


Eduard Hulicius o Nobelově ceně za fyziku udělené v roce 2014

Eduard Hulicius

*FZÚ AV ČR, v.v.i., učí na FJFI-ČVUT, TUL a spolupracuje s MFF, FEL, MU, VŠCHT, ...
Absolvent KIPL FJFI, hab. na FEL, prof. na FJFI.*

- 
- 28. 11. 1895 v Paříži podepsal Alfred Nobel závět', podle které měly být udělovány ceny vědcům, politikům, lidem, kteří v **předešlém roce** přinesli ve své oblasti **největší přínos**.
 - Teď je to pět oblastí:

Fyzika

Chemie

Medicína, fyziologie

Literatura

Mír



Nobelovy ceny za fyziku

Udílají se od r. 1901

108 vyhlášení Nobelových cen

Žádná cena nebyla udělena v letech:

1916, 1931, 1934, 1940, 1941, 1942

Za fyziku bylo uděleno 199 cen 198 lidem

John Bardeen 2x – 1956 a 1972

W. Lawrence Bragg, 1915, ve věku 25 let, napůl s
otcem W. Henry Bragg

(M. Curie-Sklodovská – fyzika i chemie)




Nobelova cena za fyziku v roce 2014 byla udělena:

„za vývoj účinných modrých luminiscenčních diod (LED x lumidek ?) umožňujících vytvoření nového, jasného a úsporného bílého světelného zdroje“


Isamu Akasaki, Hiroshi Amano a Shuji Nakamura

"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"



Jednou za čas se vážení členové výboru Královské švédské akademie věd pro udílení Nobelových cen za fyziku¹ rozhodnou udělit cenu za práce, které částečně vyhovují původnímu Nobelovu zadání „udělit cenu za nejdůležitější objev či vynález“². Dnes se můžeme jen dohadovat, co důležitostí objevu Alfred Nobel³ myslel, faktem je, že dosud bylo uděleno mnohem víc cen za fundamentální vědecký význam než za v době udělení známou aplikovatelnost, natož za vynálezy, přesto i těch je řada⁴. Roentgen?⁵

Nobelův požadavek „v předchozím roce“ byl však ze zřejmých důvodů opuštěn.



Nobelova cena za fyziku v roce 2014, která byla udělena „Za vývoj modrých světelných diod umožňujících vytvoření nového, ekologického světelného zdroje.“ je podle našeho názoru přesně na pomezí velmi důležitého aplikovatelného objevu a vynálezu. Domníváme se, že A. Nobel by měl radost.

Teoretické práce, které vedly k realizaci modrých LED, byly oceněny již dříve (např. v roce 2000). Práce laureátů, které byly oceněny, mají a budou mít velký dopad nejen na ekologii, jak se přímo píše ve zdůvodnění, ale i na ekonomii a to jak pro výrobce, tak i pro uživatele.

Jediní, kdo asi nemají radost, jsou astronomové, levné a silné zdroje světla zvyšují planetární světelný smog.

Bohužel možný pozitivní ekonomický význam pro uživatele lze relativizovat, neb zkušenost z vyspělých zemí ukazuje, že místo, aby se ušetřilo - bude se víc svítit.



O co vlastně jde: LED (Světlo emitující diody) i LD (diodové lasery)

Historie:

1907(!) - První elektroluminiscenční dioda - SiC, H.J. Round , znovu objeveno Losevem v r. **1928**.

1936 - Destriau - LED z ZnS.

1952 - Welker - $A^{III}B^V$ (GaAs).

1962 - Lasery (RCA, GE, IBM, MIT).

60-90 léta - Rozvoj epitaxních technologií.

70-90 léta - **Zavedení heterostruktur (NC 2000)** a QW (kvantových jam - nanotechnologie).

1977 - Vyřešení rychlé degradace laserů i diod (bezdislokační substr.!).

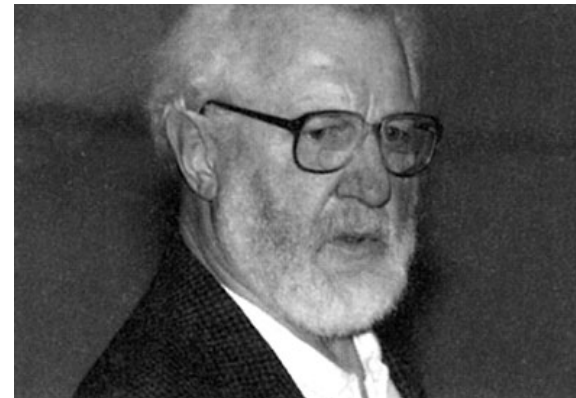
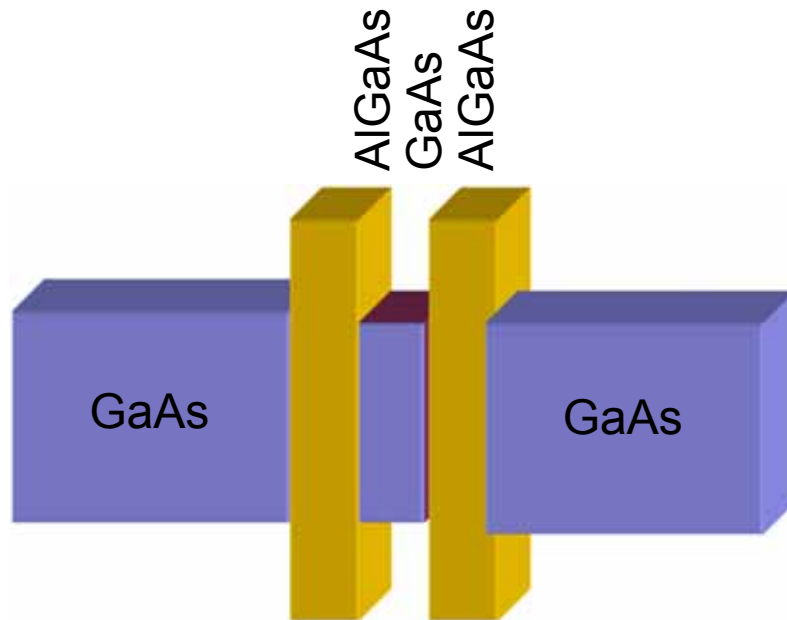
90-0 léta - Modré GaN LED na Al_2O_3 (NC 2014), na GaN, na Si, ...

QCL (kvantové kaskádové lasery) (NC ???, Kazarinov, Suris, Faist?)

10 léta – auta, osvětlení, podsvětlování, (LD – komunikace, internet, ...)

První heterostruktury – 60 léta

Nobelova cena za fyziku 2000-
Alferov a Kroemer



Výrazné zvýšení intenzity
emise z laserové diody a
účinnosti LED.

Eduard Hulicius, Bedřich Velický,
Heterostruktury, které slouží všem –
Nobelova cena za fyziku 2000, *Vesmír* 80,
32, 2001/1



MOVPE laboratory, Institute of Physics ASCR, v.v.i.



Heteropřechody:

- (a) = **b** - prvního typu
- (b) = **a** - druhého typu
- (c) - třetího typu

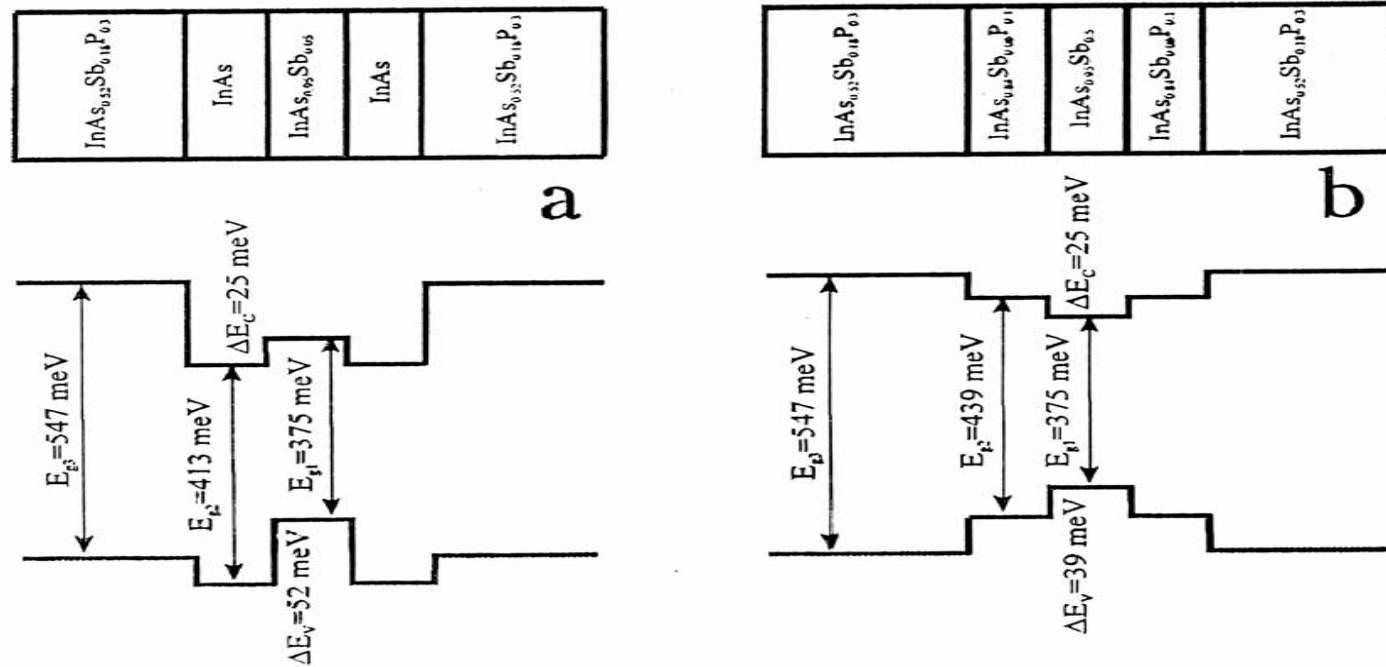
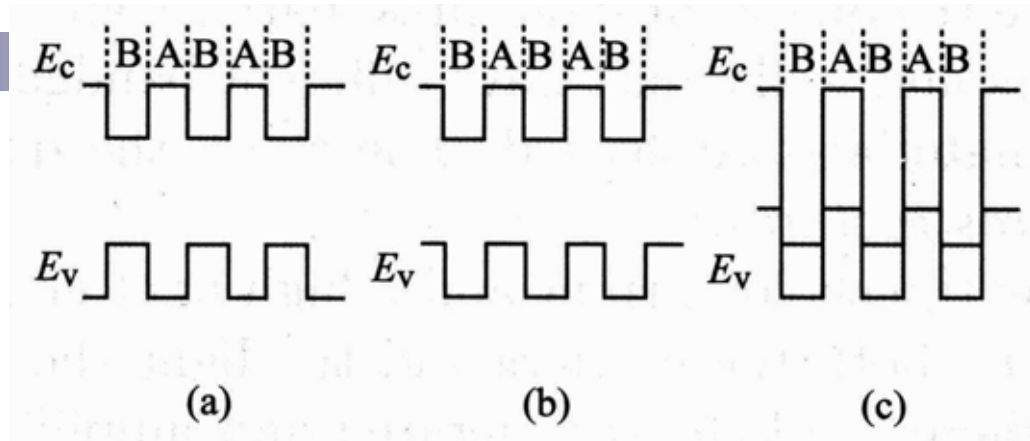


Fig.1. Laser structures with type II heterojunction (a) and type I (b) at the interface.

heterojunction at the interface had band-offset values $\Delta E_V=52$ meV, $\Delta E_C=15$ meV and $\Delta E_V/\Delta E_C \sim 3.4$. For other structure with type I heterojunction at the interface $\Delta E_V/\Delta E_C$ is equal to 1.56 ($\Delta E_V=39$ meV, $\Delta E_C=25$ meV).

Heteropřechody zase jinak

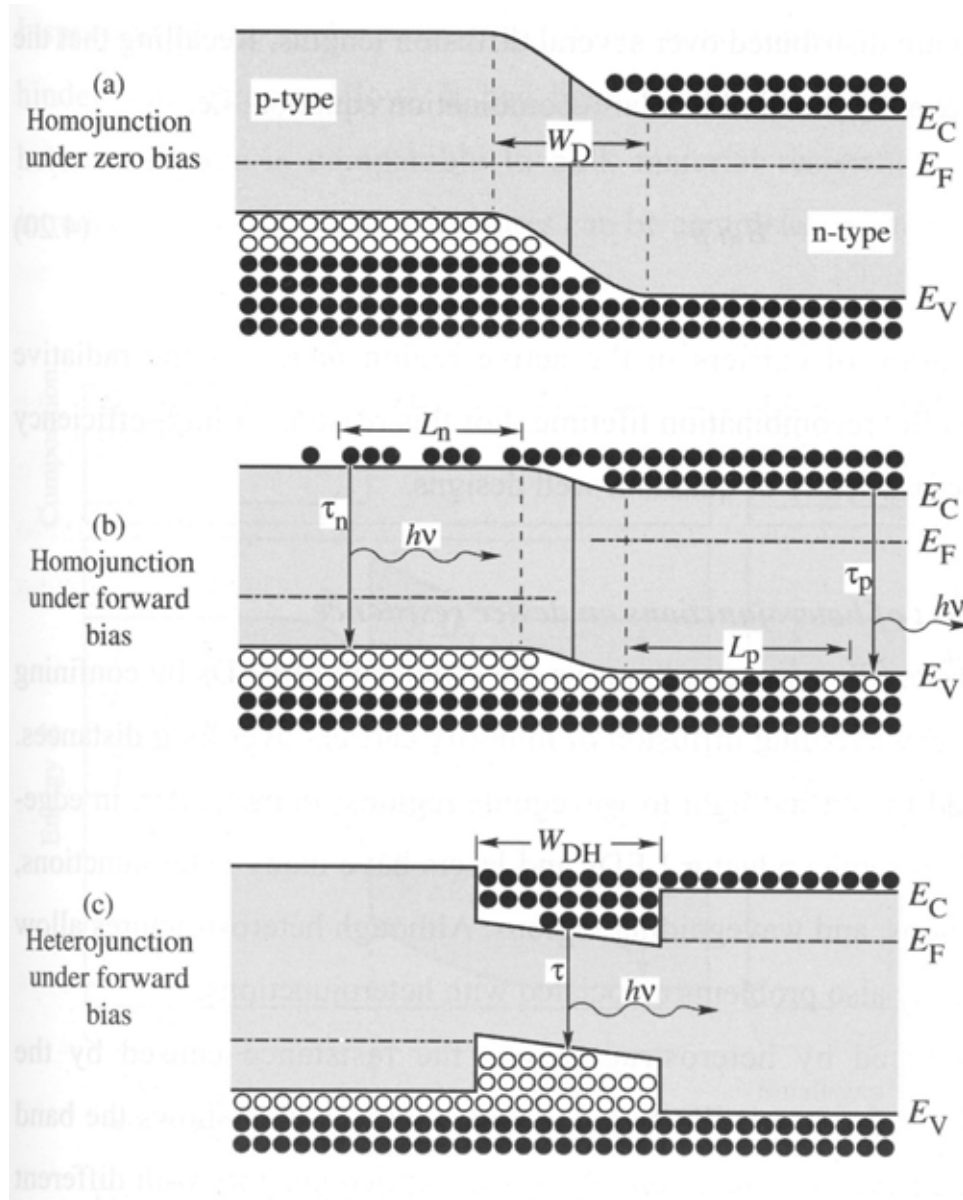
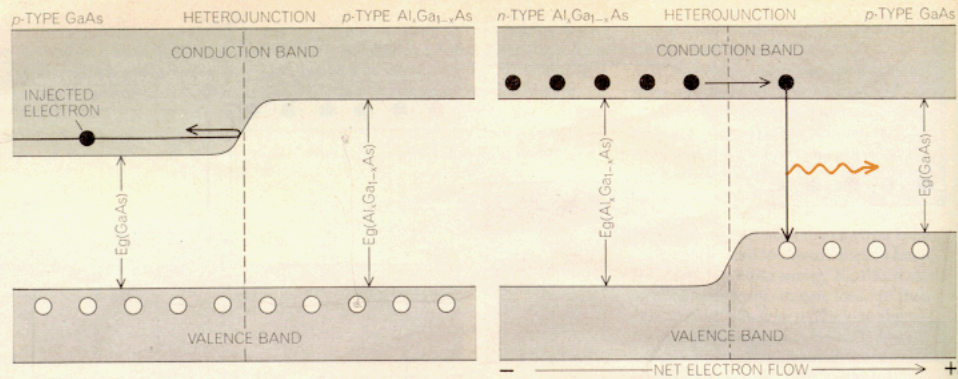
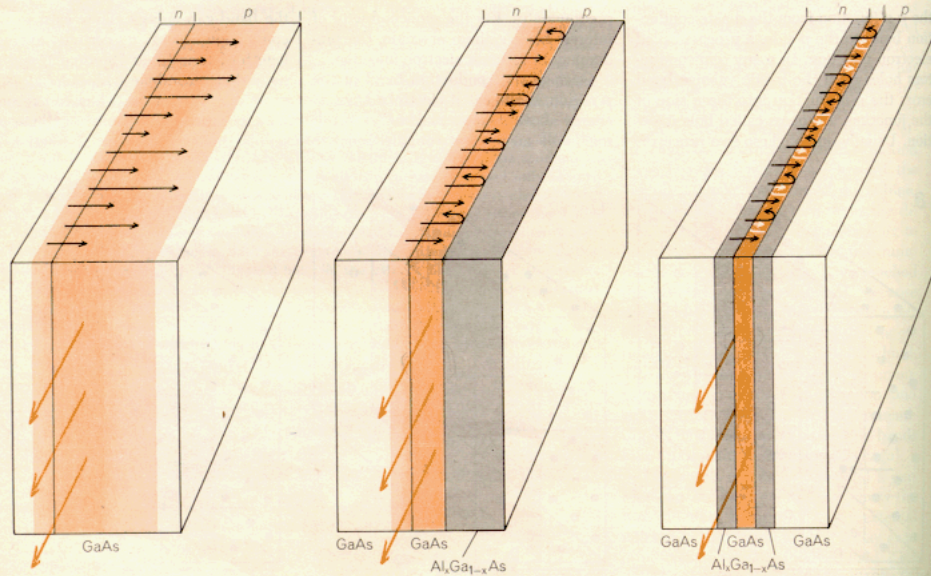


Fig. 4.6. P-n homojunction under (a) zero and (b) forward bias. P-n heterojunction (c) under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse, on average, over the diffusion lengths L_n and L_p before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterojunction barriers.



HETEROJUNCTIONS can be made between different semiconducting materials with the same or different conductivity types. In this illustration the potential profiles of the valence band and the conduction band are shown for a *p-p* heterojunction and a *p-n* heterojunction between gallium arsenide (GaAs) and aluminum gallium arsenide ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). At the *p-p* heterojunction (left) the wider band gap of aluminum gallium arsenide causes a step in conduction band that can act as a potential barrier to reflect electrons

if they are injected from the left. Forward-biasing the diode has no effect on this barrier. At the *p-n* heterojunction with no forward bias the bands are already bent to prevent current flow. When forward-biased enough to inject electrons from the *n*-type aluminum gallium arsenide to the *p*-type gallium arsenide (right), a residual potential barrier remains on the valence band at the *p-n* heterojunction as a result of the band-gap difference. This barrier prevents holes from crossing the *p-n* heterojunction from the right.



OPERATING PRINCIPLES of a homostructure laser (left), a single-heterostructure laser (middle) and a double-heterostructure laser (right) are compared in this illustration. In the homostructure laser electrons (black arrows) are injected across the *p-n* homojunction to varying distances into the *p* region. (Hole injection does not become important until much higher current levels are reached.) In the homostructure device light (color) penetrates into the adjacent material out of the region where most of the stimulation is taking place, causing a loss of light that would otherwise contribute to stimulation. In the single-heterostructure device the

light does not penetrate significantly through the *p-p* heterojunction and the electrons are reflected. As a result a higher degree of carrier-confinement and light-confinement is attained. In the double-heterostructure device holes, electrons and light are all effectively confined in the very thin region between the two heterojunctions. Electrons are reflected by the potential barrier in the conduction band at the *p-p* heterojunction, and holes are reflected by the potential barrier in the valence band at the *p-n* heterojunction. Light-confinement results from the difference in refractive index between the gallium arsenide and the aluminum gallium arsenide.



O co vlastně jde: LED (Světlo emitující diody) i LD (diodové lasery)

Historie:

1907(!) - První elektroluminiscenční dioda - SiC, H.J. Round , znovu objeveno Losevem v r. **1928**.

1936 - Destriau - LED z ZnS.

1952 - Welker - $A^{III}B^V$ (GaAs).

1962 - Lasery (RCA, GE, IBM, MIT).

60-90 léta - Rozvoj epitaxních technologií.

70-90 léta - Zavedení heterostruktur (NC 2000) a QW (kvantových jam - nanotechnologie).

1977 - Vyřešení rychlé degradace laserů i diod (bezdislokační substr.!).

90-0 léta - **Modré GaN LED na Al_2O_3 (NC 2014)**, na GaN, na Si, ...

QCL (kvantové kaskádové lasery) (NC ???, Kazarinov, Suris, Faist?)

10 léta – auta, osvětlení, podsvětlování, (LD – komunikace, internet, ...)

Lonští laureáti

Isamu Akasaki

Hiroši Amano
(Hiroshi)

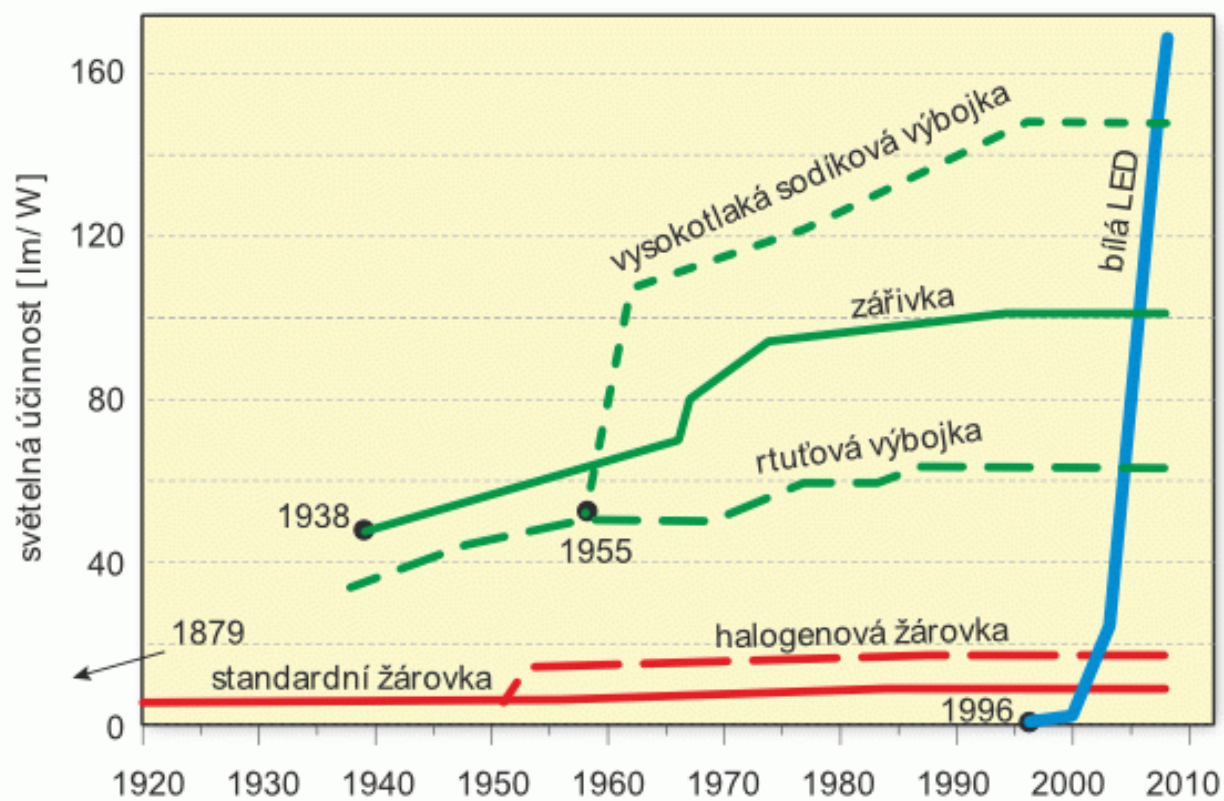
Šudži Nakamura
(Shuji)



Nagoja University

firma Nichia / UCSB

- Jan Valenta, Ivan Pelant Publikováno: Vesmír **92**, 612, 2013/11



AIXTRON

The CVD
Engineering Company

A revolution in lighting technology



LEDs use approx. 1/10 of the electricity

have a tenfold longer life (> 10 years)

	<u>Incandescent</u>	<u>LED</u>
Cost of light source	\$2.50	\$42.00
Power requirements	150 W	20 W
Annual electrical bill (at \$0.10/kWhr)	\$78.80	\$10.50
Payback period	-	< 1 year

SIEMENS

LED-Signalgeber von Siemens –
Sicherheit in neuer Dimension



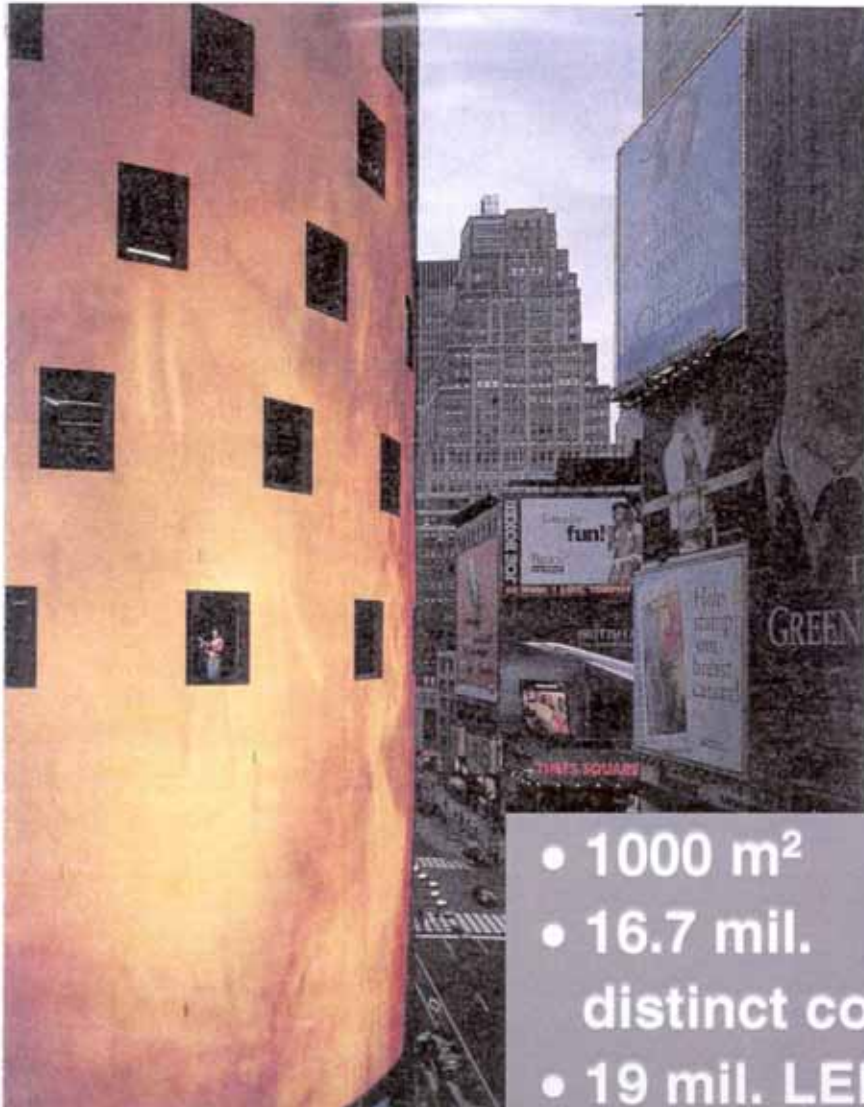
Source: *European Semiconductor, Vol. 22, No. 1, Jan. 2000*

Standard in several US states; pilot projects in UK, S, CH, A, F
Germany: pilot projects in Munich, Frankfurt, Aachen

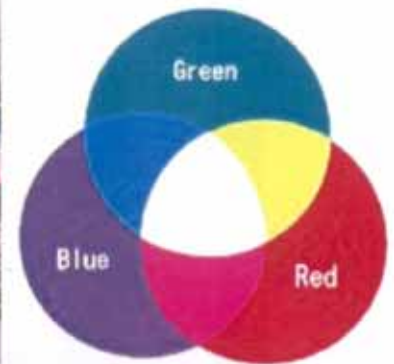
AIXTRON

The CYD
Engineering Company

Times Square TV enabled by LEDs



- 1000 m²
- 16.7 mil. distinct colors
- 19 mil. LEDs



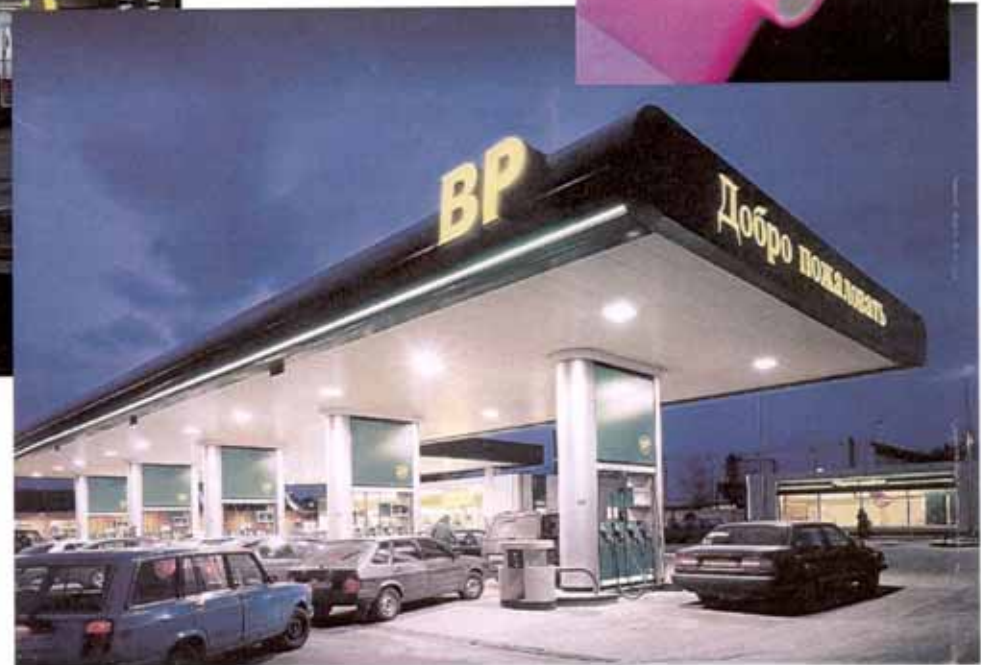


AIXTRON
The CVI
Engineering Company

Replacing the neon tube



LumiLeds





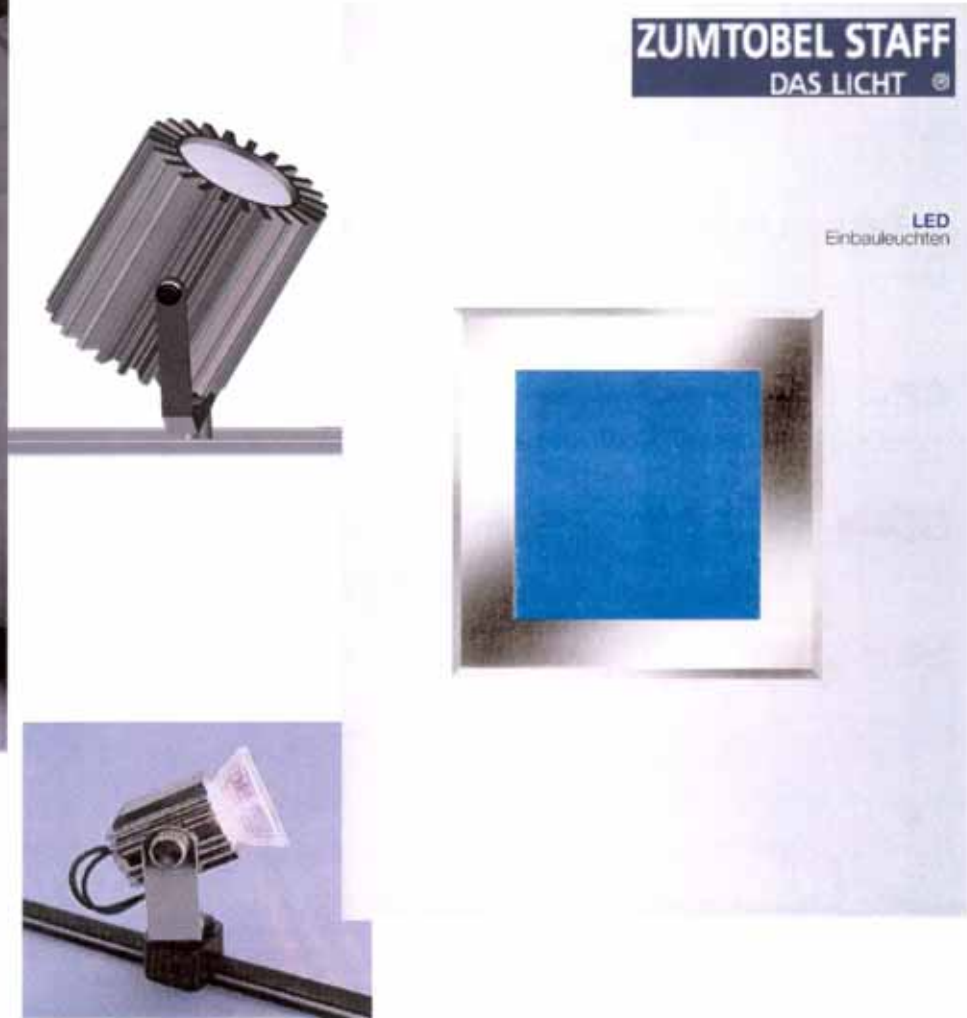
LEDs in Roadway Lighting

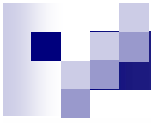
AIXTRON
The CVD
Lighting Company

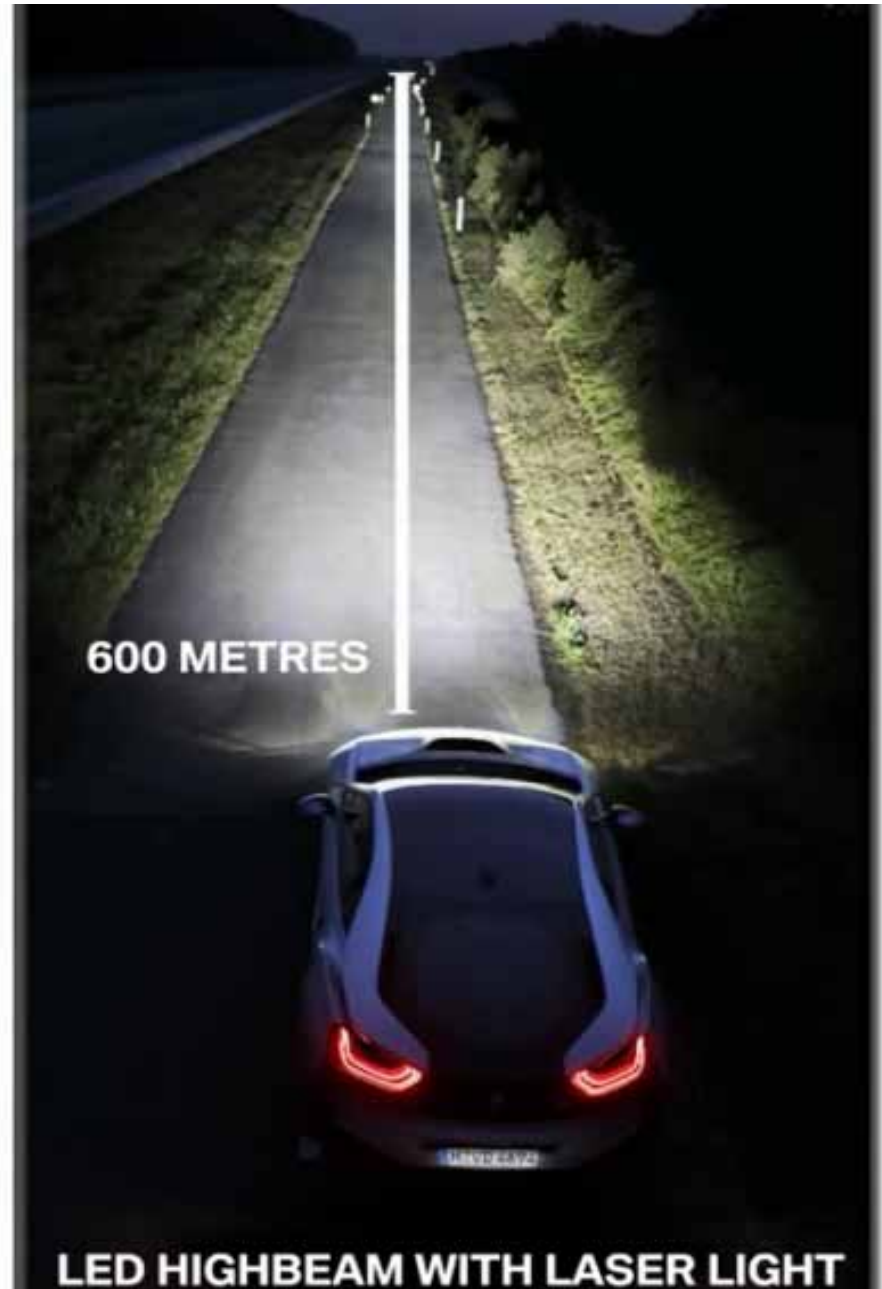


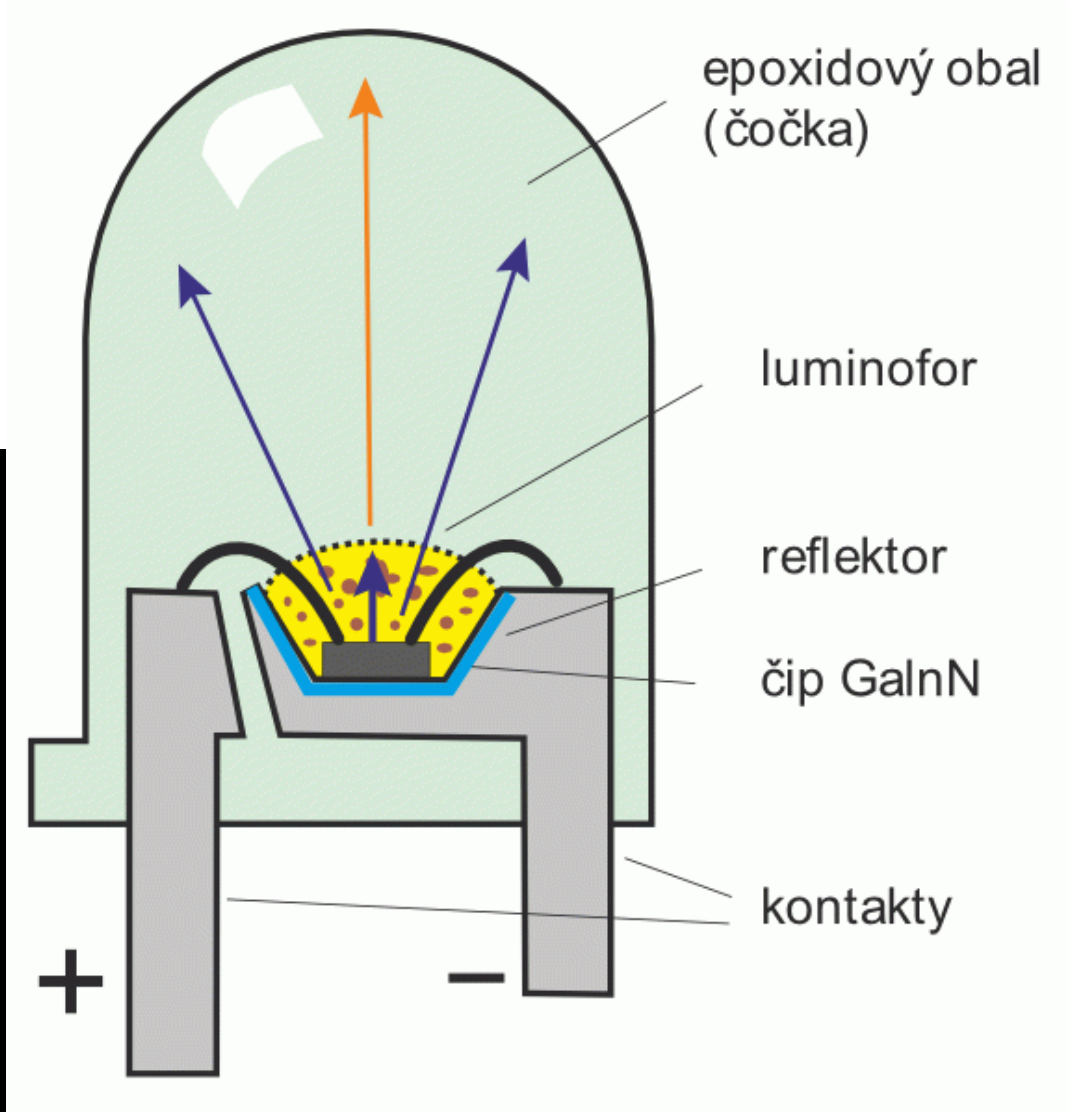
LumiLeds

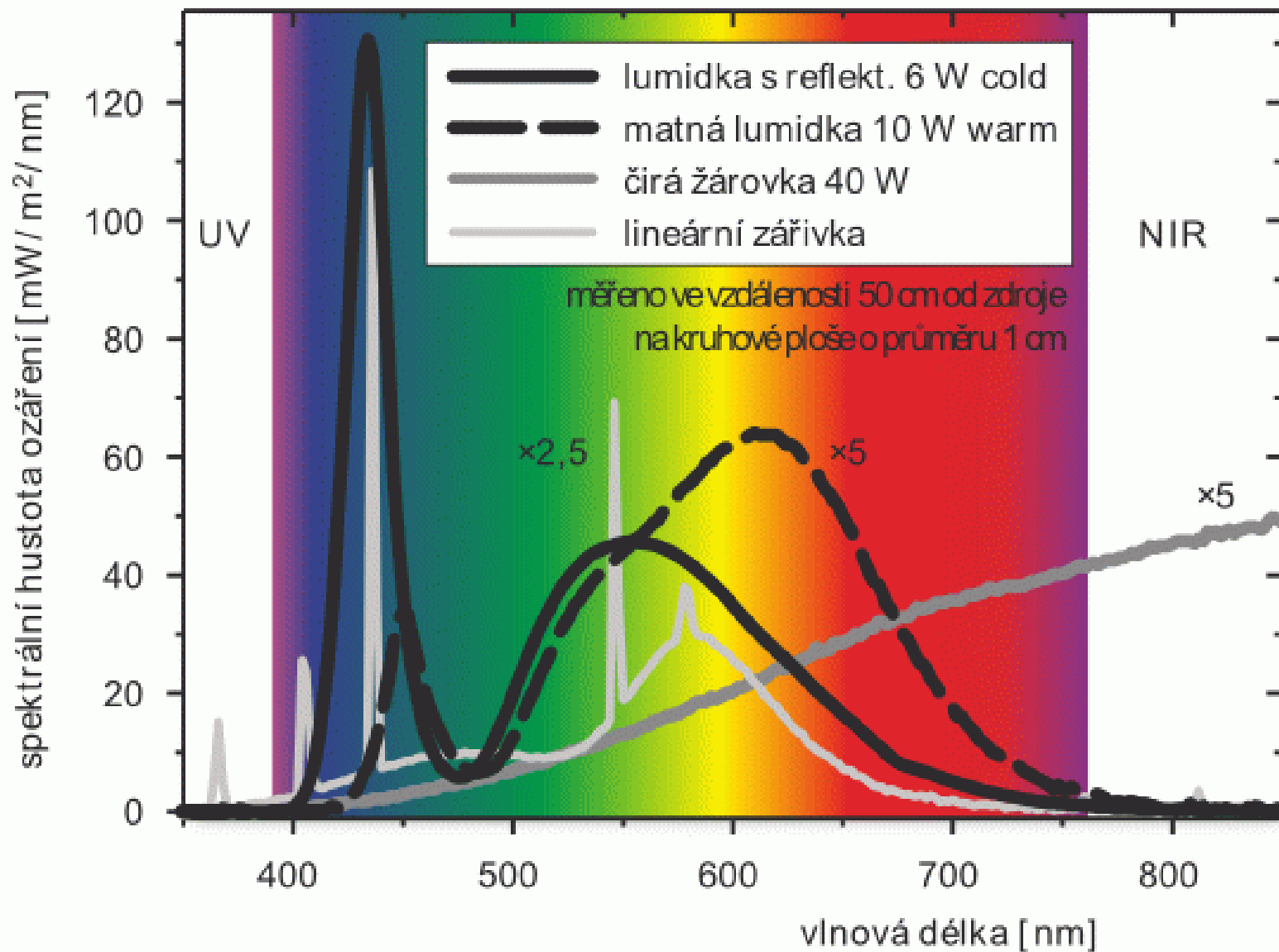
LEDs in interior lighting



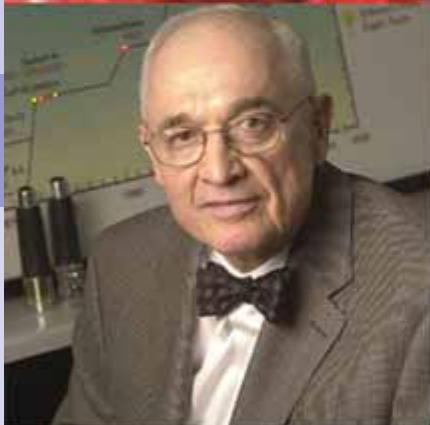




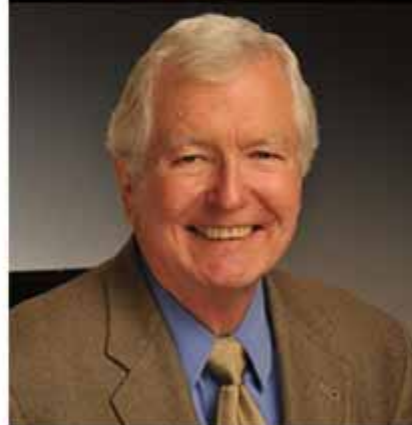




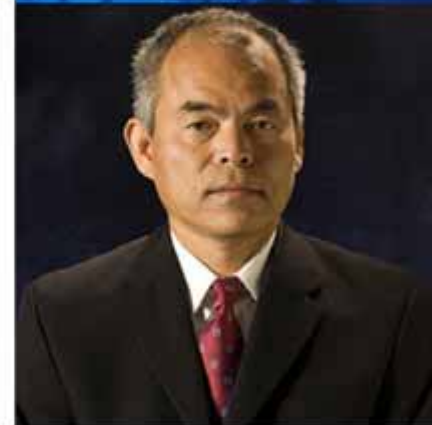
Historie LED



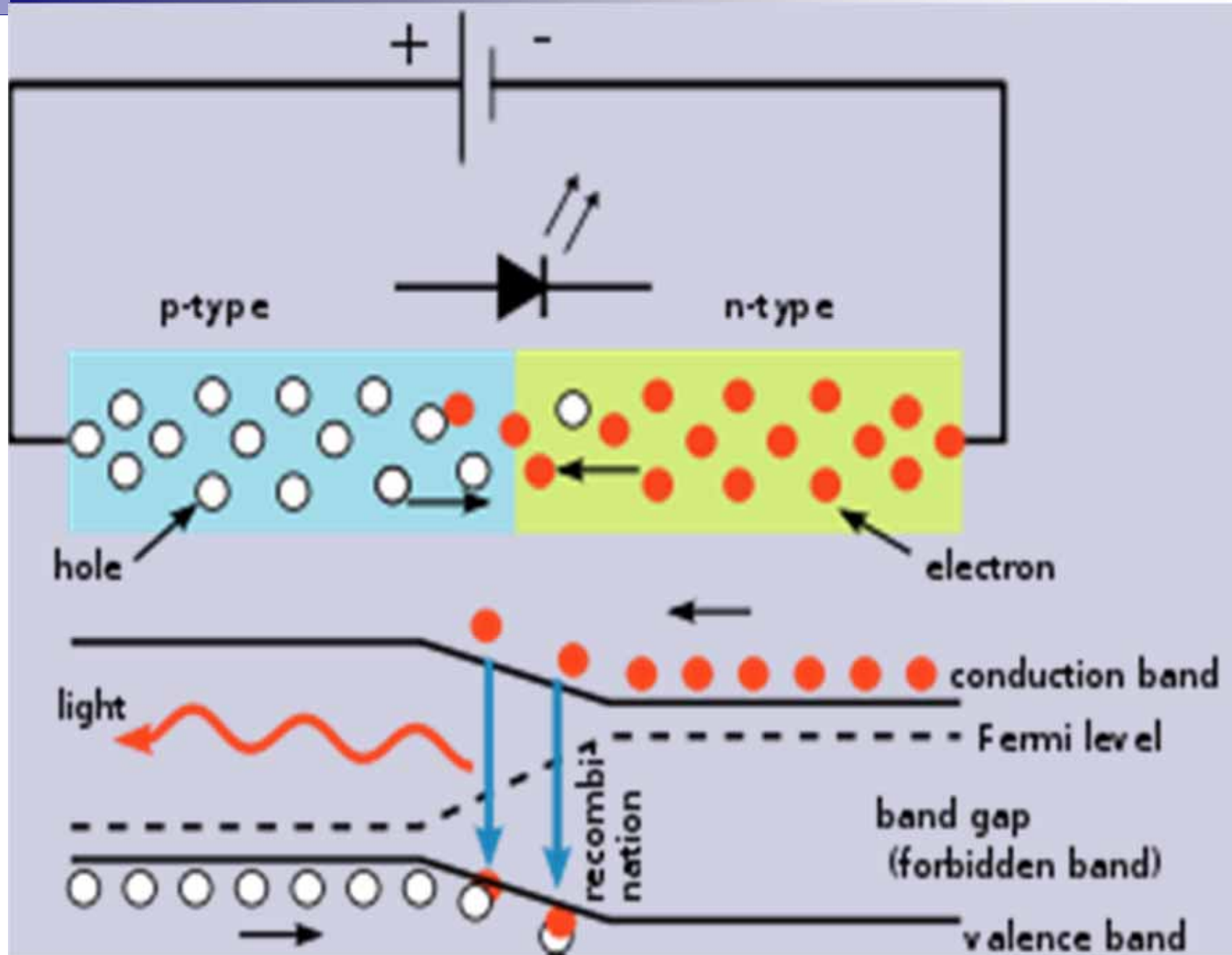
Nick Holonyak
Syracuse, NY



George Craford
St. Louis, MI

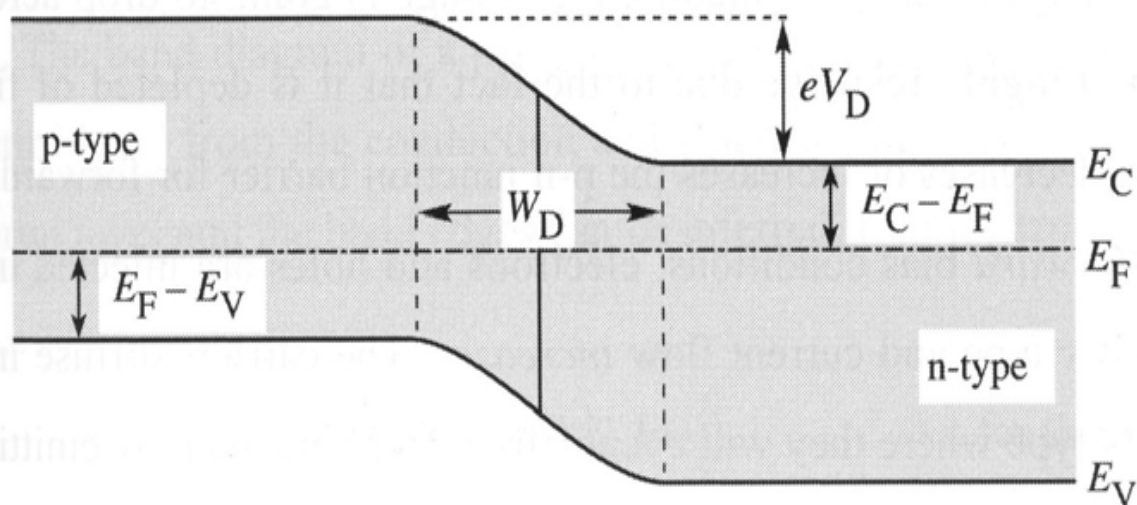


*Shuji Nakamura
Tokushima, Japan



Rekombinace a propustné napětí

(a) p-n junction under zero bias



(b) p-n junction under forward bias

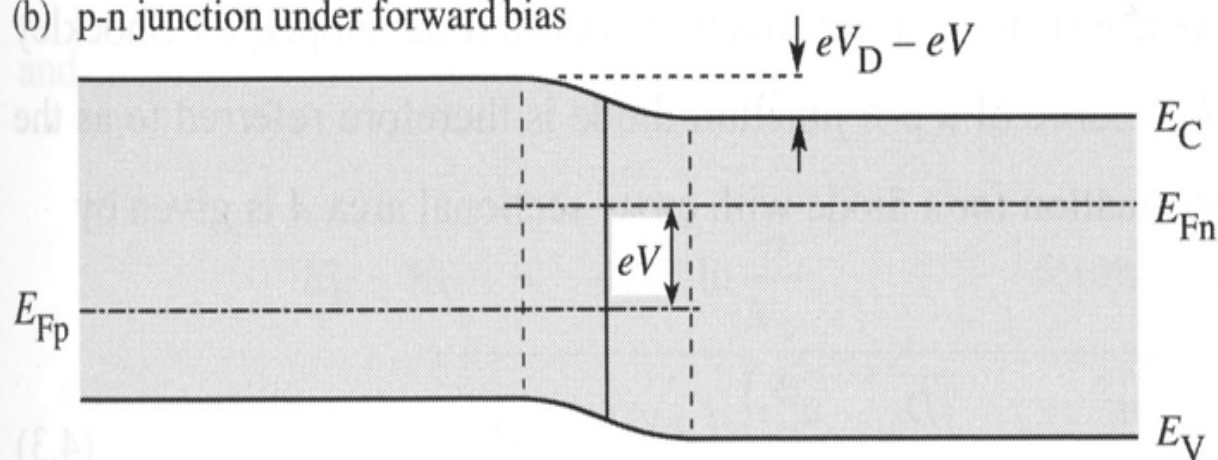
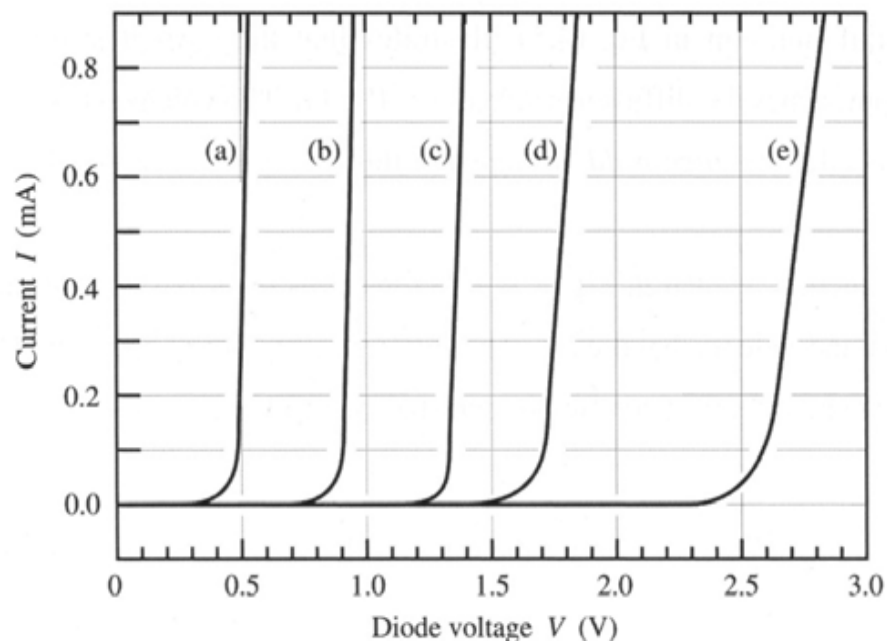


Fig. 4.1. P-n junction under (a) zero bias and (b) forward bias. Under forward bias conditions, minority carriers diffuse into the neutral regions where they recombine.

Polovodičové materiály



$T = 300 \text{ K}$

(a) Ge	$E_g \approx 0.7 \text{ eV}$
(b) Si	$E_g \approx 1.1 \text{ eV}$
(c) GaAs	$E_g \approx 1.4 \text{ eV}$
(d) GaAsP	$E_g \approx 2.0 \text{ eV}$
(e) GaInN	$E_g \approx 2.9 \text{ eV}$

Fig. 4.2. Room-temperature current–voltage characteristics of p-n junctions made from different semiconductors.

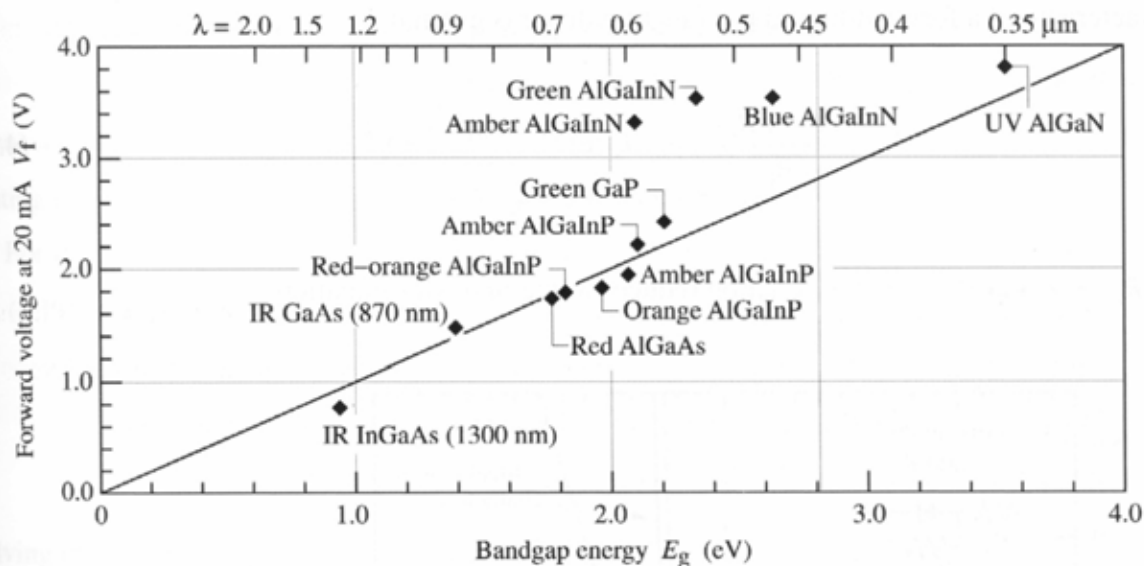
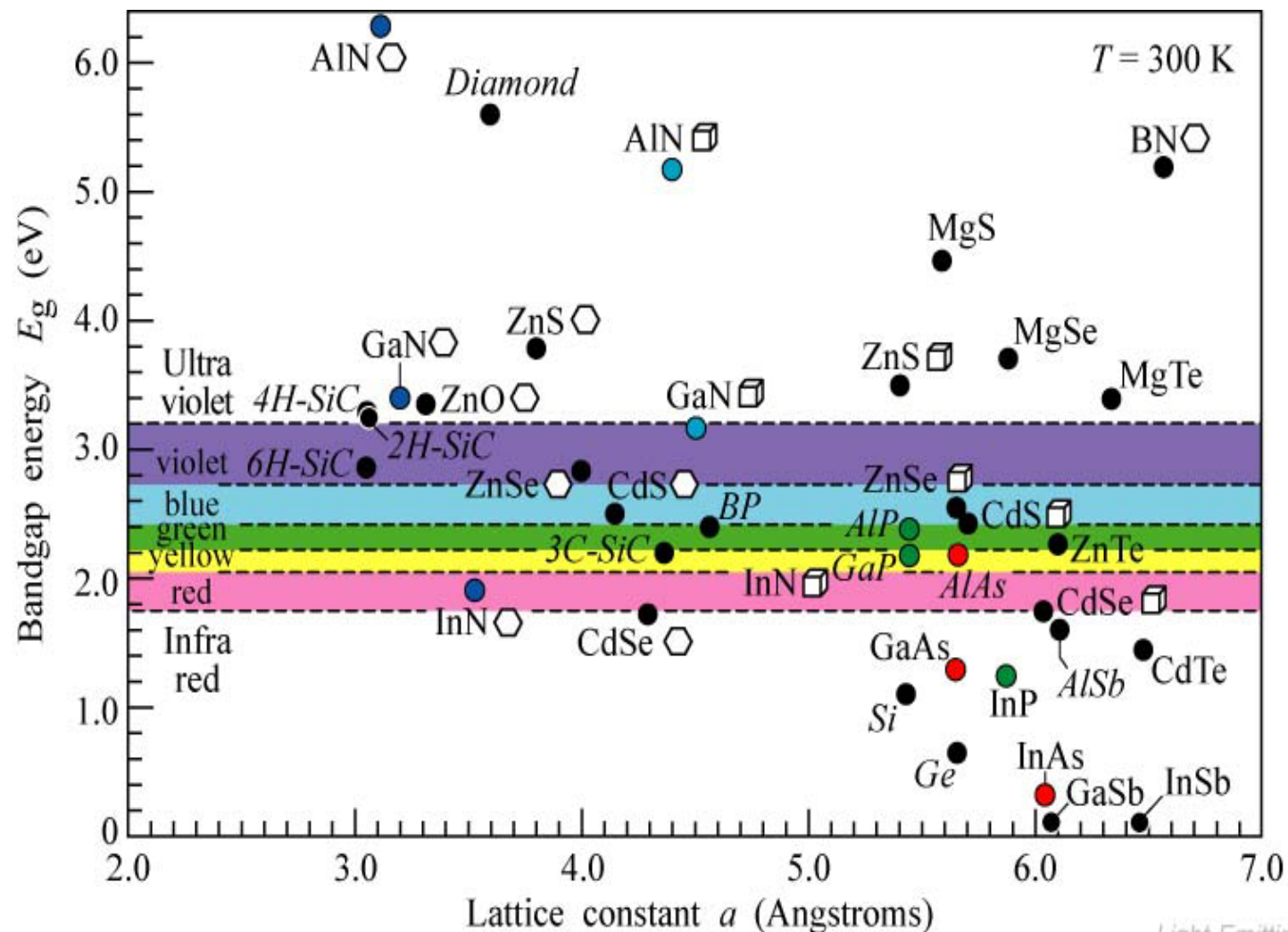


Fig. 4.3. Typical diode forward voltage versus bandgap energy for LEDs made from different materials (after Krames *et al.*, 2000; updated with UV LED data of Emerson *et al.*, 2002).



“*Italics*” = indirect gap

“Roman” = direct gap

○ hexagonal structure

□ cubic structure

Fig. 21.4. Room-temperature bandgap energy versus lattice constant of common elemental and binary compound semiconductors.

E. F. Schubert

Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)

www.LightEmittingDiodes.org

Heteropřechody zase jinak

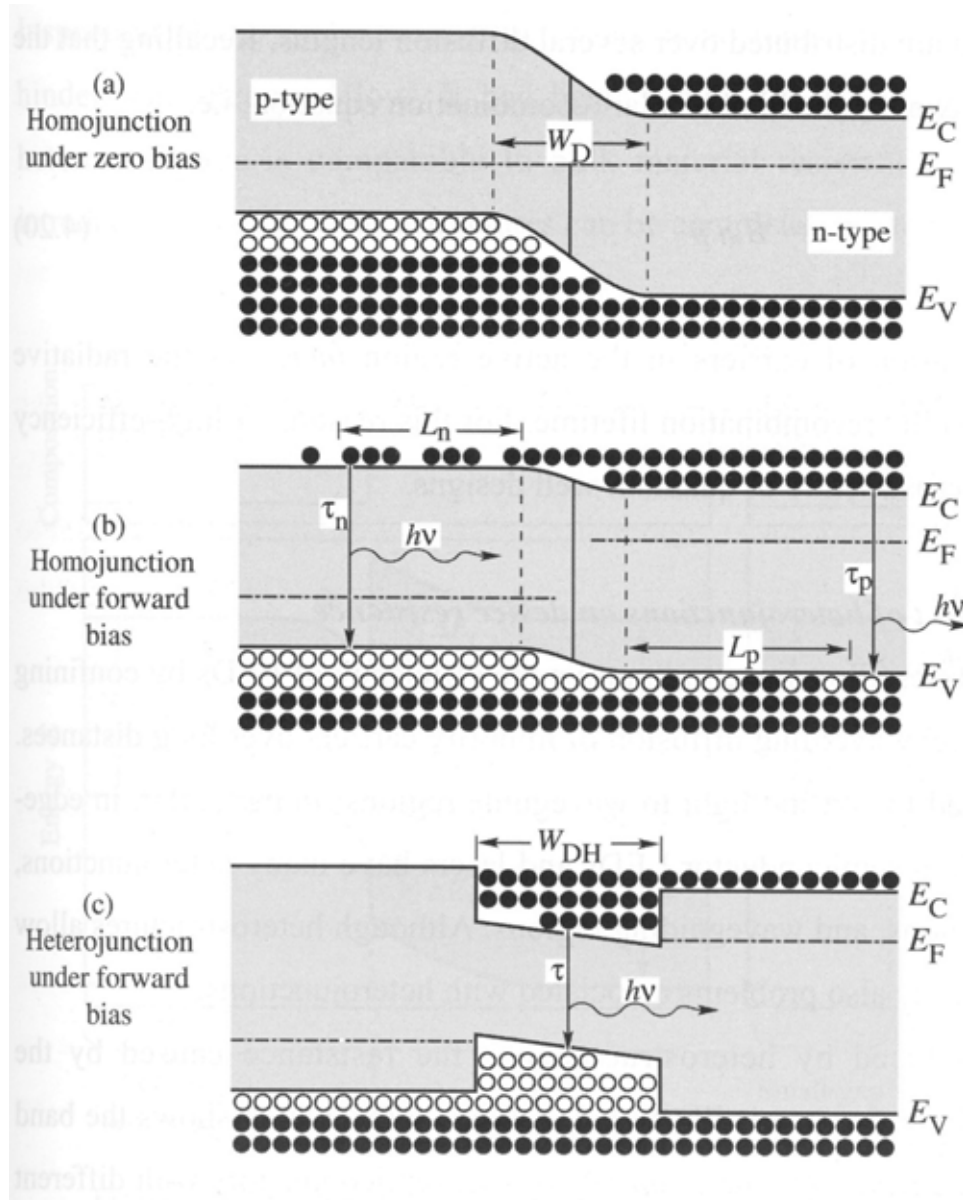
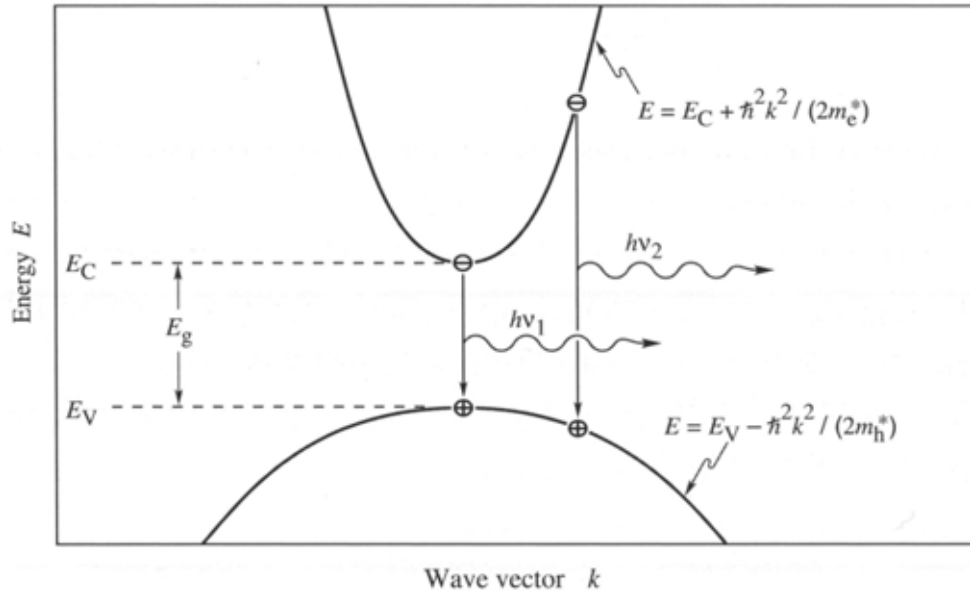


Fig. 4.6. P-n homojunction under (a) zero and (b) forward bias. P-n heterojunction (c) under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse, on average, over the diffusion lengths L_n and L_p before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterojunction barriers.

Emisní spektrum LED



Vyplývá z popisu
pásové struktury v
 k – prostoru

(v něm lze vysvětlit i to
proč Si nesvítí).

Fig. 5.1. Parabolic electron and hole dispersion relations showing “vertical” electron-hole recombination and photon emission.

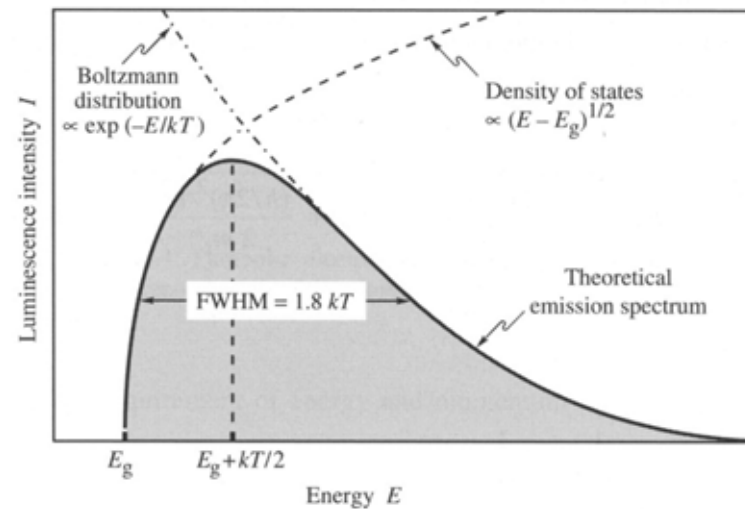


Fig. 5.2. Theoretical emission spectrum of an LED. The full width at half maximum (FWHM) of the emission line is $1.8 kT$.

?

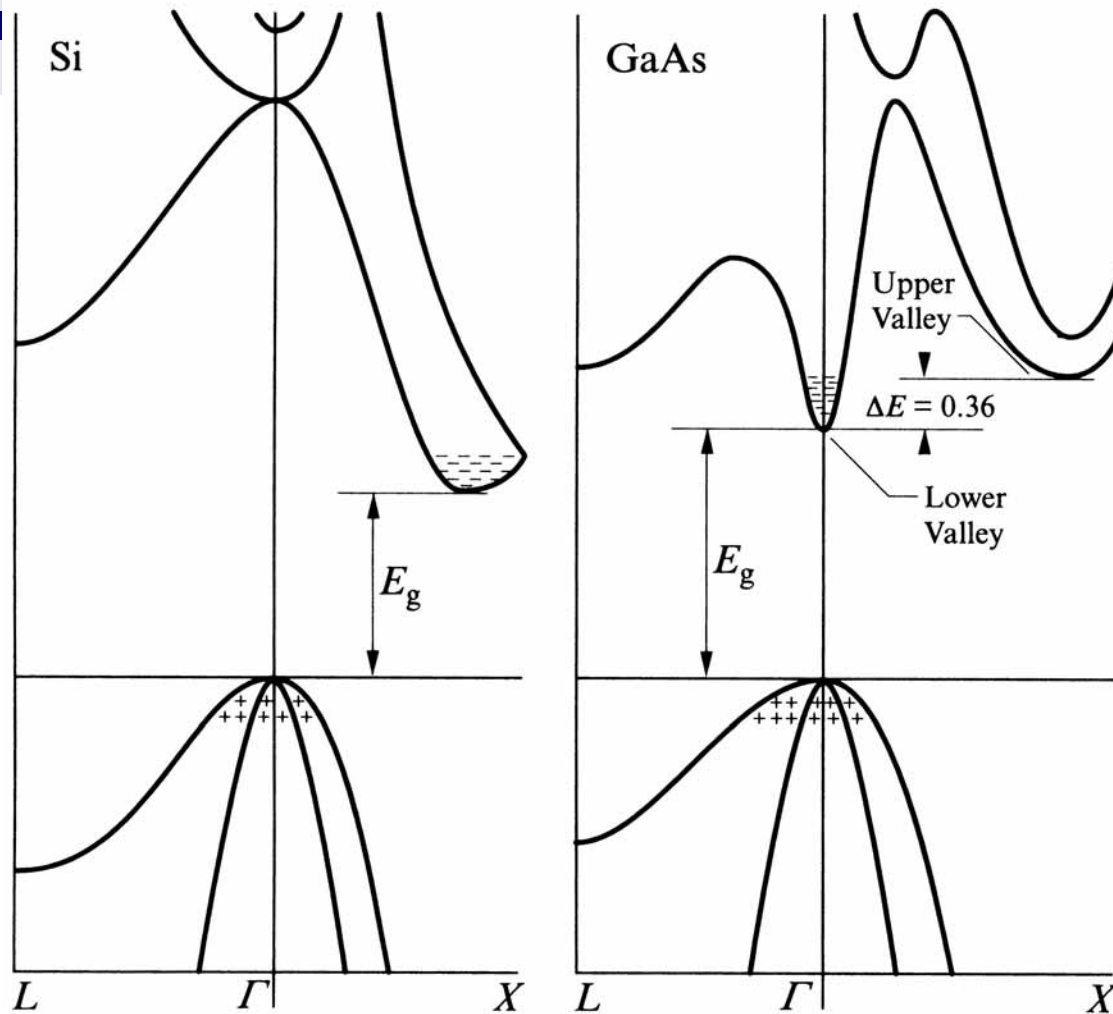


Figure 5.15 Energy band structures for Silicon (left) and GaAs (right). Energy is shown vertically, and k horizontally. The horizontal line marks the top of the filled “valence” bands; in pure samples the upper bands are empty except for thermal excitations (indicated by ++ and -- symbols.) The zero of momentum is indicated as “ Γ ”, and separate sketches are given for E vs k in (111) left and (100) right directions.

Hlavní problém LED byl - dostat světlo ven!!

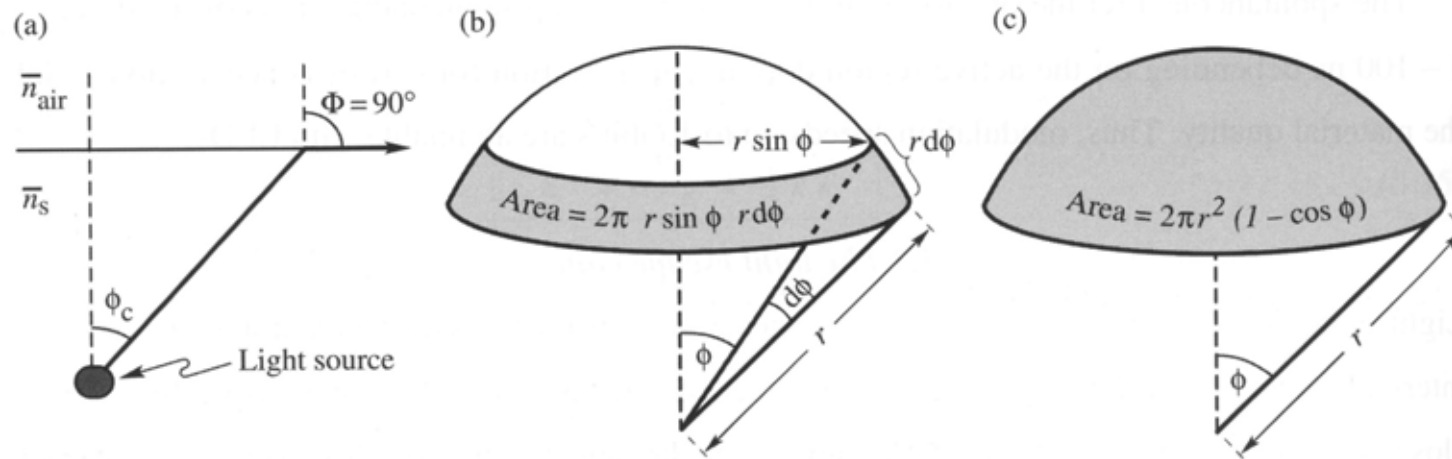


Fig. 5.3. (a) Definition of the escape cone by the critical angle ϕ_c . (b) Area element dA . (c) Area of calotte-shaped section of the sphere defined by radius r and angle ϕ_c .

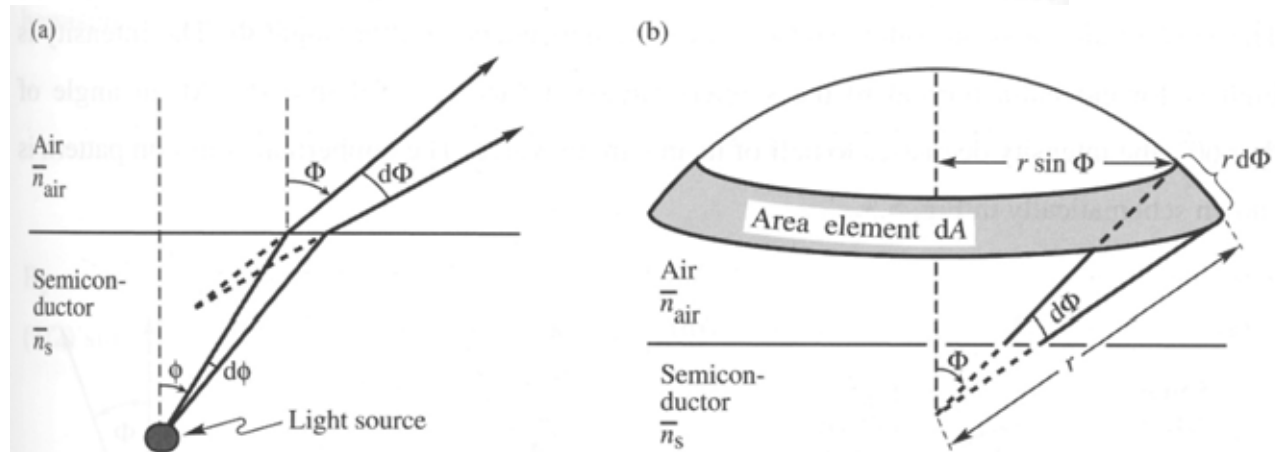


Fig. 5.4. Geometrical model used to derive the Lambertian emission pattern. (a) The light emitted into angle $d\phi$ inside the semiconductor is emitted into the angle $d\Phi$ in air. (b) Illustration of the area element dA of the calotte-shaped section of the sphere.

Jak to řešit?

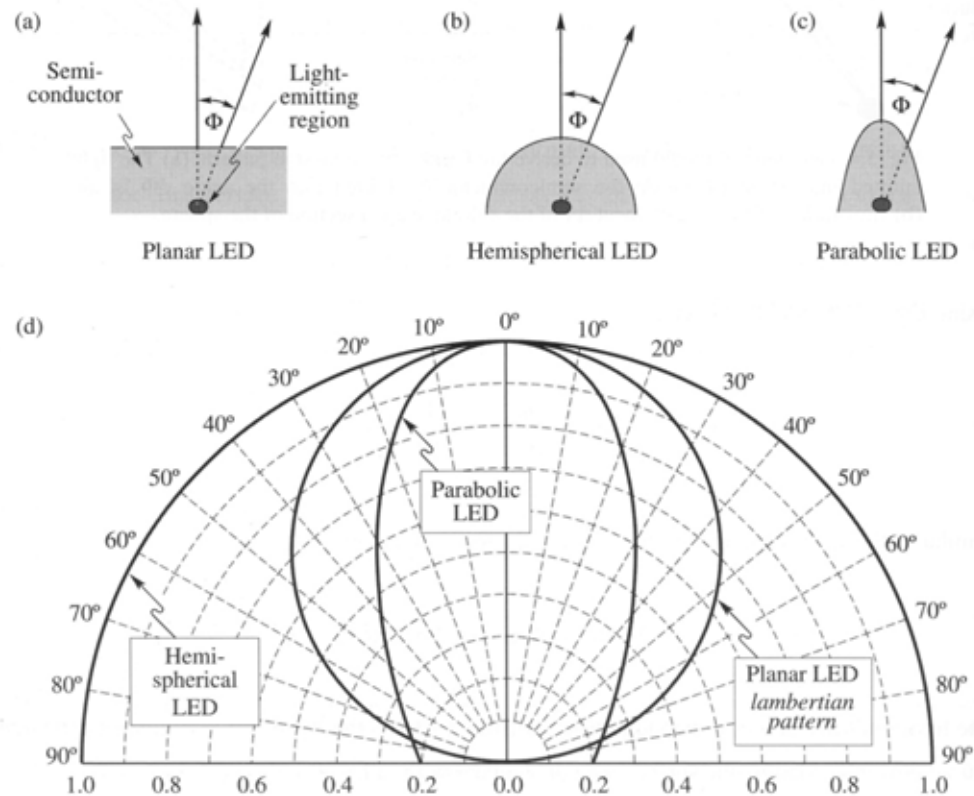


Fig. 5.5. Light-emitting diodes with (a) planar, (b) hemispherical, and (c) parabolic surfaces. (d) Far-field patterns of the different types of LEDs. At an angle of $\Phi = 60^\circ$, the lambertian emission pattern decreases to 50 % of its maximum value occurring at $\Phi = 0^\circ$. The three emission patterns are normalized to unity intensity at $\Phi = 0^\circ$.

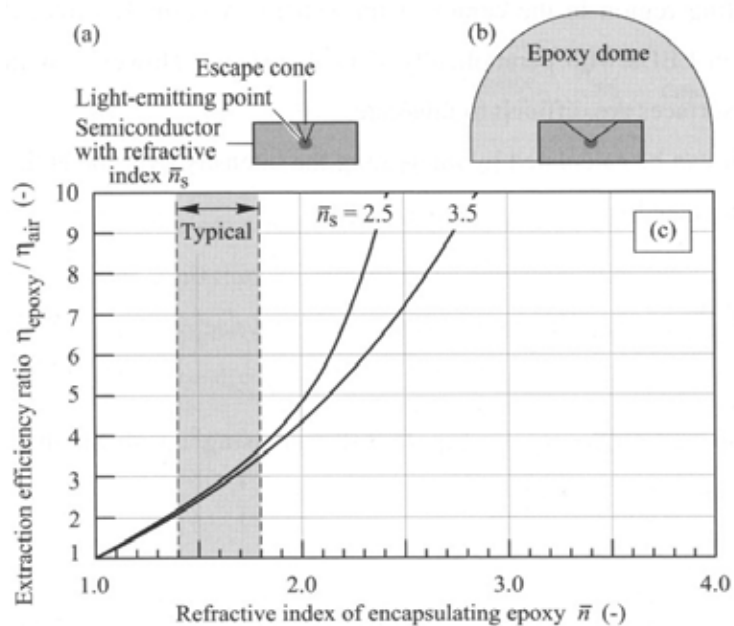


Fig. 5.6. (a) LED without and (b) with dome-shaped epoxy encapsulant. A larger escape angle is obtained for the LED with an epoxy dome. (c) Calculated ratio of light extraction efficiency emitted through the top surface of a planar LED with and without an epoxy dome. The refractive indices of typical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

Heterostruktura má efekt i v LED – nejen vymezí rekombinační oblast, a ...

?

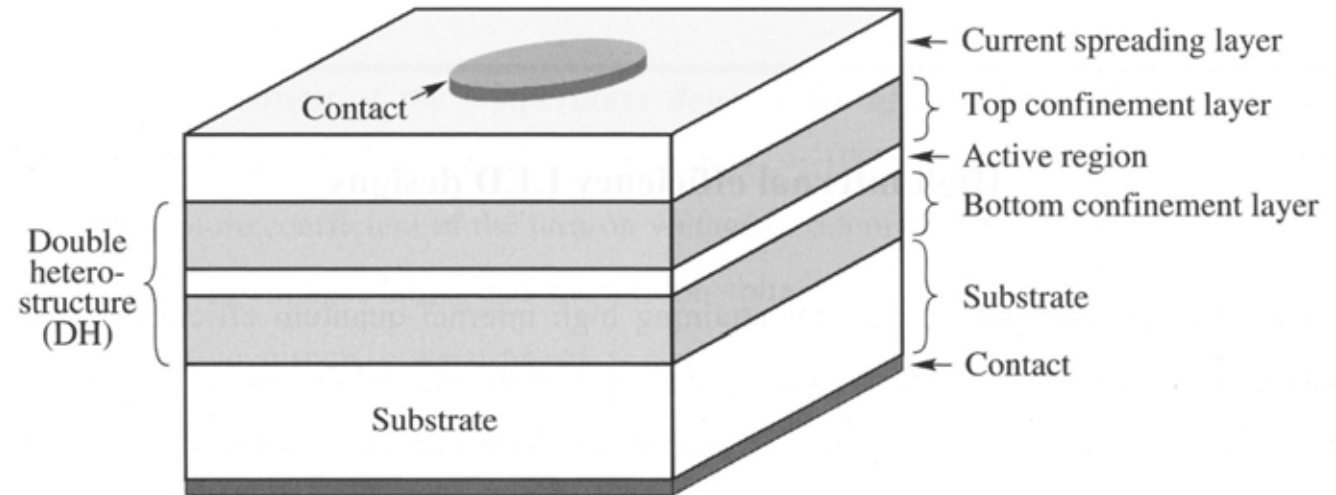


Fig. 6.1. Illustration of a double heterostructure consisting of a bulk or quantum well active region and two confinement layers. The *confinement* layers are frequently called *cladding* layers.

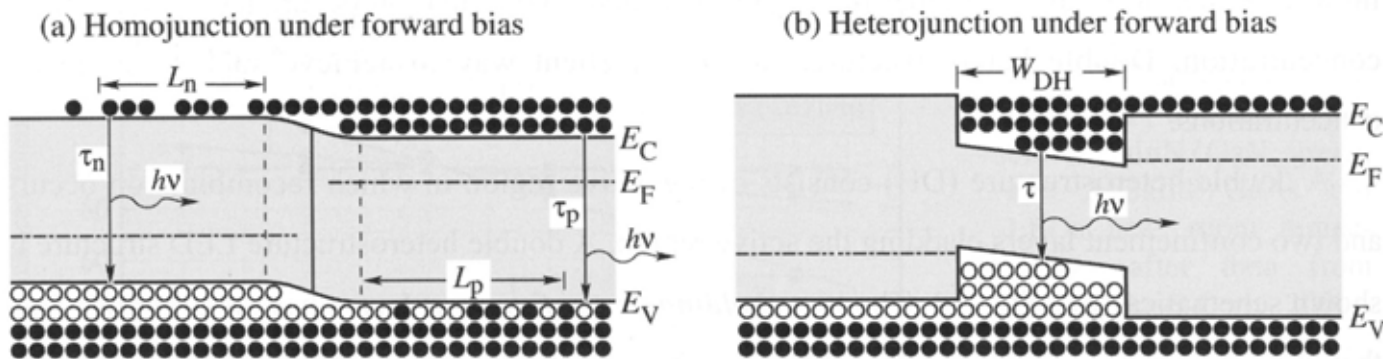


Fig. 6.2. Free carrier distribution in (a) a homojunction and (b) a heterojunction under forward bias conditions. In homojunctions, carriers are distributed over the diffusion length. In heterojunctions, carriers are confined to the well region.

... je i průhledná, ale ...

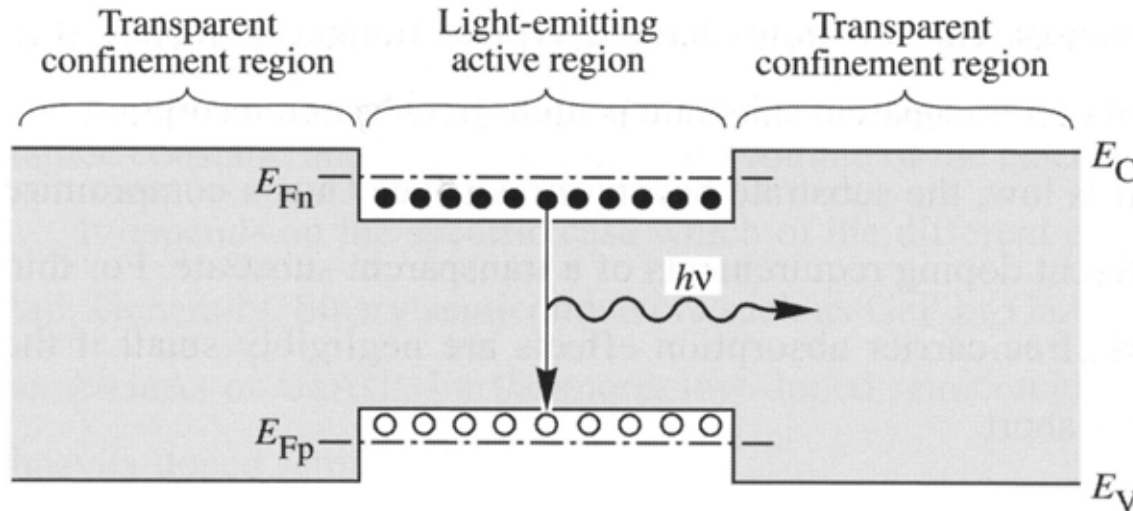


Fig. 7.2. Double heterostructure with optically transparent confinement regions. Reabsorption in the active region is unlikely due to the high carrier concentration in the active region and the resulting Burstein–Moss shift of the absorption edge.

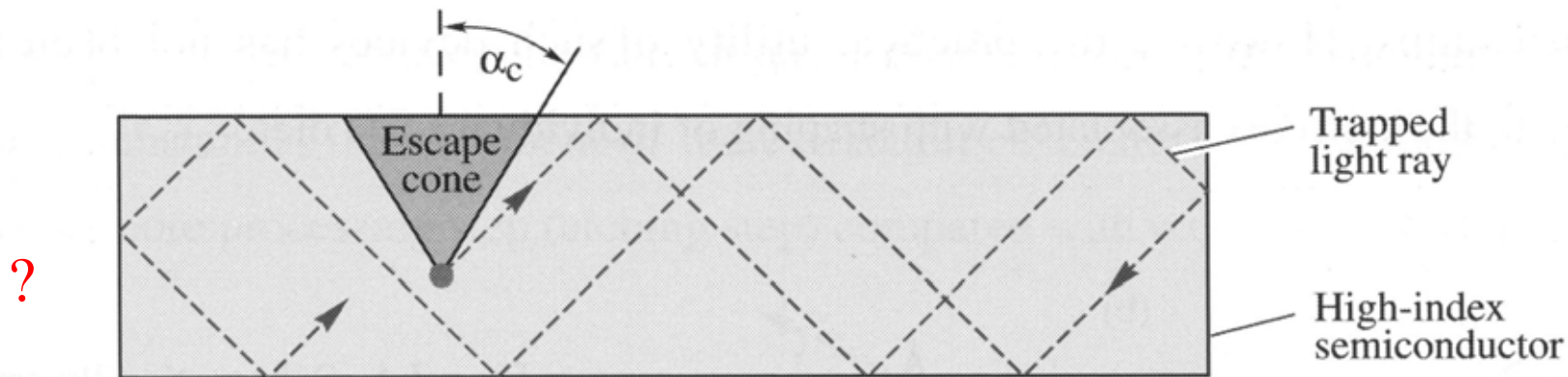


Fig. 7.3. “Trapped light” in a rectangular-parallelepiped-shaped semiconductor unable to escape for emission angles greater than α_c due to total internal reflection.

... teď jen něco udělat s tvarem:

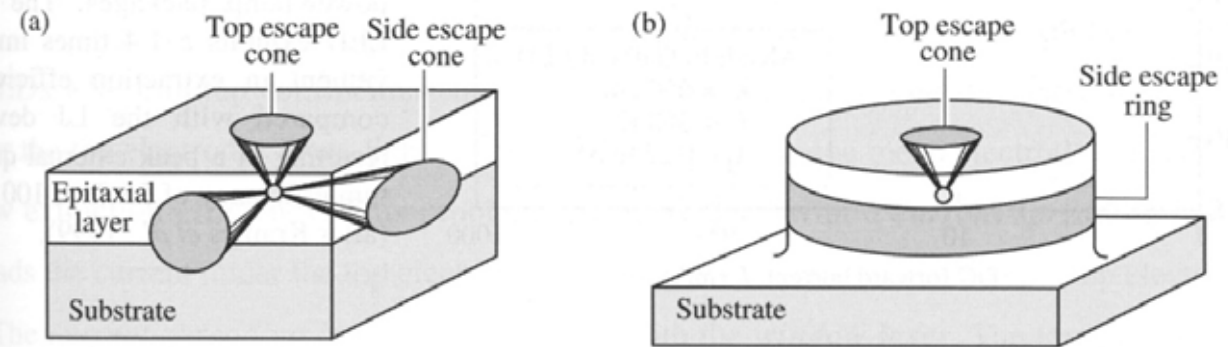


Fig. 7.5. Illustration of different geometric shapes of LEDs. (a) Rectangular parallelepipedal LED die with a total of six escape cones. (b) Cylindrical LED die with a top escape cone and a side escape ring.

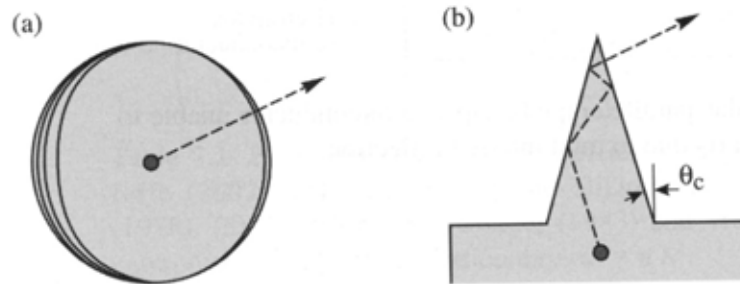


Fig. 7.4. Schematic illustration of different geometric shapes for LEDs with perfect extraction efficiency. (a) Spherical LED with a point-like light-emitting region at the center of the sphere. (b) A cone-shaped LED.

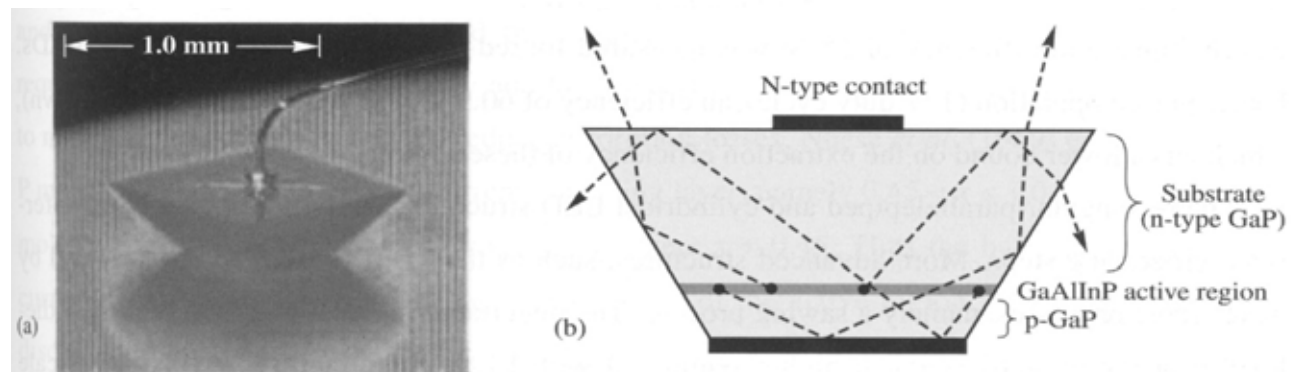


Fig. 7.6. Truncated inverted pyramid (TIP) AlInGaP/GaP LED. (a) LED driven by an electrical injection current. (b) Schematic diagram of the LED illustrating the enhanced light extraction efficiency (after Krames *et al.*, 1999).

a vnější účinnost se hned vylepší.

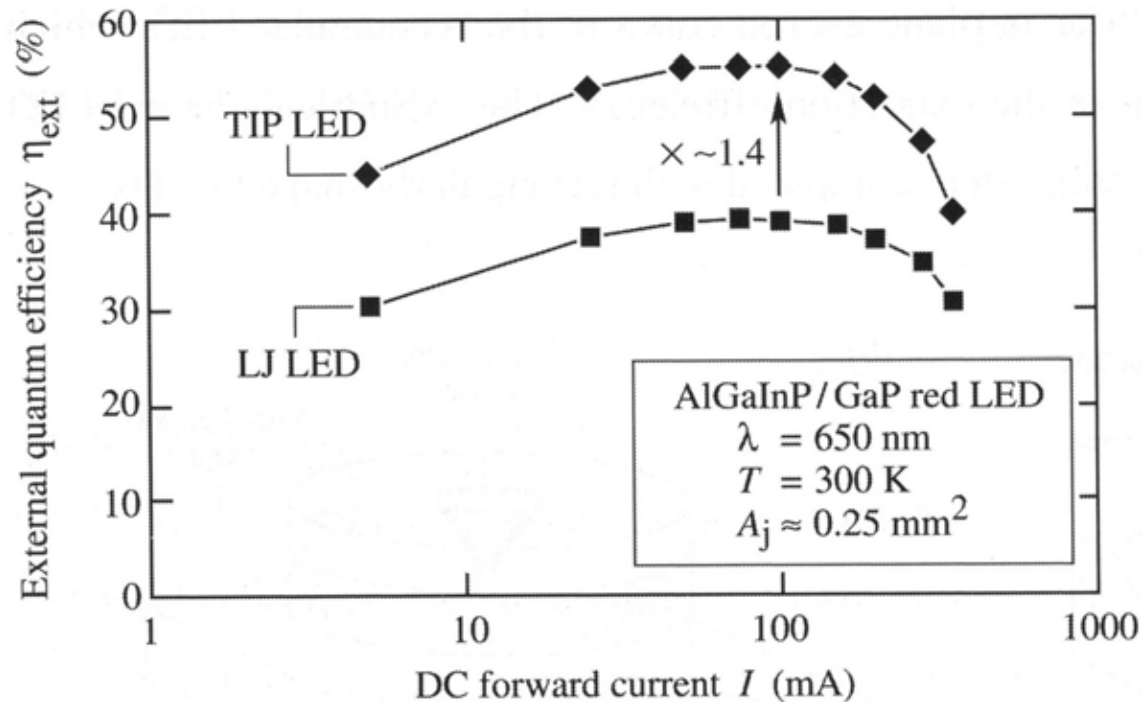


Fig. 7.7. External efficiency vs. forward current for red-emitting (650 nm) truncated inverted pyramid (TIP) LEDs and large-junction (LJ) LEDs mounted in power-lamp packages. The TIP LED exhibits a 1.4 times improvement in extraction efficiency compared with the LJ device, resulting in a peak external quantum efficiency of 55 % at 100 mA (after Krames *et al.*, 1999).

?

A co kontakty ...

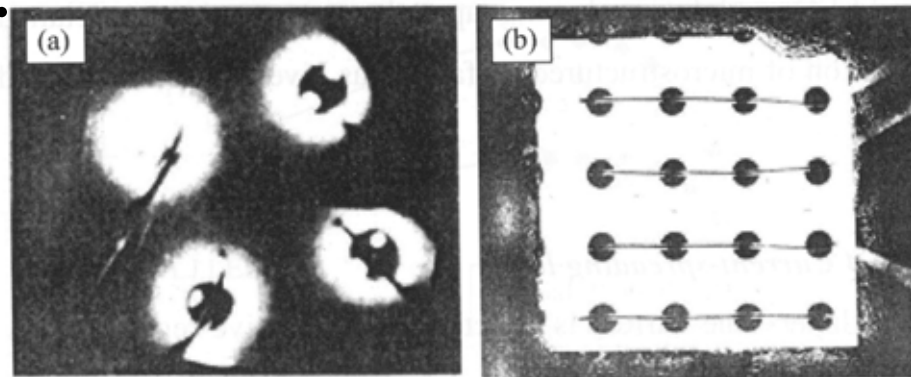


Fig. 7.8. Effect of the current-spreading layer on LED output. (a) Top view of an LED without a current-spreading layer. Emission occurs only near the perimeter of the contact. (b) Top view of an LED with a current-spreading layer (after Nuese *et al.*, 1969).

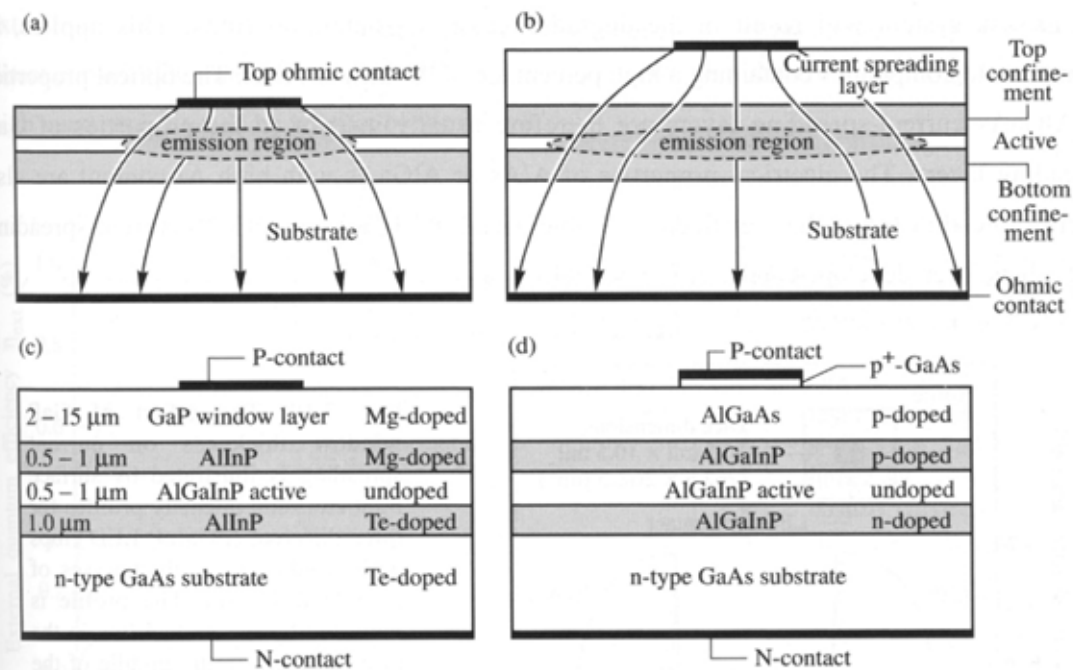


Fig. 7.9. Current-spreading structures in high-brightness AlGaInP LEDs. Illustration of the effect of a current-spreading layer for LEDs (a) without and (b) with a spreading layer on the light extraction efficiency. (c) GaP current-spreading structure (Fletcher *et al.*, 1991a, 1991b). (d) AlGaAs current-spreading structure (Sugawara *et al.*, 1992a, 1992b).

... i jejich geometrie je důležitá.

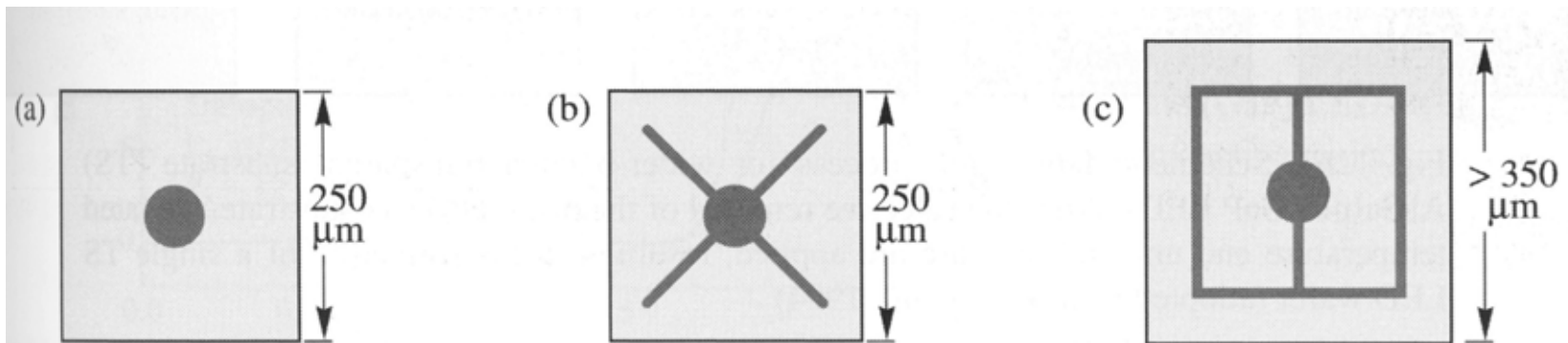


Fig. 7.16. Top view on an LED die with (a) a circular contact also serving as a bond pad and (b) a cross-shaped contact with a circular bond pad. (c) Typical contact geometry used for larger LED dies.

Někdy vadí absorbuující podložka.

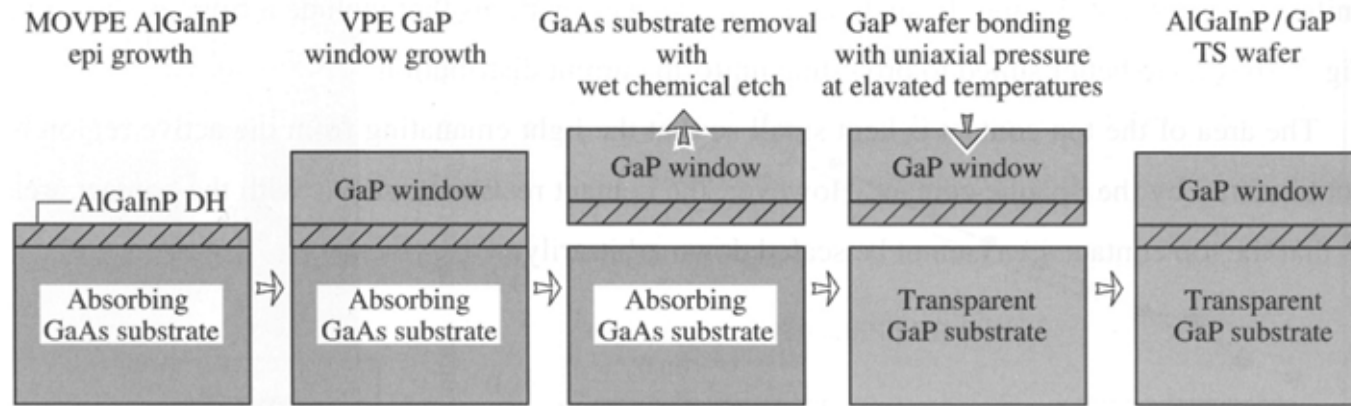


Fig. 7.17. Schematic fabrication process for wafer-bonded transparent substrate (TS) AlGaInP/GaP LEDs. After the selective removal of the original GaAs substrate, elevated temperature and uniaxial pressure are applied, resulting in the formation of a single TS LED wafer (adopted from Kish *et al.* 1994).

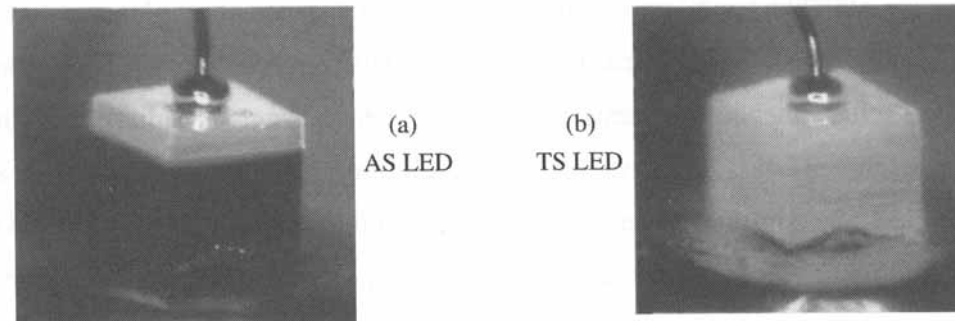


Fig. 7.19. (a) Amber AlGaInP LED with a GaP window layer and an absorbing GaAs substrate (AS). (b) Amber AlGaInP LED with a GaP window layer and a transparent GaP substrate (TS) fabricated by a wafer bonding. Conductive Ag-loaded die-attach epoxy can be seen at the bottom of the TS LED (after Kish and Fletcher, 1997).

?

Anireflexní pokrytí zvyšuje účinnost, někdy i životnost.

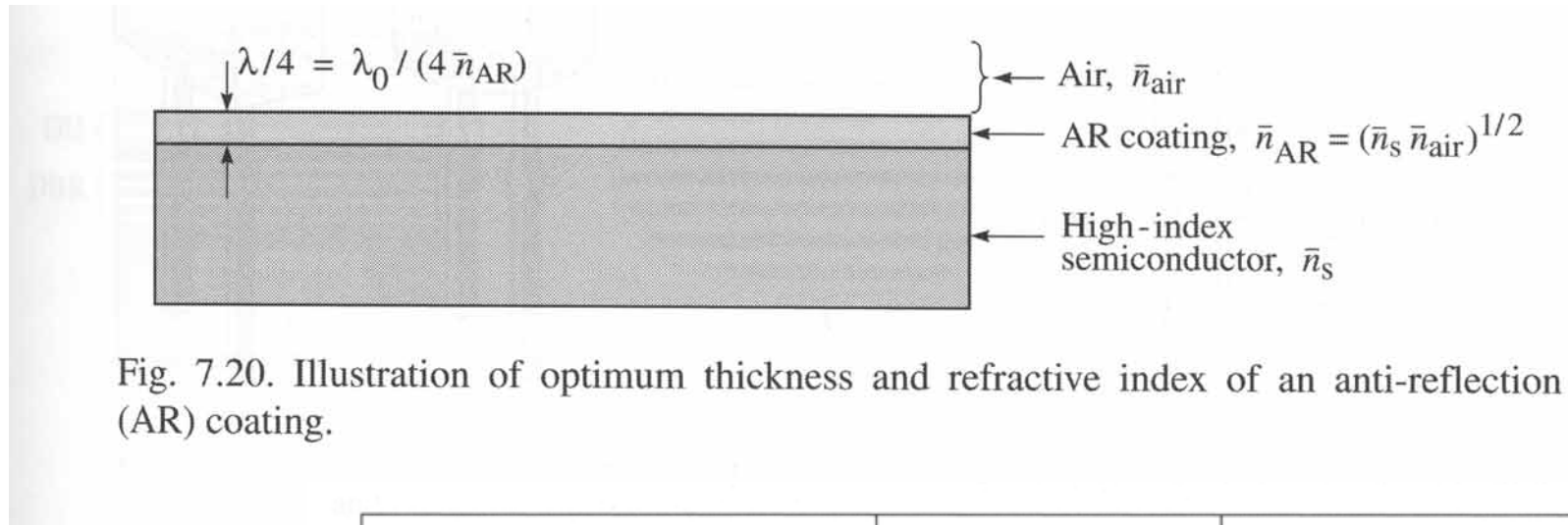


Fig. 7.20. Illustration of optimum thickness and refractive index of an anti-reflection (AR) coating.

Dielectric material	Refractive index	Transparency range
SiO ₂ (silica)	1.45	> 0.15 μm
Al ₂ O ₃ (alumina)	1.76	> 0.15 μm
TiO ₂ (titania)	2.50	> 0.35 μm
Si ₃ N ₄ (silicon nitride)	2.00	> 0.25 μm
ZnS (zinc sulphide)	2.29	> 0.34 μm
CaF ₂ (calcium fluoride)	1.43	> 0.12 μm

Table 7.2. Refractive index and transparency range of common dielectrics suitable as anti-reflection coatings (after Palik, 1998).

Zrcadla, která odráží světlo ven se dají vytvořit i ve struktuře.

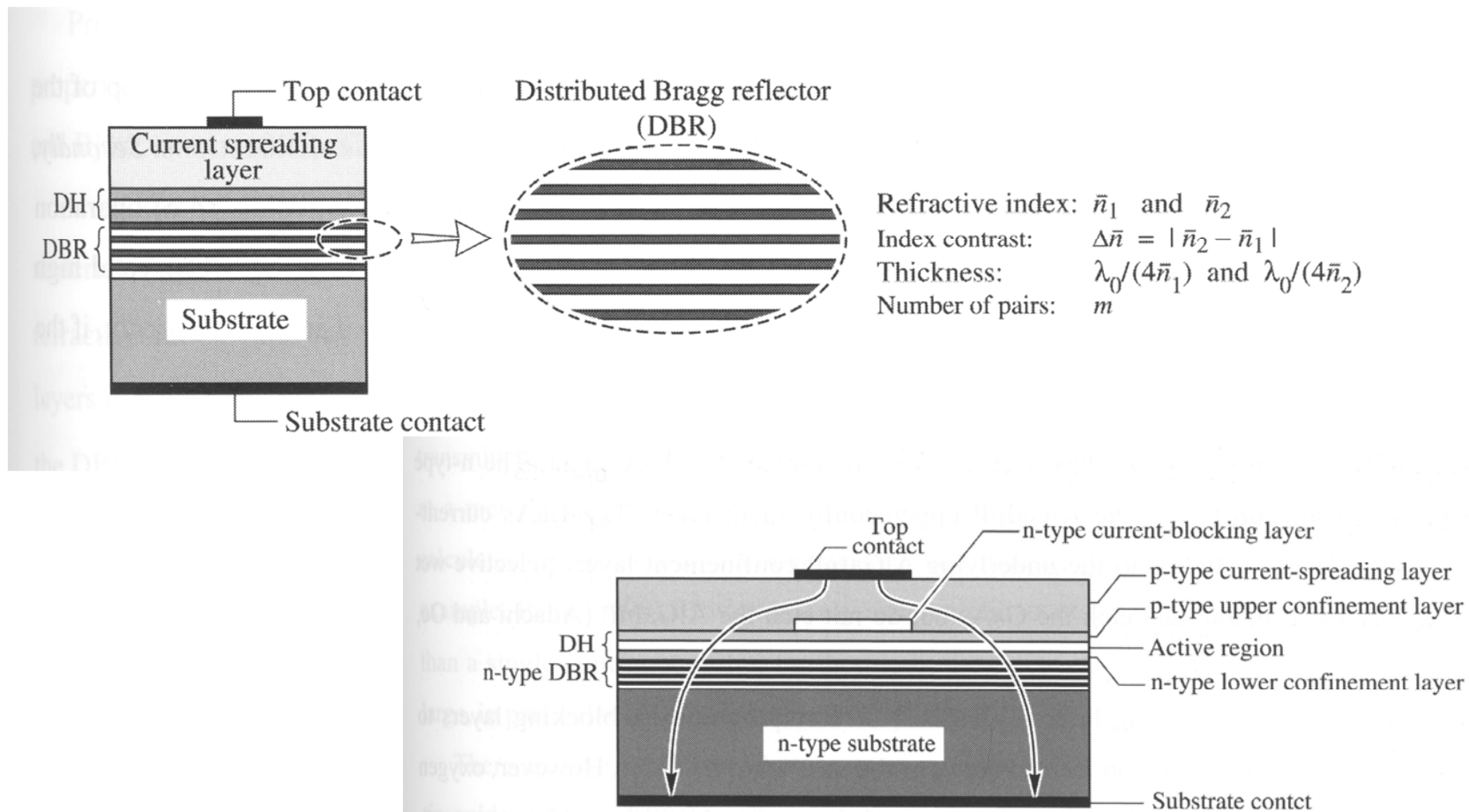


Fig. 7.24. LED with an n-type current-blocking layer located on the upper confinement layer. Light emission occurs in the regions not covered by the opaque top ohmic contact. The LED is fabricated by *epitaxial regrowth*. After growth of the current-blocking layer, the wafer is taken out of the growth system for etching. The wafer is then re-introduced into the epitaxial system for growth of the current-spreading layer.

Ale pozor na životnost a pnutí.

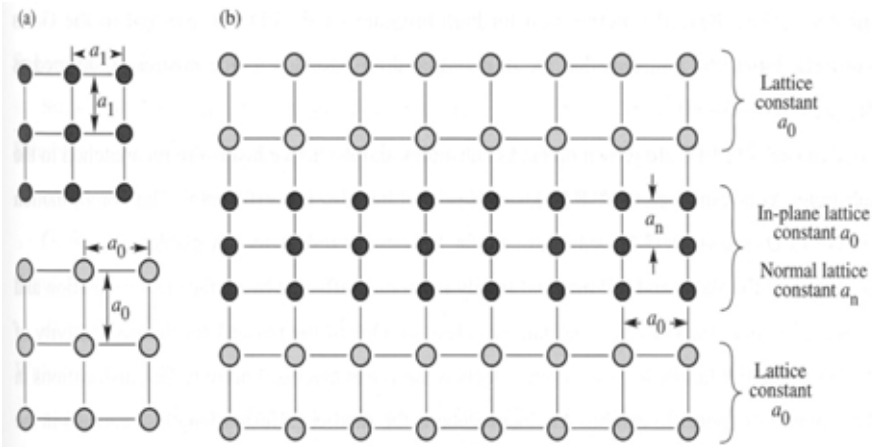


Fig. 6.14. (a) Cubic-symmetry crystals with equilibrium lattice constant a_1 and a_0 . (b) Thin, coherently strained crystal layer with equilibrium lattice constant a_1 sandwiched between two semiconductors with equilibrium lattice constant a_0 . The coherently strained layer assumes an in-plane lattice constant a_0 and a normal lattice constant a_n .

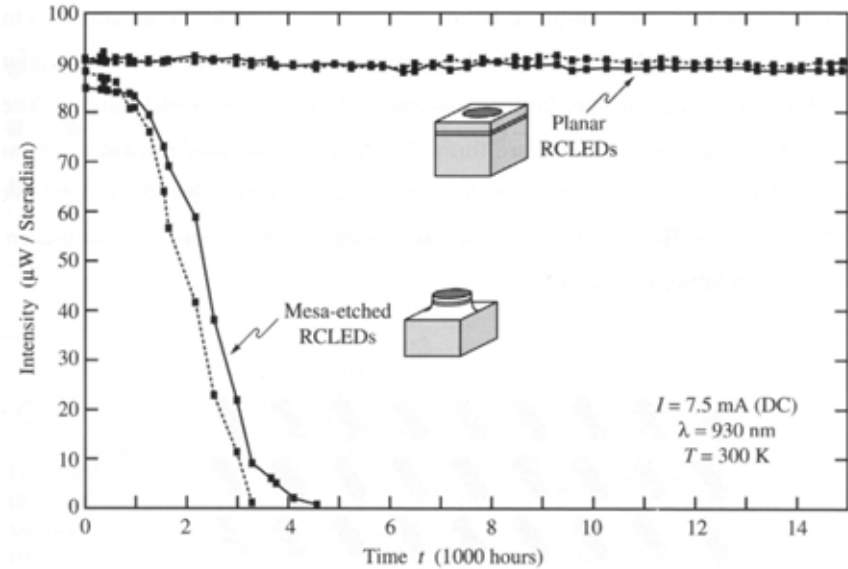


Fig. 6.11. Emission intensity of two mesa-etched LEDs and two planar LEDs versus time (after Schubert and Hunt, 1998)

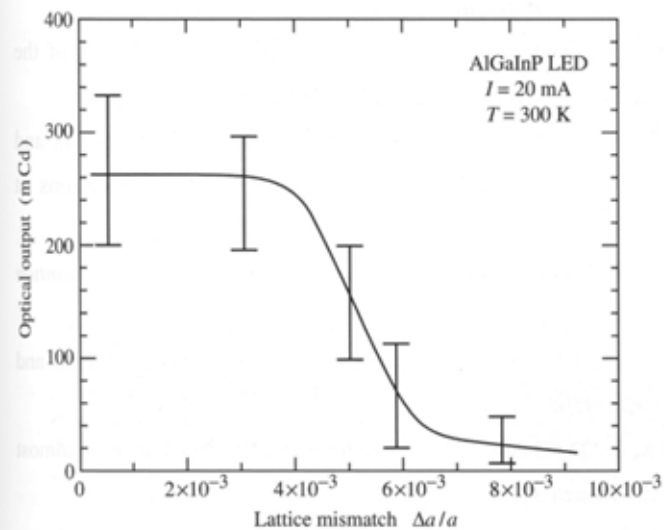


Fig. 6.15. Optical output intensity of an AlGaInP LED driven with an injection current of 20 mA versus the lattice mismatch between the AlInGaP active region and the GaAs substrate (after Watanabe and Usui, 1987).

Barvy mají pro aplikaci zásadní důležitost.

Řeší se to nejen materiálem (složením ternárních i kvaternárních sloučenin), ale v případě nanostruktur i jen jejich rozměry a geometrií.

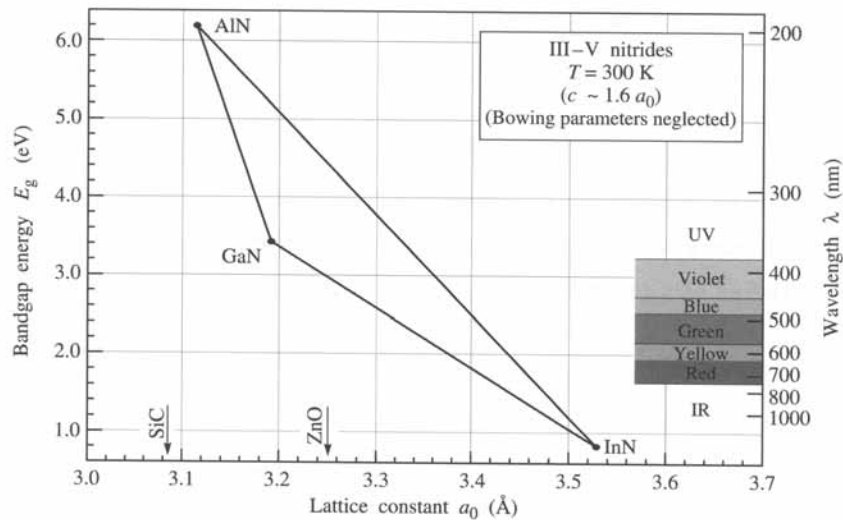
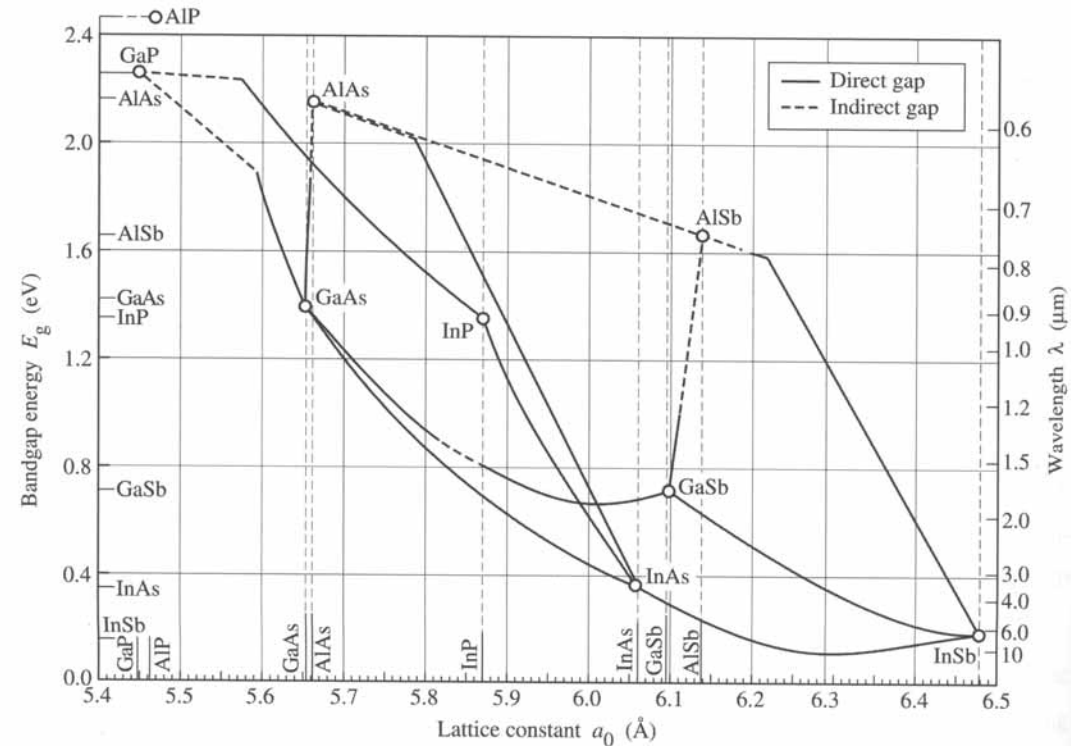


Fig. 8.12. Bandgap energy versus lattice constant of III-V nitride semiconductors at room temperature.



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

Viditelná a blízká IČ oblast je dnes již převážně komerční záležitost.

Střední a vzdálená IČ i ultrafialová oblasti jsou předmětem intenzivního výzkumu.

Bílé diody

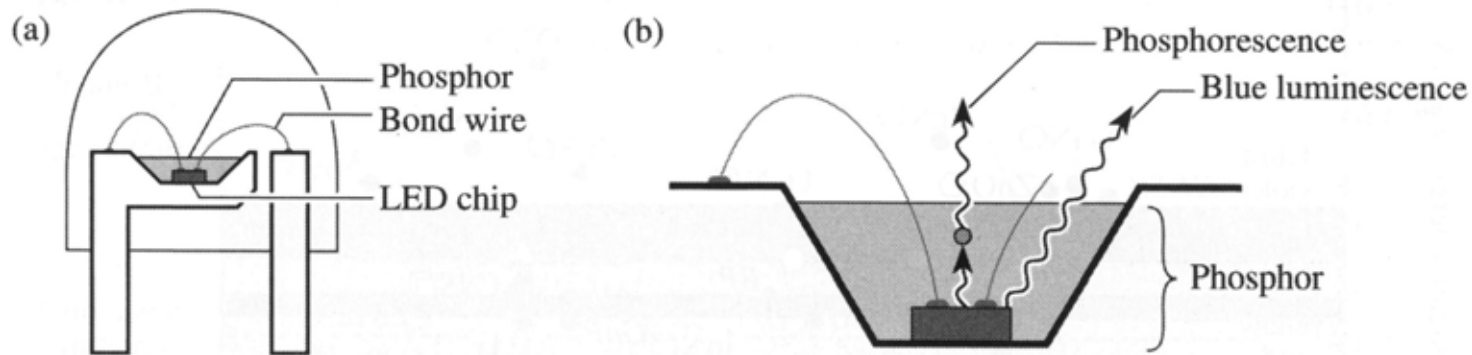


Fig. 12.5. (a) Structure of white LED consisting of a GaInN blue LED chip and a phosphor-containing epoxy encapsulating the semiconductor die. (b) Wavelength-converting phosphorescence and blue luminescence (after Nakamura and Fasol, 1997).

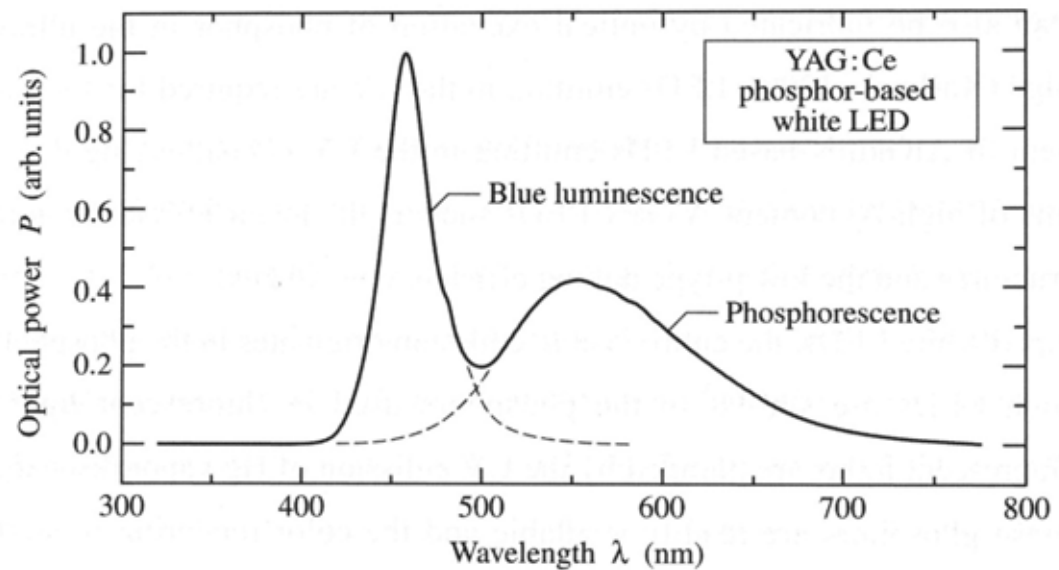


Fig. 12.6. Emission spectrum of a phosphor-based white LED manufactured by the Nichia Chemical Industries Corporation (Anan, Tokushima, Japan).

Dvoubarevné diody (jednočipové!)

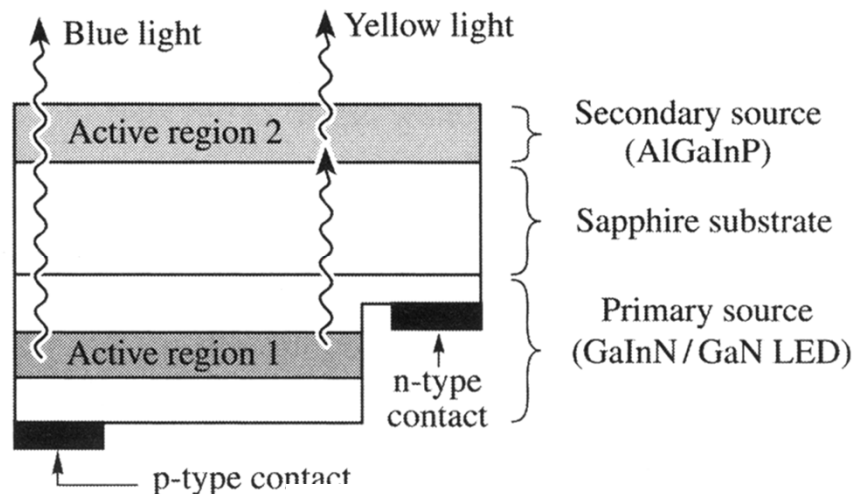


Fig. 12.8. Schematic structure of a photon-recycling semiconductor LED with one current-injected active region (Active region 1) and one optically excited active region (Active region 2) (after Guo *et al.*, 1999).

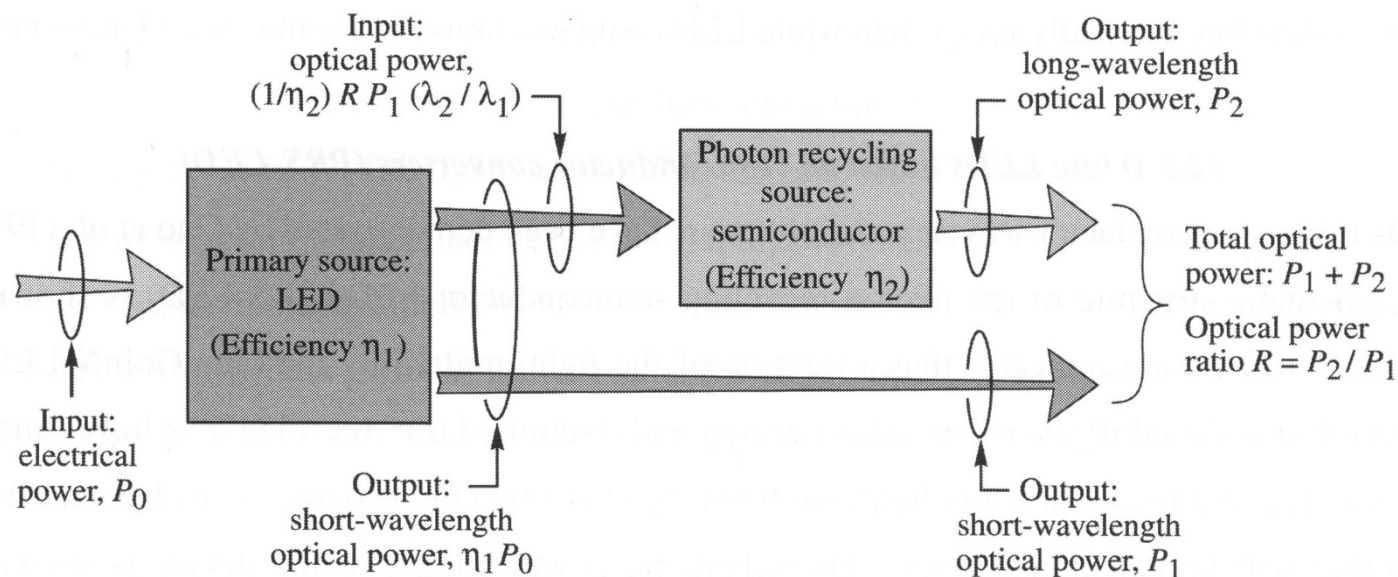


Fig. 12.9. Photon-recycling semiconductor LED power budget with electrical input power P_0 and optical output power P_1 and P_2 .

I LED-ky mohou mít rezonátory

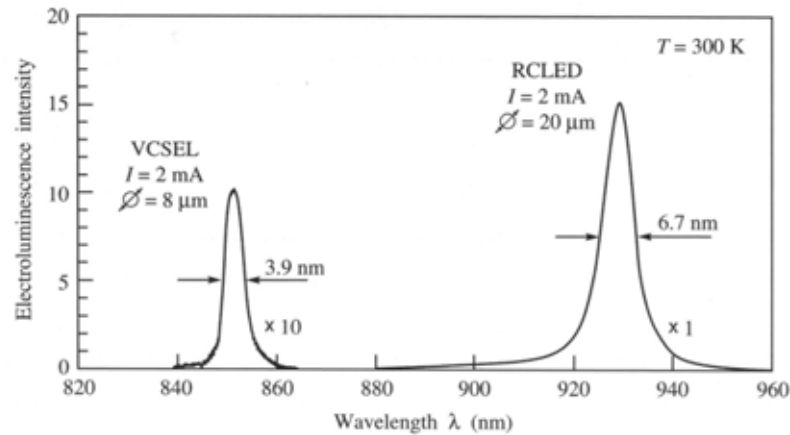


Fig. 10.3. Spontaneous electroluminescence spectrum of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) emitting at 850 nm and of a resonant-cavity light-emitting diode (RCLED) emitting at 930 nm. The drive current for both devices is 2 mA. The VCSEL spectrum is multiplied by a factor of 10. The threshold current of the VCSEL is 7 mA (after Schubert *et al.*, 1996).

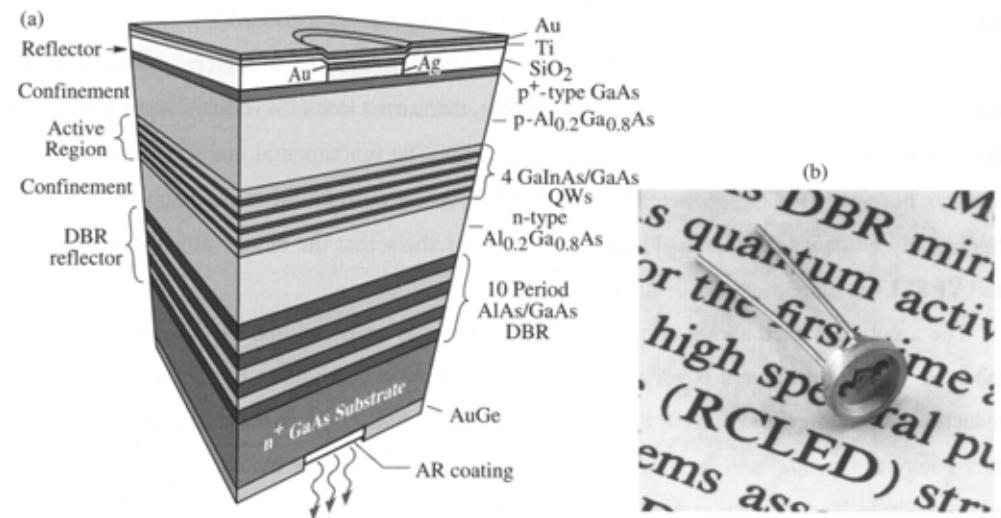


Fig. 10.4. (a) Schematic structure of a substrate-emitting GaInAs/GaAs RCLED consisting of a metal top reflector and a bottom distributed Bragg reflector (DBR). The RCLED emits at 930 nm. The reflectors are an AlAs/GaAs DBR and a Ag top reflector. (b) Picture of the first RCLED (after Schubert *et al.*, 1994).

Kolik stojí lumen?

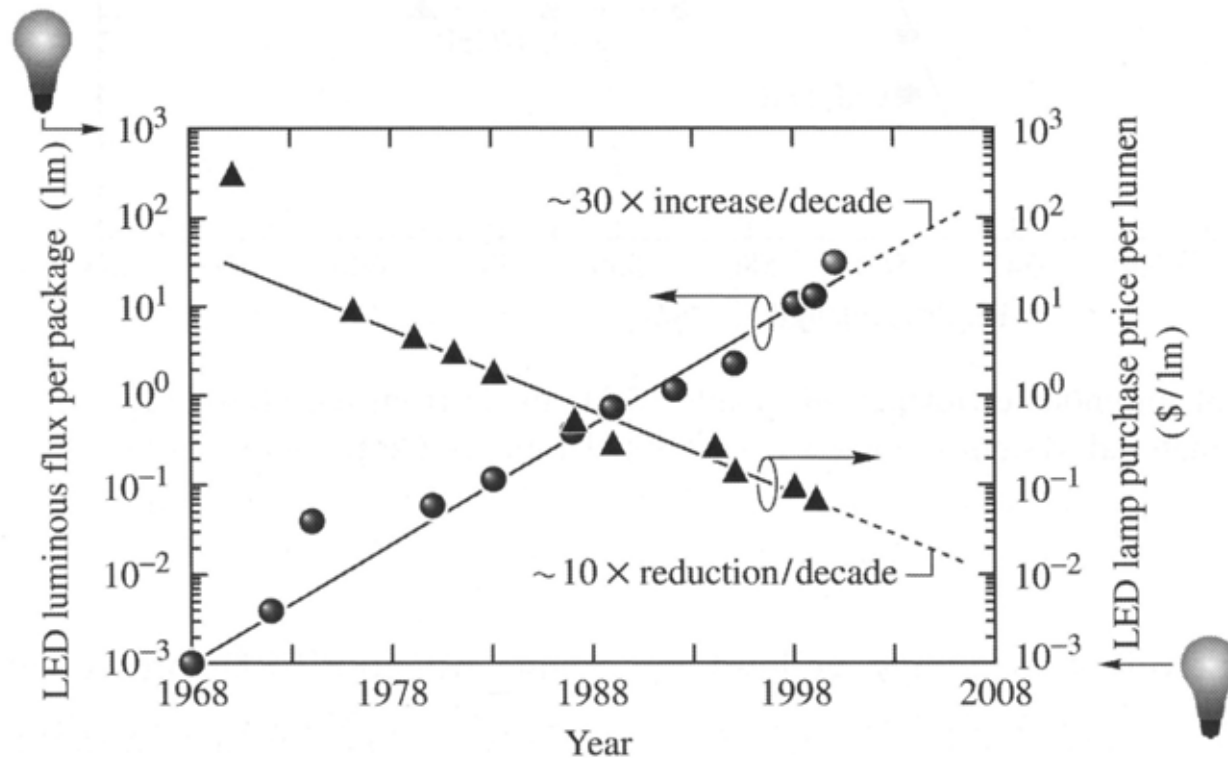


Fig. 8.15. LED luminous flux per package and LED lamp purchase price per lumen versus year. Also shown are the values for a 60 W incandescent tungsten-filament light bulb with a luminous performance of about 17 lm/W and a luminous flux of 1000 lm with an approximate price of 1.00 US\$ (after Krames *et al.*, 2000).

Spektrální citlivost oka (a LED vlastnosti)

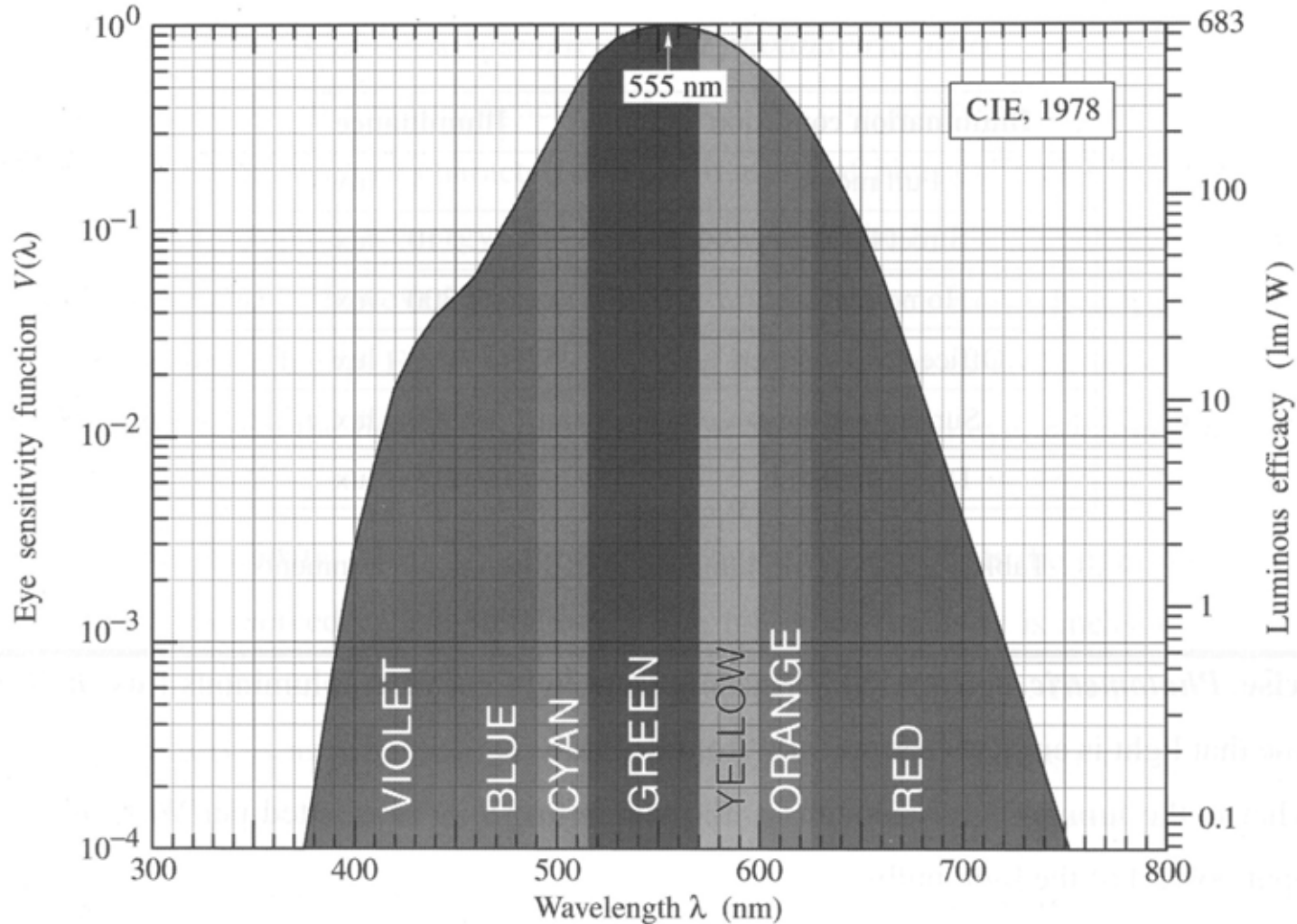
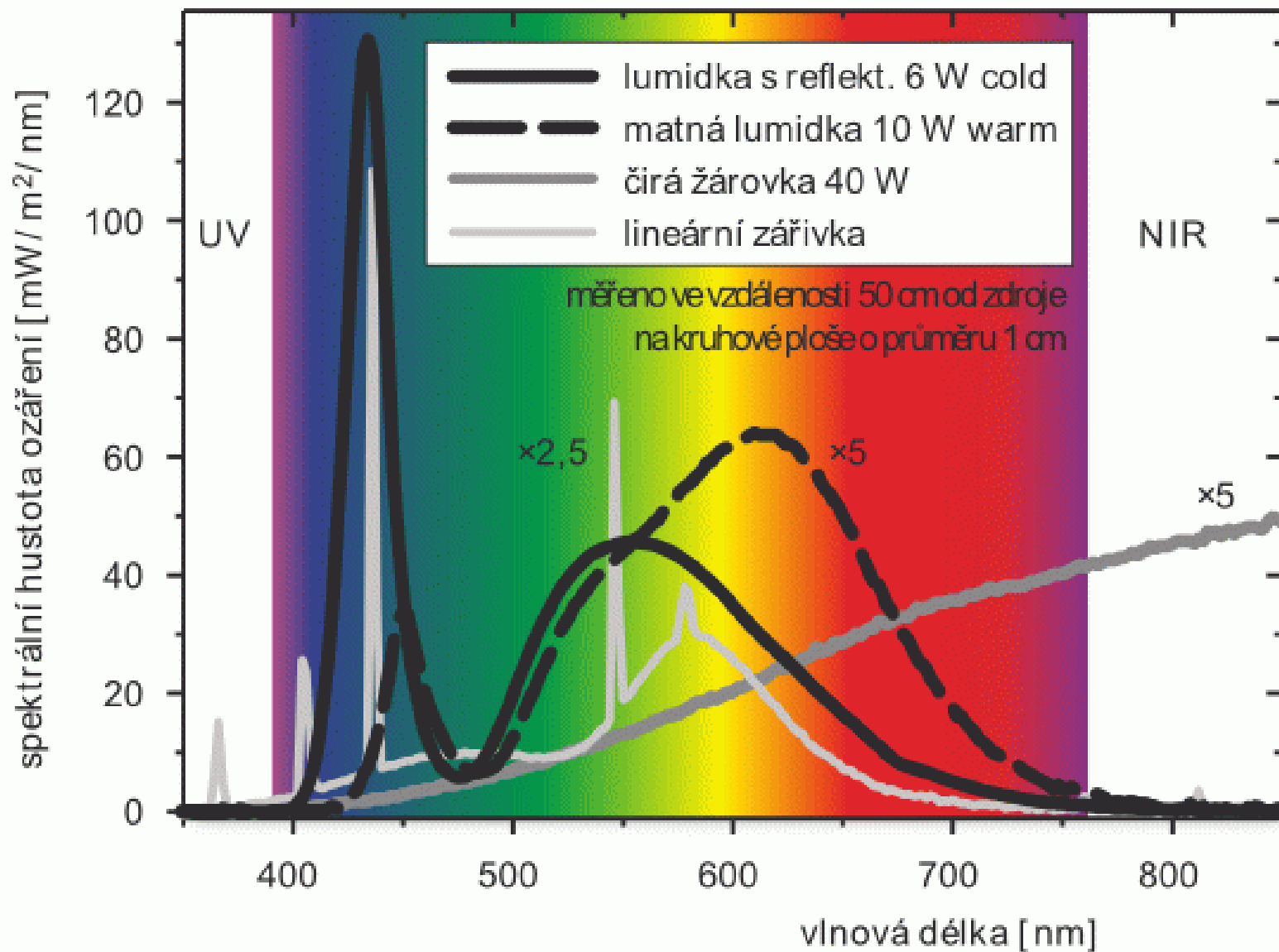


Fig. 11.2. Eye sensitivity function, $V(\lambda)$, (left ordinate) and luminous efficacy, measured in lumens per Watt of optical power (right ordinate). The eye sensitivity is greatest at 555 nm. Also given is a polynomial approximation for $V(\lambda)$ (after 1978 CIE data).





Stručný úvod je za námi, tak
teď k té loňské Nobelově ceně

Lonští laureáti:

Isamu Akasaki


Hiroši Amano

Šudži Nakamura



Nagoja University

firma Nichia / UCSB




⁶ **Isamu Akasaki** (赤崎 勇 *Akasaki Isamu*², born January 30, **1929**) is a Japanese scientist known for inventing the bright [gallium nitride \(GaN\)](#) p-n junction **blue LED in 1989** and subsequently the high-brightness **GaN** blue LED as well.^{[1][2][3][4][5]}

For this and other work Isamu Akasaki was awarded the [Kyoto Prize](#) in Advanced Technology in 2009^[6] and the [IEEE Edison Medal](#) in 2011.^[7]


Born in [Kagoshima](#) Prefecture, Akasaki graduated from [Kyoto University](#) in 1952, and obtained a [Dr.Eng.](#) degree in [Electronics](#) from [Nagoya University](#) in 1964. He started working on [GaN](#)-based blue LEDs in the **late 1960s**. Step by step, he improved the quality of GaN crystals and [device](#) structures^[9] at Matsushita Research Institute Tokyo, Inc.(MRIT), where he decided to adopt [metalorganic vapor phase epitaxy \(MOVPE\)](#) as the preferred growth method for GaN.

In 1981 he started afresh growth of GaN by MOVPE at Nagoya University and in 1985 he and his group succeeded in growing high-quality GaN on sapphire substrate by pioneering the low-temperature(LT) buffer layer technology.^{[10][11]}



Hiroshi Amano (天野 浩 *Amano Hiroshi*?, born September 11, **1960**) was born in Hamamatsu, Japan on September 11, 1960. He received his [BE](#), [ME](#) and [DE](#) degree in 1983, 1985 and 1989, respectively, from [Nagoya University](#). From 1988 to 1992, he was a research associate at Nagoya University. In 1992, He moved to [Meijo University](#), where he was an assistant professor. From 1998 till 2002 he was an associate professor. In 2002, he became a professor. In 2010 he moved to the Graduate School of Engineering, Nagoya University, where he is currently a professor.


He joined Professor [Isamu Akasaki](#)'s group in 1982 as an undergraduate student. In **1985, he developed low-temperature deposited buffer layers** for the growth of group III nitride semiconductor films on a sapphire substrate, which led to the realization of group-III-nitride semiconductor based light-emitting diodes and laser diodes. In **1989**, he succeeded in growing p-type GaN and fabricating a p-n-junction-type GaN-based UV/blue light-emitting diode for the first time in the world.



Šúdži Nakamura, též **Shuji (Shūji) Nakamura**, (* 22.5. 1954, Seto, prefektura Ehime, Japonsko) je japonsko-americký profesor Kalifornské univerzity v Santa Barbaře (UCSB od roku 1999). V roce 1977 absolvoval Tokušimskou univerzitu, kde v roce 1994 získal doktorát. Od 70. let do roku 1999 pracoval ve firmě Nichia Corporation.

Shuji Nakamura is regarded as the inventor of the blue LED, a major breakthrough in lighting technology. For Nichia Nakamura invented the first high brightness gallium nitride (GaN) LED whose brilliant blue light, when partially converted to yellow by a phosphor coating, is the key to white LED lighting, which went into production in 1993.

At the time, many considered creating a GaN LED too difficult to produce, therefore Nakamura was fortunate that the founder of Nichia, Nobuo Ogawa (1912–2002) was initially willing to support his GaN project. However the company eventually ordered him to suspend work on GaN, claiming it was consuming too much time and money. Nakamura continued to develop the blue LED on his own and in **1993** succeeded in making the device.



In 2001, Nakamura sued his former employer Nichia over his bonus for the discovery, which was originally $\text{¥}20,000$ (\approx **US\$180**). Although Nakamura originally won an appeal for $\text{¥}20$ billion (\approx **US\$180** million), Nichia appealed the award and the parties settled in 2005 for $\text{¥}840$ million (\approx **US\$9** million), at the time the largest bonus ever paid by a Japanese company.

Nakamura has also worked on green LEDs, and is responsible for creating the white LED and [blue laser diodes](#) used in [Blu-ray Discs](#) and [HD DVDs](#).

Nakamura is a professor of Materials at the University of California, Santa Barbara, and holds over 100 patents. In 2008, Nakamura, along with fellow UCSB professors Dr. Steven DenBaars and Dr. James Speck, founded **Soraa**, a developer of solid-state lighting technology built on pure gallium nitride substrates.

Soraa's New LED Optical Light Engines Are Poised To Inspire New Fixture Designs

FREMONT, CA, FEBRUARY 17, 2015

Soraa, the world leader in GaN-on-GaN™ LED technology, launched today a small, low profile series of light engines that provide fixture manufacturers access to the company's full visible spectrum GaN-on-GaN LED technology. From narrow spot to flood, Soraa's Optical Light Engines produce incredibly high **CBCP**; and the engine's optical design provides flawless beam definition, smooth beam edges and is customizable with the company's **SNAP** System. Designed for seamless fixture integration, the Optical Light Engines are compatible with a wide variety of industry-standard LED drivers and perfect for use in enclosed, non-ventilated indoor.

Certified Business Continuity Professional



Soroa's SNAP System:



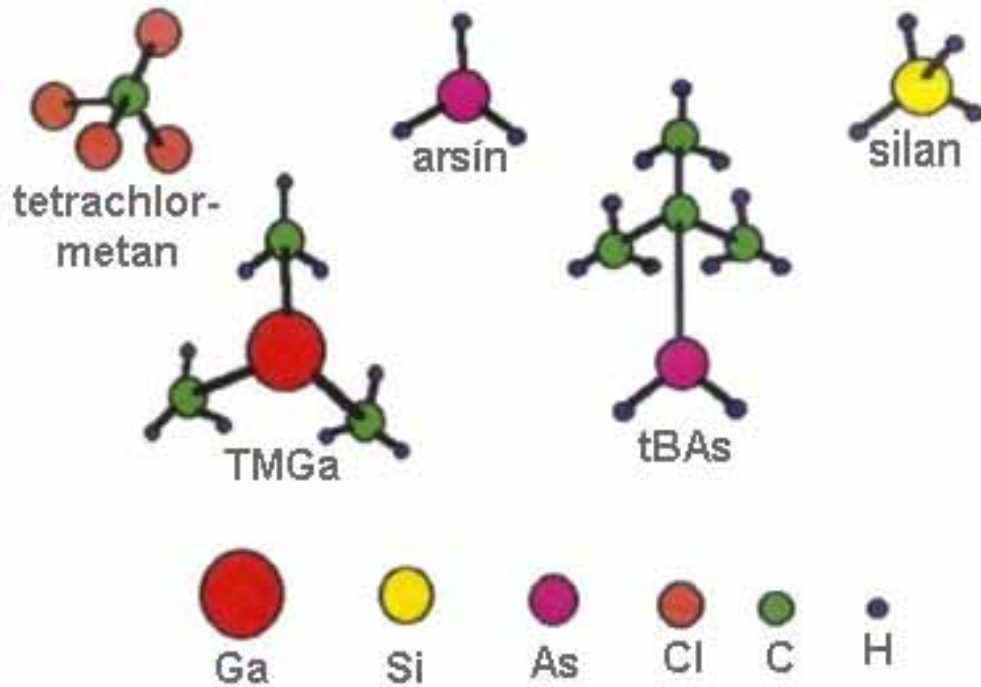
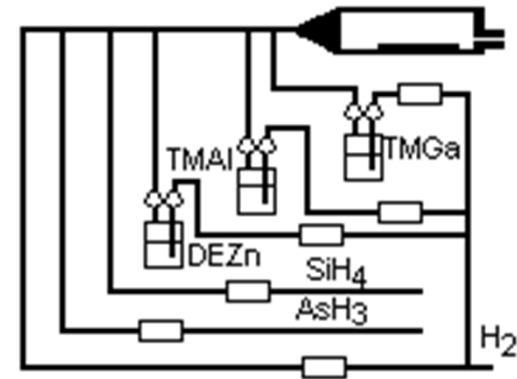
Než se dostaneme k popisu podstaty nobelovského počínu, musíme říci něco o způsobu přípravy LED (i LD) struktur.

Monokrystaly, periodicky dokonalé a úctyhodných rozměrů se připravují z **taveniny** (= vysoká teplota → hodně bodových defektů: vakance, intersticiály, antisidy a jejich kombinace, neboť platí rovnice pro minimum energie - $\mu = \Delta G = \Delta H - T\Delta S$, přes defekty běží nezářivá rekombinace → struktury nesvítí a i jinak špatně fungují).

Vrstvy, struktury (**hetero i nano**) se připravují **epitaxním** růstem (epitaxe známá již od roku 1936 = z řeckého „uspořádaně na“). Růst probíhá z pevné, kapalně i plynné fáze a hlavně při nižších teplotách ($S = \ln(n)$), tak stačí jen násobně nižší, než při růstu z taveniny, aby bylo řádově méně defektů).

Dnes jsou nejdůležitější dvě:

MBE (epitaxe z molekulárních svazků) – badatelská metoda a MOVPE(=MOCVD) technologie (Metalorganic vapor phase epitaxy – Plynná epitaxe z organokovových sloučenin), badatelská, ale hlavně průmyslová.



Zdroj: <http://www.fzu.cz/texty/brana/movpe/movpe.php>

MOVPE (MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy)

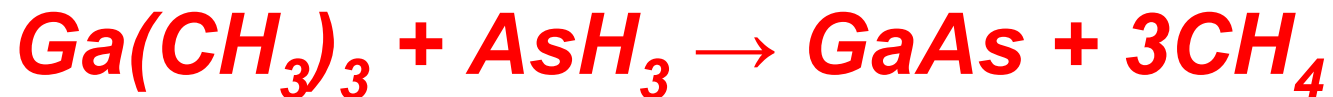
Nejvýznamnější průmyslová ale i badatelská technologie.

Princip metody:

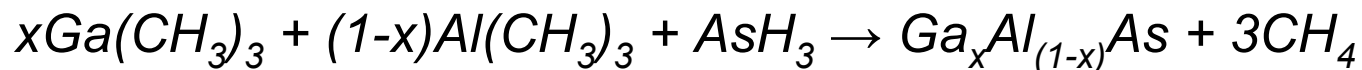
Ohřejeme substrát v prostředí ultračistého plynu (redukční vodík, výjimečně inertní dusík) na tak vysokou teplotu, aby desorbovaly přirozené oxidy a povrchové nečistoty a také, aby se povrch atomárně vyhladil. Pak přivedeme do blízkosti ohřátého substrátu vhodné prekursory (organokovy a hydridy), tyto se zde termicky rozloží a atomy budoucí epitaxní vrstvy se usadí na povrchu (fyzisorpce), migrují po něm a posléze se naváží na správná místa krystalové mřížky (chemisorpce).

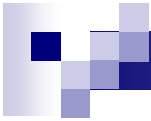
Otázky??

Základní sumární rovnice pro růst GaAs z trimetylgallia (TMGa) a arsínu

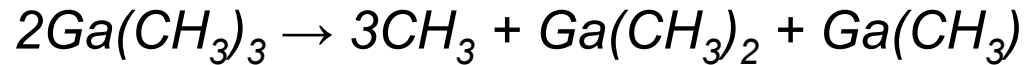


a velmi podobně pro ternární, případně kvaternární sloučeninové polovodiče

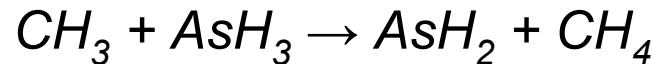




Je to ale složitější, nejprve proběhne pyrolýza TMGa na dimer a monomer



arsín se rozloží v plynné fázi



a pak teprve proběhne heterogenní reakce na povrchu horkého substrátu

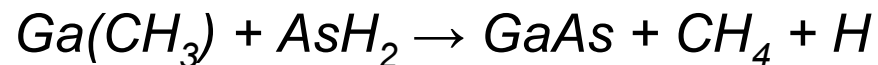
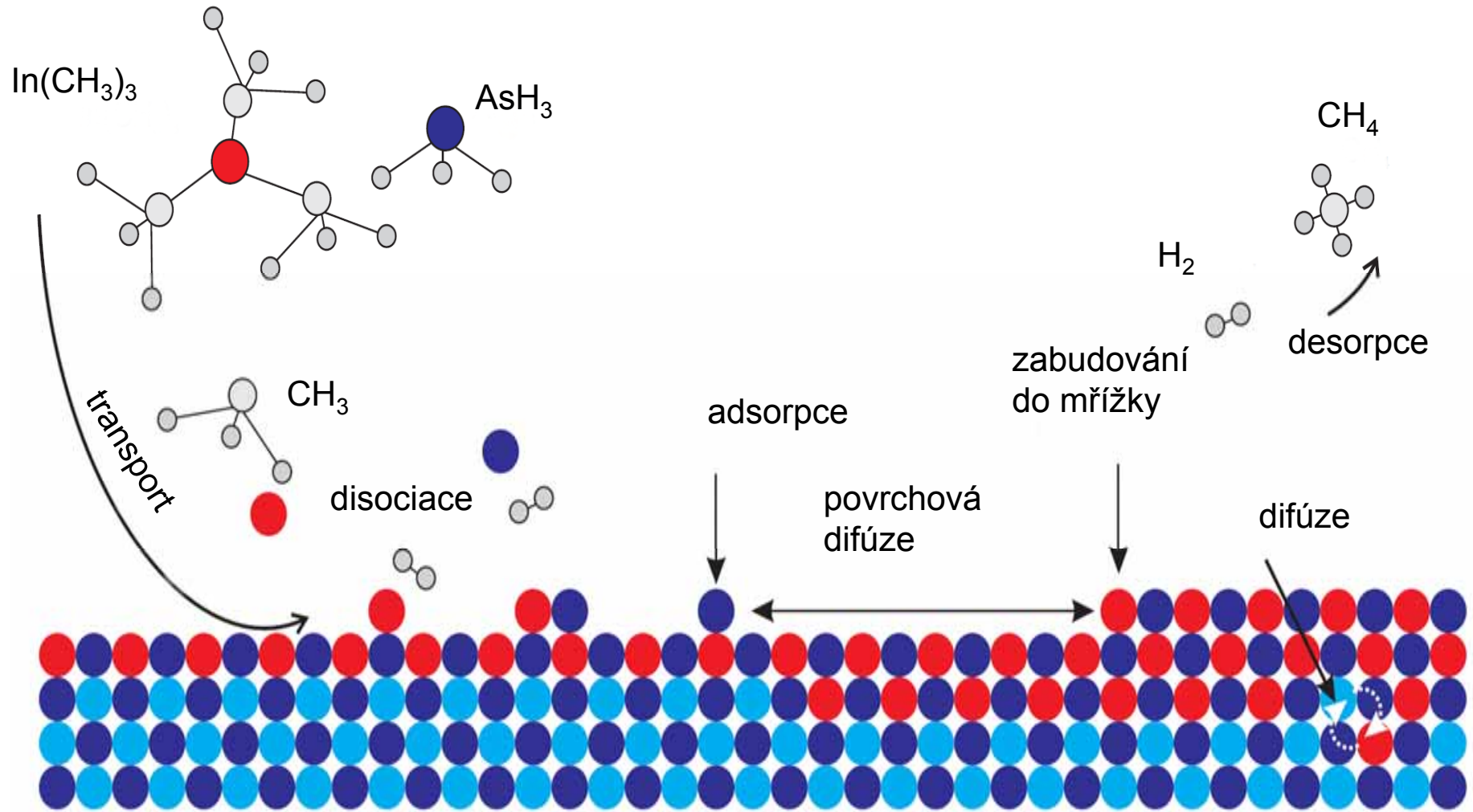
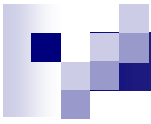


Table 2.1 Gas-phase and surface reaction mechanism for growth of GaAs from TMGa and arsine. S_A refers to an arsenic site, S_G refers to a gallium site (after Jensen *et al* 1991). (An asterisk refers to surface adsorption.)

Gas-phase reactions		Surface reactions	
(G1)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_3\cdot$	(S1)	$\text{H}\cdot + \text{S}_G \rightarrow \text{H}_G^*$
(G2)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 \rightarrow \text{GaCH}_3 + \text{CH}_3\cdot$	(S2)	$\text{H}\cdot + \text{S}_A \rightarrow \text{H}_A^*$
(G3)	$\text{CH}_3\cdot + \text{AsH}_3 \rightarrow \text{AsH}_2 + \text{CH}_4$	(S3)	$\text{CH}_3\cdot + \text{S}_G \leftrightarrow (\text{CH}_3)_G^*$
(G4)	$\text{CH}_3\cdot + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}\cdot$	(S4)	$\text{CH}_3\cdot + \text{S}_A \leftrightarrow (\text{CH}_3)_A^*$
(G5)	$\text{H}\cdot + \text{H}\cdot + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$	(S5)	$\text{GaCH}_3 + \text{S}_G \leftrightarrow \text{GaCH}_3^*$
(G6)	$\text{CH}_3 + \text{H}\cdot + \text{M} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{M}$	(S6)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{S}_G \rightarrow \text{GaCH}_3^* + \text{CH}_3\cdot$
(G7)	$\text{CH}_3\cdot + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$	(S7)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{S}_G \rightarrow \text{GaCH}_3^* + 2\text{CH}_3\cdot$
(G8)	$\text{GaCH}_3\cdot + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{GaCH}_2 + \text{CH}_4$	(S8)	$\text{GaCH}_2 + \text{S}_G + \text{S}_A \rightarrow \text{GaC} + \text{H}_2$
(G9)	$\text{GaCH}_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{GaCH}_3$	(S9)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{S}_G + \text{S}_A \rightarrow \text{GaC} + \text{CH}_3\cdot + \text{H}_2$
(G10)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{CH}_4$	(S10)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{S}_G + \text{S}_A \rightarrow \text{GaC} + 2\text{CH}_3\cdot + \text{H}_2$
(G11)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_3$	(S11)	$\text{AsH} + \text{S}_A \leftrightarrow \text{AsH}^*$
(G12)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{CH}_3$	(S12)	$\text{AsH}_2 + \text{S}_A \leftrightarrow \text{AsH}^* + \text{H}\cdot$
(G13)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 \rightarrow \text{GaCH}_2 + \text{CH}_3$	(S13)	$\text{AsH}_3 + \text{S}_A \leftrightarrow \text{AsH}^* + \text{H}_2$
(G14)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_4$	(S14)	$\text{CH}_3\cdot + \text{H}_G^* \rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_G$
(G15)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3) + \text{CH}_4$	(S15)	$\text{CH}_3\cdot + \text{H}_A^* \rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_A$
(G16)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{CH}_4$	(S16)	$\text{H}\cdot + (\text{CH})_G^* \rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_G$
(G17)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2$	(S17)	$\text{H}\cdot + (\text{CH}_3)_A^* \rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_A$
		(S18)	$\text{H}_G^* + (\text{CH})_A^* \rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_A + \text{S}_G$
		(S19)	$\text{H}_A^* + (\text{CH})_G^* \rightarrow \text{CH}_4 + \text{S}_A + \text{S}_G$
		(S20)	$\text{H}_A^* + \text{H}_G^* \rightarrow \text{H}_2 + \text{S}_A + \text{S}_G$
		(S21)	$(\text{CH}_3)_A^* + (\text{CH}_3)_G^* \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + \text{S}_A + \text{S}_G$
		(S22)	$\text{GaCH}_3^* + \text{AsH}^* \rightarrow \text{GaAs} + \text{CH}_4 + \text{S}_A + \text{S}_G$
		(S23)	$\text{AsH}^* + \text{AsH}^* \rightarrow \text{As}_2 + \text{H}_2 + 2\text{S}_A$
		(S24)	$\text{CH}_3\cdot + \text{AsH}^* \rightarrow \text{As}^* + \text{CH}_4$
		(S25)	$\text{As}^* + \text{As}^* \rightarrow \text{As}_2 + 2\text{S}_A$
		(S26)	$\text{GaCH}_3^* + \text{As}^* \rightarrow \text{GaAs} + \text{CH}_3\cdot + \text{S}_G + \text{S}_A$

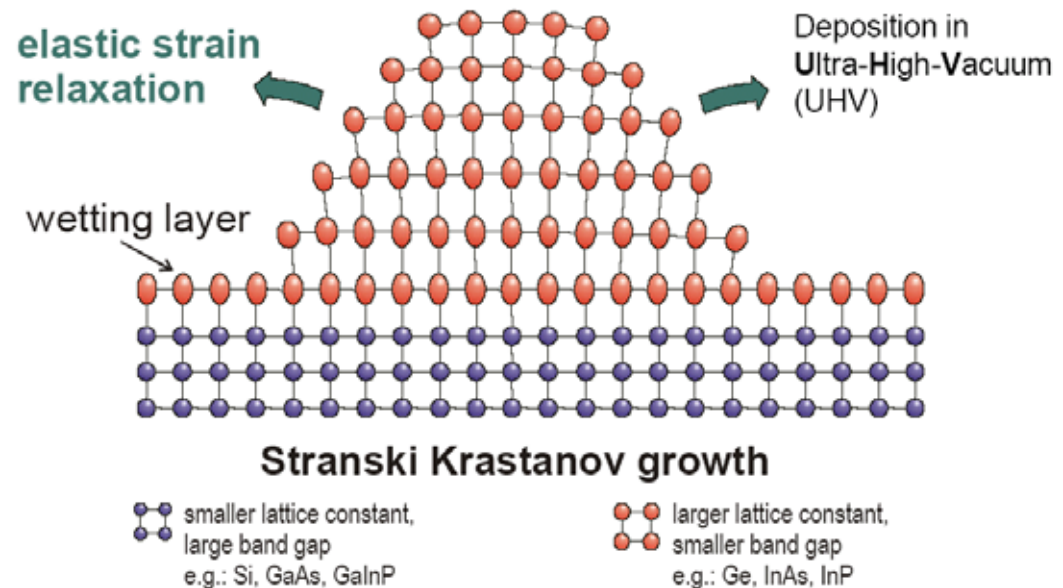


Nutná podmínka pro úspěšný epitaxní růst je mřížkově kompatibilní podložka! Jinak vzniknou dislokace, které jsou ještě horší než bodové poruchy.

Je to problém i pro jednoduché sobě podobné krystalografické mřížky (GaAs/AlAs rozdíl jen 0,1 %; InAs/GaAs–7%.

Tenké vrstvy, tak asi do 20nm, připravit lze – napnou se ale nerelaxují do dislokací.

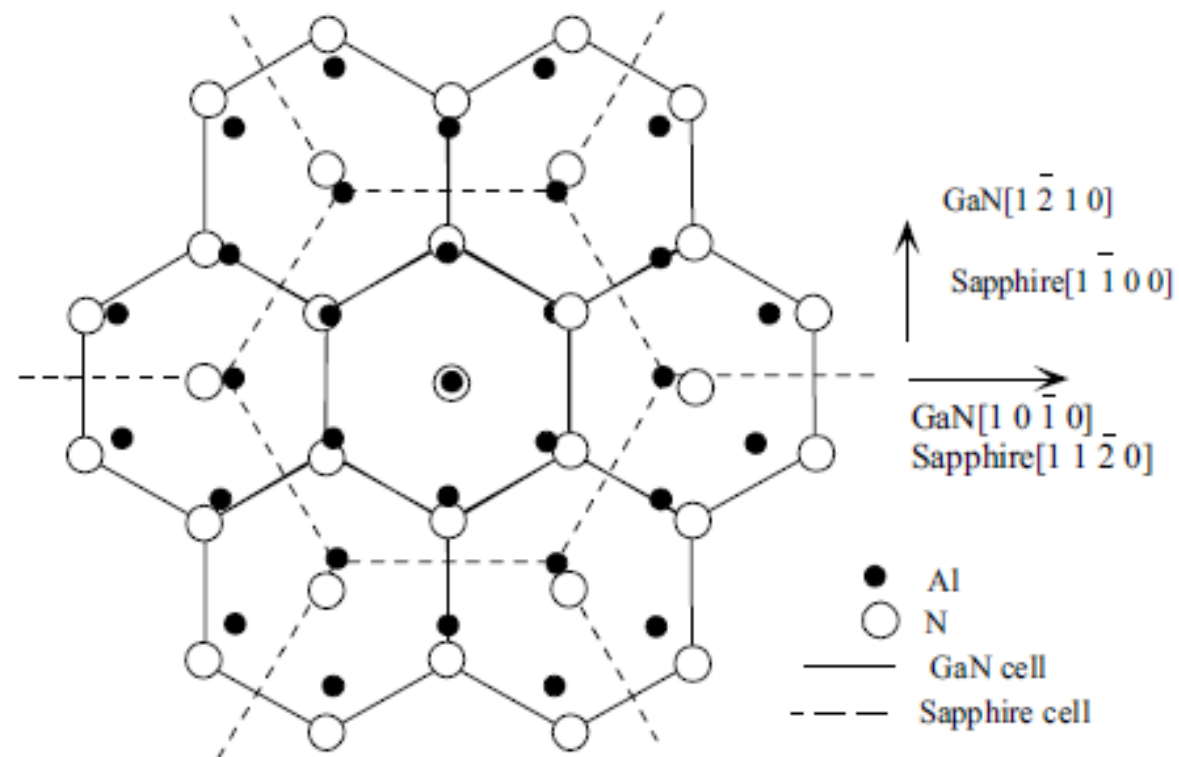
Self-assembled quantum dots



➔ Perfect crystallinity of quantum dots (not possible with top-down technology)

Pro velmi různé materiály je to problém veliký a dlouho se zdálo, že neřešitelný.

Příklad – GaN na safírové (Al_2O_3) podložce:



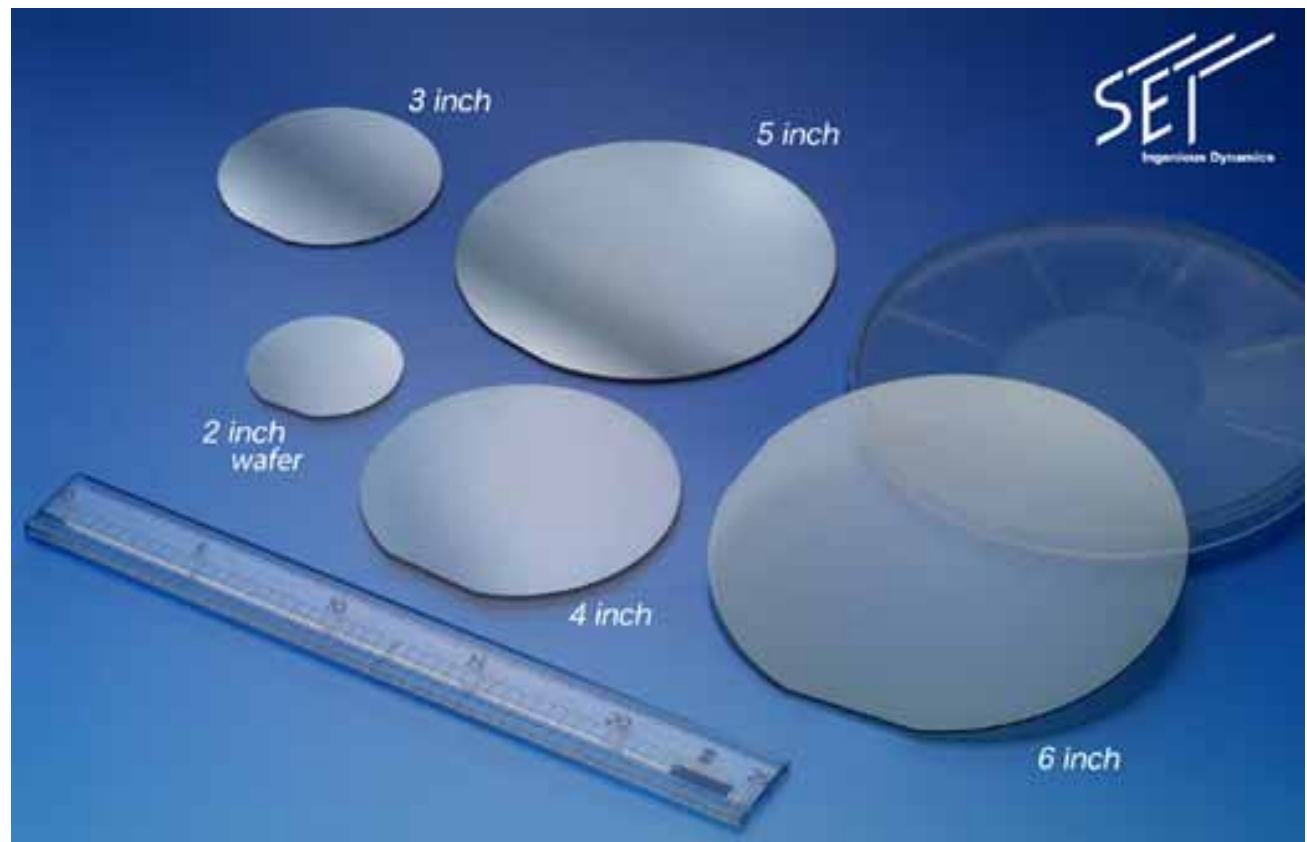
GaN krystal/vrstva je otočena o 30° vůči safírové podložce. Nepřizpůsobení krystalů 15 %!

Proč se nepoužila GaN podložka? Jako v případě struktur založených na GaAs, InAs, GaSb, Si, Ge, ...

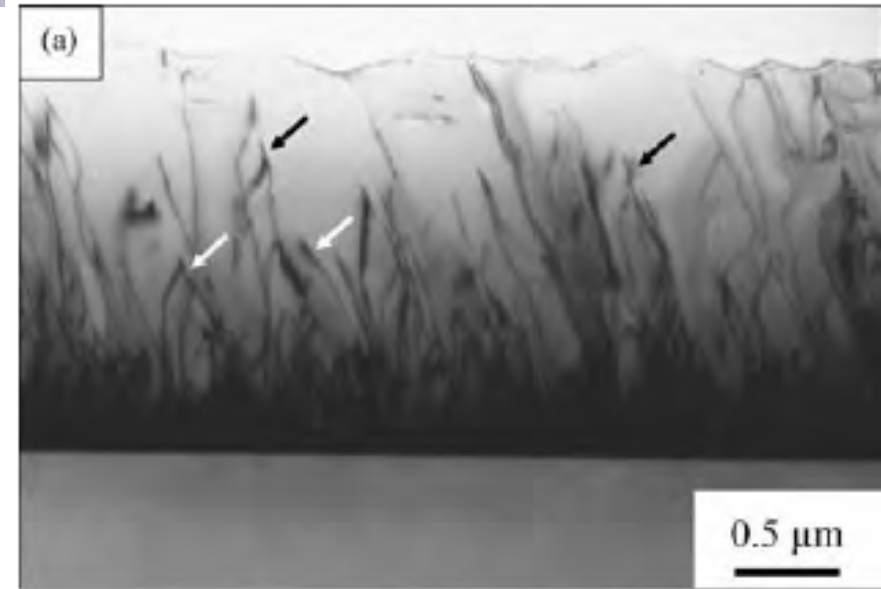
Monokrystalické GaN substráty byly dlouho nedostupné (vysoká teplota tání, vysoký tlak dusíku nad taveninou,...), teď již existují, ale jsou drahé, málo kvalitní a relativně malé.

Safír je mnohem dostupnější.

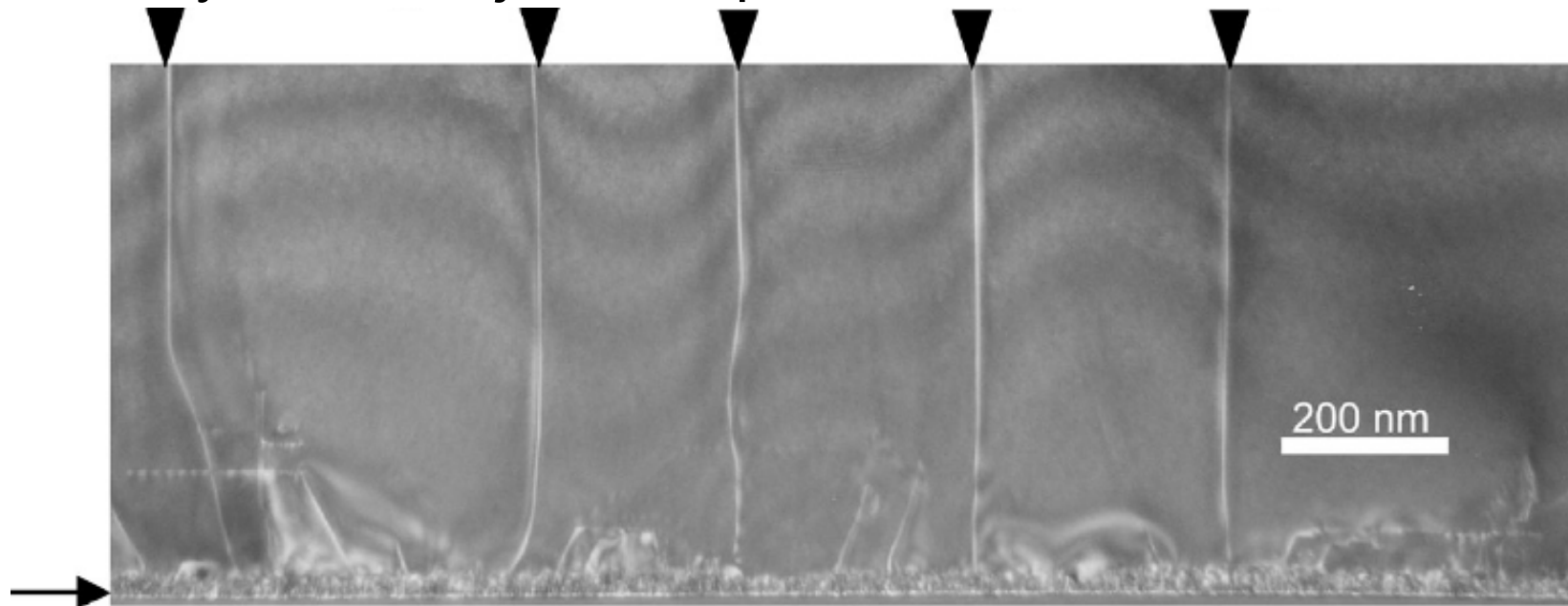
Používá se i SiC
Si, ZnO a další.




Ale vrstvy jsou špatné:



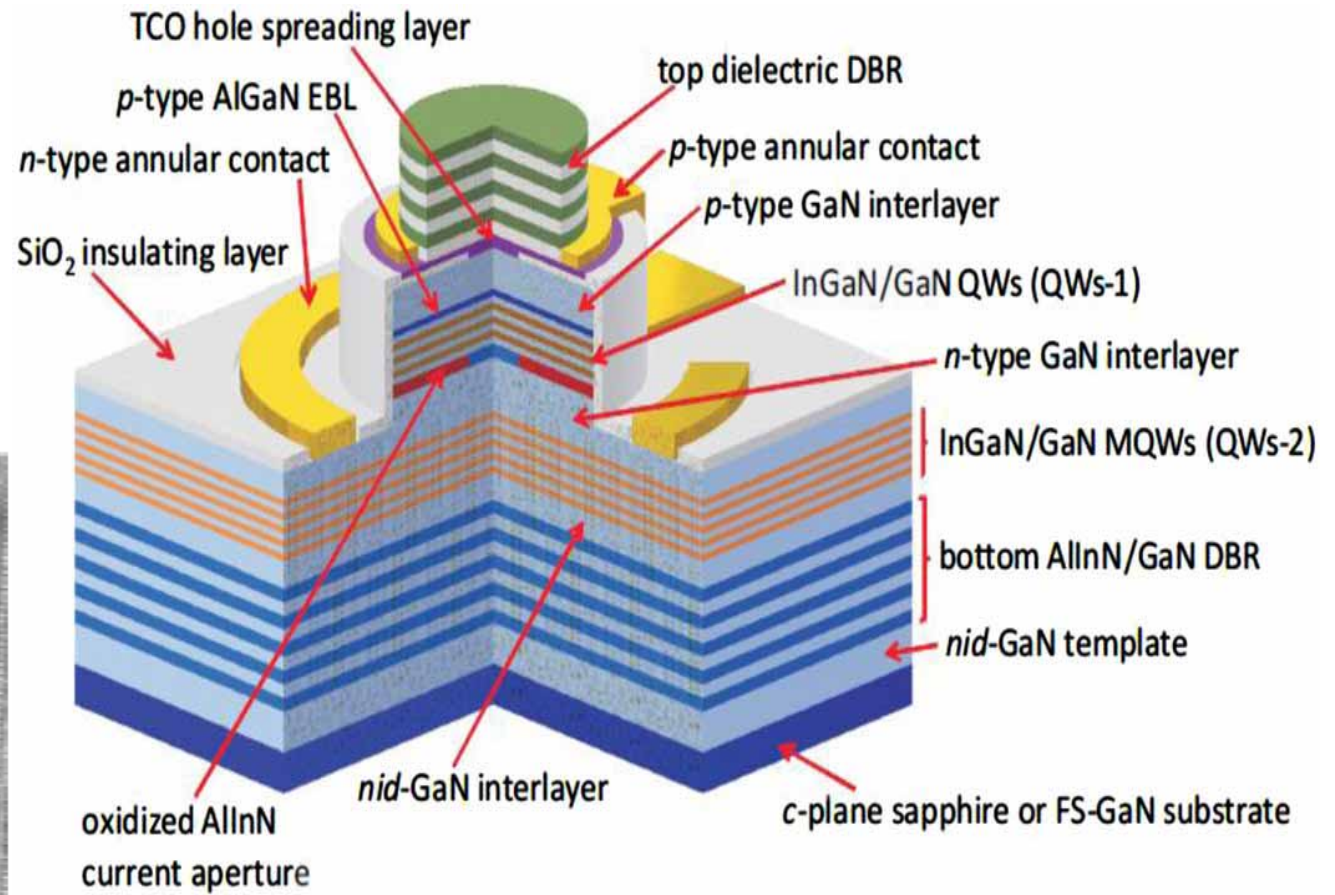
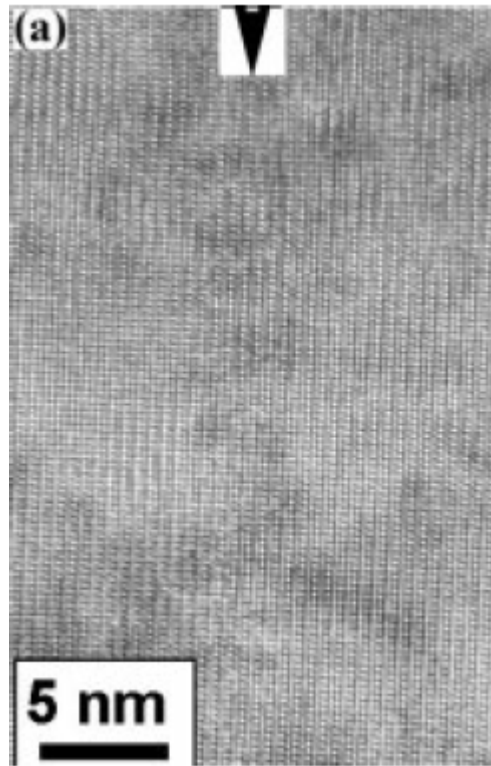
„Nobelovským trikem“ lze zlepšit:



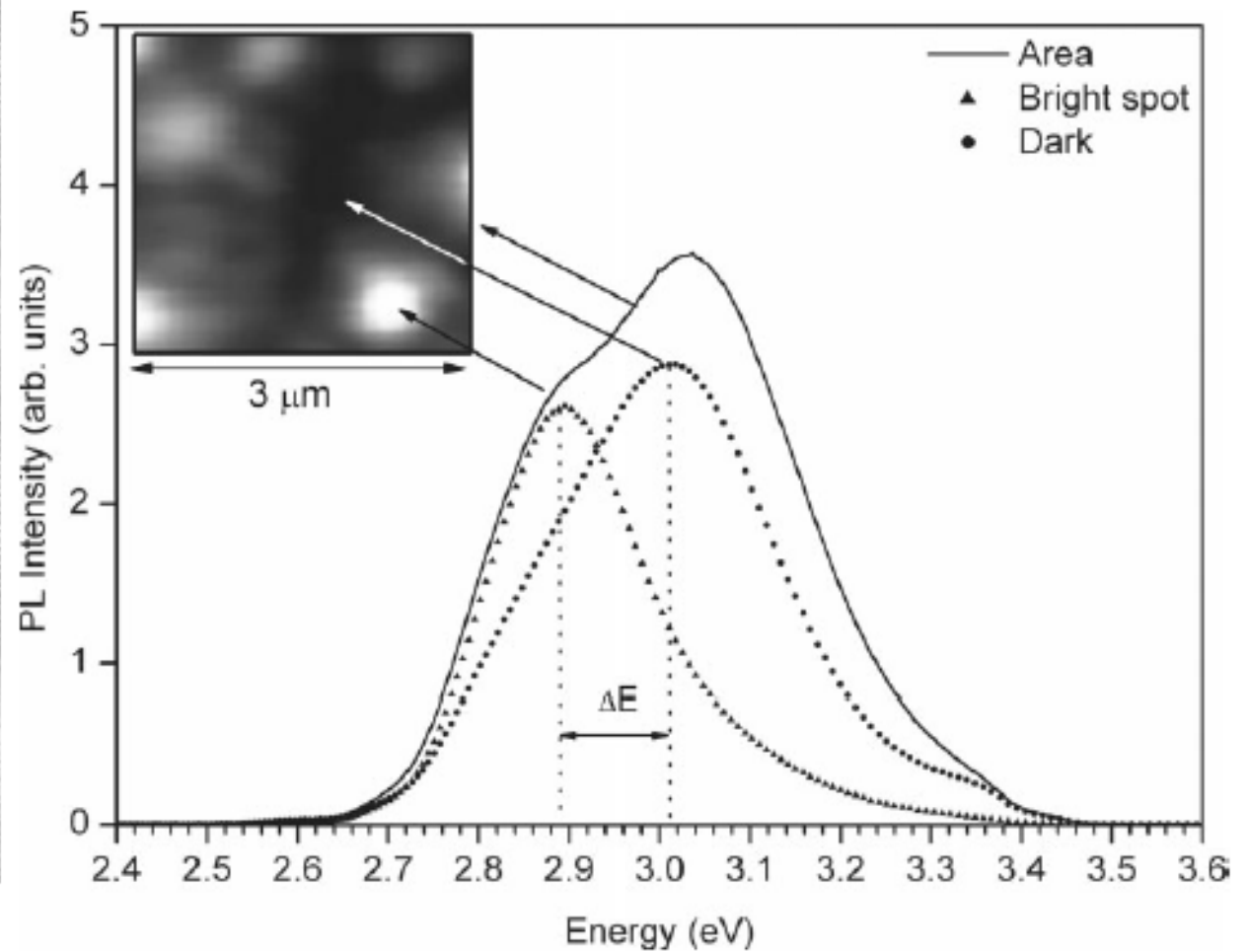


In 1981 **Akasaki** started a fresh growth of GaN by MOVPE at Nagoya University, and in 1985 he and his group succeeded in growing high-quality GaN on sapphire substrate by pioneering the **low-temperature** (LT) **buffer layer** technology.^{[10][11]}

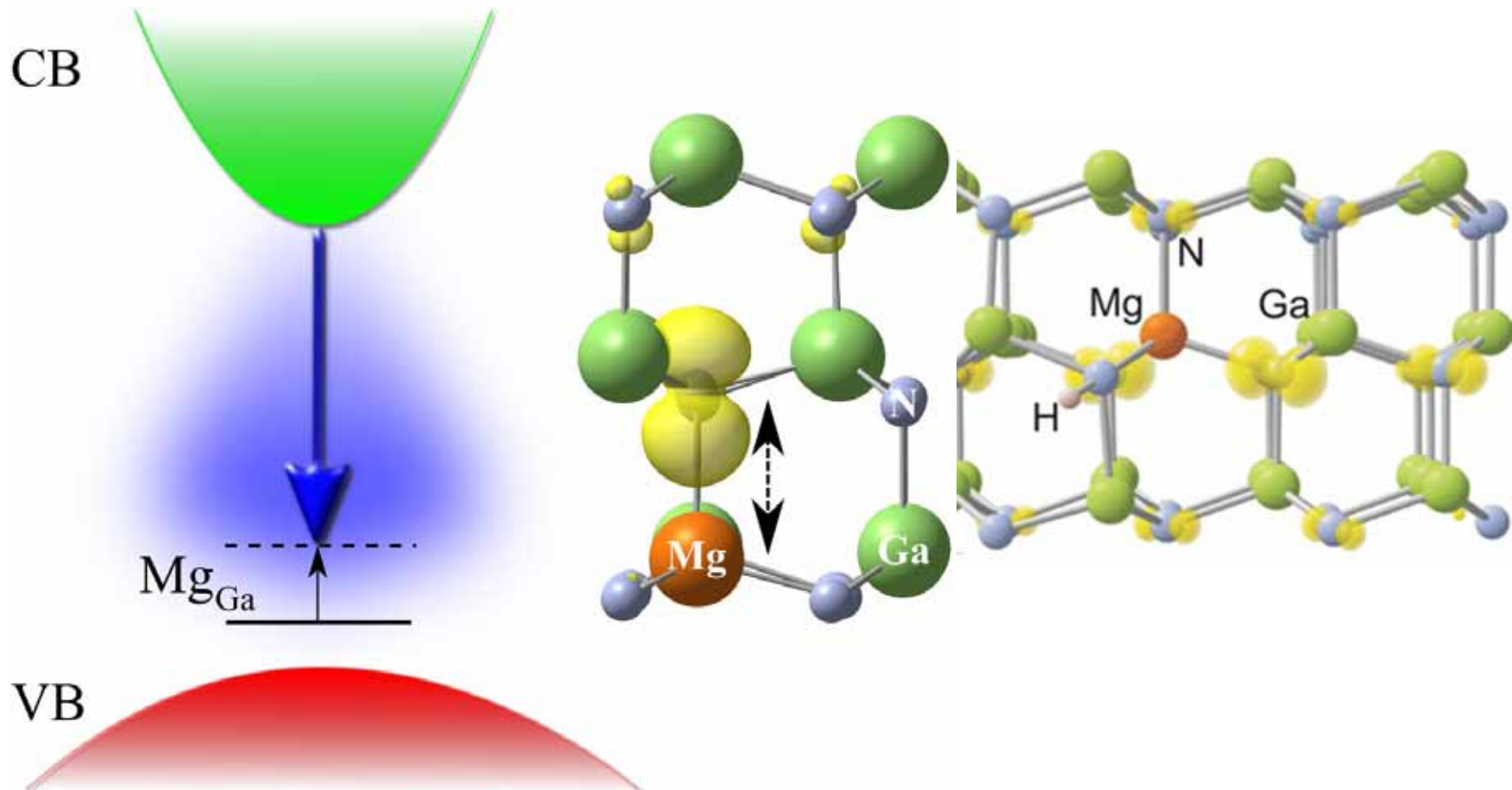
This high-quality GaN enabled them to discover **p-type GaN by doping with magnesium** (Mg) and subsequent activation by **electron irradiation** (1989), to produce the first GaN p-n junction blue/UV LED(1989), and to achieve conductivity control of **n-type GaN** (1990)^[12] and related alloys (1991)^[13] by doping with silicon (**Si**), enabling the use of hetero structures and multiple quantum wells in the design and structure of more efficient p-n junction light emitting structures.



Efekt „nezáměrných“ kvantových teček:

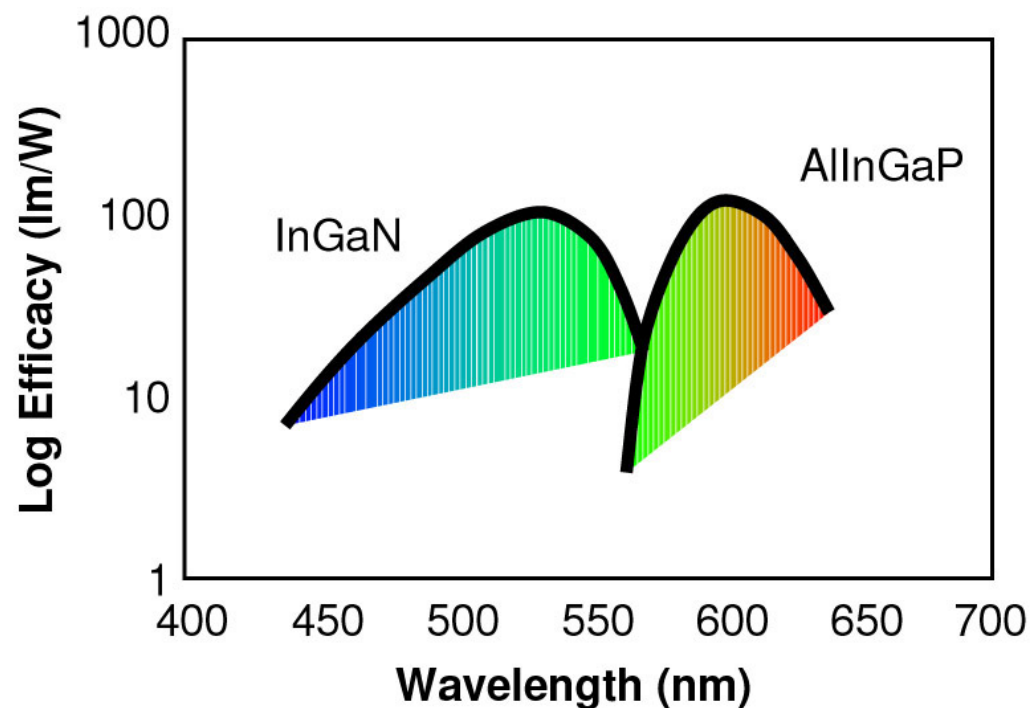
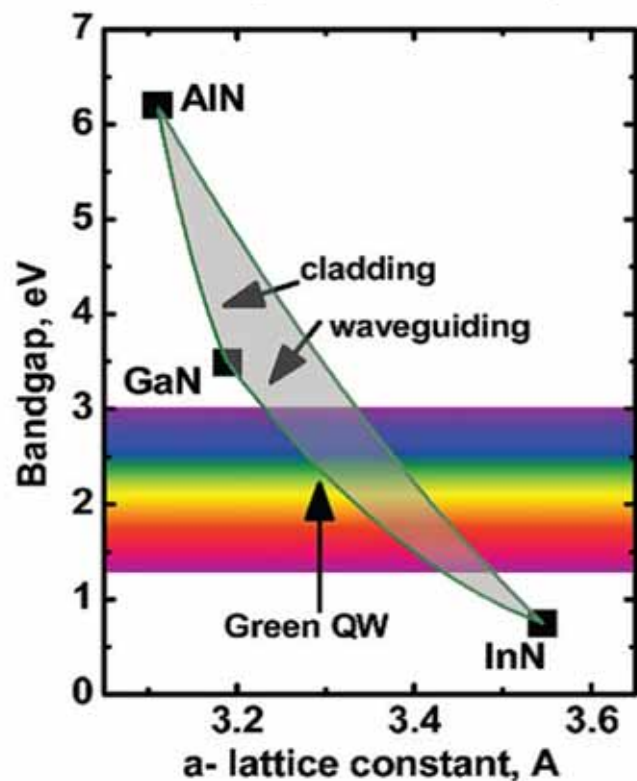


Řešení problému P-tykové dotace atomy Mg – žíhání.

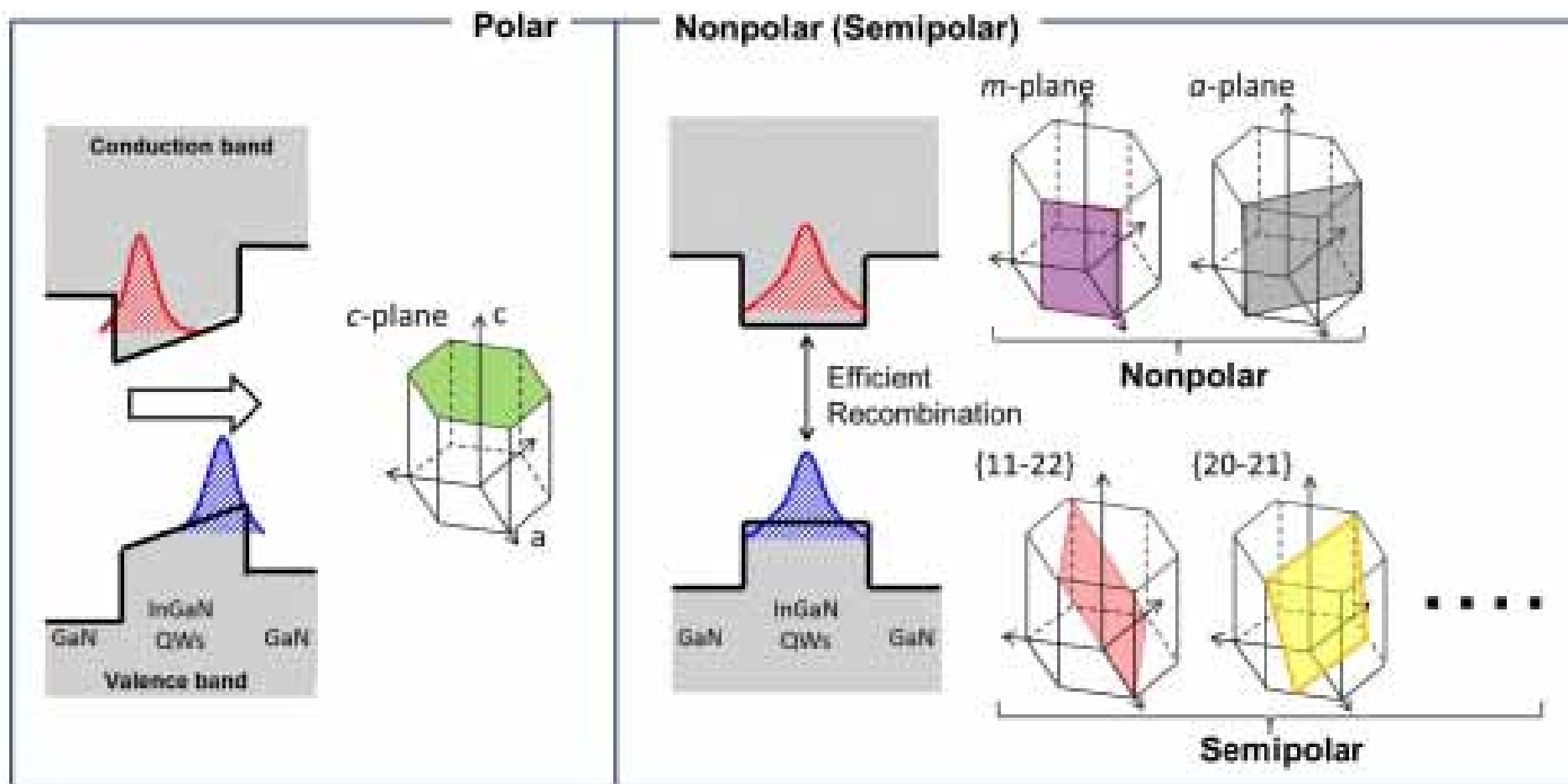


Současné problémy a výzvy v oboru LED a LD:

- UV laser a dioda (zvýšení intenzity světla, p-typové dopování).
- Zelený laser (piezoelektrické pole, vysoká koncentrace In).
- Vysokovýkonové HEMTy.
- Růst na velkých podložkách Si(111).
- Kompenzace/využití piezoelektrického pole.



Polární a nepolární směry růstu – silné piezoelektrické pole – problém



Česká stopa, co bylo u nás?

Short Notes

K71

naturally with the explanation offered above. We expect that more atoms will migrate to interstitial sites from certain planes of the surface layers than from the others. In fact, the migration is likely to depend on the surface energy, cleavage and other properties of the various planes. An extension of the macroscopic measurements right upto the melting point of the crystal is likely to throw more light on the matter.

References

- (1) B.N. DUTTA, phys. stat. sol. 2, 984 (1962).
- (2) L. MAISSEL, J. appl. Phys. 31, 211 (1960).
- (3) N.F. MOTT and R.W. GURNEY, Electronic processes in ionic crystals footnote pp. 29 Clarendon Press Oxford (1940)
(Received January 3, 1963)

Physikalisches Institut der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Prag

Herstellung dünner Schichten von Aluminium-, Gallium- sowie Indiumnitrid unter einer Gasentladung

Von

J. PASTRŇÁK und L. SOUČKOVÁ

Während die Eigenschaften der meisten Stoffe vom Typ $A^{III}B^V$ ausführlich untersucht wurden, ist über die Nitride wie AlN, GaN sowie InN (1 bis 7) nur sehr wenig bekannt.

Short Notes

phys. stat. sol. 9, K73 (1965)

Physikalisches Institut der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Prag

Epitaktisches Aufwachsen von AlN-Schichten auf SiC- und Si-Einkristallen in der Gasentladung

Von

J. PASTRŇÁK und L. ROSKOVCOVÁ

In Arbeit (1) wurde eine Herstellungsweise von AlN-Schichten auf Grund der Reaktion $AlCl_3 + N \rightarrow AlN + \frac{3}{2} Cl_2$ in der Gasphase beschrieben, wobei die Reaktion in der Entladung in Stickstoff bei einer Temperatur von 1000 bis 1100 °C verlief. Es wurde nun die Möglichkeit eines orientierten epitaktischen Aufwachsens von AlN auf einer geeigneten Kristallunterlage untersucht. Es liegt heute eine große Anzahl von Arbeiten (2) über die Faktoren, die das Aufwachsen von Kristallen auf einer Fremdunderlage beeinflussen, vor. Als am besten geeignetes Material, das die Bedingungen für ein orientiertes Aufwachsen von AlN erfüllt, wurde SiC und Si ausgewählt, zu Kontrollzwecken wurden ebenfalls Korundeinkristalle verwendet. Im Falle von SiC- und Al_2O_3 -Einkristallen wurde das Aufwachsen von AlN-Schichten auf natürlichen (00.1)-Kristallflächen be-

První práce na nitridových polovodičích ve Fyzikálním ústavu ČSAV v 60. a 70. letech: J. Pastrňák, F. Karel, L. Součková/Roskovcová, J. Rosa



MOVPE laboratory, Institute of Physics ASCR, v.v.i.



Knihá H. Morkoc (GaN bible 2013): Nitride Semiconductors and Devices

- 2.66 J.H. Harris, R.A. Youngman, R.G. Teller: *J. Mater. Res.* **5**, 1763 (1990)
- 2.67 J. Pastrnak, L. Souckova: *Phys. Status Solidi* **9**, K71 (1963)
- 2.68 J. Pastrnak, L. Roskovcova: *Phys. Status Solidi* **11**, K73 (1965)
- 2.69 P.B. Perry, R.F. Rutz: *Appl. Phys. Lett.* **33**, 319 (1978)
- 2.70 F. Karel, J. Pastrnak, J. Hejduk, V. Losik: *Phys. Status Solidi* **15**, 693 (1966)
- 2.71 F. Karel, J. Pastrnak: *Czech. J. Phys. B* **19**, 78 (1969)
- 2.72 F. Karel, J. Pastrnak: *Czech. J. Phys. B* **20**, 46 (1970)
- 2.73 F. Karel, J. Mares: *Czech. J. Phys. B* **22**, 847 (1972)
- 2.74 F. Karel, J. Mares: *Czech. J. Phys. B* **23**, 652 (1973)
- 2.75 T.L. Tansley, C.P. Foley: *J. Appl. Phys.* **59**, 3241 (1986)

Většina odkazů v kapitole o optických vlastnostech AlN je na práce vytvořené ve Fyzikálním ústavu.



LABONIT projekt za 50 MKč - 2015



MOVPE aparatura CCS 3x2,
která bude instalována ve FZÚ AVČR (snad v dubnu).



LABONIT



CCS 3x2 FlipTop reaktor, který začne pracovat
ve FZÚ AVČR v září 2015

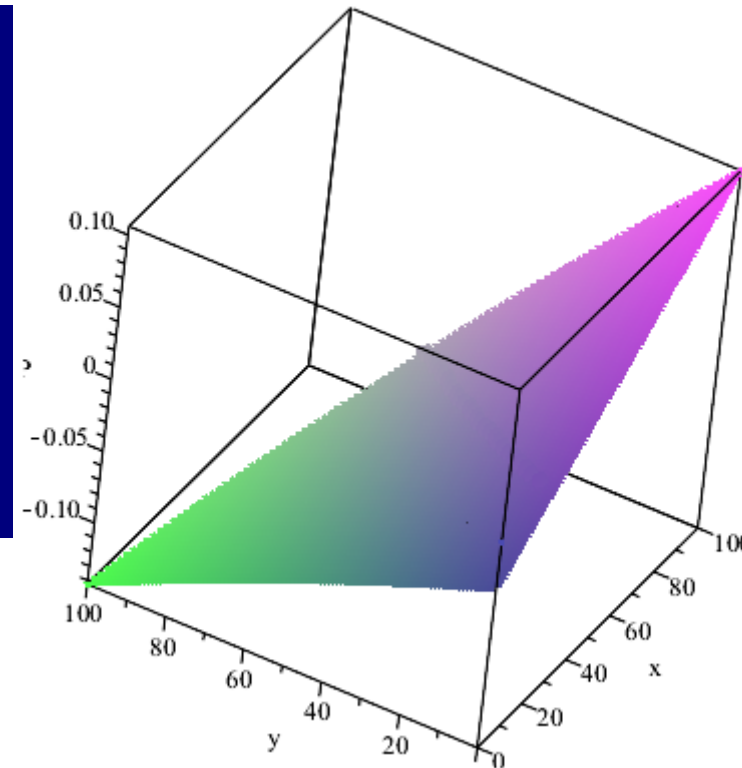
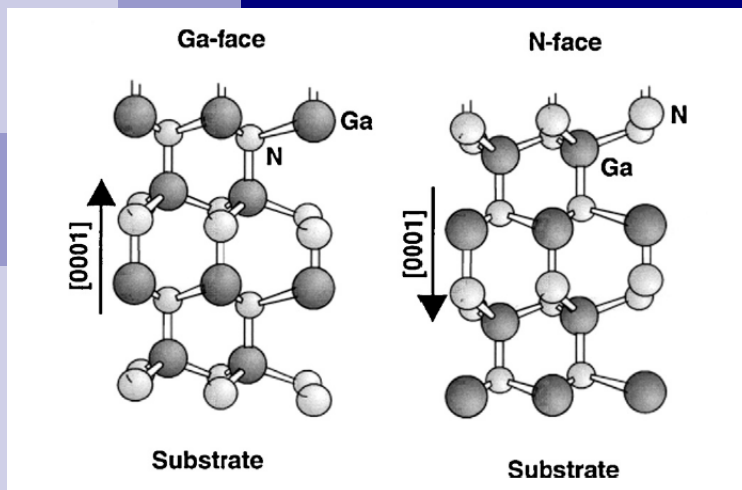


MOVPE laboratory, Institute of Physics ASCR, v.v.i.



Fyzikální ústav
Akademie věd ČR, v. v. i.

Polarizace v AlInGaN vrstvě na GaN



Připravujeme spolupráce s průmyslem



První GaN vrstva připravená na Si(111) v
Rožnově p.R.

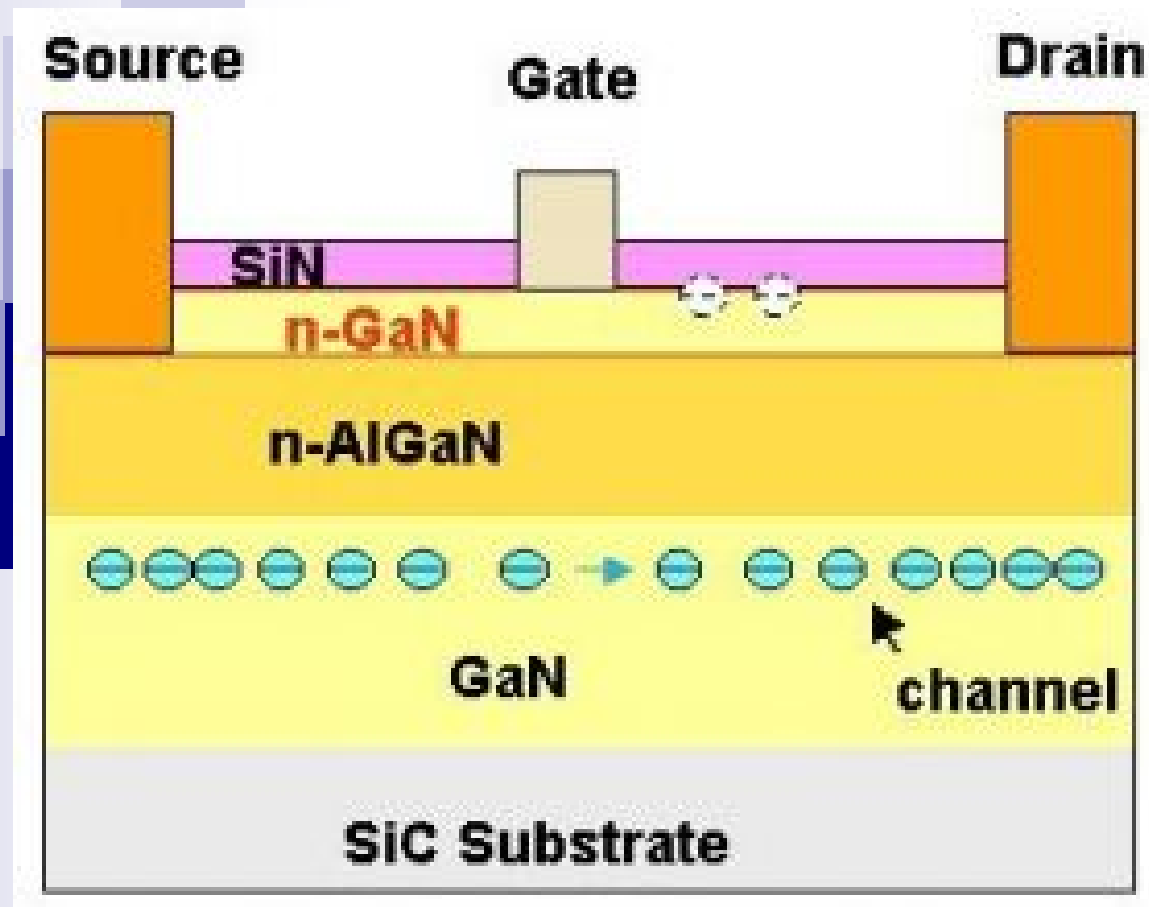


MOVPE laboratory, Institute of Physics ASCR, v.v.i.

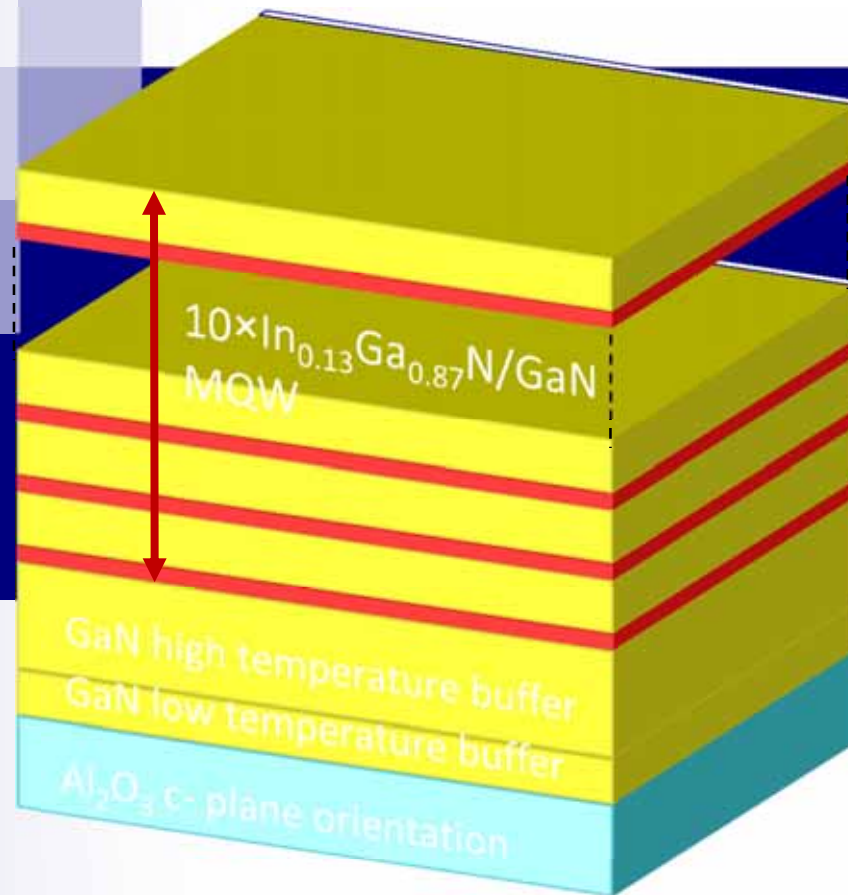


Fyzikální ústav
Akademie věd ČR, v. v. i.

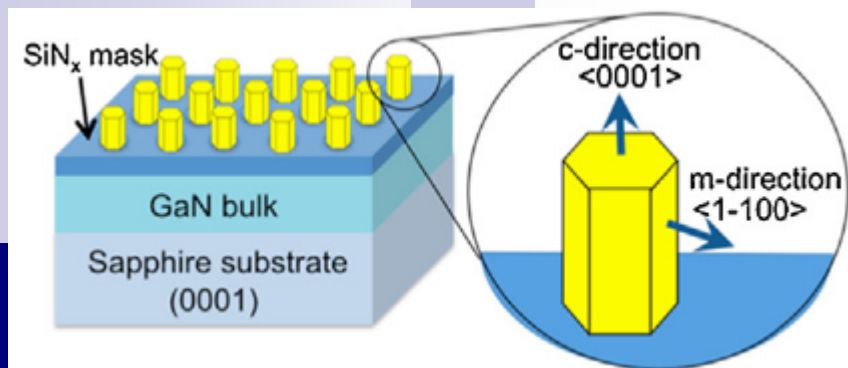
Vysokovýkonové tranzistory



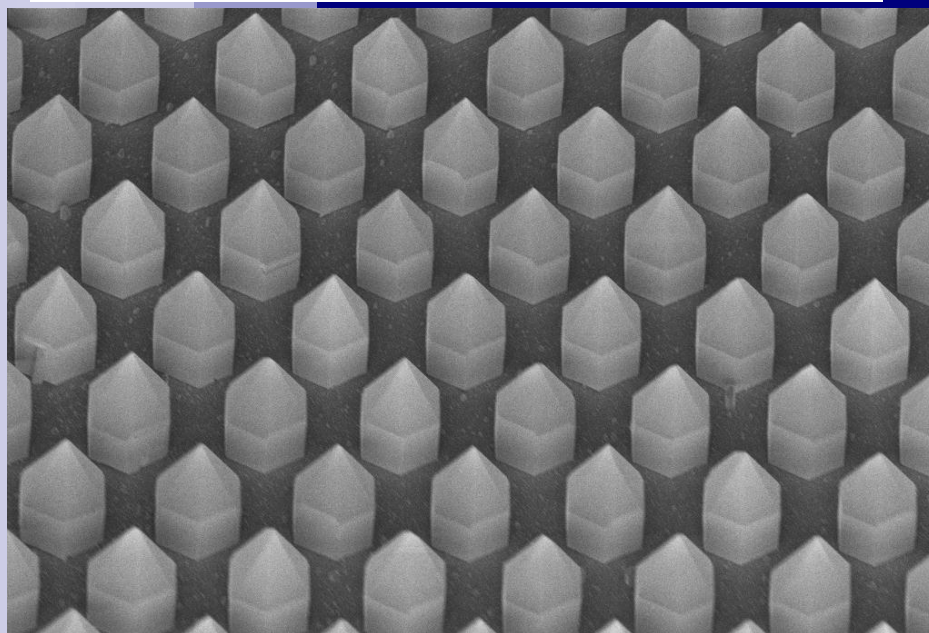
Scintilátorová struktura



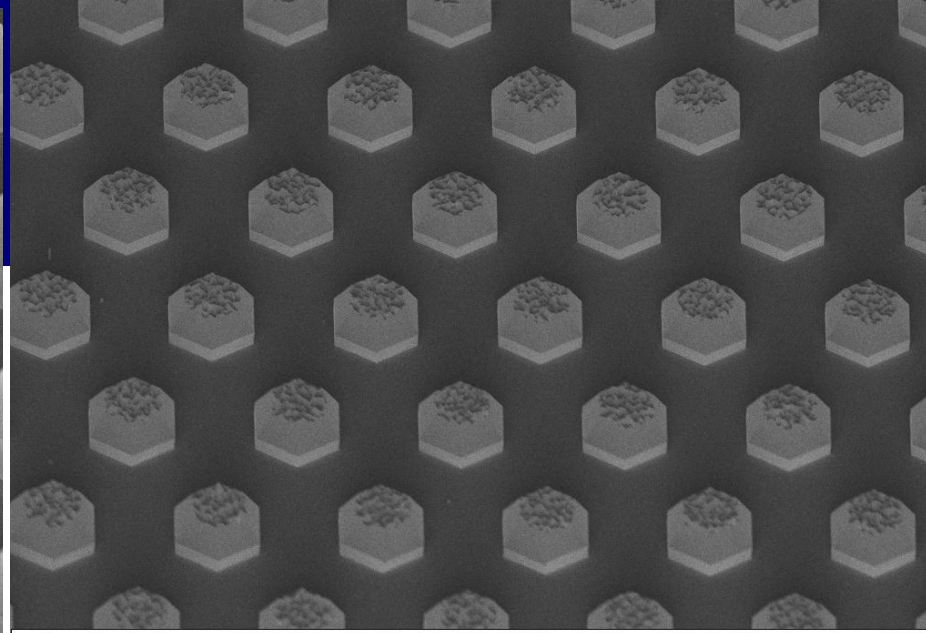
Současný výzkum ve Fyzikálním ústavu



Tyto sloupečky jsou připraveny na Si(111)



EHT = 3.00 kV
WD = 7.8 mm
Signal A = InLens
Photo No. = 7578
Date :3 Feb 2014
Time :15:16:45



EHT = 3.00 kV
WD = 9.1 mm
Signal A = InLens
Photo No. = 7543
Date :3 Feb 2014
Time :14:57:59



MOVPE laboratory, Institute of Physics ASCR, v.v.i.



Fyzikální ústav
Akademie věd ČR, v. v. i.



K dalšímu čtení:

Stanislav Banáš, Eduard Hulicius, Jiří Pangrác, Ivan Pelant, Jan Valenta, [Kvantová houba?](#) Tajemství luminiscence porézního křemíku, *Vesmír* 73, 282, [1994/5](#)

Eduard Hulicius, Bedřich Velický, [Heterostruktury, které slouží všem](#) – Nobelova cena za fyziku 2000, *Vesmír* 80, 32, [2001/1](#)

Jan Valenta, Ivan Pelant, [Doba LEDová](#) aneb Jak svítivé diody za padesát let dozrály k zásadní změně osvětlovací techniky, *Vesmír* 92, 612, [2013/11](#)

Jan Valenta, Ivan Pelant, Nobelova cena za fyziku 2014, *Vesmír* 93, [2015/1 nebo 2](#)

Hadis Morkoc, Nitride Semiconductor Devices, Wiley-VCH, 2013



K dalšímu čtení:

Stanislav Banáš, Eduard Hulicius, Jiří Pangrác, Ivan Pelant, Jan Valenta, [Kvantová houba?](#) Tajemství luminiscence porézního křemíku, *Vesmír* 73, 282, [1994/5](#)

Eduard Hulicius, Bedřich Velický, [Heterostruktury, které slouží všem](#) – Nobelova cena za fyziku 2000, *Vesmír* 80, 32, [2001/1](#)

Jan Valenta, Ivan Pelant, [Doba LEDová](#) aneb Jak svítivé diody za padesát let dozrály k zásadní změně osvětlovací techniky, *Vesmír* 92, 612, [2013/11](#)


Jan Valenta, Ivan Pelant, Nobelova cena za fyziku 2014, *Vesmír* 93, [2015/1 nebo 2](#)


Hadis Morkoc, Nitride Semiconductor Devices, Wiley-VCH, 2013


Děkuji za pozornost




Appendixes

- 
- **¹ Královská švédská akademie věd** (švédsky *Kungliga Vetenskapsakademien*) je jedna z královských akademii ve Švédsku. Je to nezávislá nevládní vědecká organizace, jejímž cílem je podpora vědy, především přírodních věd a matematiky.
 - Akademii založili roku 1739 přírodovědec Carl Linné, merkantilista Jonas Alströmer, inženýr Mårten Triewald a politik Anders Johan von Höpken. Byla vytvořena po vzoru britské Royal Society a francouzské Akademie věd.
 - Výbory Akademie mimo jiné vybírají laureáty mezinárodních cen:
 - Nobelova cena za fyziku chemii a ekonomii

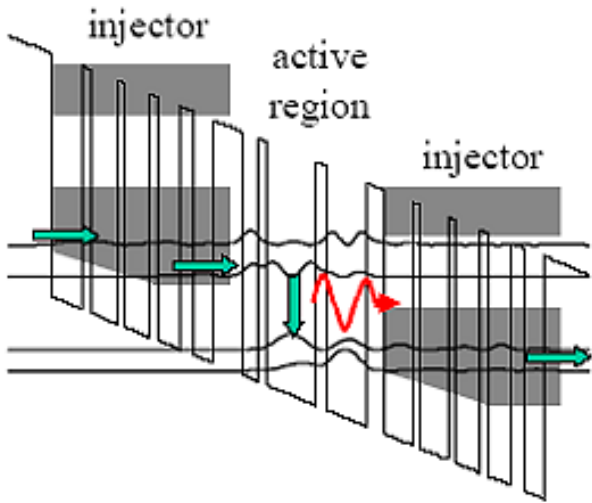
- 
- *^2 to the person who shall have made the most important discovery or invention within the field of physics ..."*
(Excerpt from the will of Alfred Nobel),
 - Physics was the prize area which Alfred Nobel mentioned first in his will. At the end of the nineteenth century, many people considered physics as the foremost of the sciences, and perhaps Nobel saw it this way as well. His own research was also closely tied to physics.

- 
- ³ **Alfred Bernhard Nobel**, _
 - (21. října 1833 Stockholm – 10. prosince 1896 San Remo) byl švédský chemik, vynálezce dynamitu a díky němu byla později také založena Nobelova cena. Na jeho počest byl po něm pojmenován chemický prvek nobelium.

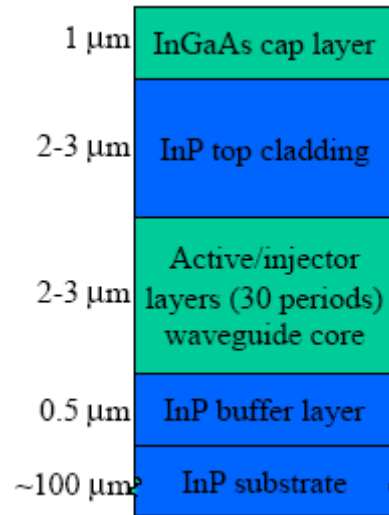


⁴ za přesné optické přístroje 1907, příspěvky k rozvoji bezdrátové [telegrafie](#) 1909, za objev automatických regulátorů 1912, zobrazování [trajektorií](#) elektricky nabitých částic pomocí kondenzace vlhkosti 1927, za vynález [cyklotronu](#) 1937, za vynález přístroje pro vytvoření extrémně vysokého [tlaku](#) 1946, za rozvoj Wilsonovy metody [mlžné komory](#) 1948, za vývoj fotografické metody 1950, za objev fázově kontrastní metody, zejména za vynález fázově kontrastního [mikroskopu](#) 1953, za výzkum [polovodičů](#) a objev [tranzistorového jevu](#) 1956, za zásadní práci v elektronové optice a za návrh prvního [elektronového mikroskopu](#) a za návrh řádkovacího tunelového mikroskopu 1986, za [tekuté krystaly](#) a [polymery](#), za vynález a vývoj částicových detektorů, zejména drátěné komory 1992, za zásadní práci v oboru informační a telekomunikační technologie, za vývoj heterogenních polovodičových struktur používaných ve vysokorychlostní elektronice a optoelektronice a za jeho podíl na vynálezu [integrovaného obvodu](#) 2000, za průlom v oblasti přenosu světla v [optických vláknech](#), za vynález [CCD](#) a za objev [grafenu](#) 2010

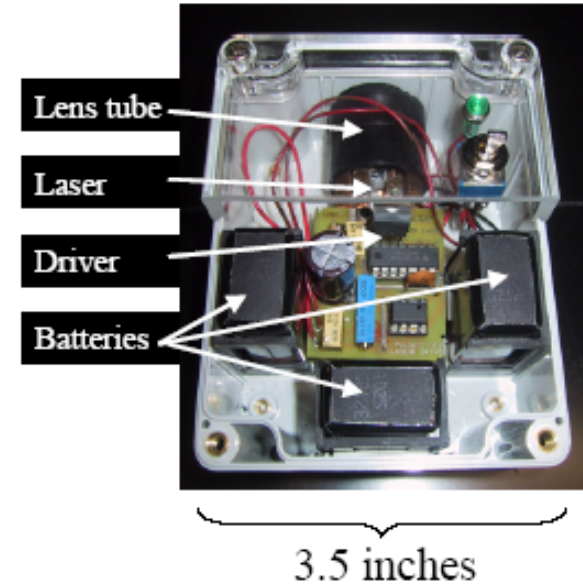
Tunable Emission Over a Wide Spectral Range



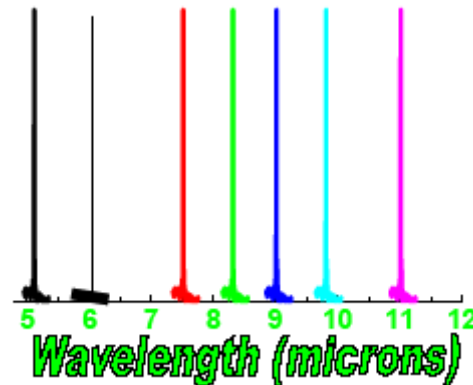
Conduction band schematic of GaInAs/AlInAs quantum cascade laser lattice matched to InP.



Cross sectional schematic of laser waveguide structure.



Photograph of a self-contained prototype quantum cascade laser pointer realised at CQD.



Demonstrated single mode emission from quantum cascade lasers spanning both atmospheric windows.