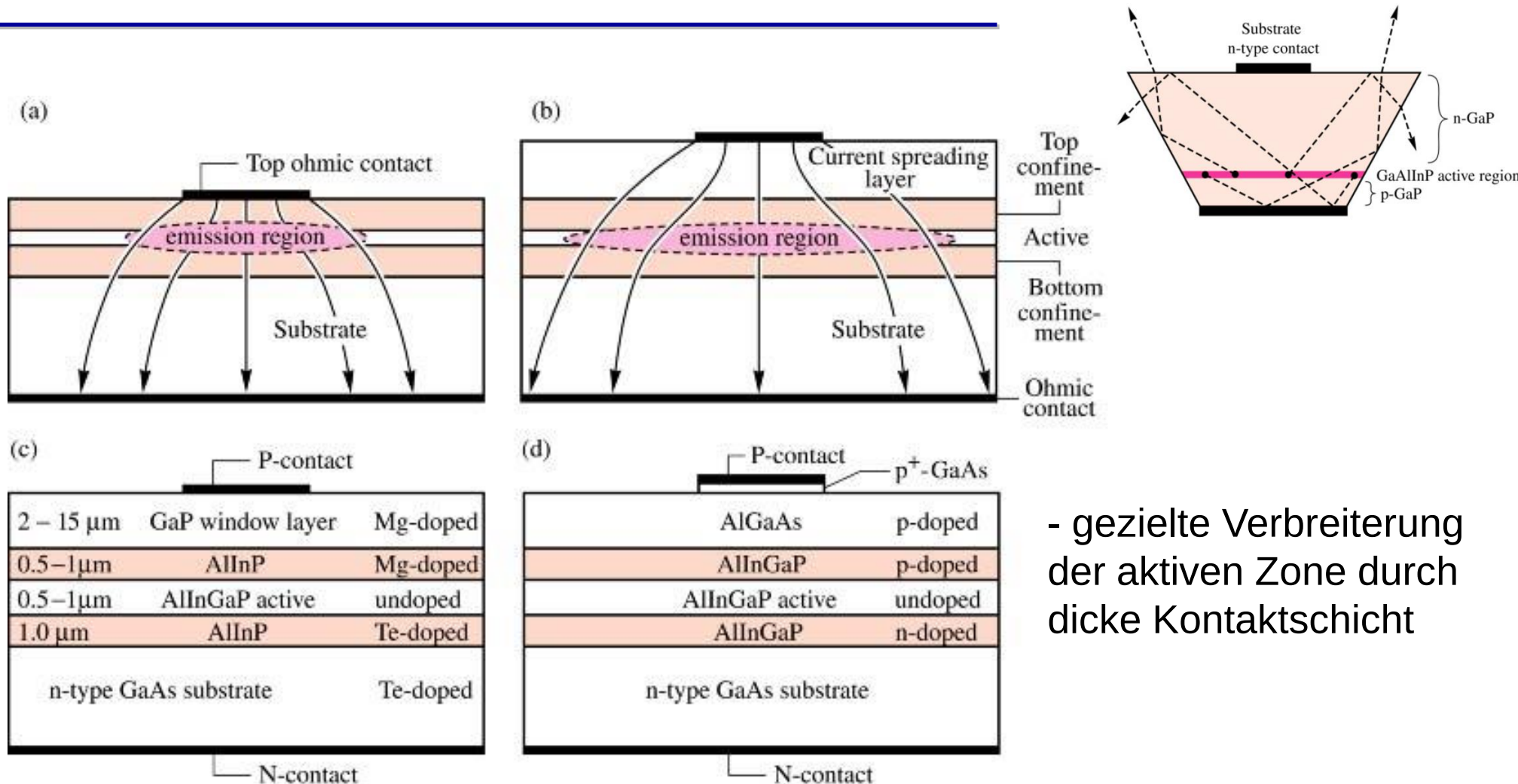
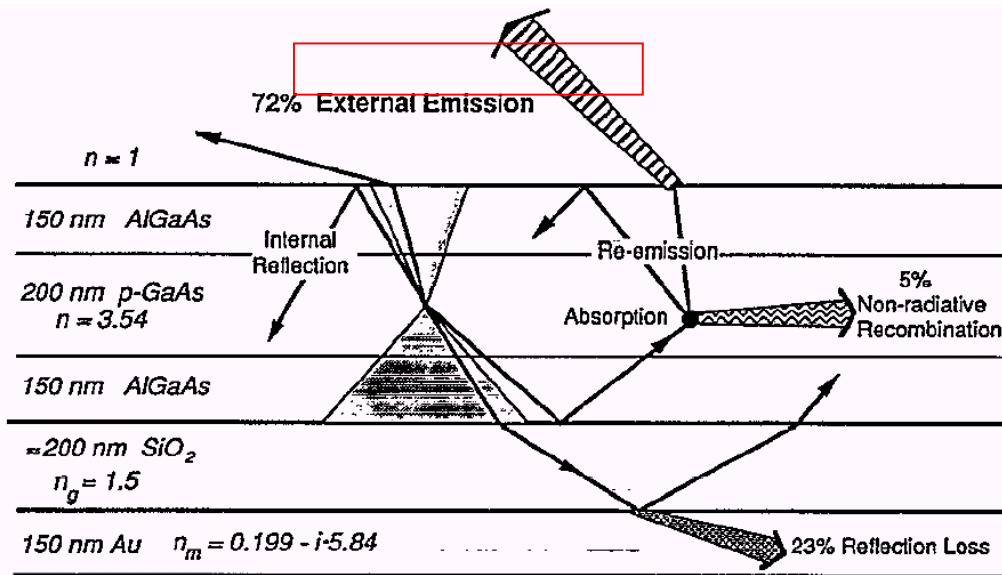


Fig. 6.8. Current spreading structures in high-brightness AlInGaP LEDs. Illustration of the effect of a current spreading layer for LEDs (a) without and (b) with a spreading layer on the light extraction efficiency. (c) GaP current spreading structure (Fletcher *et al.*, 1991). (d) AlGaAs current spreading structure (Sugawara *et al.*, 1992).

Photon Recycling

Absorption and re-emission of photons results in several chances for emission in the escape cone and thus increased h_{ext} .



⇒ Other losses in the structure have to be minimal, since many “reincarnations” are necessary before the escape cone is found.

FIG. 1. Schematic cross section of epi-lift-off heterostructure, Van der

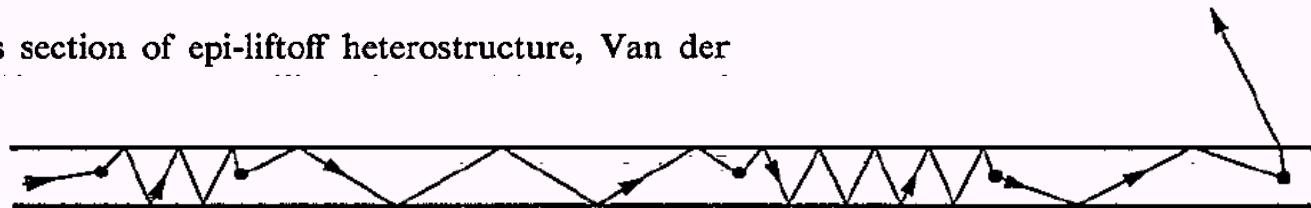
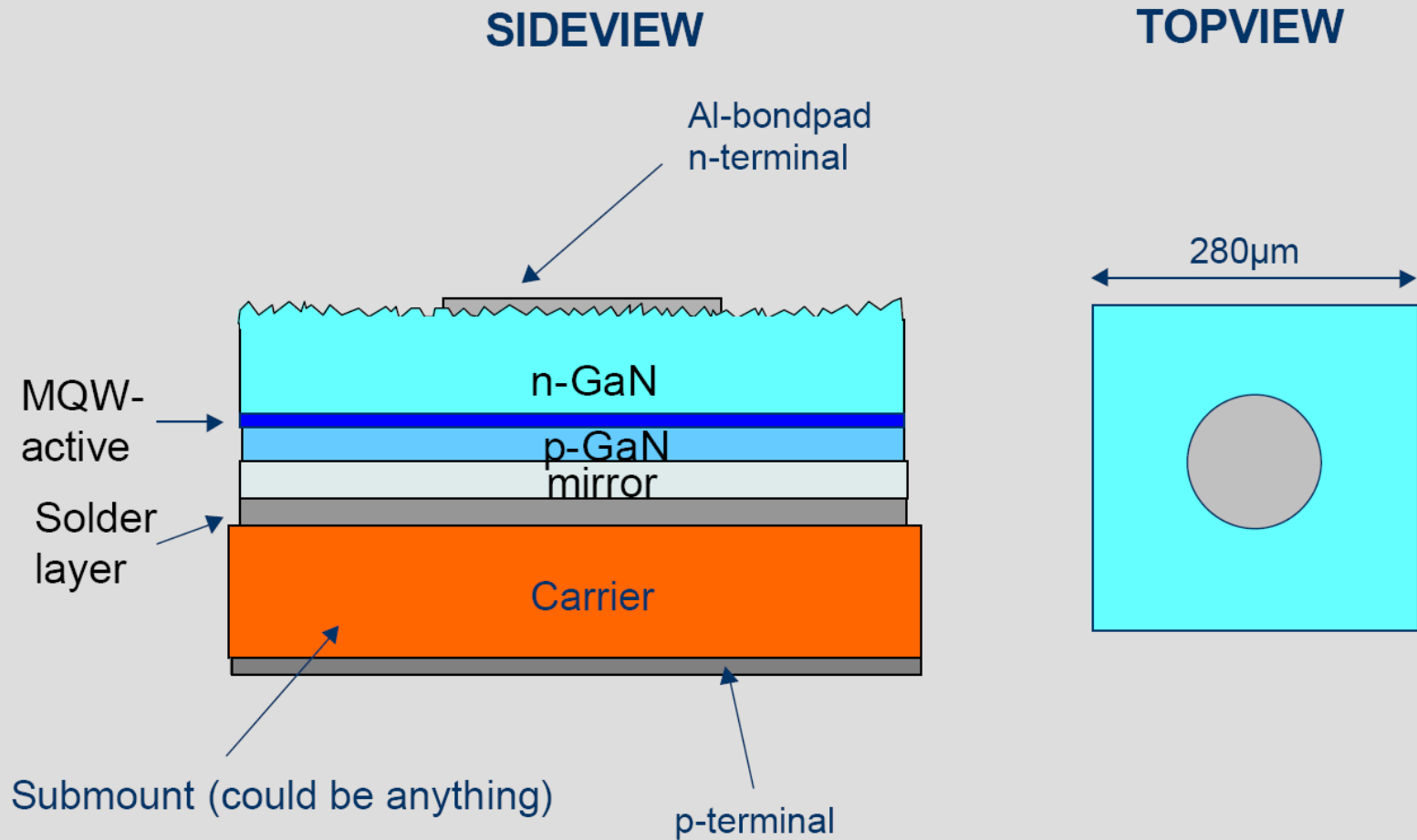


FIG. 2. Typical photon trajectory in the heterostructure shown in Fig. 1. Dots represent absorption/emission events. High external efficiency demands ~ 25 such events before a photon finds the escape cone.

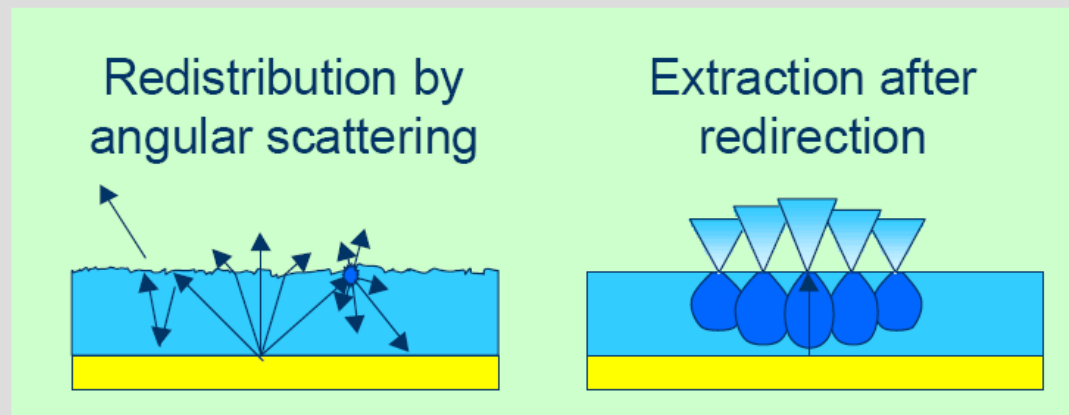
Chip Design for Thinfilm LED: **ThinGaN™**



Source: Osram OS

Thinfilm Concept

- reduced internal absorption $\Rightarrow$ thin layers
- highly reflective mirrors $\Rightarrow$ mirror material design
- ergodic angular distribution $\Rightarrow$ surface texturing

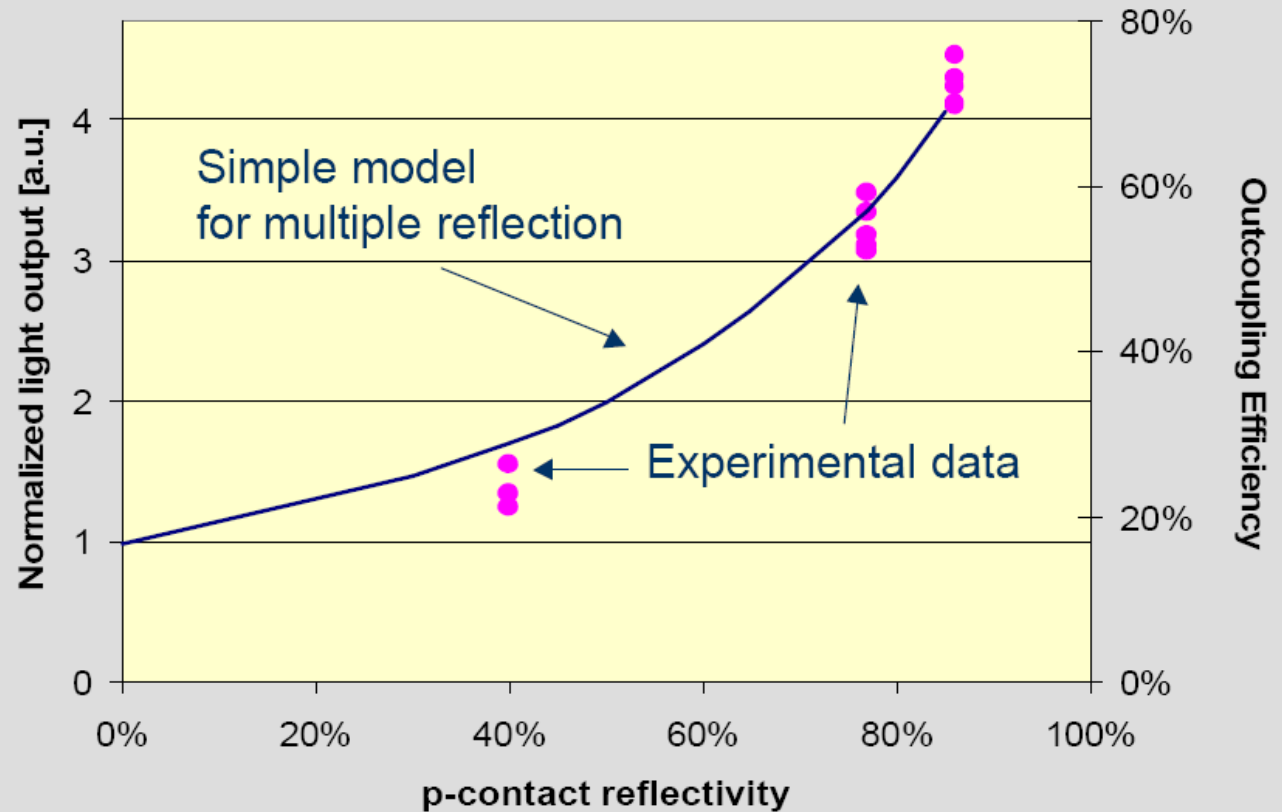


„Give photons multiple chances to find an escape cone“

Optimized p-type backside mirror

Reflectivity of Metals

Al:	92%
Ag:	91%
Rh:	74%
Pt:	60%
Ni:	55%
Au:	36%
(@460nm, to air)	



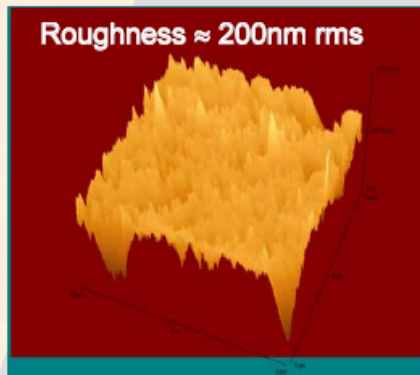
optimum p-mirror reflectivity mandatory for high efficiency!

Prozess Flow bei der Herstellung von InGaN-Dünnschicht

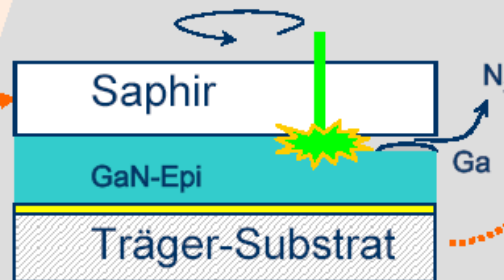
Prozess Flow:



- Epitaxie auf Saphir
- Spiegel-Metallisierung

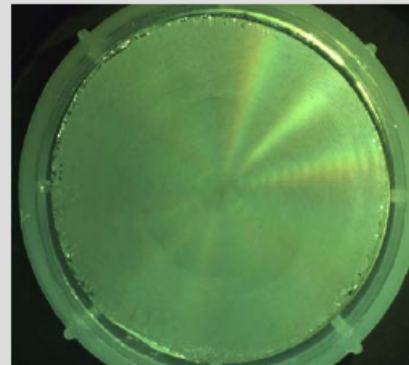


- AFM (Oberfläche)



- Löten auf Träger
- Epi Laser-liftoff

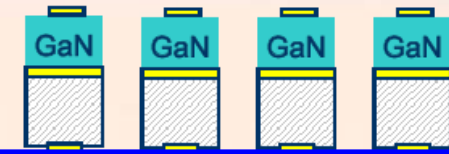
(M. Stutzmann, WSI München
OSRAM Patent)



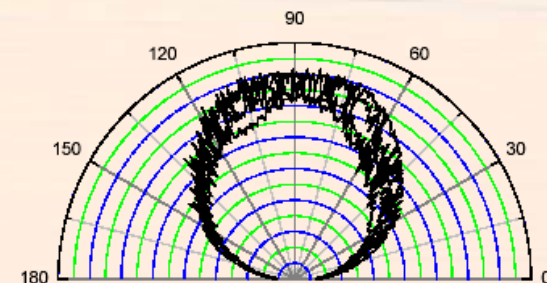
- $4\ \mu\text{m}$ Epi auf Träger



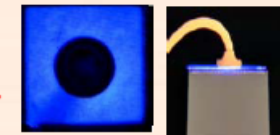
- Chip-Prozessierung



- Chip-Trennen auf Folie

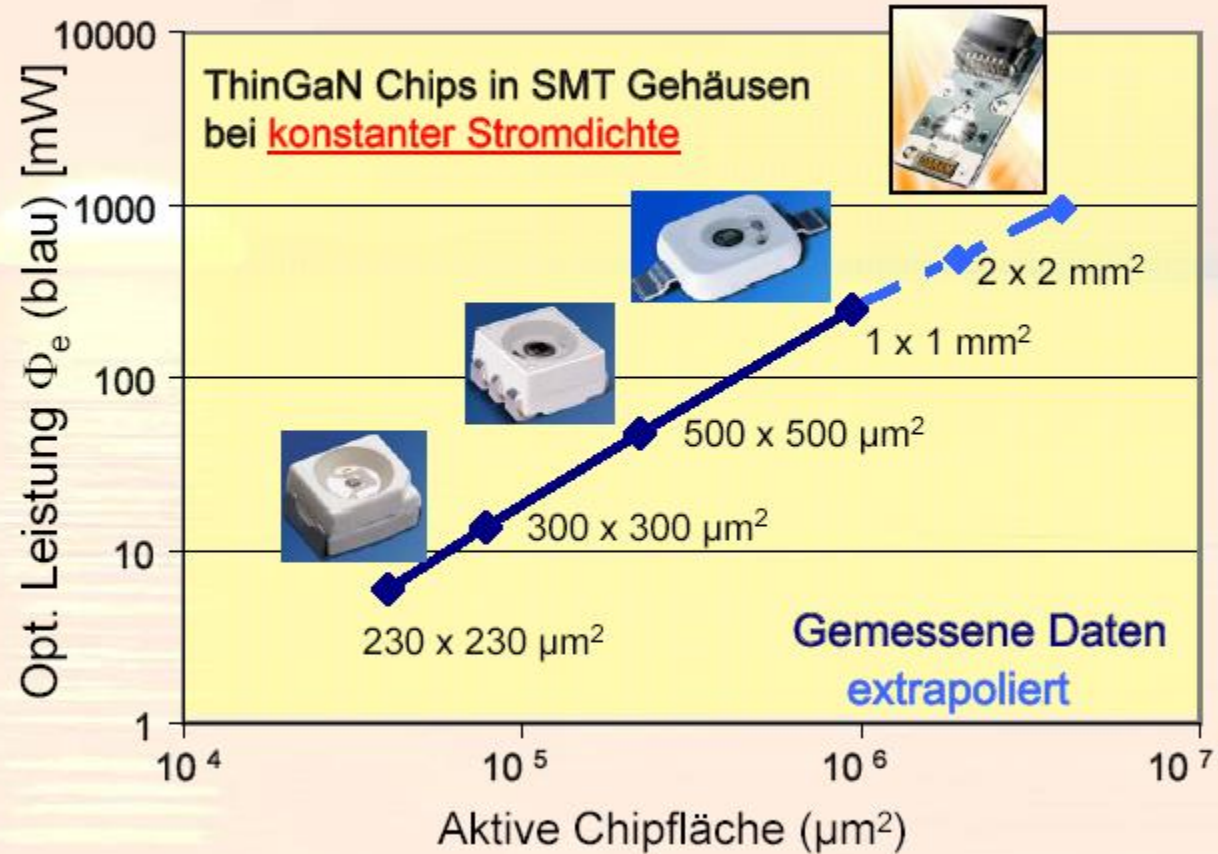
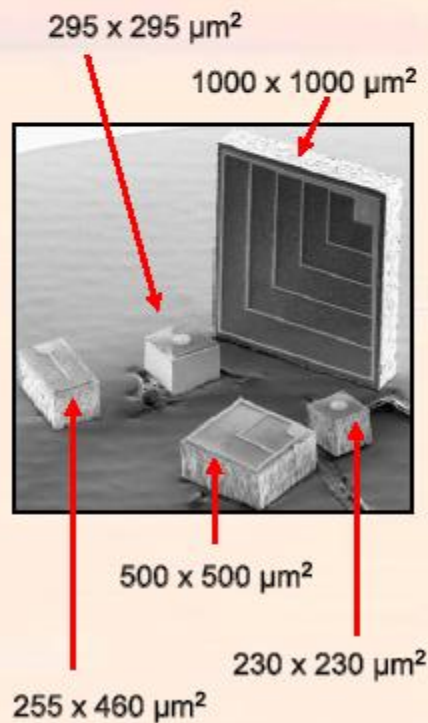


Reiner
Oberflächen-
strahler



Volle Skalierbarkeit der ThinGaN Technologie

ThinGaN Chip Familie



ThinGaN: Opt. Leistung ist eine lineare Funktion der aktiven Chipfläche bei konstanter Stromdichte

ThinGaN Technology

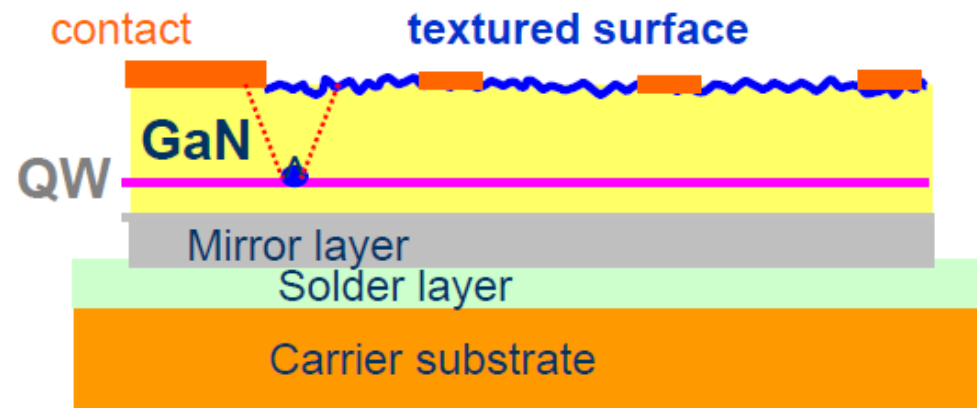
The Way to Improve Light Extraction

Thinfilm principle:

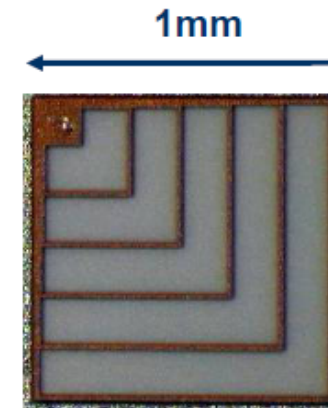
- prevent absorption in substr.
- low internal absorption
- prevent waveguiding

Present actions:

- ⇒ improve mirror reflectivity
- ⇒ **reduce / omit n-contacts**
- ⇒ optimize surface roughness



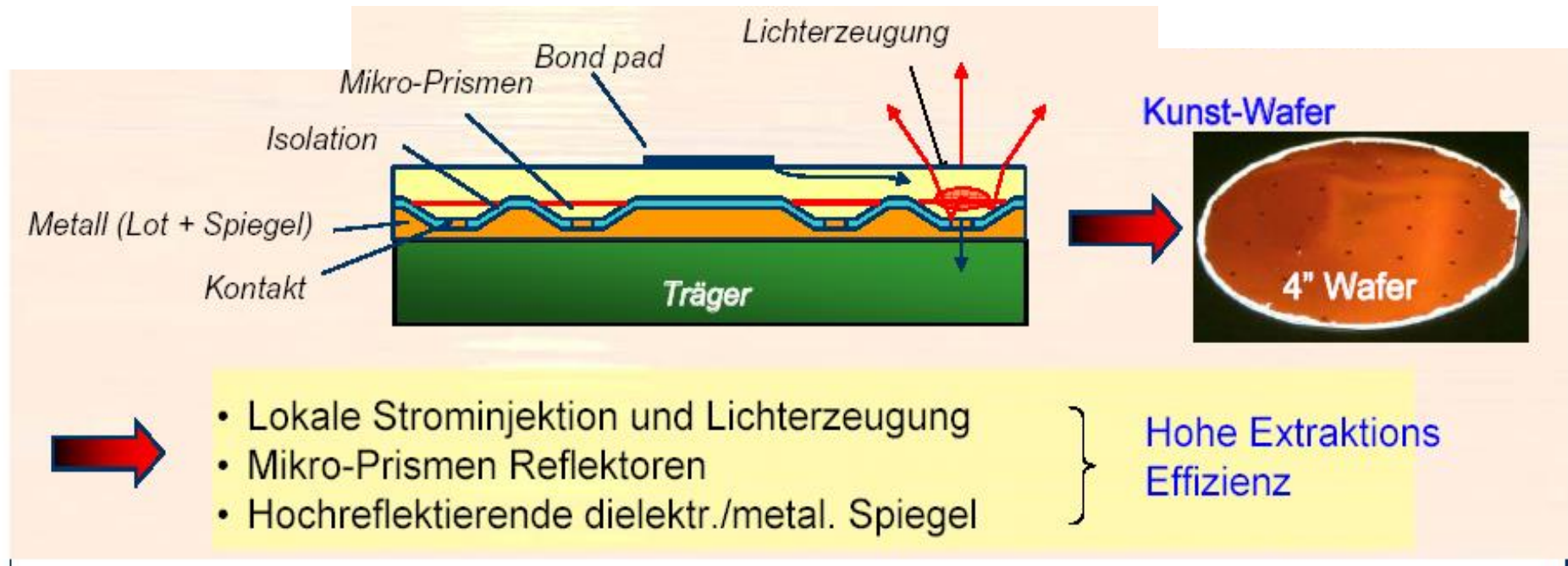
PowerThinGaN; schematic side view



Power ThinGaN top view

- **Light extraction of >80% is reached**
- **Scalability of chip size @ same extraction efficiency**

Mikrostrukturierte Oberflächen bei AlGaInP



Auskopplung durch Mikrostrukturierung bei AlGaInP-LEDs (rot)