

1. Einführung:

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

Optische Signale werden verwendet für:

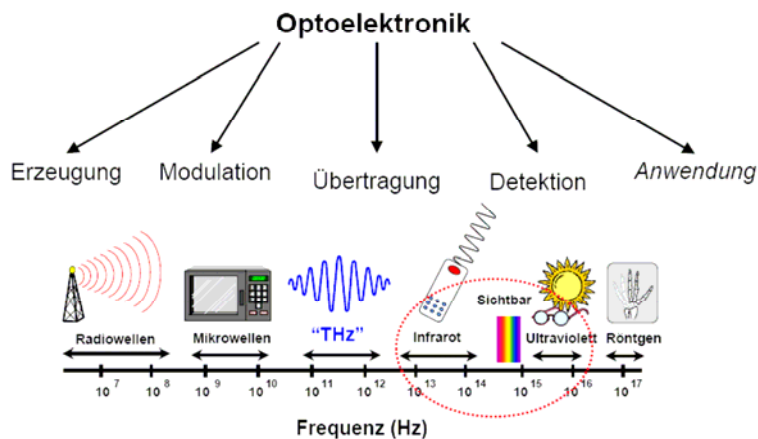
- Nachrichtenübertragung
- Anzeigesysteme (Großflächenbildschirme, Farbdisplays,...)
- Speichersysteme (Optische Disk, CD-player, DVD, ...)
- Optische Schalter
- Optische Logikbausteine -> optischer Computer

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, Notweissignalleuchten, Treppenbelichtung, ...)
- Gebäudebeleuchtung (Kirchen, Brücken, ... mit unterschiedlichen Farben)

apl.Prof. Dr. D.J. As

Die Optoelektronik umfasst viele Facetten des Wechselspiels zwischen Strom und Licht:



apl.Prof. Dr. D.J. As

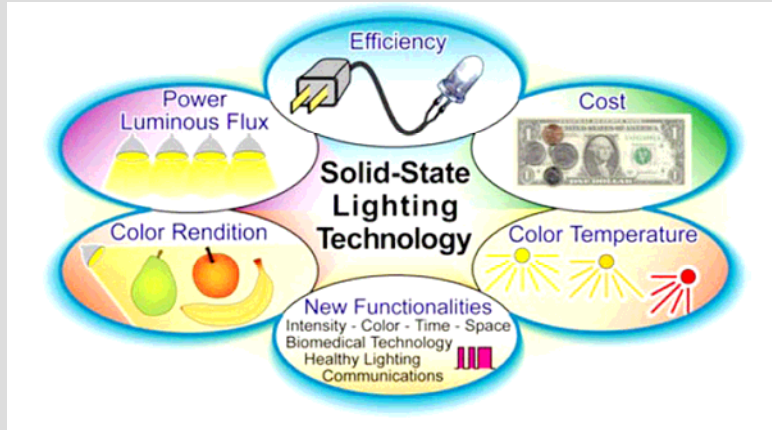
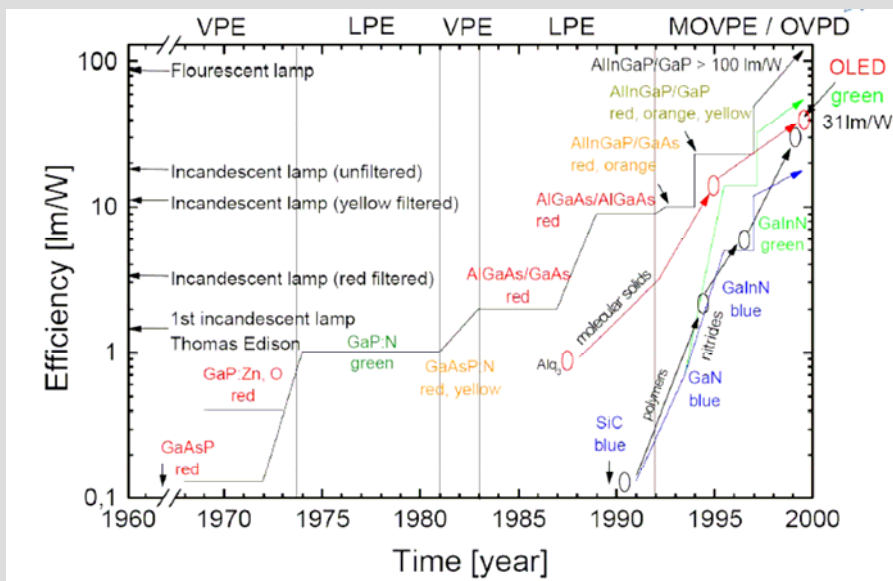


Figure A-1 Characteristics of SSL that will likely play important roles in SSL's ultimate impact on national/worldwide energy consumption and the human visual experience. [Schubert 2006]

apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As

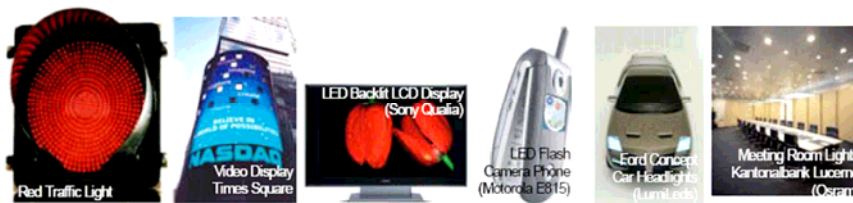
Table A-1 Cost and Performance Characteristics for Some Solid-State Lighting Technologies^{1,2}

	Product or Technology	I (A)	V (V)	Die Size (mm ²)	Output (lm)	lm/W	W _{opt} (W)	Life (hrs)	CRI	CCT (K)	Temp (°C)	λ/Δλ (nm/nm)	
Low CRI Power White Luxeon® LEDs	K2 LXNK2-PM12-R00	0.35	3.42	1.00	45.00	37.6	0.093	50 ^M	70	6500	3.4 ^M	440/20 +	
	K2 LXNK2-PM14-U00	1.00	3.72	1.00	100.00	26.9	0.067	50 ^M	70	6500	3.4 ^M	560/130	
High CRI Power Warm White Luxeon® LEDs	LXHL-BW03	0.35	3.42	1.00	26.00	21.7	0.058	50 ^M	90	3200	2.99 ^M	450/20 + 560/100 + 640/90	
Power Color Luxeon® LEDs	K2 Royal Blue LXNK2-PR12-L00	0.35	3.42	1.00	200 mW ^M	n/a	0.167	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	455/20	
	K2 Royal Blue LXNK2-PR14-Q00	1.00	3.72	1.00	475 mW ^M	n/a	0.128	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	455/20	
	K2 Blue LXNK2-PB12-K00	0.35	3.42	1.00	9.50	7.9	0.128	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	470/25	
	K2 Blue LXNK2-PB14-N00	1.00	3.72	1.00	23.00	6.7	0.108	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	470/25	
	K2 Cyan LXNK2-PE12-Q00	0.35	3.42	1.00	35.00	29.2	0.105	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	505/30	
	K2 Cyan LXNK2-PE14-T00	1.00	3.72	1.00	80.00	21.3	0.077	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	505/30	
	K2 Green LXNK2-PM12-R00	0.35	3.42	1.00	45.00	37.6	0.064	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	530/35	
	K2 Green LXNK2-PM14-U00	1.00	3.72	1.00	100.00	26.9	0.046	50 ^M	n/a	n/a	2.36 ^M	530/35	
	K2 Amber LXNK2-PA12-Q00	0.35	2.95	0.63	33.00	33.9	0.066	50 ^M	n/a	n/a	2.37 ^M	590/14	
	K2 Red-Orange LXNK2-PR12-S00	0.35	2.95	0.63	60.00	38.1	0.207	50 ^M	n/a	n/a	2.37 ^M	617/20	
	K2 Red LXNK2-PD12-R00	0.35	2.95	0.63	45.00	43.6	0.218	50 ^M	n/a	n/a	2.37 ^M	627/20	
	OLED	SSL 2002 EERE/OEDA Roadmap			11,764.70	10.00	10.0	0.025	0.3	n/a	n/a	2.00	
	High Power IR Laser	ZDSU Diode Laser (Proton 2006)						0.760					915/5
	100%-efficient hypothetical high CRI SSL	100% Efficient RYGB SSL with CRI = 90 and cap/opp = 1/3				1,900	376.4	1.000	50	90	4000	3.15	459/20 + 531/30 + 572/20 + 612/20

- Notes:
1. Data compiled in May 2006.
 2. Lifetime for White Luxeon K2 is projected as 70% lumen maintenance at 50,000 hours at 1000 mA operation, T_j maintained at or below 120 °C.
 3. Price listed is for volumes up to 10K units. Higher volume pricing is negotiated depending on customer and application specific requirements.
 4. Lifetime for White Luxeon is projected as 70% lumen maintenance at 50,000 hours at 350 mA operation, T_j maintained at or below 90 °C.
 5. Royal Blue product is tested and binned for radiometric power rather than photometric flux.
 6. Lifetime for Royal Blue, Blue, Green and Cyan Luxeon K2 is projected as 70% lumen maintenance at 50,000 hours (1000 mA operation, T_j ≤ 150 °C).
 7. Lifetime for Red, Red-Orange, and Amber Luxeon K2 is projected as 70% lumen maintenance at 50,000 hours at 350 mA operation, T_j ≤ 120 °C.

apl.Prof. Dr. D.J. As

1. Einführung



Die **Licht emittierende Diode (LED)** ist eins der einfachsten **optoelektronischen Bauelemente**, welches besonders wichtige Anwendung in der **Displaytechnologie** (Hintergrundbeleuchtung von Handydisplays) als auch als **optische Signalquelle** für optische Nachrichtenübermittlung bekommen hat.

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

Nachteile sind jedoch:

- niedrige optische Ausgangsleistung (stimmt nur mehr teilweise)
- breites und inkohärentes Spektrum
- langsamer Bauelementeresponce (< 100 MHz)

Die **Basis** für eine **LED** ist ein vorwärtsbespannter **p-n-Übergang**

apl.Prof. Dr. D.J. As

2. Materialsysteme für LEDs

7

Die LED ist die Grundvoraussetzung für eine Laserdiode (LD), deren Anwendung für Modulationsgeschwindigkeiten oberhalb von 5 GHz benötigt werden oder wo spektral reine optische Ausgänge benötigt werden.

Spektrale Breite einer LED: $\sim k_B T$ dies entspricht bei Raumtemperatur (~ 26 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 und Löcher in das p- und 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.

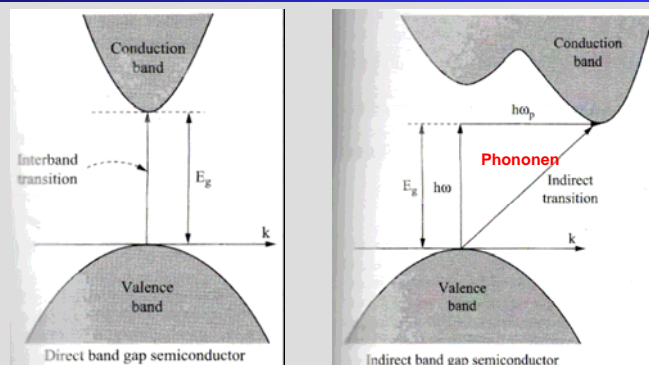
In **indirekten Halbleitern** (wie z.B. Si) erfolgt die Rekombination überwiegend zur Erzeugung von Phononen (Gitterschwingungen) und damit **nichtstrahlend**.

→ LED = p-n Übergang an direktem Halbleiter

apl.Prof. Dr. D.J. As

Direkt – indirekte Halbleiter

8



Wichtige Überlegungen zur Auswahl eines Halbleiters für LED oder Laserdioden:

- **Emissionsenergie** (Wellenlänge für den jeweiligen Anwendungsbereich)
- **Verfügbarkeit eines geeigneten Substrates** (Herstellung von epitaktischen Schichten)

Zusammenhang Energie – Wellenlänge:

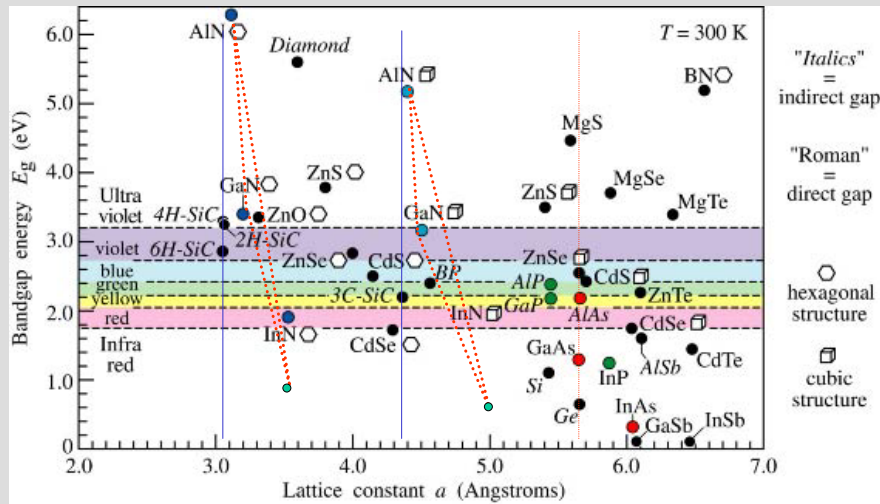
$$E(eV) = \frac{1239,85}{\lambda(nm)}$$

apl.Prof. Dr. D.J. As

Emissionsenergie

9

Das von einem Halbleitermaterial emittierte Licht ist eng mit dessen Bandlücke verknüpft und die injizierten Elektronen und Löcher werden durch Quasi-Fermiverteilungsfunktionen beschrieben.



apl.Prof. Dr. D.J. As

Substratverfügbarkeit

10

So gut wie alle optoelektronischen Lichtquellen hängen von der epitaktischen Kristallzuchtmethode ab, wobei dünne aktive Schichten (~ einige Mikrometer) auf einem dicken Substrat (~ 200 μm) abgeschieden werden. Die Verfügbarkeit von hoch qualitativen Substraten ist für die Epitaxie-Technologie jedoch extrem wichtig, da es bei Substraten, die nicht Gitter angepaßt sind, zur Bildung von Versetzungslinien und anderen nichtstrahlenden Defekten kommt. Dies kann aber katastrophale Auswirkungen auf die Performance, bzw. Leistung des Bauelements haben.

Die **wichtigsten verfügbaren Substrate** für die LED-Technologie sind:

- | | |
|-----------------------|--|
| a) Si | } genügend rein, kommerziell erhältlich, groß genug
(2-3 Zoll) |
| b) GaAs | |
| c) InP | |
| d) Sapphir | |
| e) LiNbO ₂ | |

Nur einige wenige Halbleiter und deren Verbindungen sind jedoch gitterangepaßt an diese Substrate

apl.Prof. Dr. D.J. As

Die Gitterkonstante einer Verbindung ist der gewichtete Mittelwert der einzelnen Komponenten, d.h. die Gitterkonstante der Verbindung A_xB_{1-x} ist. (z.B. A = GaAs, B= InAs)

$$a = x \cdot a_A + (1-x) \cdot a_B \quad \text{Vegard's law}$$

Wobei a_A und a_B die Gitterkonstanten der Materialien A und B sind. Dieses lineare Interpolationsgesetz wird als Vegard'sches Gesetz bezeichnet.

Wichtige Halbleitermaterialien für die Optoelektronik sind:

- a) $Ga_xAl_{1-x}As$ gitterangepasst an GaAs
- b) $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ gitterangepasst an GaAs
- c) $In_{0.52}Al_{0.48}As$ gitterangepasst an InP
- d) InGaAsP gitterangepasst an InP

MATERIAL	CRYSTAL STRUCTURE	BANDGAP (eV)	DIRTY CONSTANT	LATTICE CONSTANT (Å)	DENSITY (g/cm ³)
C	DI	5.50, I	3.570	3.5668	3.5133
Si	DI	1.1242, I	11.9	3.571	2.3290
SiC	ZB	2.416, I	9.72	4.3596	3.196
Ge	DI	0.668, I	16.2	3.659	5.323
AIN	W	6.2, D	Z=9.14	a=3.111 c=4.981	3.255
AlP	ZB	2.45, I	9.8	3.6635	2.401
AlAs	ZB	2.153, I	10.06	3.660	3.760
GaN	W	3.44, D	$\epsilon_0 = 10.4$	a=3.175 c=5.178	6.095
GaP	ZB	2.272, I	11.11	3.650	4.138
GaAs	ZB	1.424, D	13.18	3.653	5.118
GaSb	ZB	0.75, D	15.69	4.0699	5.6177
InN	W	1.89, D	—	a=3.546 c=5.7034	5.81
InP	ZB	1.344, D	12.56	3.6687	4.81
InAs	ZB	0.354, D	15.15	3.658	5.607
InSb	ZB	0.230, D	16.8	4.079	5.775
ZnS	ZB	3.68, D	8.9	3.6102	4.079
ZnSe	W	3.9107, D	Z=9.6	a=3.8226 c=6.205	4.084
ZnTe	ZB	2.822, D	9.1	3.668	5.266
ZnTe	ZB	2.394, D	8.7	3.604	5.636
CdS	W	2.501, D	Z=9.38	a=4.1362 c=6.714	4.82
CdSe	ZB	2.50, D	—	3.818	—
CdTe	W	1.751, D	$\epsilon_0 = 10.16$ $\epsilon_1 = 9.29$	a=4.2999 c=7.0109	5.81
CdTe	ZB	1.475, D	10.2	3.682	5.87
PbS	R	0.41, D*	169	3.936	7.967
PbSe	R	0.278, D*	210	3.617	8.26
PbTe	R	0.310, D*	414	3.662	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, ϵ_0 indirect, ϵ_1 parallel to c-axis, ϵ_c perpendicular to c-axis

Auch für die Bandlücke von Verbindungshalbleitern gibt es eine Interpolationsformel. Aufgrund der Unordnung in der Verbindung treten jedoch häufig Verbiegungseffekte auf die zu einer nichtlinearen Abhängigkeit führen.

Meistens wird die Abhängigkeit durch eine parabolische Funktion beschreiben:

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

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

Compound	Direct Energy Gap E _g (eV)
Al _{1-x} In _x P	1.351 + 2.23x
Al _{1-x} Ga _x As	1.424 + 1.247x
Al _{1-x} In _x As	0.360 + 2.012x + 0.698x ²
Al _{1-x} Ga _x Sb	0.726 + 1.129x + 0.368x ²
Al _{1-x} In _x Sb	0.172 + 1.621x + 0.43x ²
Ga ₂ In _{1-x} P	1.351 + 0.643x + 0.796x ²
Ga ₂ In _{1-x} As	0.36 + 1.064x
Ga ₂ In _{1-x} Sb	0.172 + 0.139x + 0.415x ²
GaP _{1-x} As _x	1.424 + 1.150x + 0.176x ²
GaAs _{1-x} Sb _x	0.726 + 0.502x + 1.2x ²
InP _{1-x} As _x	0.360 + 0.891x + 0.101x ²
InAs _{1-x} Sb _x	0.18 + 0.41x + 0.58x ²

apl.Prof. Dr. D.J. As

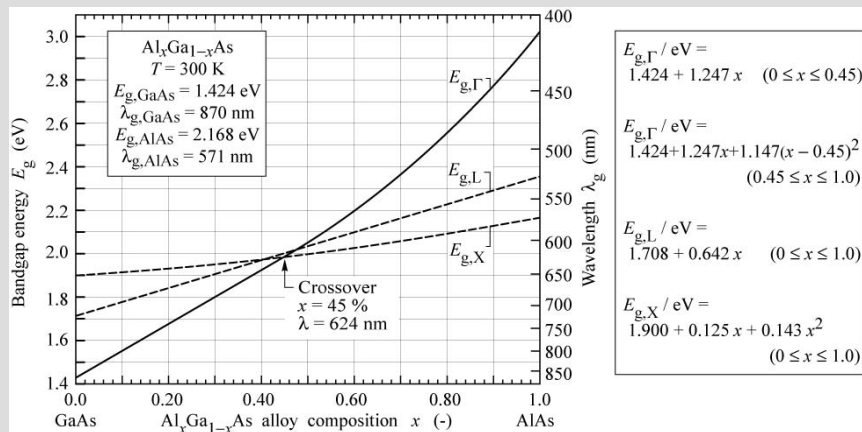
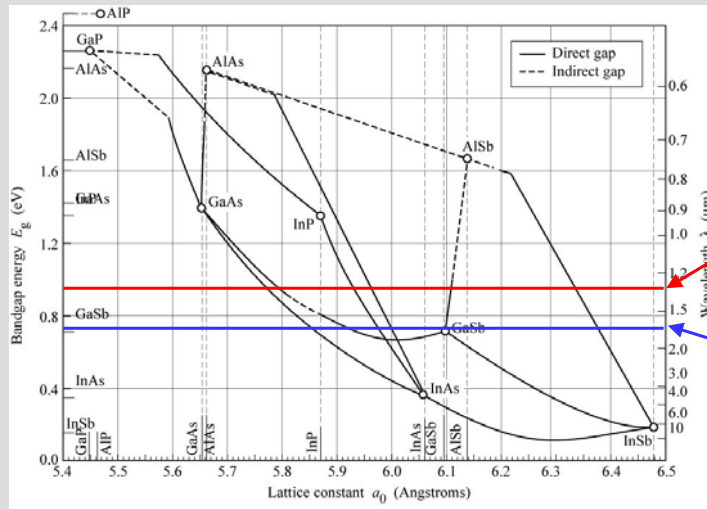


Fig. 12.7. Bandgap energy and emission wavelength of AlGaAs at room temperature. E_Γ denotes the direct gap at the Γ point and E_L and E_X denote the indirect gap at the L and X point of the Brillouin zone, respectively (adopted from Casey and Panish, 1978).

apl.Prof. Dr. D.J. As

III - V Materialien

15



Für optische Nachrichtenübertragung

1.3 μm

1.55 μm

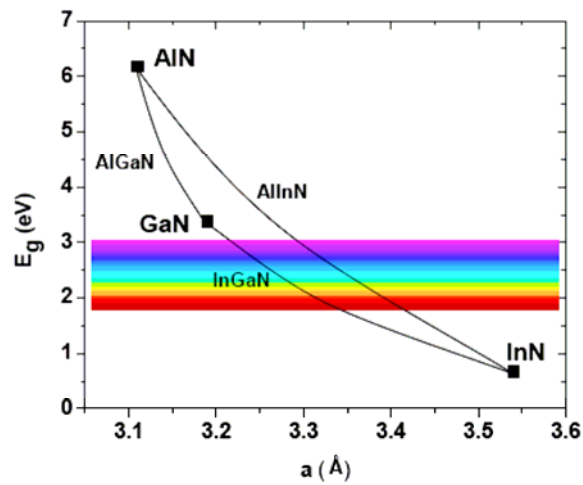
Fig. 12.6. Bandgap energy and lattice constant of various III-V semiconductors at room temperature (adopted from Tien, 1988).

apl.Prof. Dr. D.J. As

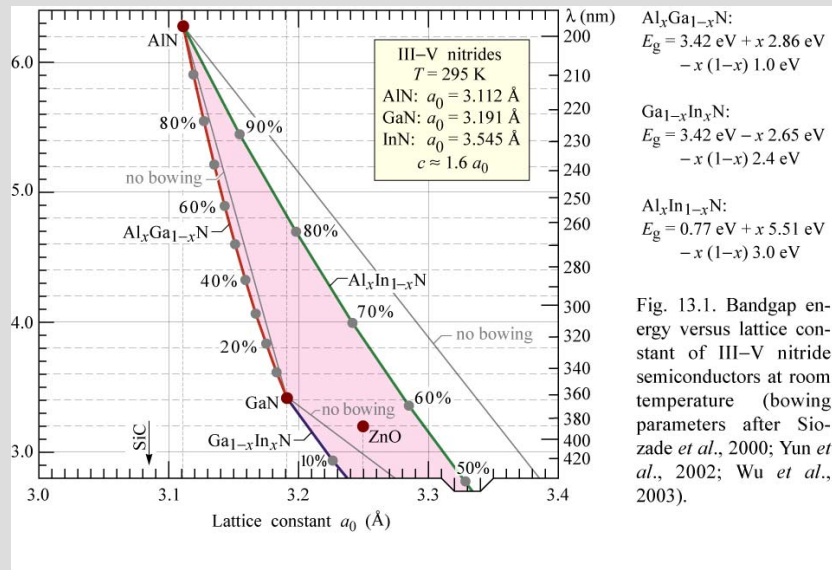
III - Nitride

16

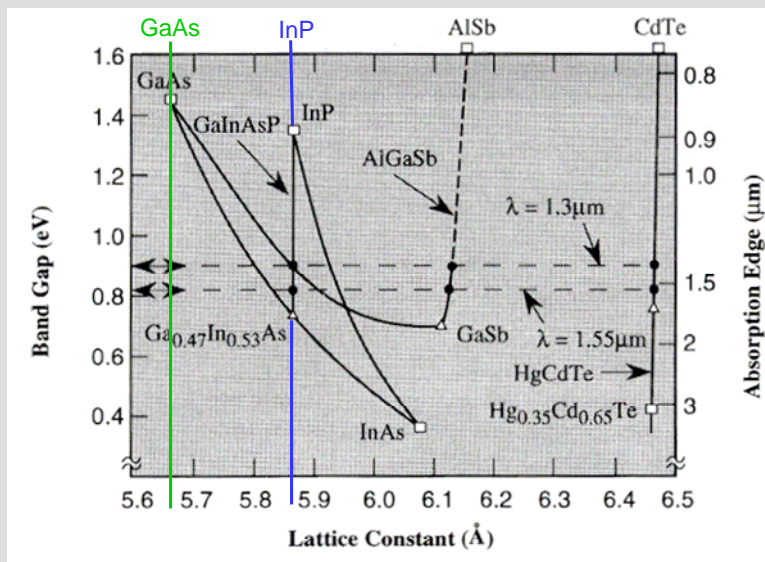
WIDE-BANDGAP NITRIDE SEMICONDUCTORS



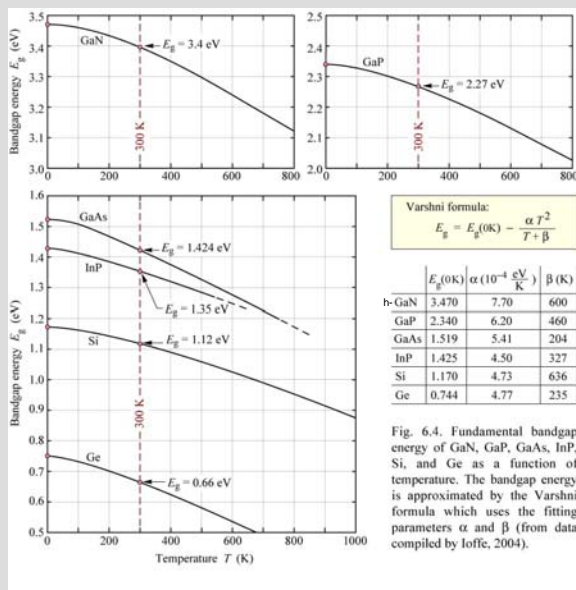
apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As



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

Die Änderung der Bandlücke mit der Temperatur bewirkt damit eine Rotverschiebung der Wellenlänge mit zunehmender Temperatur.

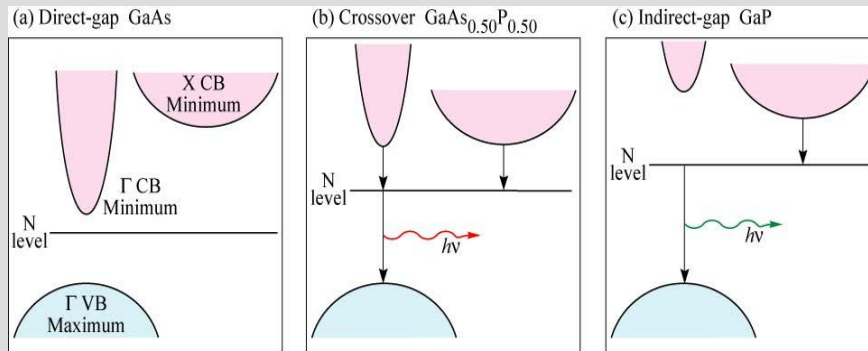
apl.Prof. Dr. D.J. As

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 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 408)
GaP	Indirect	2.338	2.261	2.338-5.771 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 372)
GaAs	Direct	1.519	1.424	1.519-5.405 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 204)
GaSb	Direct	0.810	0.726	0.810-3.78 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 94)
InP	Direct	1.421	1.351	1.421-3.63 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 162)
InAs	Direct	0.420	0.360	0.420-2.50 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 75)
InSb	Direct	0.236	0.172	0.236-2.99 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 140)
Si	Indirect	1.17	1.11	1.17-4.37 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 636)
Ge	Indirect	0.66	0.74	0.74-4.77 x 10 ⁻⁴ T ² (T + 235)

Table B.1: Energy gaps of some semiconductors along with their temperature dependence

apl.Prof. Dr. D.J. As

Zur Emission von Licht können auch Defektniveaus verwendet werden, z.B. das Stickstoffniveau in dem Mischkristall system GaAsP.



Emission von rot bis grün: erste rote und grüne LEDs

Nachteil: geringe Effizienz

apl.Prof. Dr. D.J. As

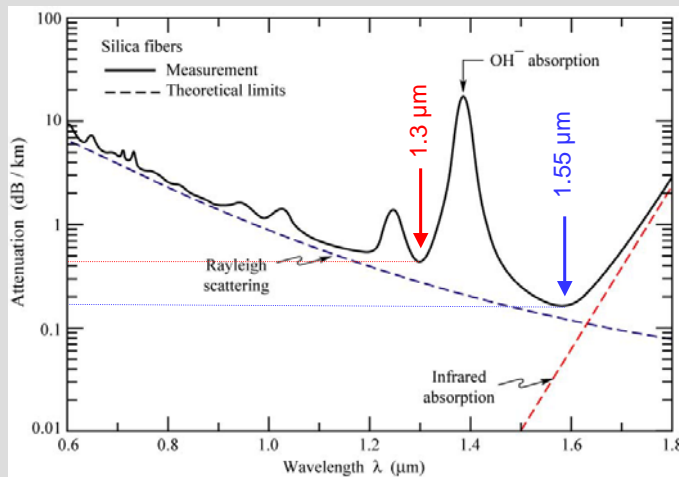


Fig. 22.2. Measured attenuation in silica fibers (solid line) and theoretical limits (dashed lines) given by Rayleigh scattering in the short-wavelength region, and by molecular vibrations (infrared absorption) in the infrared spectral region.

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

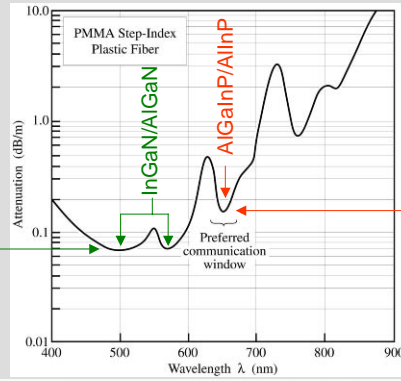
dB	P_1/P_2
3	2
10	10
20	100
0.2	1.047
0.5	1.122

apl.Prof. Dr. D.J. As

(PMMA polymethyl methacrylate)

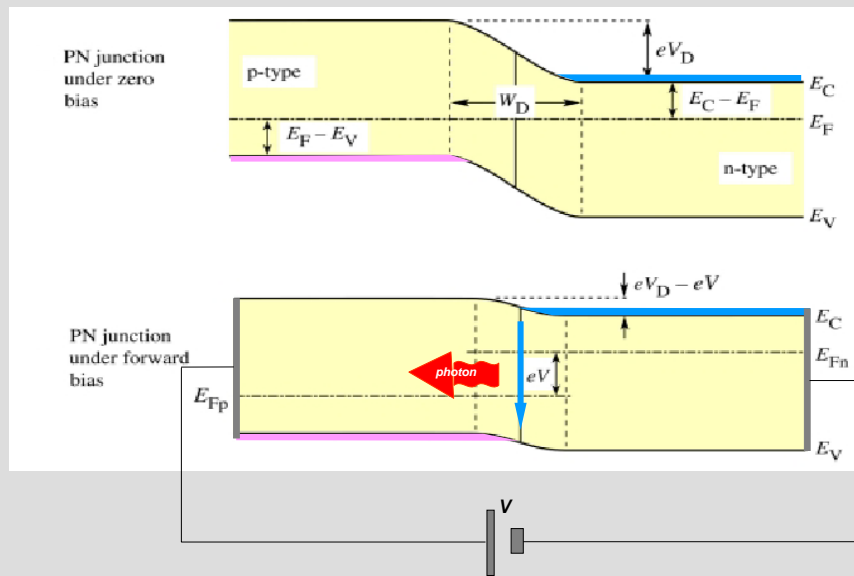
Silica fiber:
0.15 dB/km
(1.55 μm)

70 dB/km
(510 nm, 570 nm)



150 dB/km
(650 nm)

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



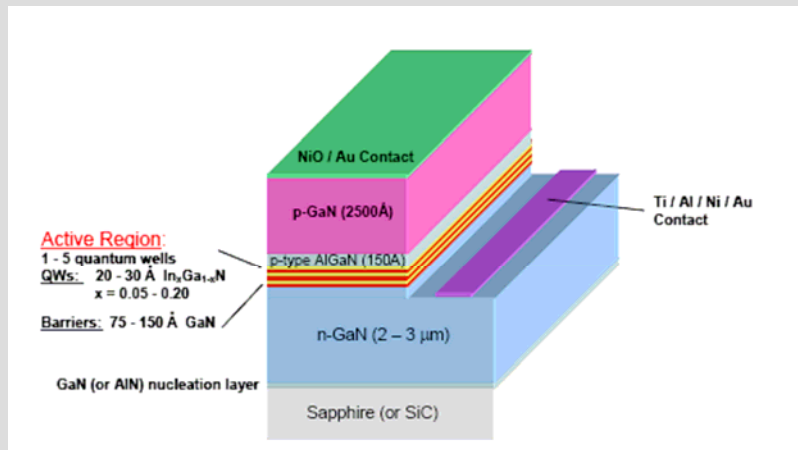


Figure A-10 Schematic of a nitride LED.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Wichtige Materialsysteme

Kommentare

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$:
 für $x=0.47$ gitterangepasst
 $E_{\text{gap}}=1.35-0.72y+0.12y^2$ (eV)

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

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

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

$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$:

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

SiC, GaN, ZnS, ZnSe:
 Material mit großer Bandlücke für blaues Licht und darüber

- wichtige Materialien für blaue Emission
- Technologie noch nicht ausgereift, aber entwickelt sich sehr schnell

HgCdTe, PbTe, PbS, InSb:
 IR Material

- wichtige Materialien für IR Emission
- Technologie noch nicht ausgereift

apl.Prof. Dr. D.J. As