

## Heterostruktury półprzewodnikowe – studnie kwantowe



## Heterostruktury półprzewodnikowe – studnie kwantowe



## Plan wykładu

Powtórzenie. Pasma w półprzewodnikach  
 Heterostruktury półprzewodnikowe – studnie kwantowe  
 Potencjał harmoniczny. Kropki kwantowe.  
 Transport, tunelowanie, blokada kulombowska.  
 Obsadzenia stanów, gęstości stanów, poziom Fermiego.  
 Heterostruktury domieszkowane na tym p i n. Złącza półprzewodnik-metal. Efekt fotoelektryczny  
 Heterostruktury w polach zewnętrznych E i B. Tensor przewodnictwa  
 Efekt Halla, kwantowy efekt Halla, ułamkowy efekt Halla

2013-02-27

3

## Pasma w kryształach

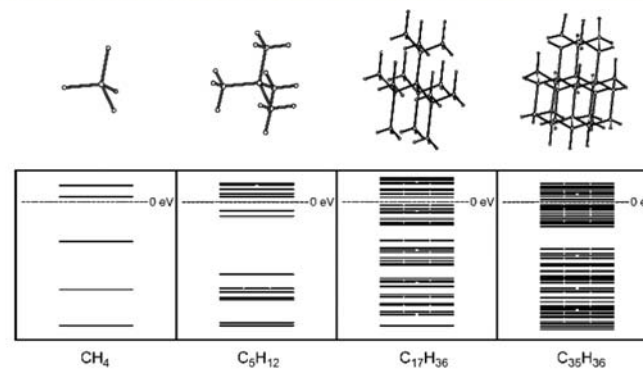


Fig. 2.3 Development of the diamond band gap

W. R. Fahrner (Editor) Nanotechnology and Nanoelectronics

2013-02-27

4

## Pasma w kryształach

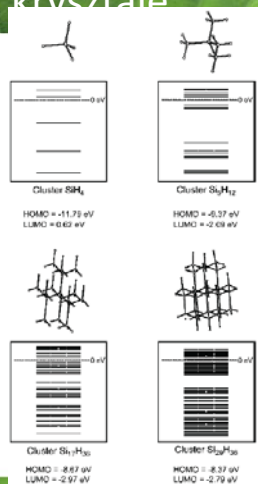


Fig. 2.4 Development of the Si band gap

W. R. Fahrner (Editor) Nanotechnology and Nanoelectronics

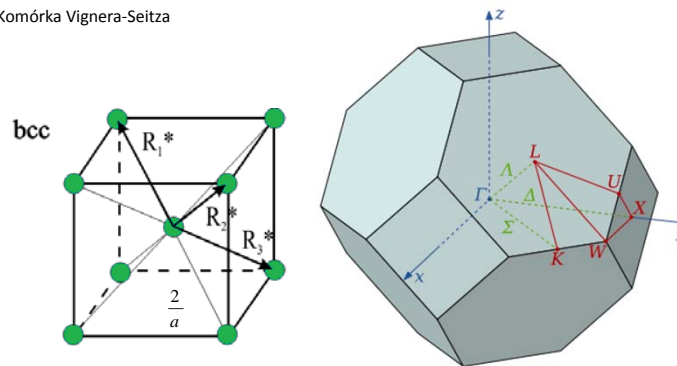
2013-02-27

5

## Trochę więcej na temat pasm

### Sieć odwrotna do fcc to bcc

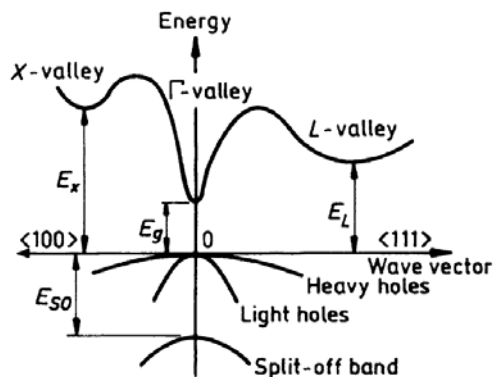
Komórka Wignera-Seitza



2013-02-27

6

## Przejścia optyczne



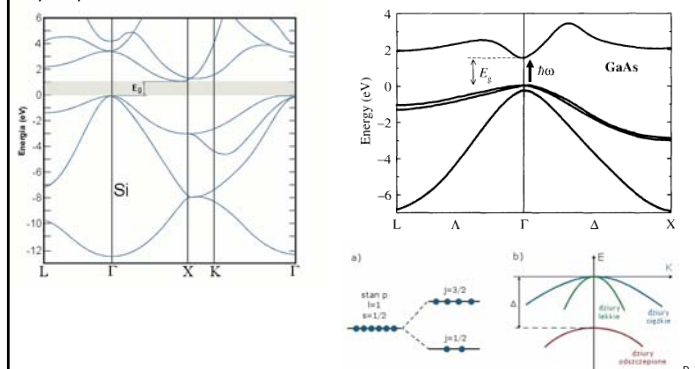
2013-02-27

7

## Pasma w kryształach

### Struktura pasmowa ciał stałych

Przykłady:



D. Wasik.

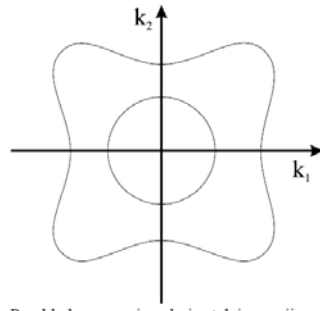
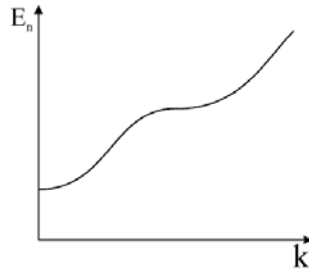
2013-02-27

8

## Pasma w kryształach

### Masa efektywna. Przybliżenie $kp$

Energia  $E_n(k)$  wokół ekstremum



R. Stepniowski

2013-02-27

9

## Pasma energetyczne

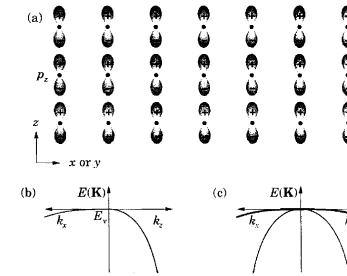


FIGURE 2.17. Valence bands constructed from  $p$  orbitals. (a) Lattice of  $p_z$  orbitals. (b) Band structure of the  $p_z$  orbitals only; the band is 'light' along  $k_x$  to the right and 'heavy' along  $k_x$  or  $k_y$  to the left. (c) Total bands from all three  $p$  orbitals, showing a doubly degenerate 'heavy' band and a single 'light' band.

2013-02-27

10

## Pasma energetyczne

Do optoelektroniki potrzebna jest przerwa prosta.

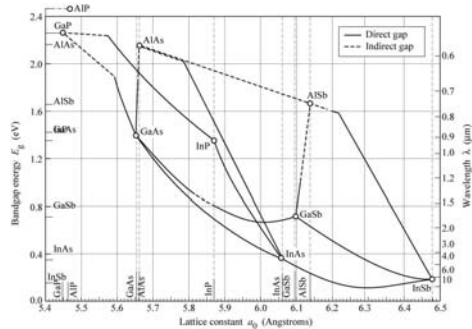


Fig. 12.6. Bandgap energy and lattice constant of various III-V semiconductors at room temperature (adopted from Tien, 1988).

S. F. Scherrer  
Light-Emitting Diodes: Characterization and Design  
www.light-emitting-diodes.org

2013-02-27

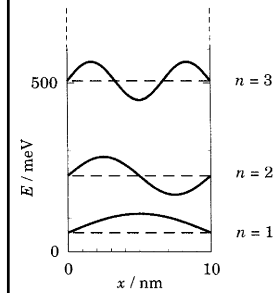
11

## Studnia nieskończona

Wewnątrz studni:

$$\psi(x, t) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin(k_n x) e^{-i\omega t} \quad k_n = \frac{n\pi}{L}$$

$$\epsilon_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2mL^2}$$



2013-02-27

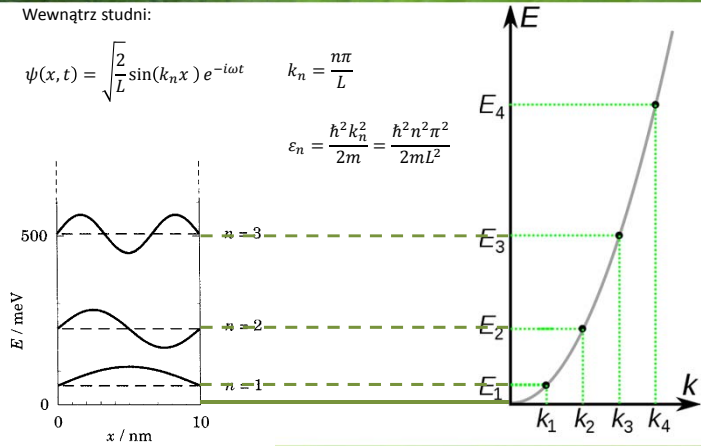
12

### Studnia nieskończona

Wewnątrz studni:

$$\psi(x, t) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin(k_n x) e^{-i\omega t} \quad k_n = \frac{n\pi}{L}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2mL^2}$$



2013-02-27

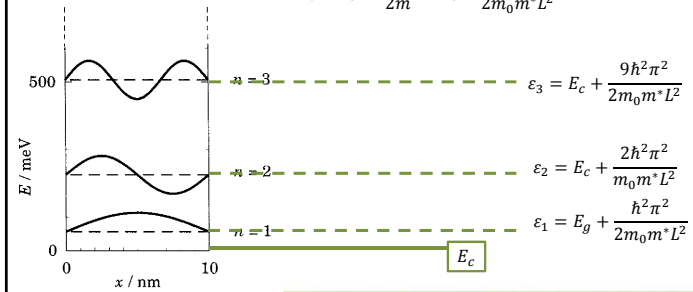
13

### Studnia nieskończona

Wewnątrz studni:

$$\psi(x, t) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin(k_n x) e^{-i\omega t} \quad k_n = \frac{n\pi}{L}$$

$$\varepsilon_n = E_c + \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = E_c + \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2m_0 m^* L^2}$$



2013-02-27

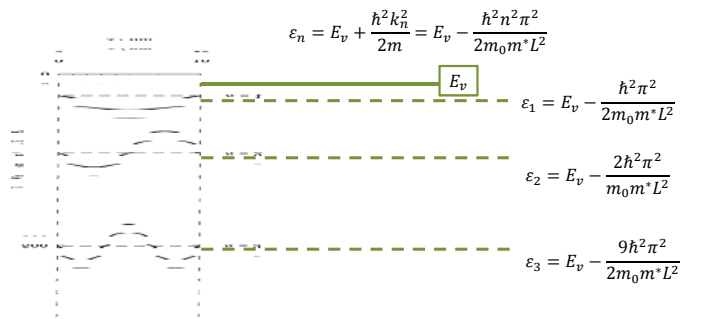
14

### Studnia nieskończona

Wewnątrz studni:

$$\psi(x, t) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin(k_n x) e^{-i\omega t} \quad k_n = \frac{n\pi}{L}$$

$$\varepsilon_n = E_v + \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = E_v - \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2m_0 m^* L^2}$$



2013-02-27

15

### Studnia skończona

Wewnątrz studni:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} \psi(z) + V_0(z) \psi(z) = \varepsilon \psi(z)$$

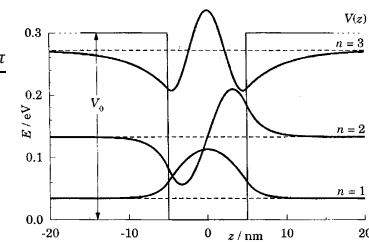
$$-\frac{a}{2} < z < \frac{a}{2}$$

$$\psi(z, t) = \begin{cases} \sin(k_n z) \\ \cos(k_n z) \end{cases} e^{-i\omega t} \quad k_n = \frac{n\pi}{L}$$

$$\varepsilon < V_0$$

$$\psi(z) = D \exp(\pm \kappa z)$$

$$\frac{\hbar^2 \kappa^2}{2m} = V_0 - \varepsilon = B$$

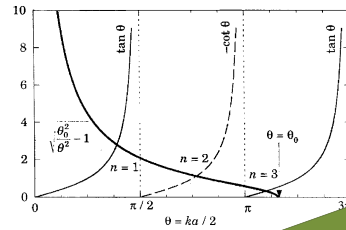


2013-02-27

16

## Studnia skończona

Wewnątrz studni:



Na ćwiczeniach

2013-02-27

17

## Pasma w kryształach

### Struktura pasmowa ciał stałych

Przykłady:

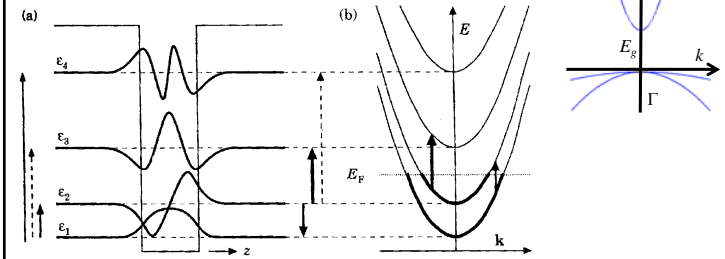


FIGURE 8.5. Absorption by transitions between states in a quantum well. (a) Wave functions along  $z$  with energy levels. The thicknesses of the arrows are rough indications of the oscillator strengths of the transitions, with broken lines signifying forbidden transitions. (b) Band structure in the transverse  $k$ -plane showing the vertical nature of the allowed transitions, which must go from filled to empty states.

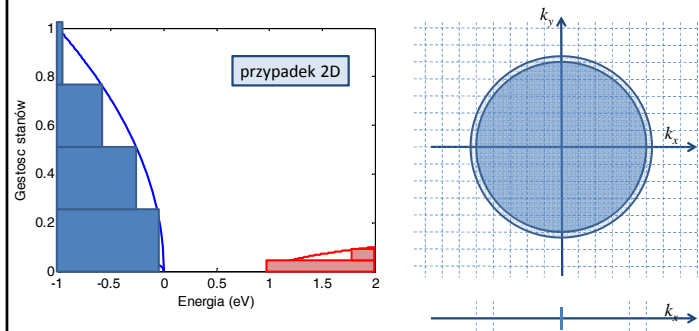
2013-02-27

18

## Elektrony i dziury

### Gęstość stanów

Często wygodniejsza jest znajomość gęstości stanów w przestrzeni energii  $E$  (a więc ilość stanów w przedziale  $(E, E+dE)$ ). Dla pasma sferycznego i parabolicznego:



2013-02-27

19

## Przejścia optyczne

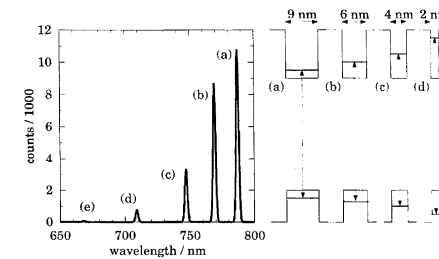


FIGURE 1.4. Photoluminescence as a function of wavelength for a sample with four quantum wells of different widths, whose conduction and valence bands are shown on the right. The barriers between the wells are much thicker than drawn. [Data kindly supplied by Prof. E. L. Hu, University of California at Santa Barbara.]

Jeszcze do tego wrócimy (reguły wyboru)!

2013-02-27

20



## Heterostruktuury półprzewodnikowe

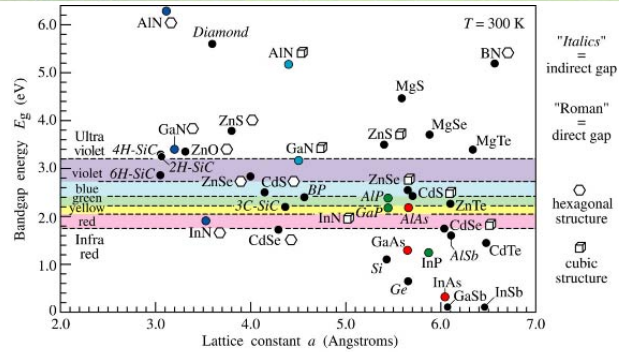


Fig. 11.4. Room-temperature bandgap energy versus lattice constant of common elemental and binary compound semiconductors.

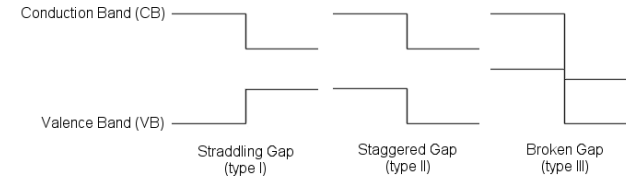
2013-02-27

21

## Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostruktuury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład (binary, ternary, quaternary, quaternary alloys)
- kontrolując naprężenie



2013-02-27

22

## Jak się robi heterostruktuury?

### Liquid-phase (LPE)

wzrost z fazy ciekłej na podłożu w temperaturach niższych od temperatury topnienia hodowanego materiału. Półprzewodnik jest rozpuszczony w cieczy innego materiału, wzrost w warunkach bliskich równowagi roztworu i depozycji; prędkości wzrostu 0.1 to 1  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

### Vapor-phase (VPE, CVD)

wzrost z fazy gazowej dzięki reakcjom chemicznym prekursorów na powierzchni, często dzielony ze względu na źródłowe gazy na wodorkową VPE i metalorganiczną VPE (MOCVD); prędkości wzrostu >10 -20  $\text{nm}/\text{min}$ .

### Molecular-beam (MBE)

Materiał źródłowy podgrzewany w komórkach produkuje strumień cząsteczek. W wysokiej próżni ( $10^{-8}$  Pa) cząsteczki docierają do podłoża i osadzają się na nim; prędkości wzrostu < 1 monowarstwa/s (1  $\mu\text{m}/\text{h}$ ).

2013-02-27

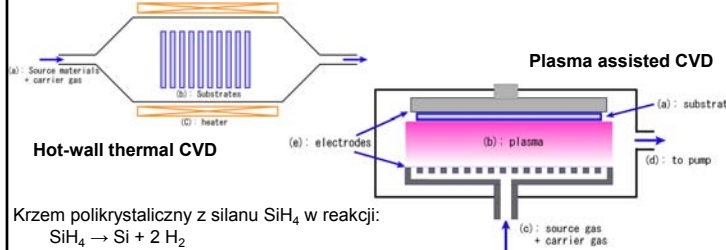
24

2013-02-27

23

## Jak się robi heterostruktury?

**Chemical Vapor Deposition (CVD)** – proces chemiczny, w którym do obszaru, gdzie znajduje się podłoże doprowadzone są jeden lub więcej prekursorów reagujących z podłożem w wyniku czego powstaje pożądany materiał. Jest to często stowarzyszone z lotnymi produktami, które usuwane są strumieniem gazu przepływającego przez komorę. (Si, SiC, SiN, dielektryki, diament syntetyczny).  
Proces może przebiegać w ciśnieniu normalnym lub obniżonym (wolniej, bardziej jednorodny materiał).



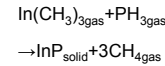
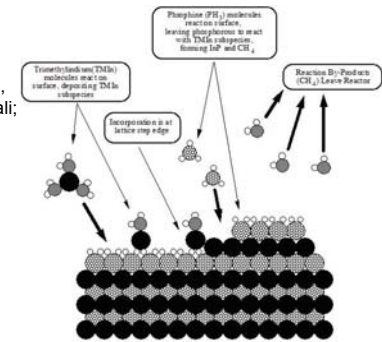
Krzem polikrystaliczny z silanu SiH<sub>4</sub> w reakcji:  
 $SiH_4 \rightarrow Si + 2 H_2$   
LPCVD, temperatura 600 and 650°C, ciśnienie 25 -150 Pa, prędkość wzrostu 10 -20 nm/min.

2013-02-27

25

## Jak się robi heterostruktury?

**Metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD)** – proces CVD reakcji chemicznych na powierzchni z zastosowaniem związków organicznych, metalorganicznych oraz wodoroków metali; zachodzi z gazu pod obniżonym ciśnieniem (2-100 kPa); np. InP z trymetylu indu In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> i fosfinu PH<sub>3</sub>; główna metoda dla produkcji diod laserowych, złącz fotowoltaicznych



2013-02-27

26

## Jak się robi heterostruktury?

**Metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD)** –

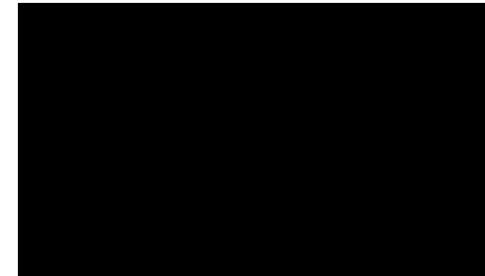


TurboDisc MaxBright M GaN MOCVD Multi-Reactor System

2013-02-27

27

## Jak się robi heterostruktury?



TurboDisc K465i Animation

2013-02-27

28

## Jak się robi heterostruktury?

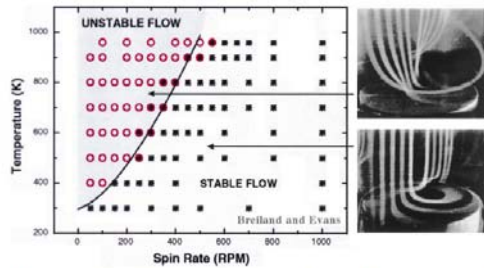


Fig. 10. Plot of the results of flow visualization experiments for a heated, spinning disk. Asterisks indicate that the flow is stable with a steady-state, fixed pattern, as illustrated in the lower right photo. Open circles indicate unstable, time-dependent flow patterns, as illustrated in the upper right photo. The transition from unstable to stable flow is characterized by the mixed convection parameter (MCP) defined by Eq. (27).

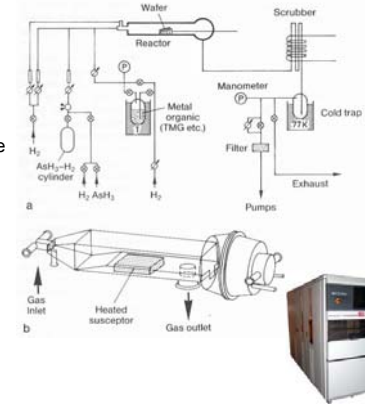
Organometallic vapor phase epitaxy (OMVPE) Materials Science and Engineering, R24 (1999) 241-274

2013-02-27

29

## Jak się robi heterostruktury?

Podłoże umieszczone na podgrzewanym piecykiem indukcyjnym RF grafitcie wewnątrz komory reakcyjnej. Typowe temperatury 500°C do 800°C. Wzrost w atmosferze wodoru i ciśnieniu 100 - 700 Torr. Prekursory rozkładają się w kontakcie z gorącym podłożem i tworzą warstwę. Prekursory grupy V: AsH<sub>3</sub> (arsin), PH<sub>3</sub> (fosfin), grupy III: Ga(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> Trimethylgallium (TMG), Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> Trimethylaluminium (TMA), In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> trimethylindium (TMI), Domieszkowanie: SiH<sub>4</sub> Silane, Zn(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub> Diethylzinc (DEZ).



2013-02-27

30

## Jak



2013-02-27

31

## Jak

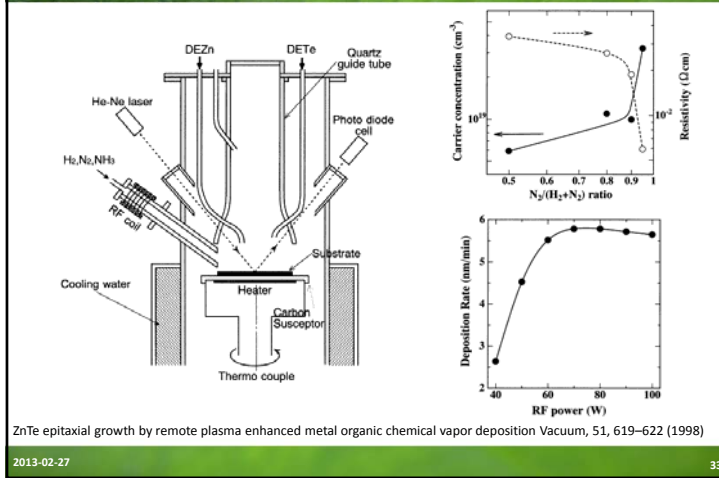


2013-02-27

32



## Jak się robi heterostruktury?



## Jak się robi heterostruktury?

Reaktor Metal-Organic Chemical Vapour Epitaxy (MOCVD) w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego



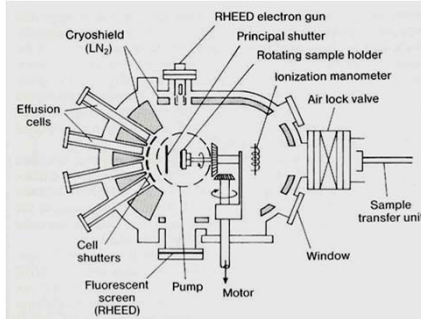
Heterostruktury GaInSb, AlGaInAs and AlGaIn heterostructures.

2013-02-27

34

## Jak się robi heterostruktury?

Wzrost warstw **MBE** jest monitorowany przez Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED). Komputer steruje przesłonami (shutterami) na froncie podgrzewanych komórek efuzyjnych, co pozwala na precyzyjną kontrolę wzrostu do poziomu pojedynczej warstwy atomowej. Wzrost warstw z jamami kwantowymi (quantum wells), kropek kwantowych (quantum dots) – struktury LD, LED.



2013-02-27

35

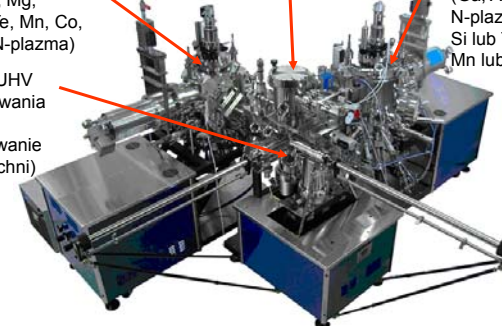
## Jak się robi heterostruktury?

komora UHV wzrostu materiałów II-VI (Zn, Cd, Mg, S, Se, Te, Mn, Co, ZnCl<sub>2</sub>, N-plazma)

komora UHV wzrostu materiałów III-V (Ga, Al, In, As, Sb, N-plazma, Si lub Te, Be lub Zn, Mn lub Cr lub Co)

komora UHV przygotowania podłoży (odgazowanie powierzchni)

komora załadunkowa

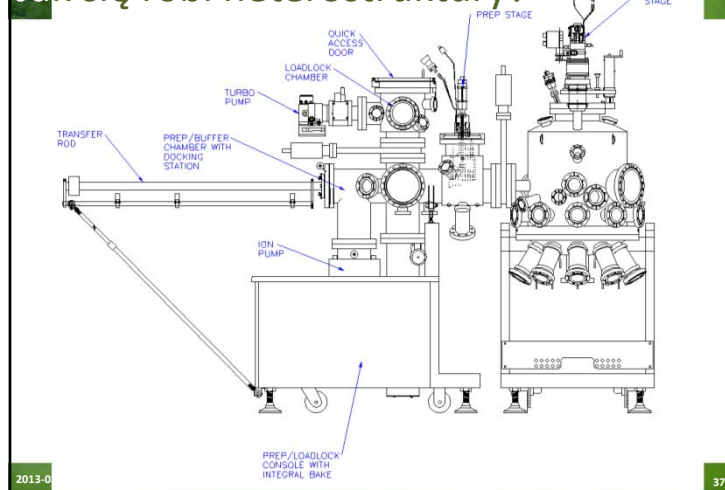


Urządzenie MBE - do epitaksji z wiązek molekularnych (2 komory wzrostu) producent SVTA (USA). Zakup przez Wydział Fizyki w r. 2010, program CePT

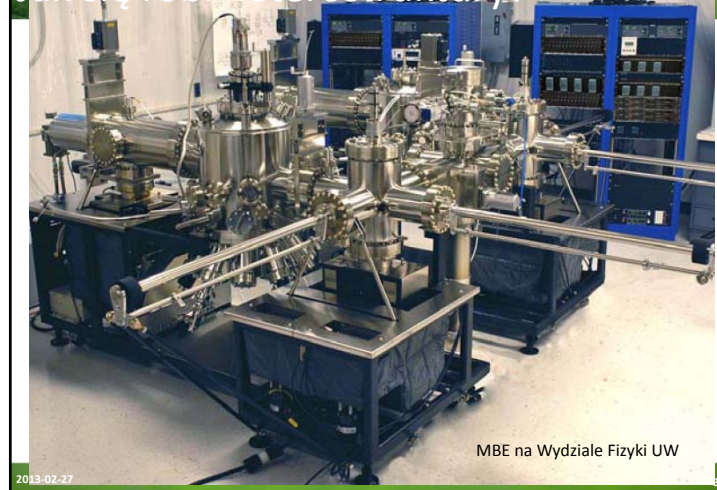
2013-02-27

36

## Jak się robi heterostruktuzy?



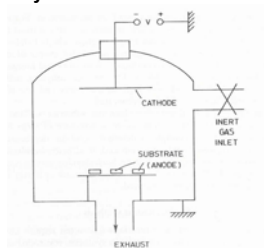
## Jak się robi heterostruktuzy?



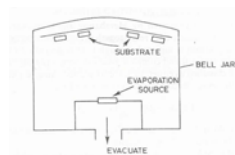
## Jak się robi heterostruktuzy?

W dzisiejszych dla otrzymywania cienkich warstw czasach często stosuje się również takie technologie:

- elektrochemiczne (elektrolityczne nakładanie metali, elektrolityczne utlenianie),
- sputteringowe
- naporowywania warstw.



**Sputtering katodowy**  
obniżone ciśnienie  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  Torr gazu obojętnego przy napięciu kilkunastu kV jony dodatnie wybijają materiał katody i osadzają go na m.in. materiale podłożowym

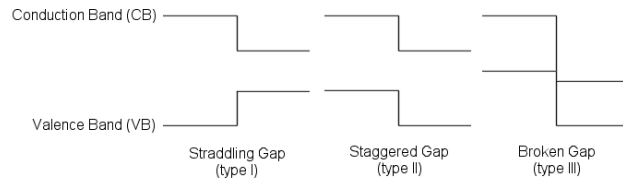


**Naporowywanie warstw**  
w próżni  $<10^{-6}$  Torr materiał źródłowy jest zamieniany w fazę gazową przez podgrzanie lub bombardowanie i deponuje się na m.in. materiale podłożowym

# Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostrukcji:

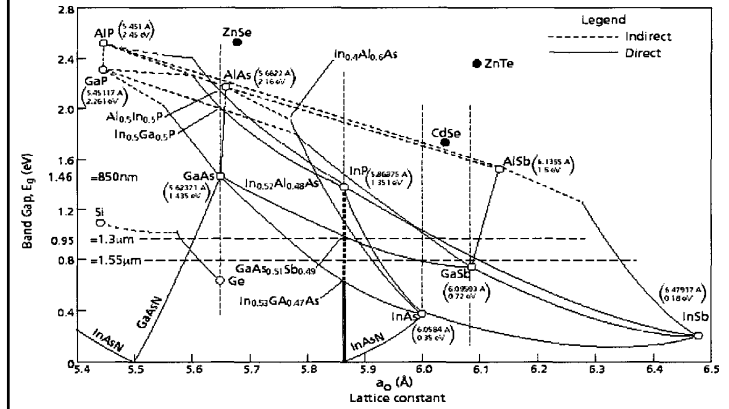
- wybierając materiał
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie



2013-02-27

41

# Heterostruktuury półprzewodnikowe



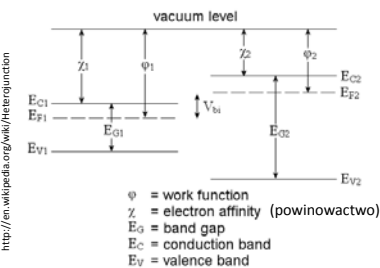
Investigation of high antimony-content gallium arsenic nitride-gallium arsenic antimonide heterostructures for long wavelength application

2013-02-27

42

# Bandgap engineering

Valence band offset



$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2 = \Delta\chi$$

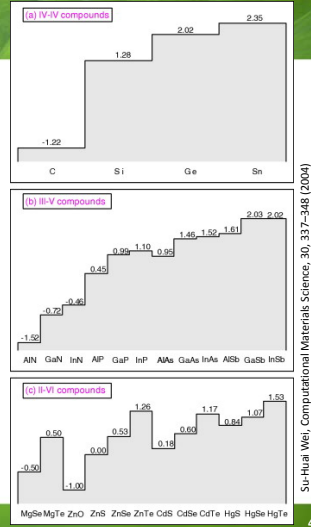
$$\Delta E_G = E_{G2} - E_{G1}$$

Valence band offset:  $\Delta E_V = \Delta E_G - \Delta\chi$

$$\Delta E_G = \Delta E_C + \Delta E_V$$

2013-02-27

43



Sun-Hai Wei, Computational Materials Science, 30, 337-348 (2004)

# Bandgap engineering

Valence band offset

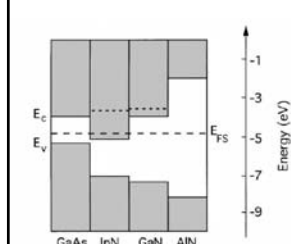


Fig. 4. Band offsets for group III-Nitrides. The dashed lines represent the Fermi energy for the maximum achievable free electron concentration in GaN and InN.

2013-02-27

44

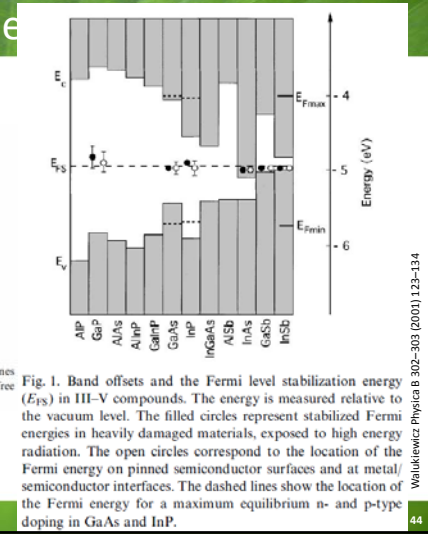
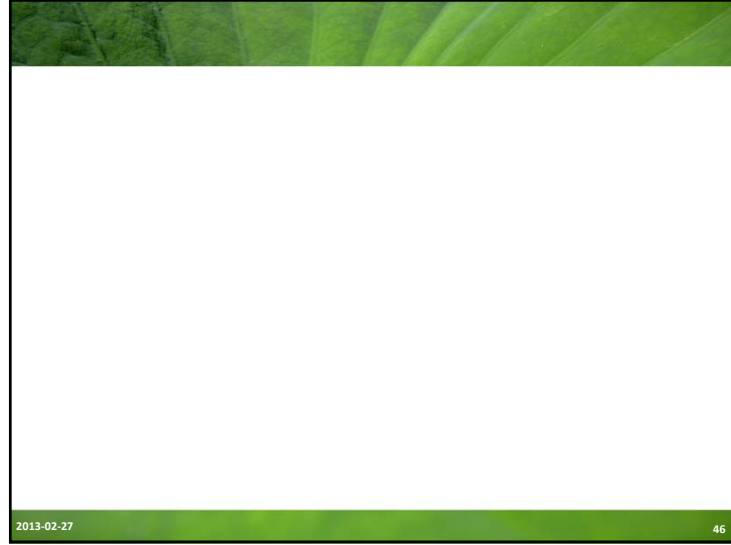
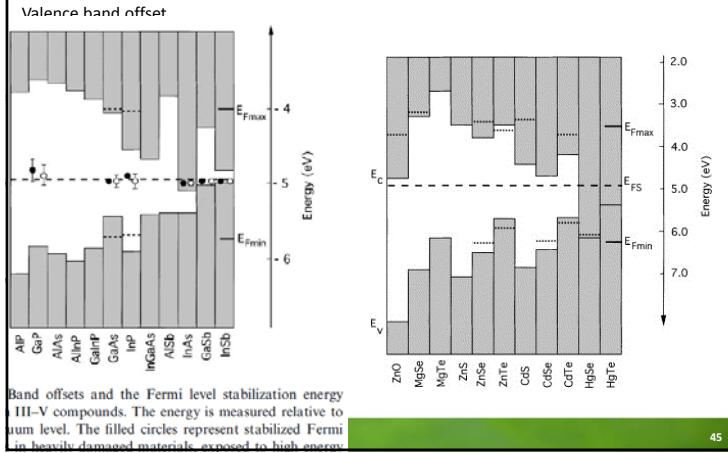


Fig. 1. Band offsets and the Fermi level stabilization energy ( $E_{FS}$ ) in III-V compounds. The energy is measured relative to the vacuum level. The filled circles represent stabilized Fermi energies in heavily damaged materials, exposed to high energy radiation. The open circles correspond to the location of the Fermi energy on pinned semiconductor surfaces and at metal/semiconductor interfaces. The dashed lines show the location of the Fermi energy for a maximum equilibrium n- and p-type doping in GaAs and InP.

Wojciech Physica B 302-303 (2001) 123-134

# Bandgap engineering



# Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostrukury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie

Prawo Vegarda:  
określa stałą sieci stopu dwóch kryształów „binarnych” A i B (np. GaAs i GaP albo GaN i AlN)

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

„prawo empiryczne”

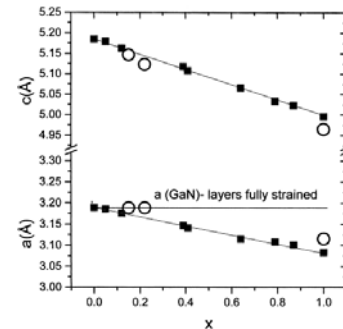


Fig. 5. Lattice parameters of 0.15–0.20 μm Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layers. Lines—Vegard’s law between values for the AlN and GaN single crystals. Solid squares—layers on SiC, Open circles—layers on bulk GaN.

# Bandgap engineering

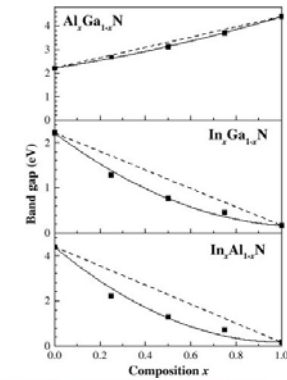
W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostrukury:

- wybierając materiał
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie

Prawo Vegarda:  
dot. przerwy energetycznej stopu „binarnego”:

$$E = E_A(1 - x) + E_B x - bx(1 - x)$$

*b* - tzw. „bowing” przerwy energetycznej

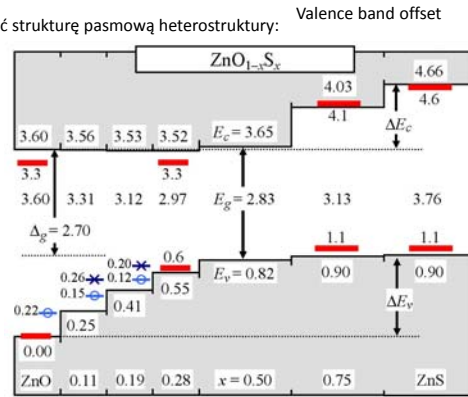


Z Dridi et al. Semicond. Sci. Technol. 18 No.9 (September 2003) 850-856

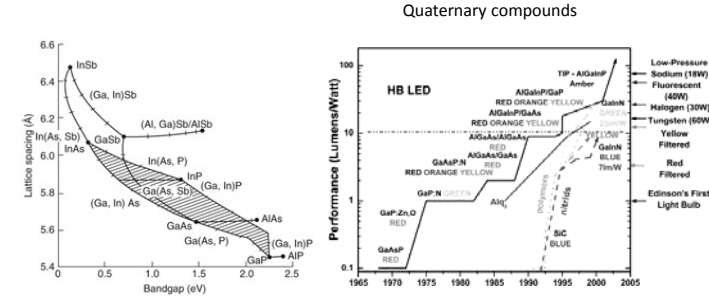


# Bandgap engineering

- W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostruktury:
- wybierając materiał
  - kontrolując skład
  - kontrolując naprężenie



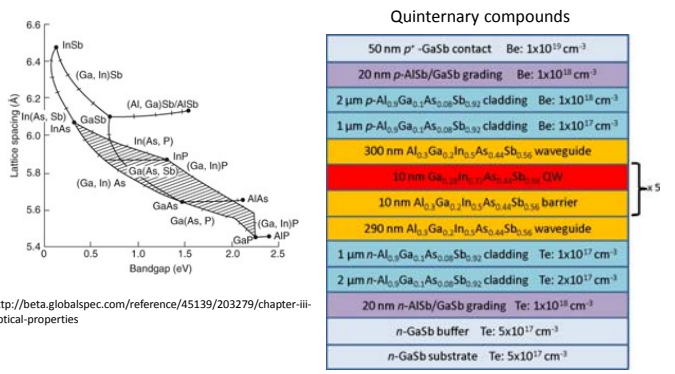
# Heterostrukture półprzewodnikowe



http://beta.globalspec.com/reference/45139/203279/chapter-iii-optical-properties

Thin Solid Films 433 (2003) 22–26

# Heterostrukture półprzewodnikowe



http://beta.globalspec.com/reference/45139/203279/chapter-iii-optical-properties

Quintenary barriers push room-temperature operation of GaSb-based type-I lasers further into mid-infrared

# Bandgap engineering

- W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostruktury:
- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
  - kontrolując skład
  - kontrolując naprężenie

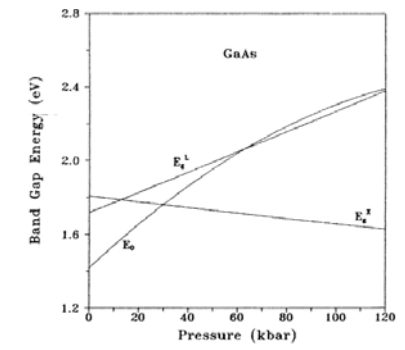


Fig. 2. Direct and indirect band gaps in GaAs as a function of pressure.



### Bandgap engineering

### Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostruktury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie

Fig. 3. Variation of the pressure dependent electronic energy band structure,  $E_{g,i}(P)$  for GaAs, at two different pressures, 0 kbar (solid line) and 120 kbar (dashed line).

### Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostruktury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie

# Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostrukury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie

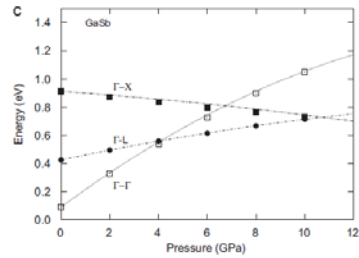


Fig. 5. Direct and indirect band gaps in GaP, GaAs and GaSb as a function of pressure.

Satyam S. Parashari et al., Physica B 403 (2008) 3077–3088

# Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostrukury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie

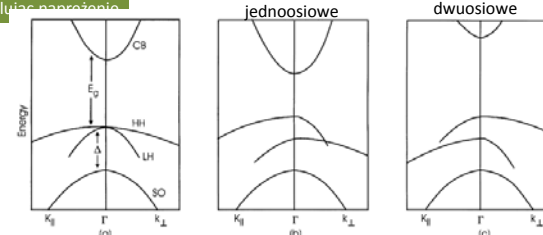


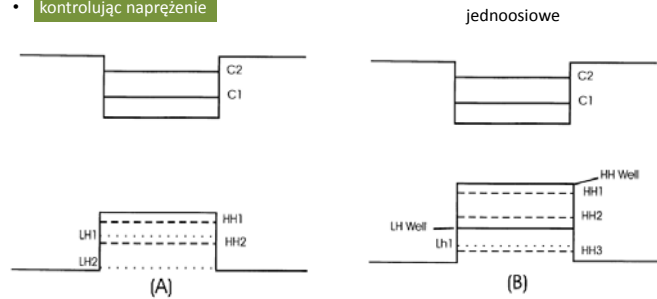
FIG. 6. (a) Schematic representation of the band structure of an unstrained direct-gap tetrahedral semiconductor (as in Fig. 2). (b) Under bi-axial tension, the hydrostatic component of the tension reduces the mean band gap, while the axial component splits the degeneracy of the valence band maximum and introduces an anisotropic valence band structure, with the highest band being light along the strain axis ( $k_x$ ) and comparatively heavy perpendicular to that axis. (c) Under bi-axial compression the mean band gap increases and the valence splitting is reversed so the highest band is now heavy along the strain axis ( $k_x$ ) and comparatively light perpendicular to it (reprinted with permission of <sup>(167)</sup> ©1989 Institute of Physics).

Prog. Quant. Electr. Vol. 21, No. 5, pp. 361-419, 1998

# Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostrukury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie

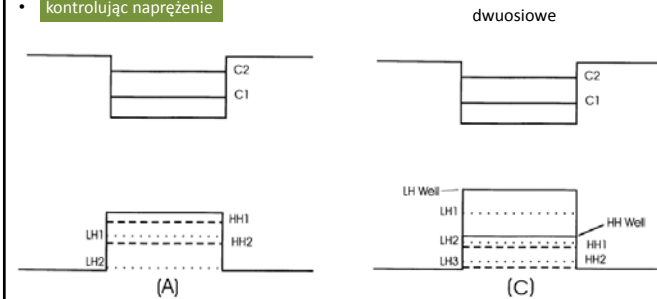


Prog. Quant. Electr. Vol. 21, No. 5, pp. 361-419, 1998

# Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostrukury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład
- kontrolując naprężenie



Prog. Quant. Electr. Vol. 21, No. 5, pp. 361-419, 1998

# Pasma w kryształach

## Struktura pasmowa ciał stałych

Przykłady:

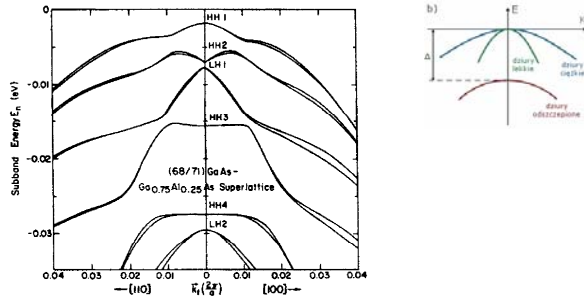


FIGURE 10.4. Valence-band structure in a multi-quantum well as a function of  $k$  along two directions. The wells comprise 68 atomic layers of GaAs with barriers of 71 atomic layers of  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ . [From Chang and Schulman (1985).]

D. Wasik.

2013-02-27

61

# TU 2012.10.10

2013-02-27

62

# Przejścia optyczne

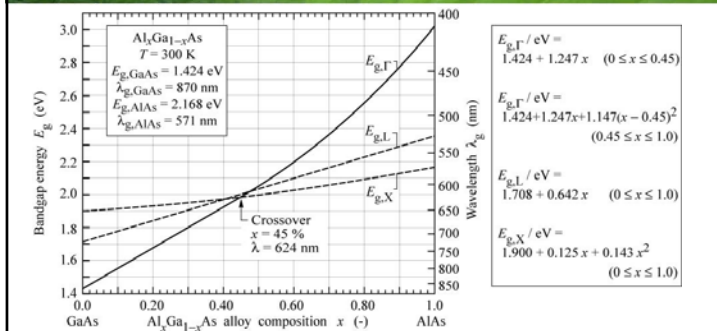


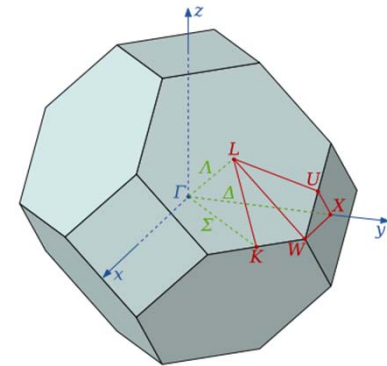
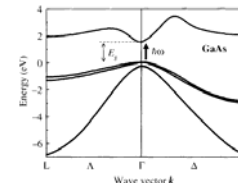
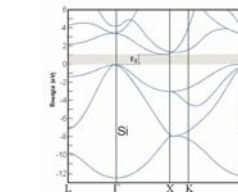
Fig. 12.7. Bandgap energy and emission wavelength of AlGaAs at room temperature.  $E_{\Gamma}$  denotes the direct gap at the  $\Gamma$  point and  $E_L$  and  $E_X$  denote the indirect gap at the L and X point of the Brillouin zone, respectively (adopted from Casey and Panish, 1978).

E. F. Schubert  
<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>

2013-02-27

63

# Bandgap engineering

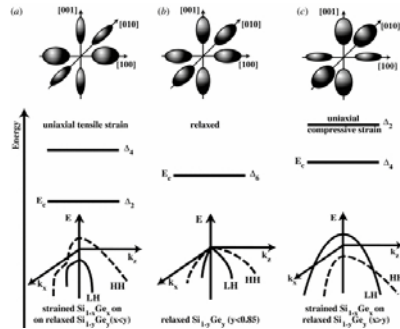


2013-02-27

64



### Trochę więcej na temat pasm



2013-02-27

65

### Trochę więcej na temat pasm

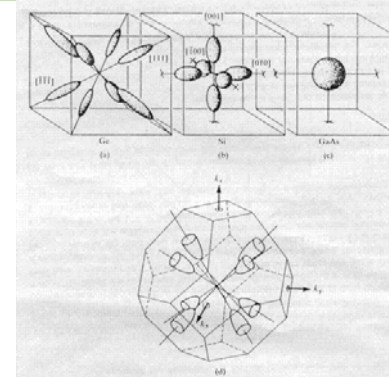


Fig. 3.14 Constant-energy surfaces characterizing the conduction band structure in (a, d) Ge, (b) Si, and (c) GaAs. (d) shows the truncation of the Ge surfaces at the Brillouin-zone boundaries. [(a-c) after Sze<sup>20</sup> and Zeman<sup>20</sup>] (d) from McKelvey<sup>20</sup> Reprinted with permission; the later from Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, Florida.]

2013-02-27

66

### Przejścia optyczne

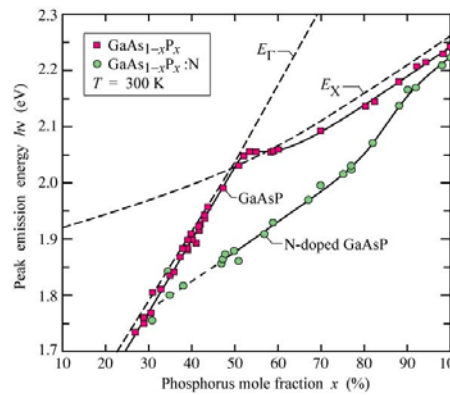


Fig. 12.2. Room-temperature peak emission energy versus alloy composition for undoped and nitrogen-doped GaAsP LEDs injected with a current density of 5 A/cm<sup>2</sup>. Also shown is the energy gap of the direct-to-indirect ( $E_{\Gamma}$ -to- $E_X$ ) transition. The direct-indirect cross-over occurs at  $x \approx 50\%$  (after Craford *et al.*, 1972).

E. F. Schubert  
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)  
[www.LightEmittingDiodes.org](http://www.LightEmittingDiodes.org)

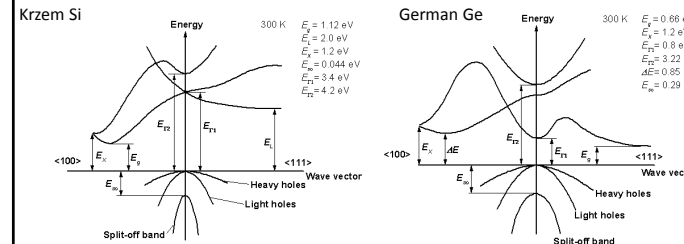
<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>

2013-02-27

67

### Trochę więcej na temat pasm

#### Krzem i german – przerwa skośna



$$E(\mathbf{k}) = E_c^{min} + \frac{\hbar^2}{2m_{\perp}} [(k_x - k_{0x})^2 + (k_y - k_{0y})^2] + \frac{\hbar^2}{2m_{\parallel}} (k_z - k_{0z})^2$$

2013-02-27

68

# Trochę więcej na temat pasm

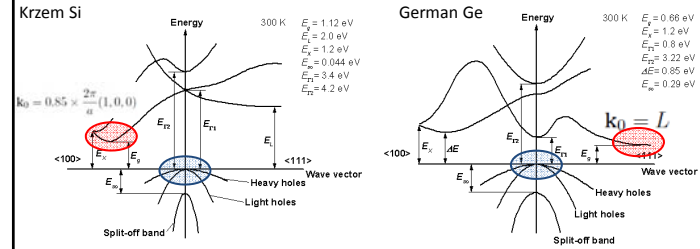
Komórka Vignera-Seitzza

2013-02-27

69

# Trochę więcej na temat pasm

## Krzem i german – przerwa skośna

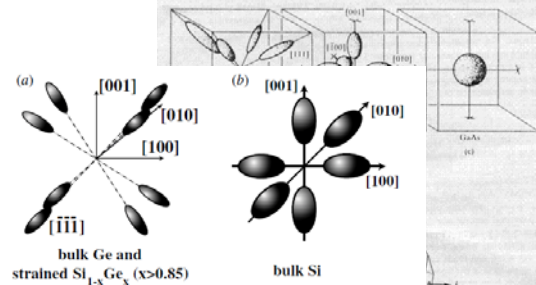


$$E(\mathbf{k}) = E_c^{min} + \frac{\hbar^2}{2m_{\perp}} [(k_x - k_{0x})^2 + (k_y - k_{0y})^2] + \frac{\hbar^2}{2m_{\parallel}} (k_z - k_{0z})^2$$

2013-02-27

70

# Trochę więcej na temat pasm

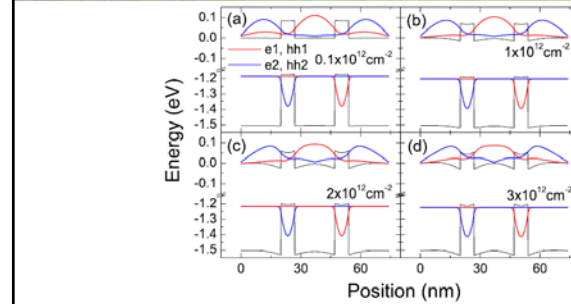


**Figure 10.** (a) The conduction band valleys of Ge along the [111] directions and (b) the conduction band valleys of silicon along the [100] directions.

Fig. 3.14 Constant energy surfaces characterizing the conduction band structure in (a, b) Ge, (b) Si, and (c) GaAs. (d) shows the transition of the Ge surfaces at the Brillouin zone boundaries. [(a-c) after Strz<sup>3</sup> and Ziman,<sup>10</sup> (d) from McKelvey.<sup>10</sup> Reprinted with permission; the later from Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, Florida.]

2013-02-27

71



**Figure 3.** Calculated band structure of the GaAs<sub>0.8</sub>Sb<sub>0.2</sub>/GaAs QW illustrated for a four different carrier densities of: (a)  $n_{qw} = 0.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , (b)  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , (c)  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , and (d)  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . The magnitudes of the single-particle electron and hole envelope wavefunctions of the two first states are also plotted.

2013-02-27

72

## Bandgap engineering

W jaki sposób możemy zmieniać strukturę pasmową heterostruktury:

- wybierając materiał (np. GaAs/AlAs)
- kontrolując skład (ternary, quaternary, quaternary alloys)
- kontrolując naprężenie