

# Optoelectronic Generation of Light

Optische Signalgeneration ist für eine Vielfalt von passiven und aktiven informationsverarbeitenden Funktionen verantwortlich.

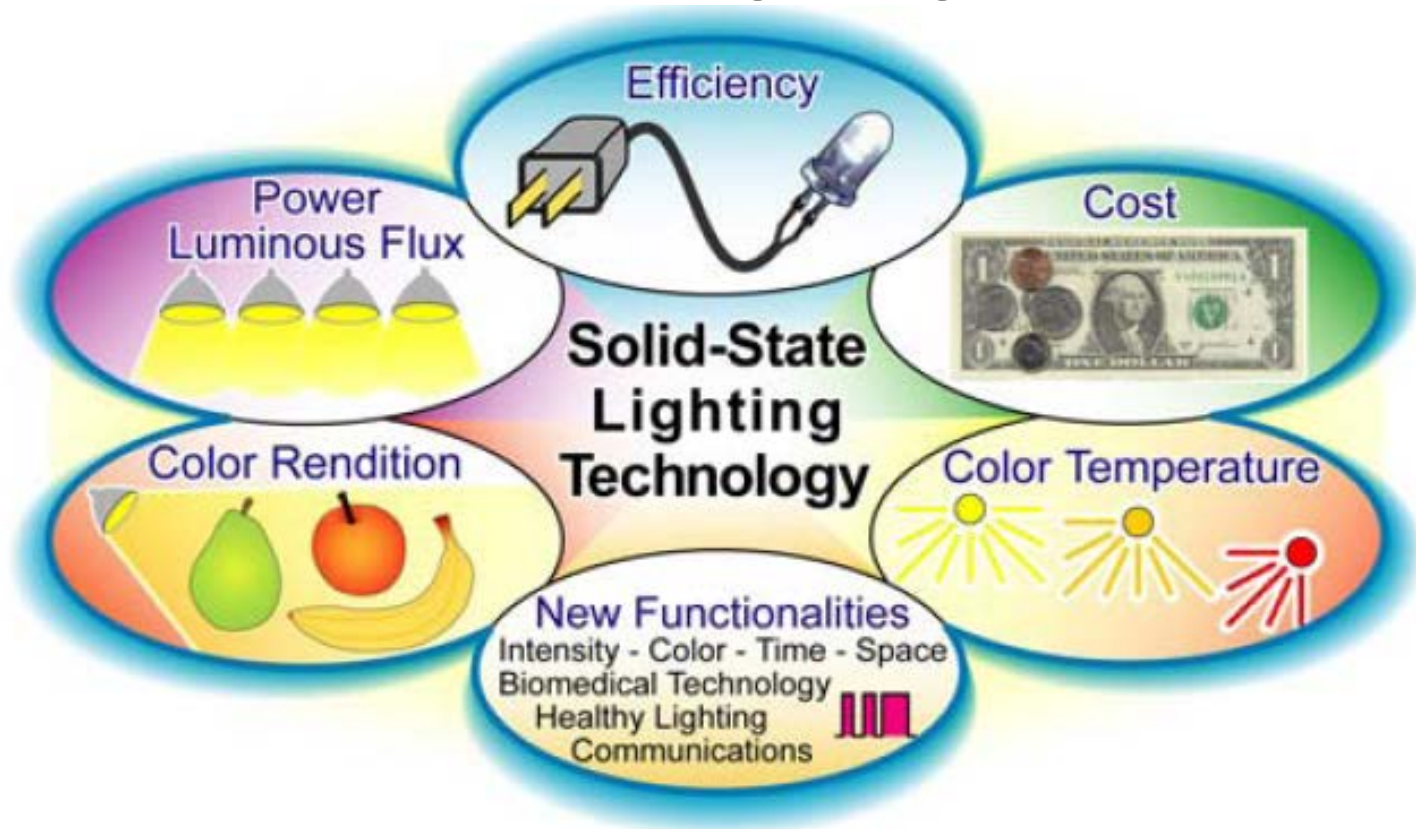
Optische Signale werden verwendet für:

- Nachrichtenübertragung
- Anzeigesysteme (Großflächenbildschirme, Farbdisplays,...)
- Speichersysteme (Optische Disk, CD-Player, DVD, ...)
- Optische Schalter
- Optische Logikbausteine -> optischer Computer

Neben der **optischen Signalübertragung** wird aber immer mehr auch die **Beleuchtung** von optoelektronischen Halbleiterbauelementen dominiert, z.B.

- Verkehrsampeln und -leitsystemen
- Autobeleuchtung (Innenbeleuchtung, Rückleuchten, Scheinwerfer, ...)
- Raumbelichtung (Innenbeleuchtung, Notweißsignalleuchten, Treppenbeleuchtung, ...)
- Gebäudebeleuchtung (Kirchen, Brücken, ... mit unterschiedlichen Farben)

# Solid State Lighting (SSL)



**Figure A-1** Characteristics of SSL that will likely play important roles in SSL's ultimate impact on national/worldwide energy consumption and the human visual experience. [Schubert 2006]

# Light Emitting Diode (LED)

Die **Licht emittierende Diode (LED, Leuchtdiode)** ist eins der einfachsten **optoelektronischen Bauelemente**, welches besonders wichtige Anwendung in der **Displaytechnologie** (Hintergrundbeleuchtung von Handydisplays, Monitore) als auch als **optische Signalquelle** für optische Nachrichtenübermittlung bekommen hat. Auch in der Beleuchtungstechnik (Autoscheinwerfer, Raumbelichtung, Taschenlampen,..) werden LEDs immer wichtiger.

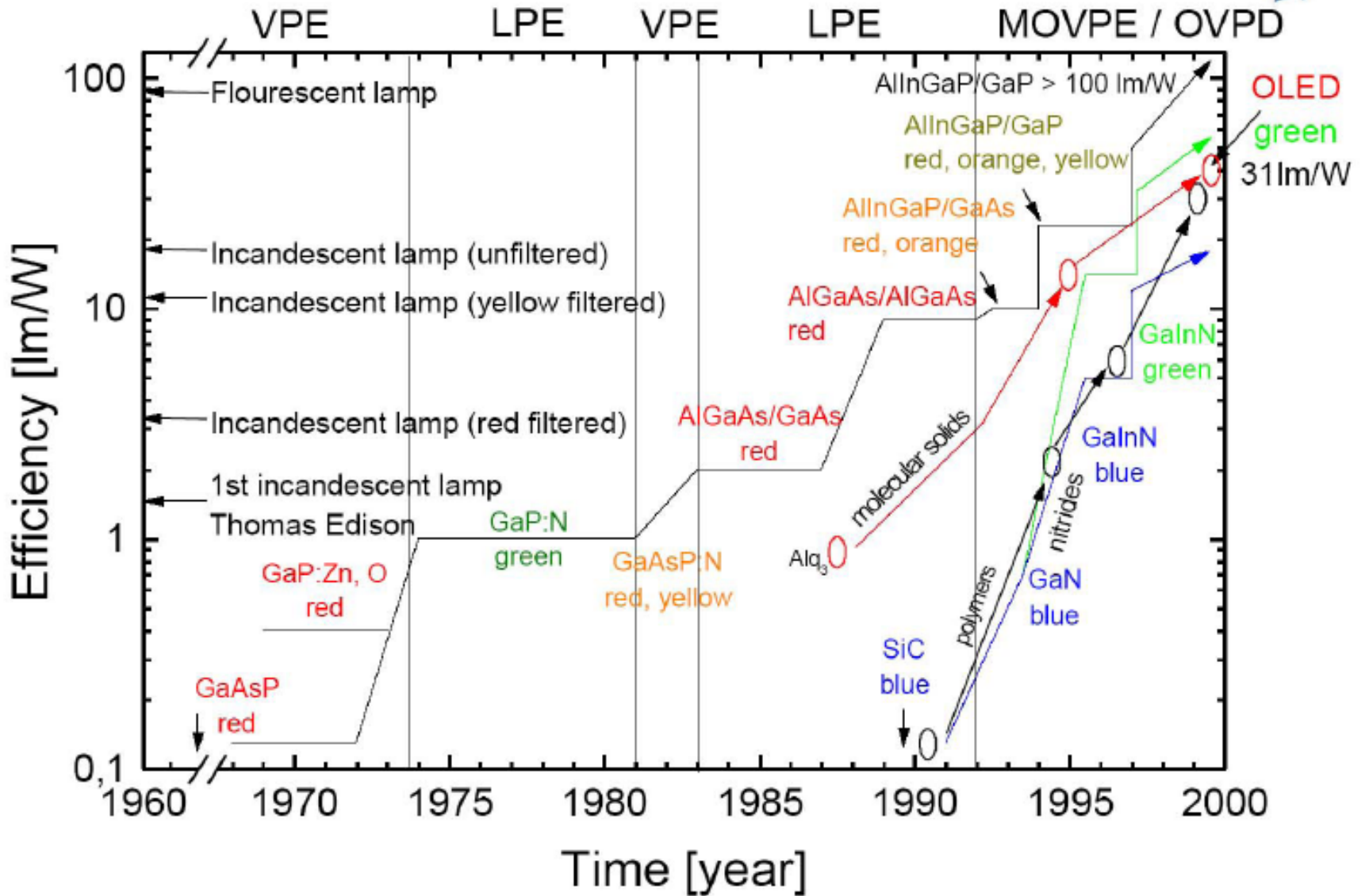
Im Vergleich zu **Laserdioden (LD)** ist eine LED relativ einfach und benötigt keinen optischen Resonator zum Betrieb:

Nachteile sind jedoch:

- **niedrige optische Ausgangsleistung (stimmt nur mehr teilweise)**
- **breites und inkohärentes Emissionsspektrum**
- **langsamere Modulierbarkeit (< 100 MHz)**

**Die Basis für eine LED ist ein p-n-Übergang, der in Vorwärtsrichtung betrieben wird!**

# Power of LED



# Development of the power of LED

- Der Fortschritt in der Effizienz von LEDs ist sehr groß
- Für weiße LEDs hat Phillips 2013 200 lm/Watt weißes Licht erreicht
- 15 lm/W für Glühlampe, 50-100 lm/Watt für eine Leuchtstoffröhre
  
- Auch für rote LEDs sind 200 lm/Watt erzielt worden (Osram 2011)
- Mehr als 60 % der elektrischen Leistung werden in Licht umgesetzt.

# LED: Basics

Die LED ist die Grundvoraussetzung für eine Laserdiode (LD), deren Anwendung für Modulationsgeschwindigkeiten oberhalb von 5 GHz benötigt werden oder wo spektral reine optische Emission ( $\Delta\lambda < 1\text{nm}$ ) benötigt werden.

**Spektrale Breite einer LED:**  $\sim k_B T$  dies entspricht bei Raumtemperatur ( $\sim 26\text{ meV}$ ) einem Wellenlängenbreite von ca. 30-40 nm.  
für menschliches Auge trotzdem monochromatisch

Grundlage der LED ist ein **vorwärts gespannter p-n-Übergang**, in dem Elektronen (Löcher) in das p-(n-) Gebiet **injiziert** werden. Die injizierten Minoritätsladungsträger **rekombinieren** mit den Majoritätsladungsträgern in der Verarmungszone oder dem neutralen Bereich.

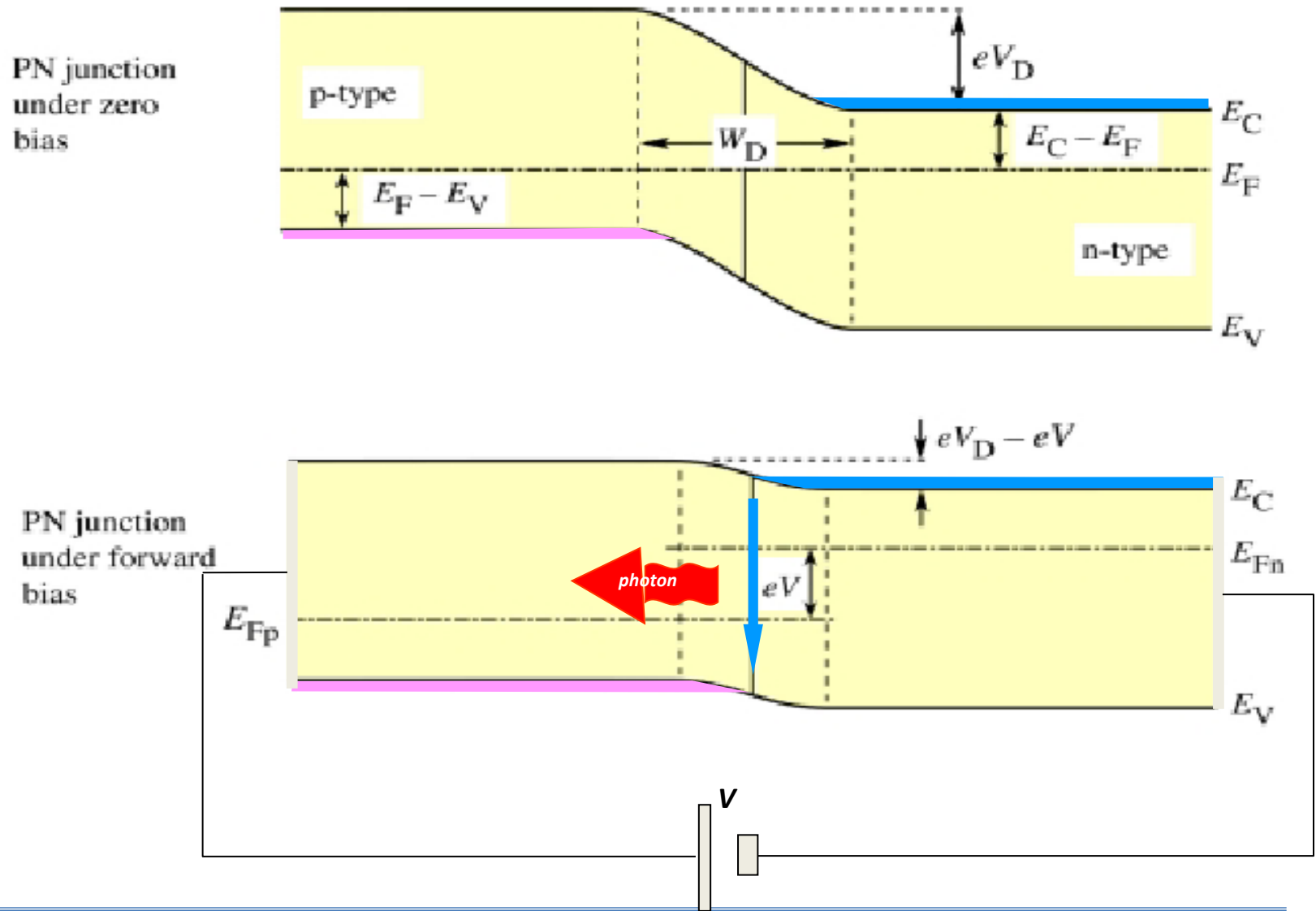
In **direkten Halbleitern** (wie z.B. GaAs) führt diese Rekombination zur Lichtemission da dort **strahlende Rekombination** überwiegt.

In **indirekten Halbleitern** (wie z.B. Si) erfolgt die Rekombination überwiegend zur Erzeugung von Phononen (Gitterschwingungen) und damit **nichtstrahlend**.

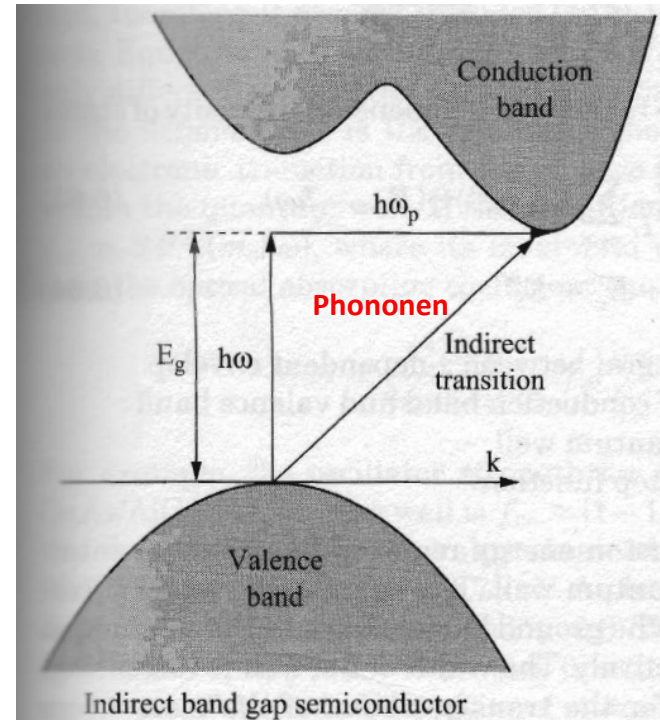
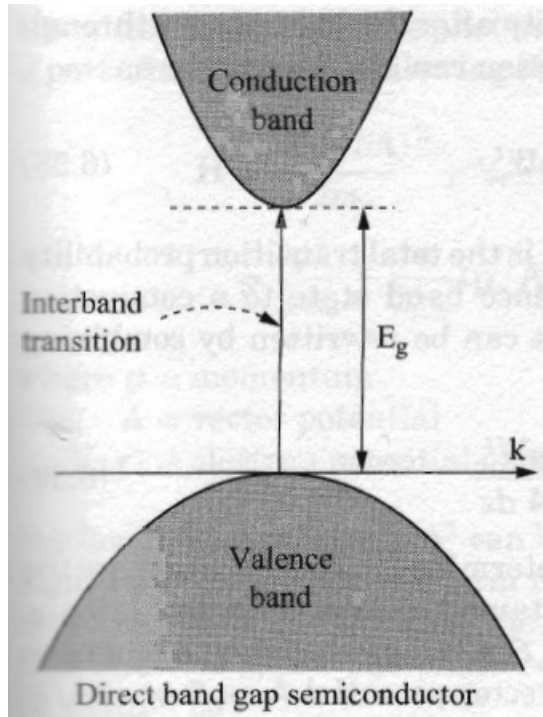


**LED = p-n Übergang in direktem Halbleiter**

# p-n-junction: electronic properties



# Direct - indirect Semiconductor



Important considerations for the selection of a semiconductor for LED or Laser diodes:

- **Emission energy** (wavelength for the used application)
- **Availability of suitable substrate** (Growth of epitaxial layers)

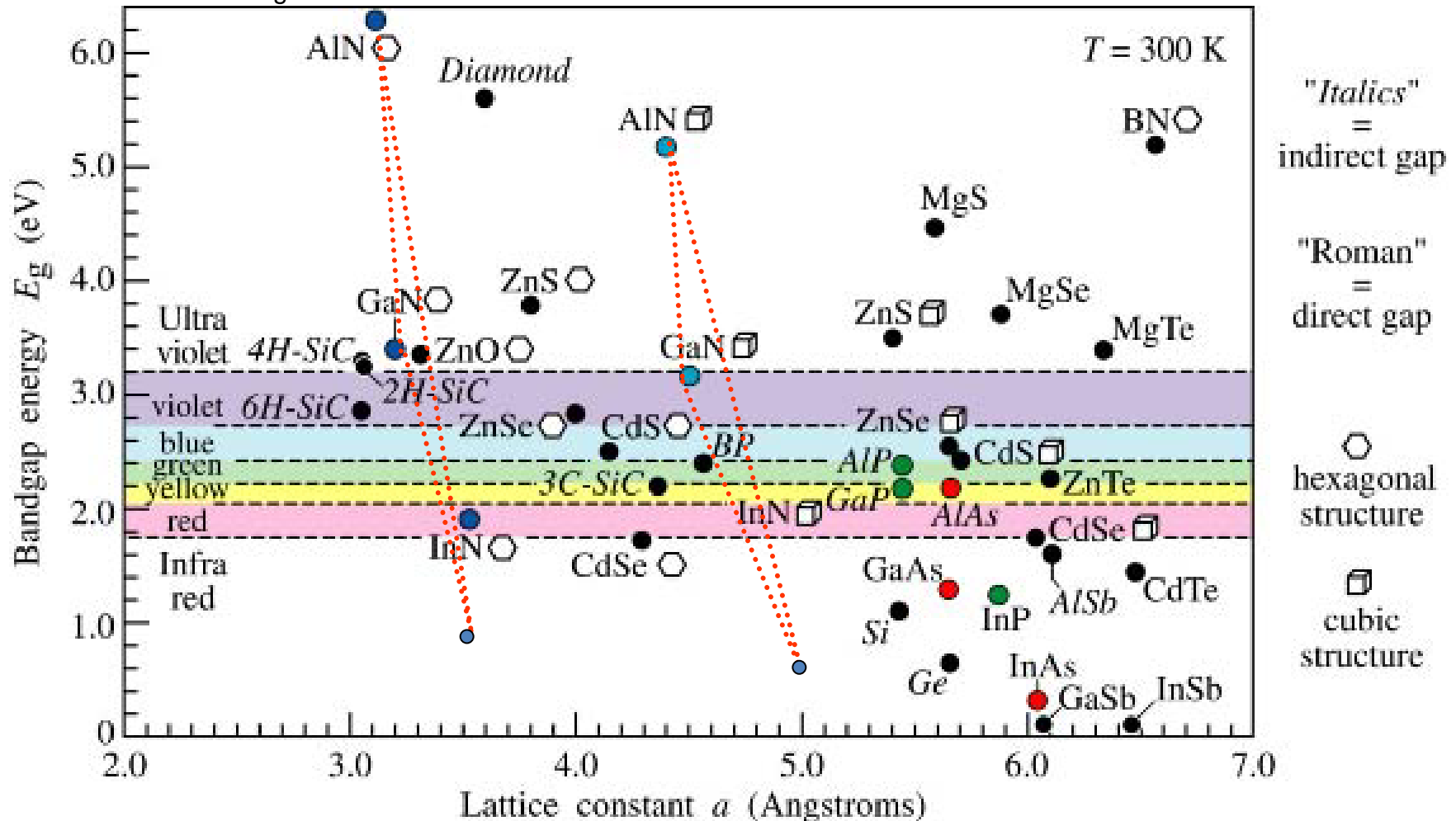
Connection: Energy – wavelength:

$$E(eV) = \frac{1239,85}{\lambda(nm)}$$



# Emission wavelength

Generation of light by recombination of e-h-pairs above the band gap!  
 => Band gap  $E_g$  determines the emission energy!



# Availability of substrates

- Nearly all optoelectronic light sources depend on epitaxial growth methods
- Thick active epitaxial layers (~ some  $\mu\text{m}$ ) are deposited on thick substrates (~200-700  $\mu\text{m}$ ).
- For high quality devices the epilayer have to be as defect free as possible (Defects = non-radiative rekombination centers)
- Availability of high quality substrates is very important for the epitaxy, since with lattice mismatched substrates the formation of dislocations and other defects is possible.

The **most important available substrats** for LED-technology are:

- |                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
| a) Si                 | } | genügend rein, kommerziell erhältlich, groß genug<br>( 2-3 Zoll) |
| b) GaAs               |   |  |
| c) InP                |   |  |
| d) Saphir             |   |  |
| e) LiNbO <sub>2</sub> |   |  |

However, only a few semiconductors and their alloys are lattice matched to the substrates.

# Lattice constant of compound semiconductors

The lattice constant of a compound is in good approximation the weighted mean value of the different components, e.g. the lattice constants of the alloy compound  $A_xB_{1-x}$  is. (z.B. A = GaAs, B= InAs)

$$a = x \cdot a_A + (1 - x) \cdot a_B$$

**Vegards law**

where  $a_A$  and  $a_B$  are the lattice constants of material A and B. This linear Interpolation is called Vegards law.

Important Semiconductors for optoelectronic applications are:

- a)  $Ga_xAl_{1-x}As$  lattice matched to GaAs
- b)  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  lattice matched to InP
- c)  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  lattice matched to InP
- d) InGaAsP lattice matched to GaAs  
(visible spectral range)

# Lattice constants of binary compound semiconductors

MATERIAL	CRYSTAL STRUCTURE	BANDGAP (eV)	STATIC DIELECTRIC CONSTANT	LATTICE CONSTANT (Å)	DENSITY (gm-cm <sup>-3</sup> )
C	DI	5.50, I	5.570	3.5668	3.5153
Si	DI	1.1242, I	11.9	5.431	2.3290
SiC	ZB	2.416, I	9.72	4.3596	3.166
Ge	DI	0.664, I	16.2	5.658	5.323
AlN	W	6.2, D	$\bar{\epsilon} = 9.14$	$a = 3.111$ $c = 4.981$	3.255
AlP	ZB	2.45, I	9.8	5.4635	2.401
AlAs	ZB	2.153, I	10.06	5.660	3.760
GaN	W	3.44, D	$\epsilon_{  } = 10.4$ $\epsilon_{\perp} = 9.5$	$a = 3.175$ $c = 5.158$	6.095
GaP	ZB	2.272, I	11.11	5.4505	4.138
GaAs	ZB	1.424, D	13.18	5.653	5.318
GaSb	ZB	0.75, D	15.69	6.0959	5.6137
InN	W	1.89, D	—	$a = 3.5446$ $c = 8.7034$	6.81
InP	ZB	1.344, D	12.56	5.8687	4.81
InAs	ZB	0.354, D	15.15	6.058	5.667
InSb	ZB	0.230, D	16.8	6.479	5.775
ZnS	ZB	3.68, D	8.9	5.4102	4.079
ZnS	W	3.9107, D	$\bar{\epsilon} = 9.6$	$a = 3.8226$ $c = 6.6205$	4.084
ZnSe	ZB	2.822, D	9.1	5.668	5.266
ZnTe	ZB	2.394, D	8.7	6.104	5.636
CdS	W	2.501, D	$\bar{\epsilon} = 9.38$	$a = 4.1362$ $c = 6.714$	4.82
CdS	ZB	2.50, D	—	5.818	—
CdSe	W	1.751, D	$\epsilon_{  } = 10.16$ $\epsilon_{\perp} = 9.29$	$a = 4.2999$ $c = 7.0109$	5.81
CdTe	ZB	1.475, D	10.2	6.482	5.87
PbS	R	0.41, D*	169.	5.936	7.597
PbSe	R	0.278, D*	210.	6.117	8.26
PbTe	R	0.310, D*	414.	6.462	8.219

Data given are room temperature values (300 K).

KEY: DI: diamond; R: rocksalt; W: wurtzite; ZB: zinc-blende

\*: gap at L point; D: direct; I: indirect;  $\epsilon_{||}$ : parallel to c-axis;  $\epsilon_{\perp}$ : perpendicular to c-axis

$$\text{Lattice mismatch } [\%] = \left| \frac{a_{\text{Film}} - a_{\text{Substrat}}}{a_{\text{Substrat}}} \right| \times 100$$

# Band gap of compound semiconductors

- Band gap of ternary Compound semiconductors is “between“ values of the binary compounds.
- Lineare Interpolation possible:

$$E_{gap}^{alloy}(x) = x \cdot E_{gap}^A + (1-x) \cdot E_{gap}^B$$

- Due to disorder in the compound often „bowing effects“ are observed, which can be described by nonlinear dependence.
- Improved description by a parabolic dependence:

$$E_{gap}^{alloy}(x) = E_{gap}^A + b \cdot x + c \cdot x^2$$

$x$  = Anteil von B

Compound	Direct Energy Gap $E_G$ (eV)
$Al_xIn_{1-x}P$	$1.351 + 2.23x$
$Al_xGa_{1-x}As$	$1.424 + 1.247x$
$Al_xIn_{1-x}As$	$0.360 + 2.012x + 0.698x^2$
$Al_xGa_{1-x}Sb$	$0.726 + 1.129x + 0.268x^2$
$Al_xIn_{1-x}Sb$	$0.172 + 1.621x + 0.43x^2$
$Ga_xIn_{1-x}P$	$1.351 + 0.643x + 0.786x^2$
$Ga_xIn_{1-x}As$	$0.36 + 1.064x$
$Ga_xIn_{1-x}Sb$	$0.172 + 0.139x + 0.415x^2$
$GaP_xAs_{1-x}$	$1.424 + 1.150x + 0.176x^2$
$GaAs_xSb_{1-x}$	$0.726 + 0.502x + 1.2x^2$
$InP_xAs_{1-x}$	$0.360 + 0.891x + 0.101x^2$
$InAs_xSb_{1-x}$	$0.18 + 0.41x + 0.58x^2$

# Compound semiconductors: band bowing

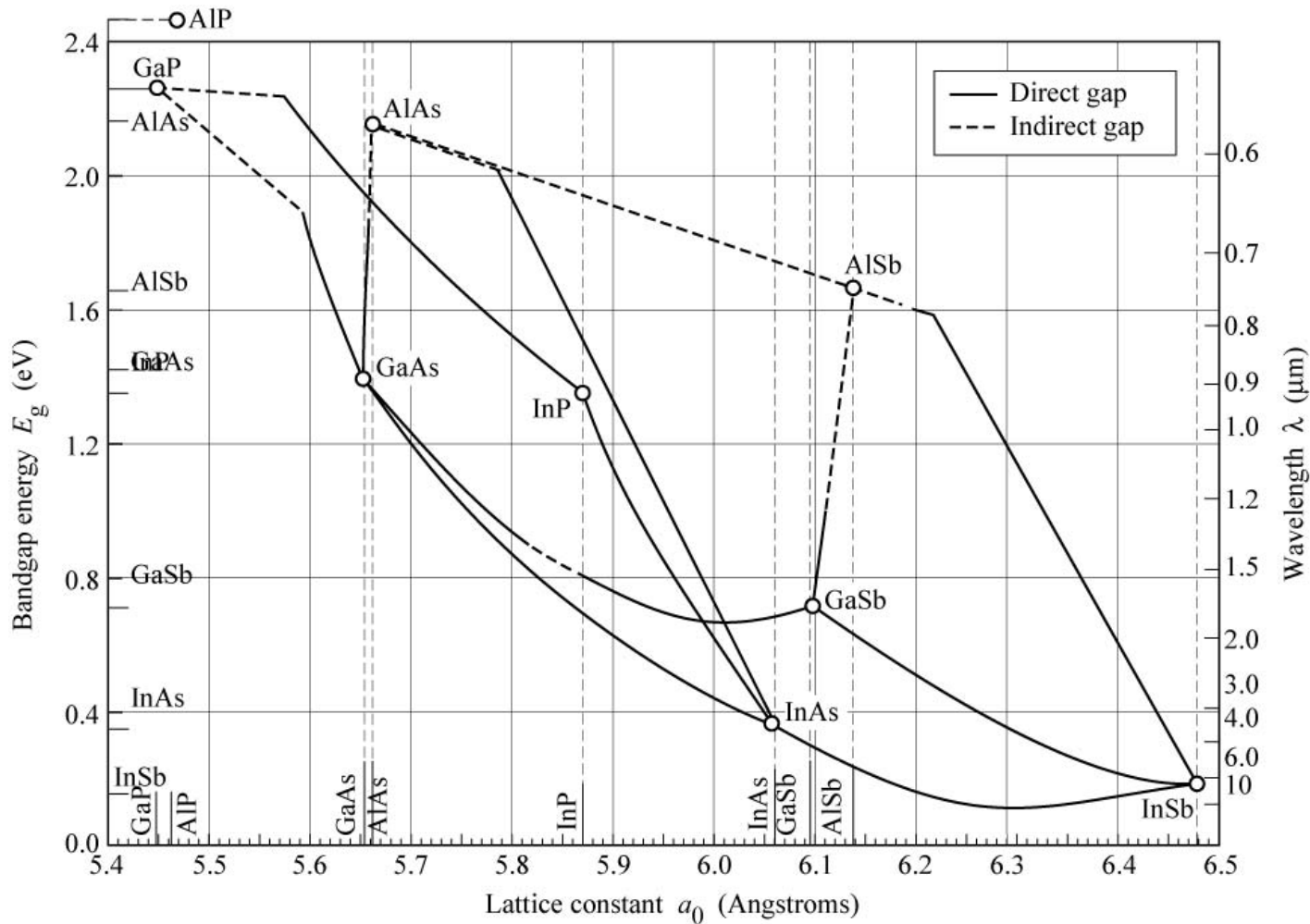


Fig. 12.6. Bandgap energy and lattice constant of various III–V semiconductors at room temperature (adopted from Tien, 1988).

# $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : direct vs. indirect

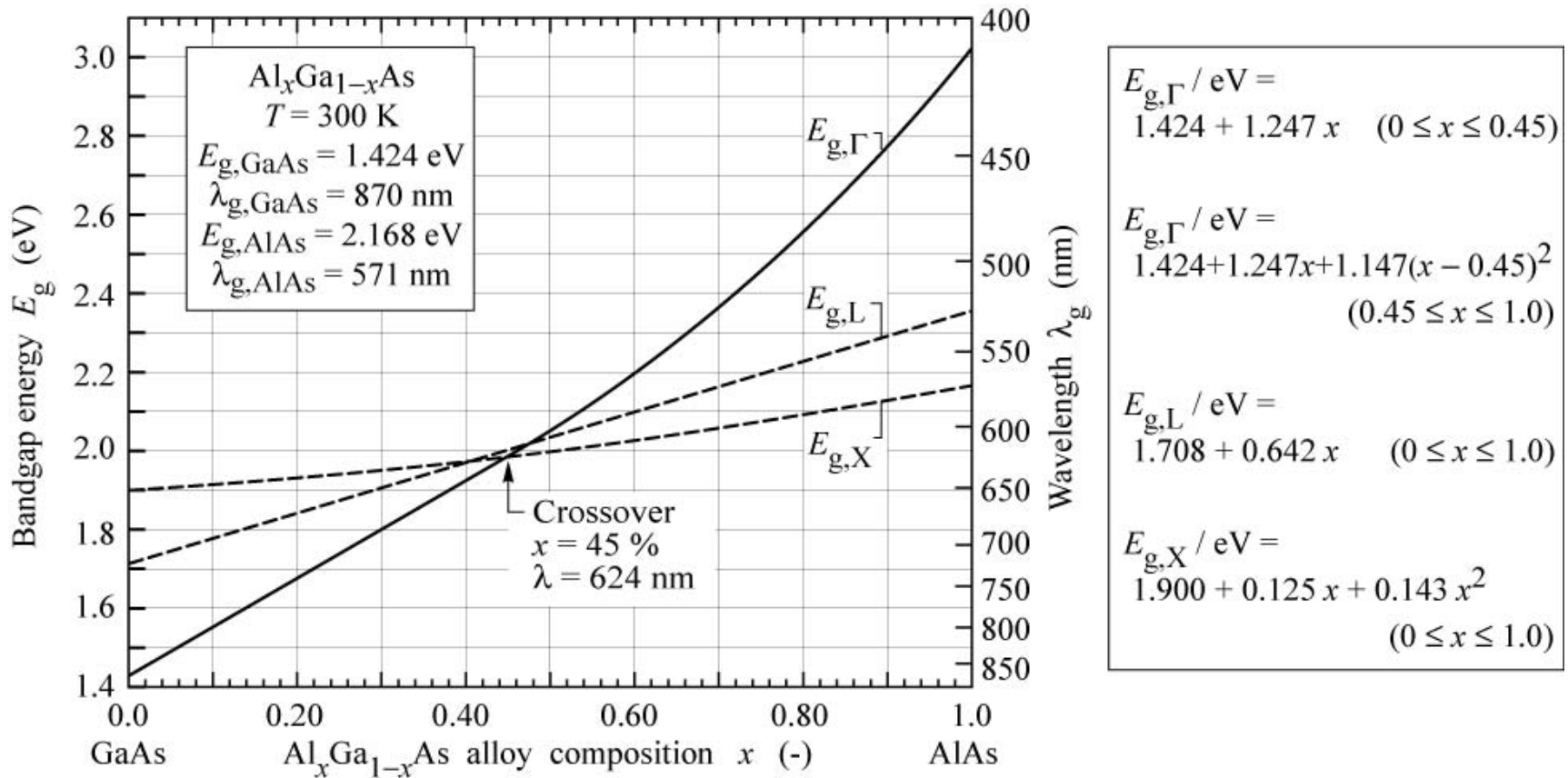


Fig. 12.7. Bandgap energy and emission wavelength of AlGaAs at room temperature.  $E_{\Gamma}$  denotes the direct gap at the  $\Gamma$  point and  $E_L$  and  $E_X$  denote the indirect gap at the L and X point of the Brillouin zone, respectively (adopted from Casey and Panish, 1978).

# classic III-V-Halbleiter

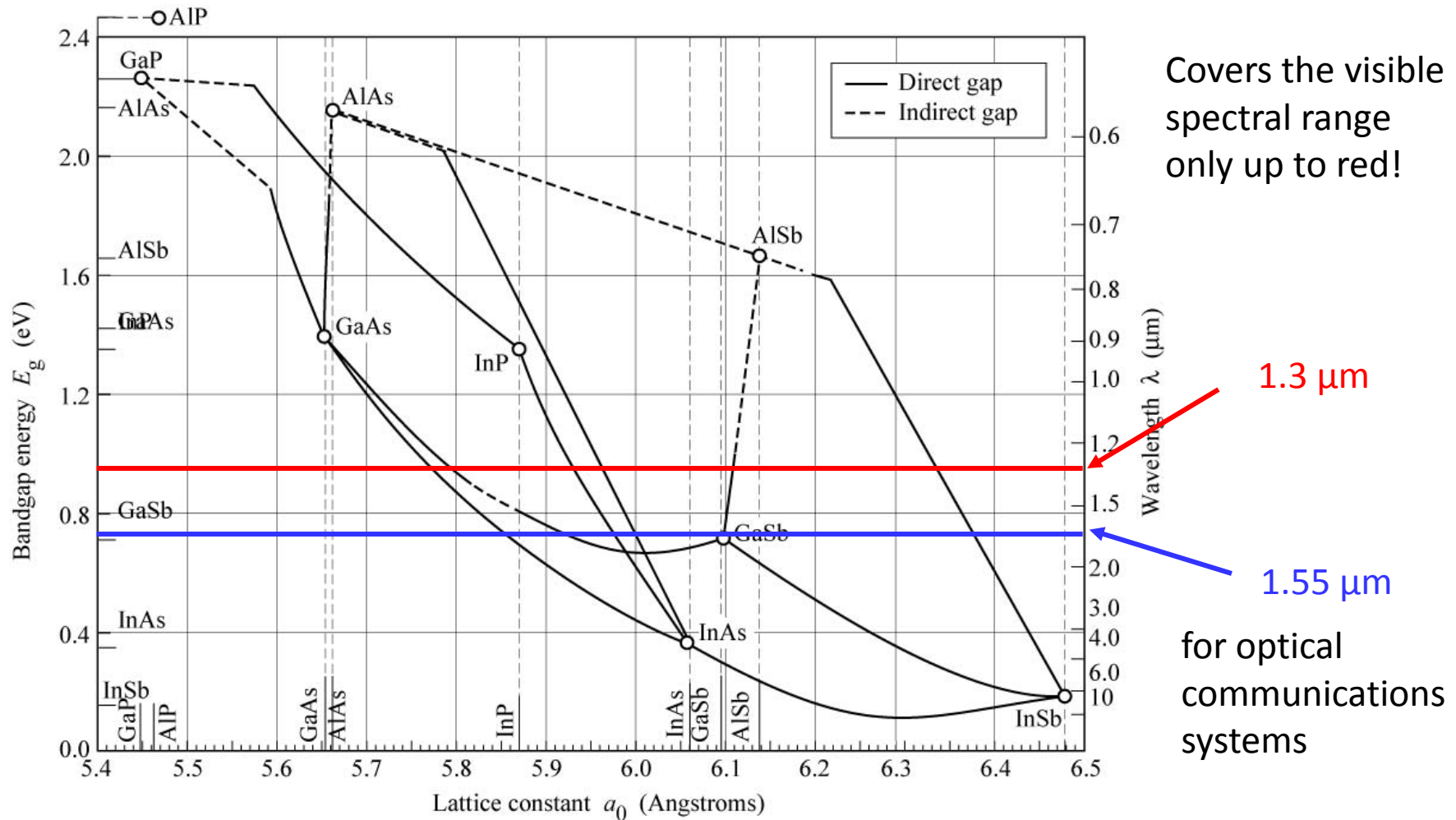
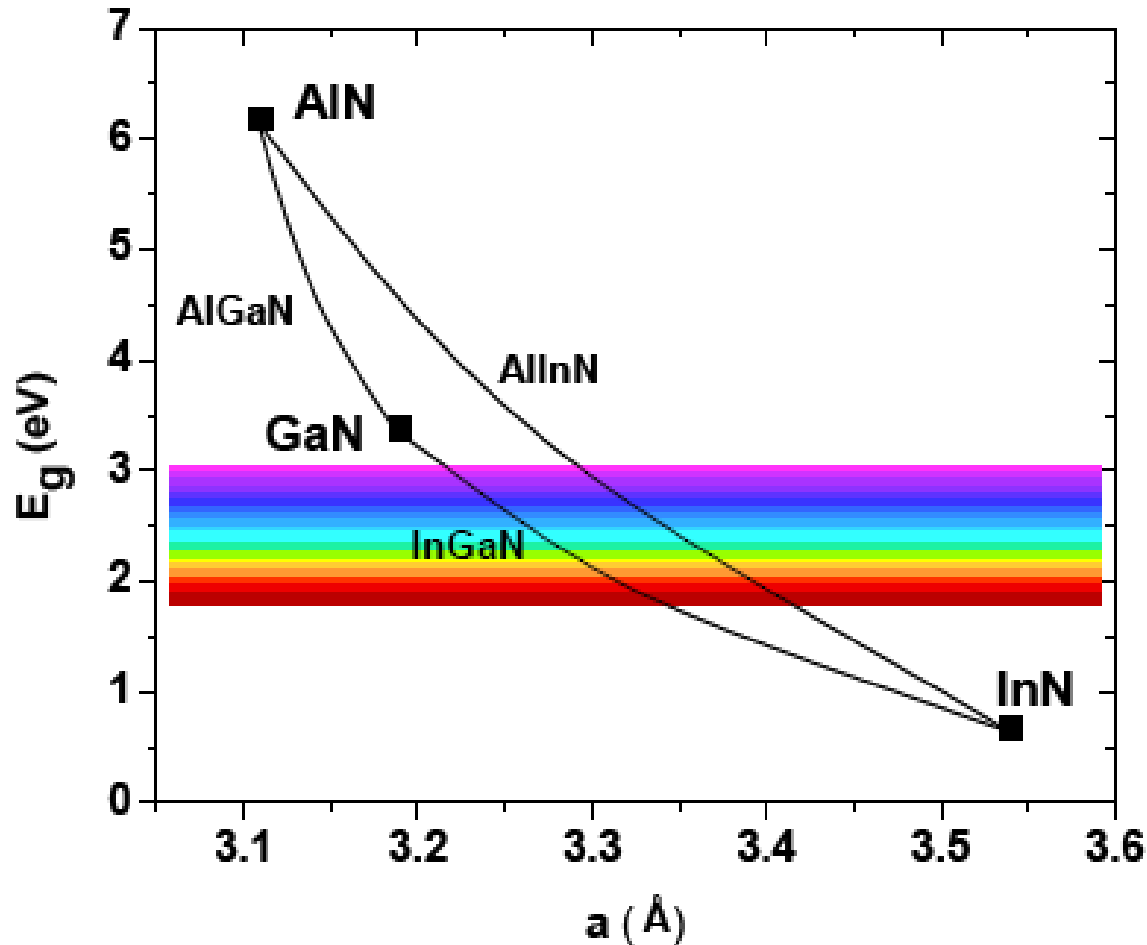


Fig. 12.6. Bandgap energy and lattice constant of various III–V semiconductors at room temperature (adopted from Tien, 1988).



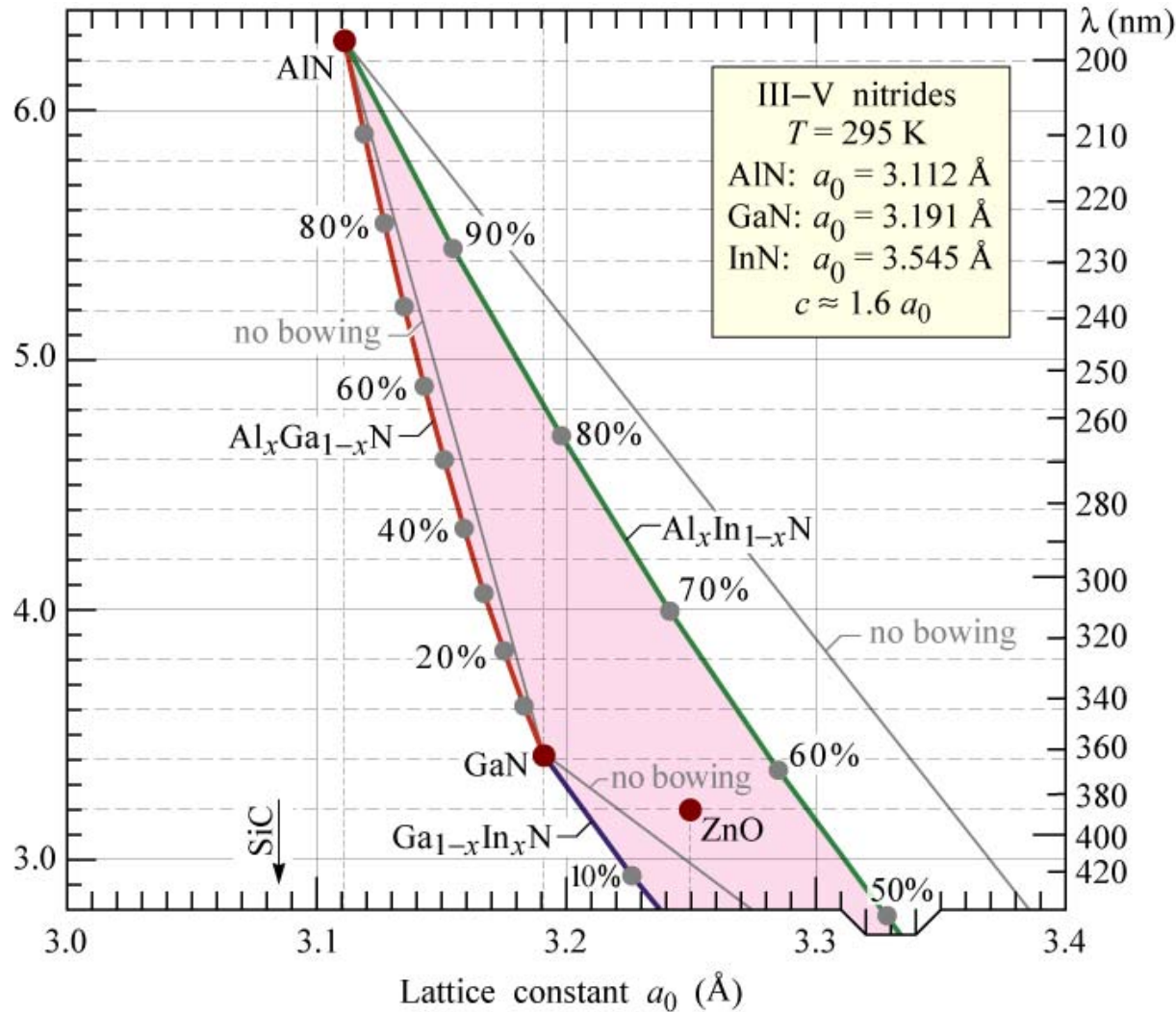
# Gruppe-III-Nitride

## WIDE-BANDGAP NITRIDE SEMICONDUCTORS



- Covers the whole visible spectral range!
- also UV!
- Very important for illumination techniques!
- Very important for the optical data storage (Blue-Ray,..)

# UV-Materials



$$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N:}$$

$$E_g = 3.42 \text{ eV} + x 2.86 \text{ eV} - x(1-x) 1.0 \text{ eV}$$

$$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N:}$$

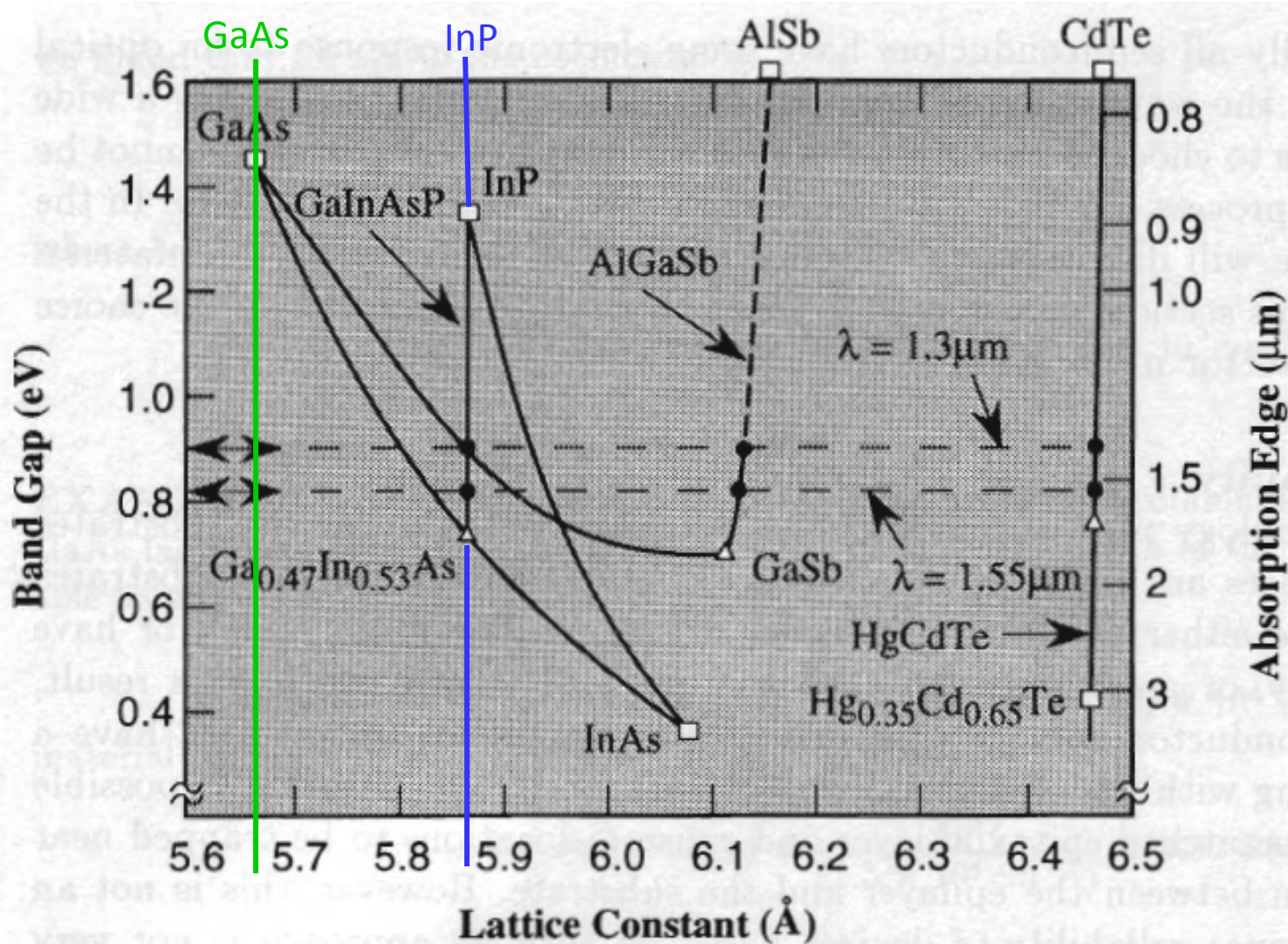
$$E_g = 3.42 \text{ eV} - x 2.65 \text{ eV} - x(1-x) 2.4 \text{ eV}$$

$$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N:}$$

$$E_g = 0.77 \text{ eV} + x 5.51 \text{ eV} - x(1-x) 3.0 \text{ eV}$$

Fig. 13.1. Bandgap energy versus lattice constant of III-V nitride semiconductors at room temperature (bowing parameters after Sizade *et al.*, 2000; Yun *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003).

# IR-Materials



Important for  
chemical  
Analytics  
(Gas sensors)

# $E_g$ vs. $T$

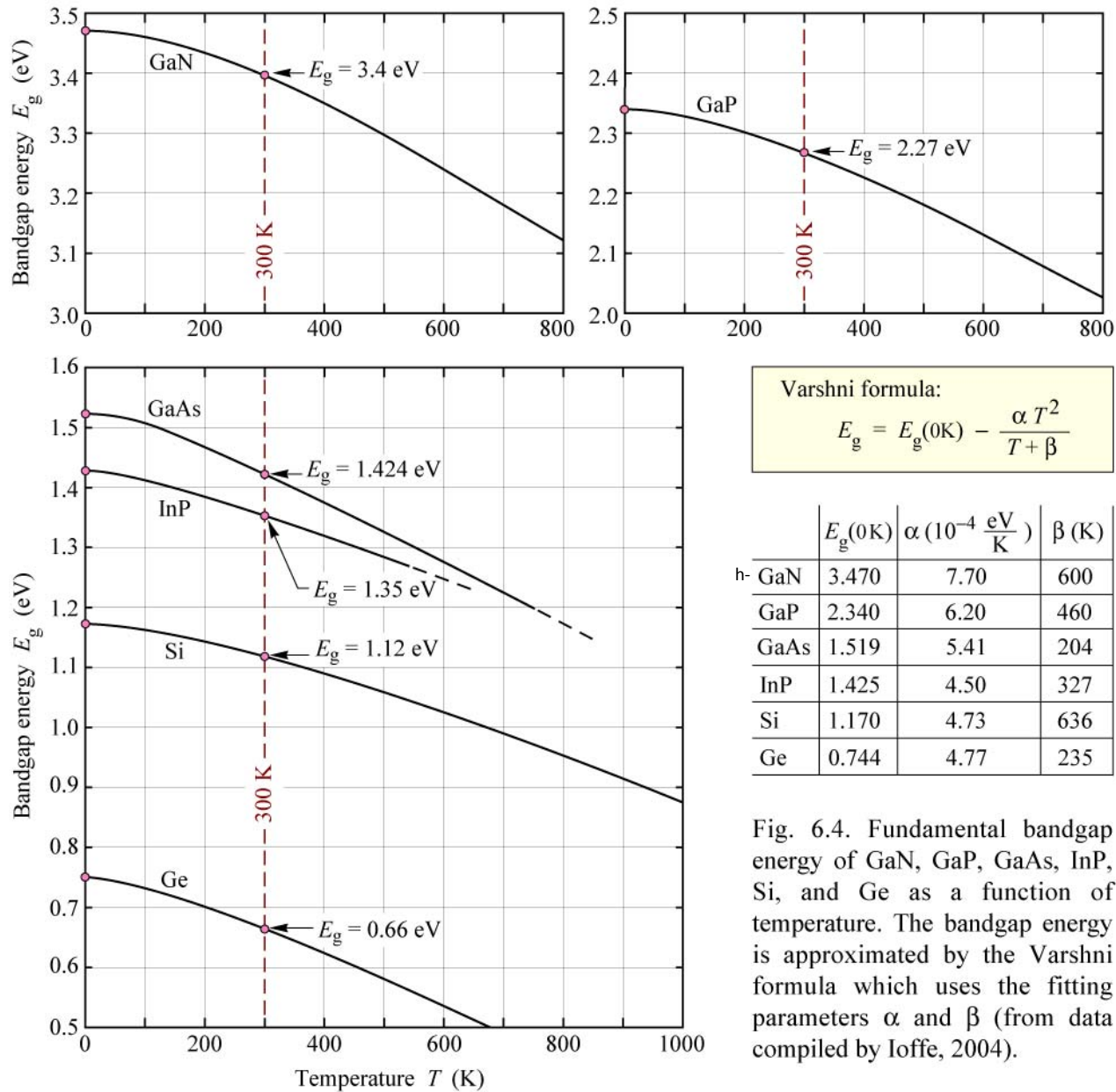


Fig. 6.4. Fundamental bandgap energy of GaN, GaP, GaAs, InP, Si, and Ge as a function of temperature. The bandgap energy is approximated by the Varshni formula which uses the fitting parameters  $\alpha$  and  $\beta$  (from data compiled by Ioffe, 2004).

- i. A. nimmt  $E_g$  mit steigendem  $T$  ab
- Rotverschiebung der Emission mit zunehmender Temperatur

$$E(eV) = \frac{1239,85}{\lambda(nm)}$$

- Temperaturdrift kann ein Problem (vor allem für Laser) sein

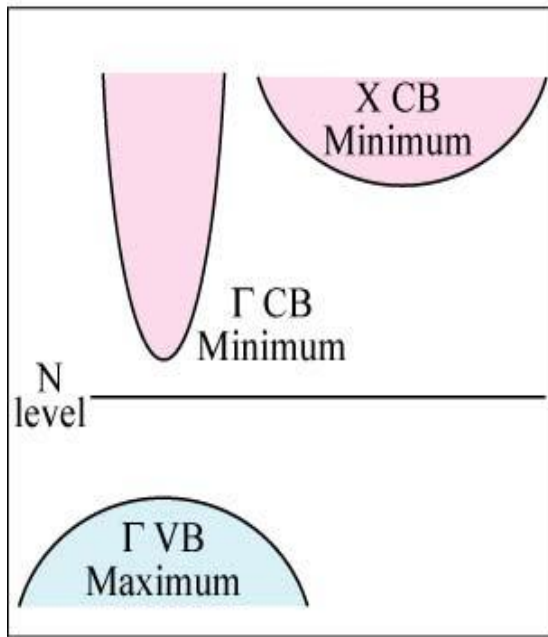
# $E_g$ vs. $T$

Semi-conductor	Type of Energy Gap	Experimental Energy Gap $E_g$ (eV)		Temperature Dependence of Energy Gap (eV)
		0 K	300 K	
AlAs	Indirect	2.239	2.163	$2.239 - 6.0 \times 10^{-4} T^2 / (T + 408)$
GaP	Indirect	2.338	2.261	$2.338 - 5.771 \times 10^{-4} T^2 / (T + 372)$
GaAs	Direct	1.519	1.424	$1.519 - 5.405 \times 10^{-4} T^2 / (T + 204)$
GaSb	Direct	0.810	0.726	$0.810 - 3.78 \times 10^{-4} T^2 / (T + 94)$
InP	Direct	1.421	1.351	$1.421 - 3.63 \times 10^{-4} T^2 / (T + 162)$
InAs	Direct	0.420	0.360	$0.420 - 2.50 \times 10^{-4} T^2 / (T + 75)$
InSb	Direct	0.236	0.172	$0.236 - 2.99 \times 10^{-4} T^2 / (T + 140)$
Si	Indirect	1.17	1.11	$1.17 - 4.37 \times 10^{-4} T^2 / (T + 636)$
Ge	Indirect	0.66	0.74	$0.74 - 4.77 \times 10^{-4} T^2 / (T + 235)$

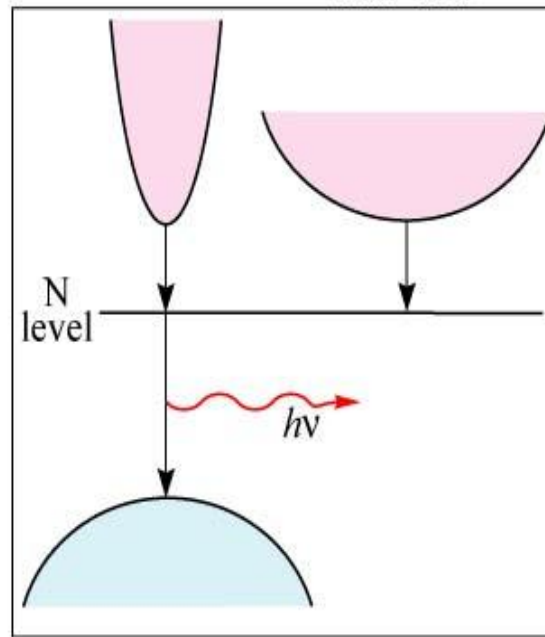
# Emission via defect levels

For light emission also defect levels are usable, e.g. the nitrogen level in the alloy GaAsP.

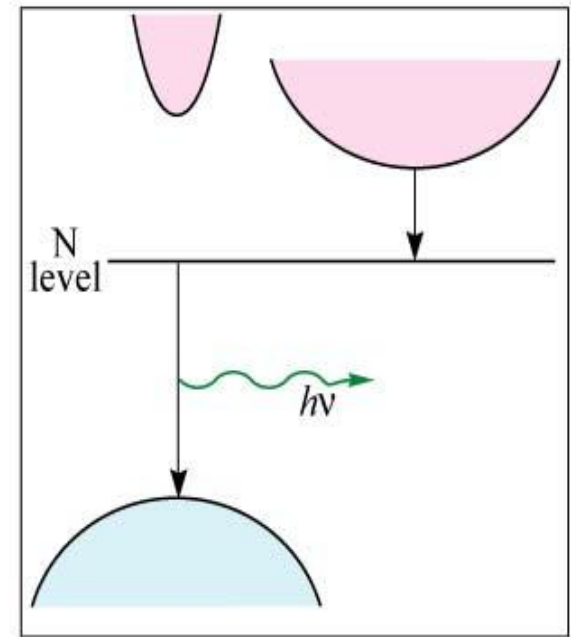
(a) Direct-gap GaAs



(b) Crossover GaAs<sub>0.50</sub>P<sub>0.50</sub>



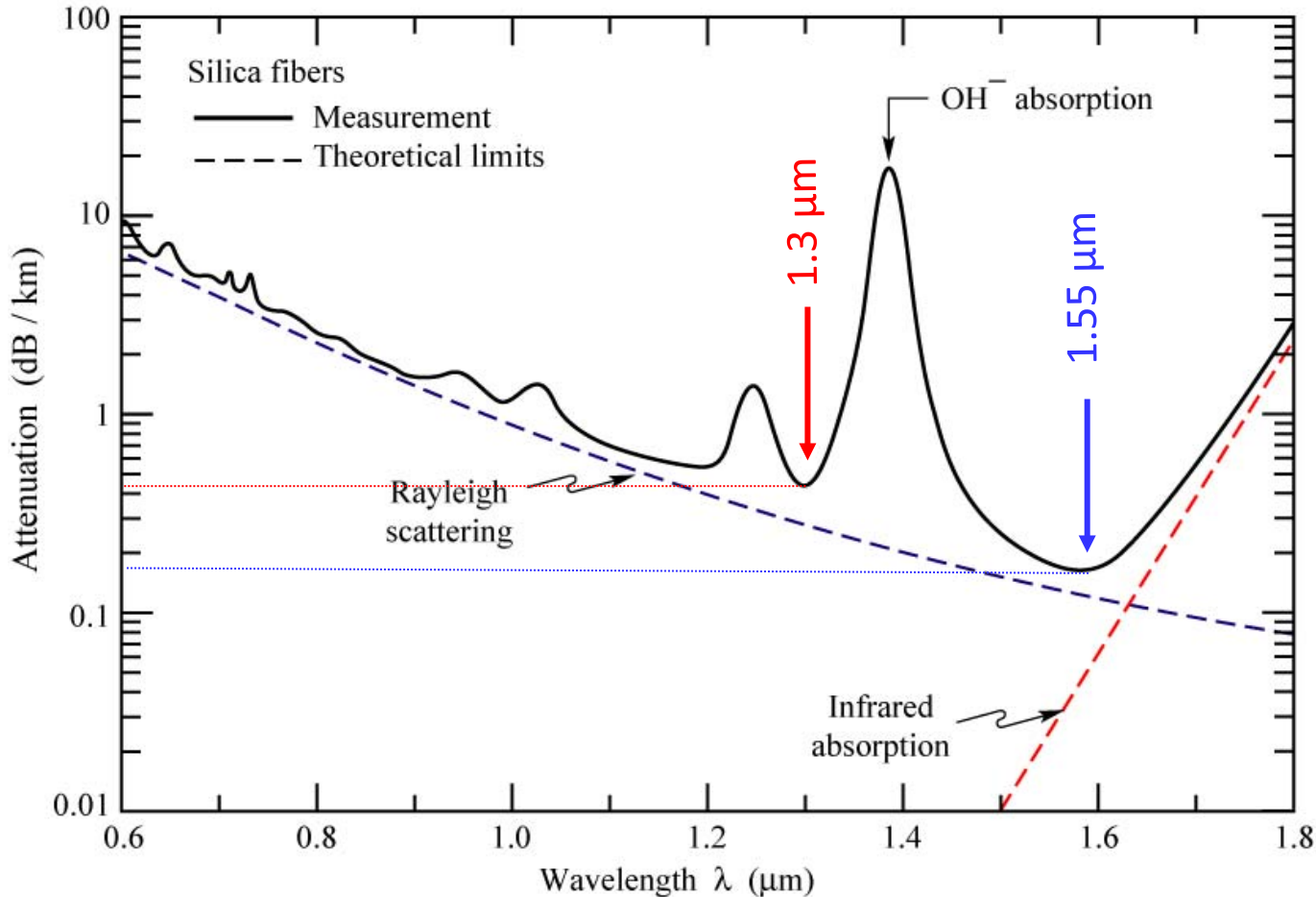
(c) Indirect-gap GaP



Emission between red and green: first red and green LEDs

**Drawback: low efficiency**

# Data transmission via SiO<sub>2</sub> - glass fiber



$$n \text{ dB} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

dB	P <sub>1</sub> /P <sub>2</sub>
3	2
10	10
20	100
0.2	1.047
0.5	1.122

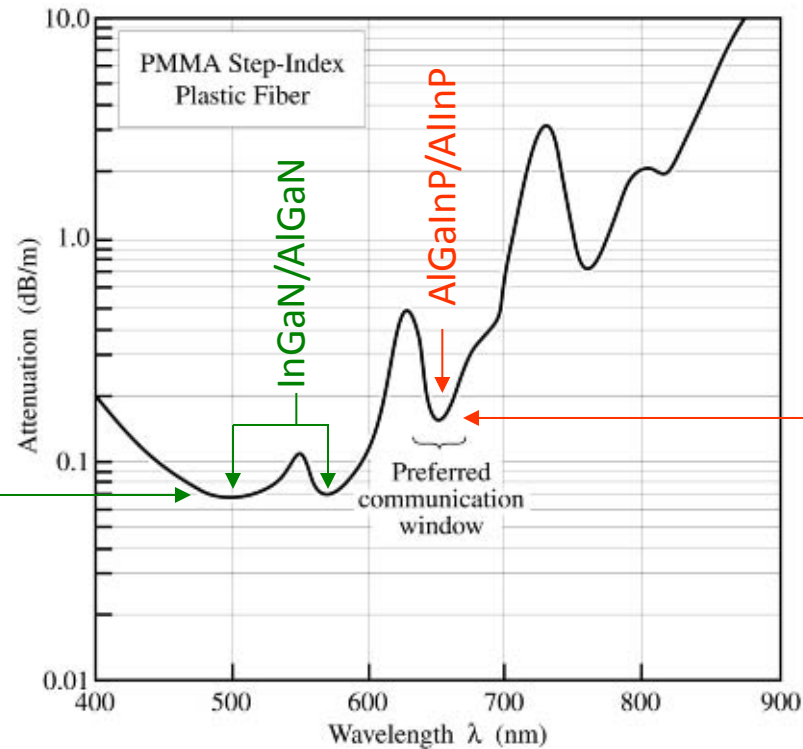
Fig. 22.2. Measured attenuation in silica fibers (solid line) and theoretical limits (dashed lines) given by Rayleigh scattering in the short-wavelength region, and by molecular vibrations (infrared absorption) in the infrared spectral region.

# Data transmission via plastic optical fiber (POF)

(PMMA polymethyl methacrylate)

**Silica fiber:**  
**0.15 dB/km**  
**(1.55  $\mu\text{m}$ )**

**70 dB/km**  
**(510 nm, 570 nm)**



**150 dB/km**  
**(650 nm)**

<i>Wavelength</i>	525 nm	560 nm	650 nm
<i>Material dispersion</i>	700 ps / (nm km)	500 ps / (nm km)	320 ps / (nm km)



# Conclusions: Material systems

## Wichtige Materialsysteme



für  $x=0.47$  gitterangepasst

$$E_{\text{gap}} = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2 \text{ (eV)}$$

## Kommentare

- gitterangepasst an InP
- großer Emissionsbereich ( $\sim 0.8$  bis  $1.35$ )
- Materialtechnologie ist fortgeschritten und kann für Kommunikationsanwendungen eingesetzt werden

## AlGaAs:

$$E_{\text{gap}} = 1.43 + 1.25x \text{ (eV); } x < 0.35$$

- gitterangepasst an GaAs
- Materialtechnologie sehr fortgeschritten und kann für LANs eingesetzt werden

## GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>:

- Material wird bei  $x=0.45$  indirekt
- durch N-dotierung: obwohl indirekt - grüne LED ( $\lambda=0.55\mu\text{m}$ )
- sehr vielseitig: rot (GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub>)  
orange (GaAs<sub>0.35</sub>P<sub>0.65</sub>:N)  
gelb (GaAs<sub>0.15</sub>P<sub>0.85</sub>:N)

## SiC, GaN, ZnS, ZnSe:

Material mit großer Bandlücke für blaues Licht und darüber

- wichtige Materialien für blaue Emission
- GaN von enormer Bedeutung, Technologie entwickelt sich schnell

## HgCdTe, PbTe, PbS, InSb:

IR Material

- wichtige Materialien für IR Emission
- Technologie noch nicht ausgereift