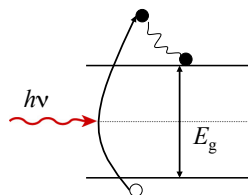


## Generatsioon ja rekombinatsioon

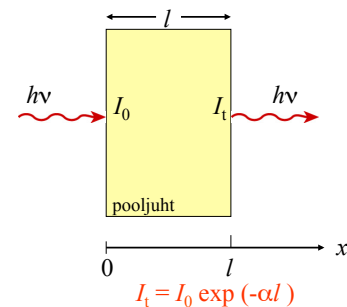
- Vabu lisalaengukandjaid võib pooljuhti sisestada mitmeti.
- Kõige laiemalt levinud on nn. **fotogeneratsioon**.

Kui footoni energia ( $h\nu$ ) on suurem, kui pooljuhi keelutsooni laius, siis neeldunud valgus on võimeline tekitama elektron-augu paare.



1

## Valguse neeldumine pooljuhis

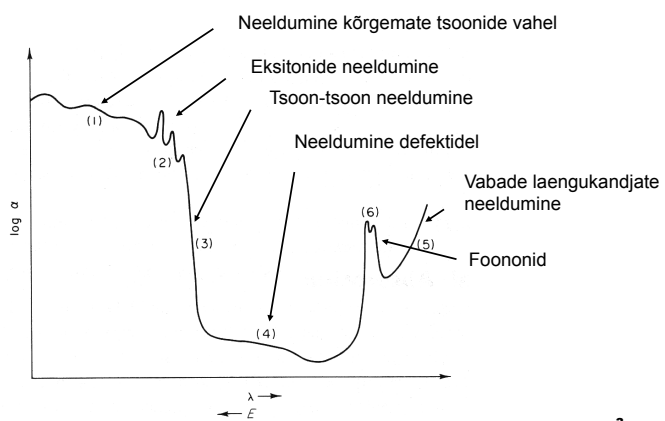


$$I_t = I_0 \exp(-\alpha l)$$

kus  $I_0$  on valguse intensiivsus kohas  $x = 0$  ja  $I_t$  on intensiivsus kohas  $x = l$ ,  $\alpha$ - neeldumiskoeffitsient (sõltub lainepikkusest).

2

## Valguse neeldumine pooljuhis



3

## Mõningate pooljuhtide neeldumiskoeffitsiendi sõltuvus lainepikkusest.

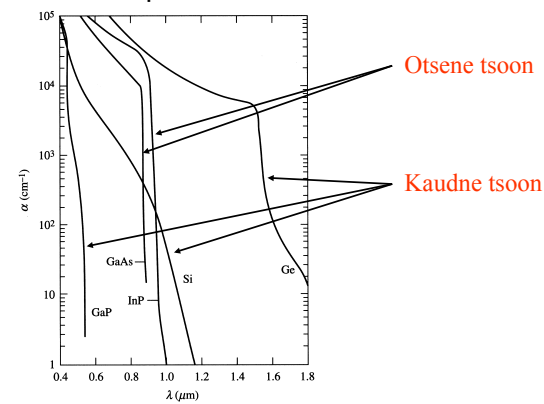


Figure 3.20

4

## Neeldumine otsese tsooni korral

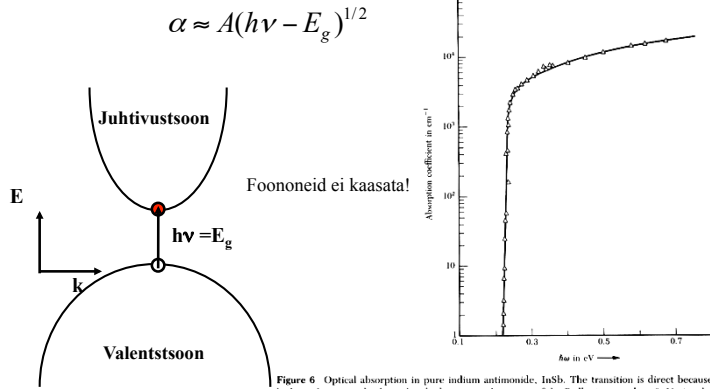
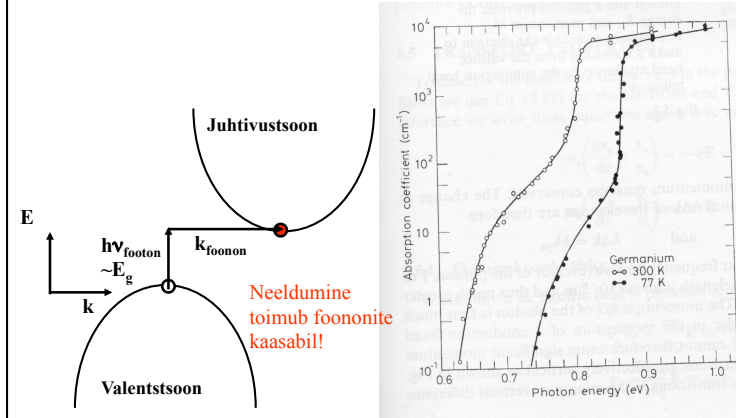


Figure 6 Optical absorption in pure indium antimonide, InSb. The transition is direct because both conduction and valence band edges are at the center of the Brillouin zone,  $k = 0$ . Notice the sharp threshold. (After G. W. Gobelt and H. Y. Fan.)

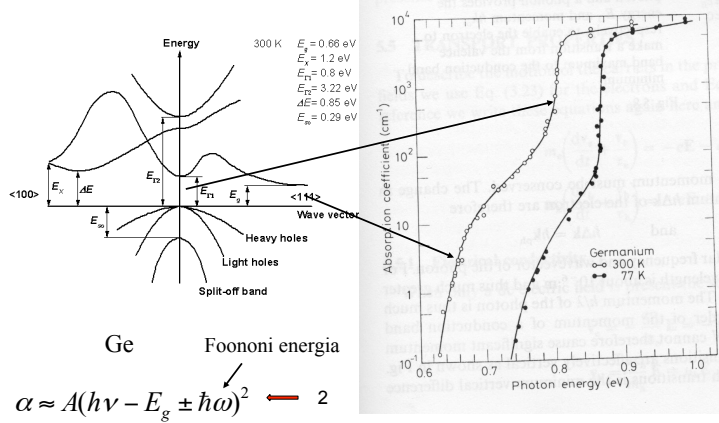
5

## Neeldumine kaudse tsooni korral



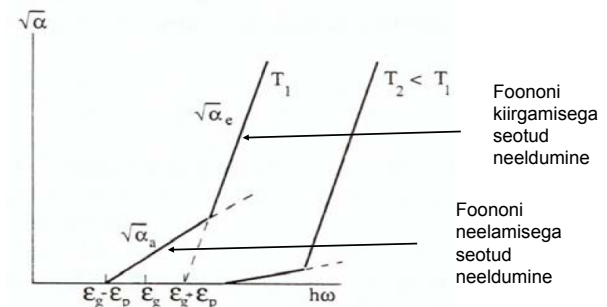
6

## Neeldumine kaudse tsooni korral



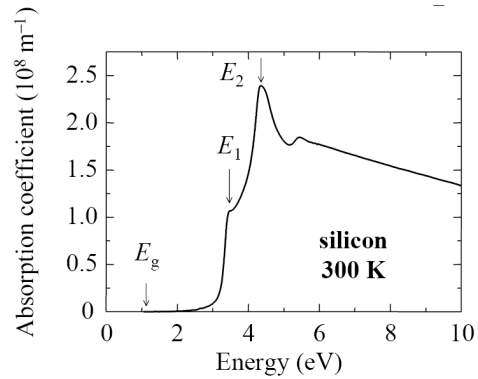
7

## Neeldumine kaudse tsooni korral



8

## Neeldumine ränis

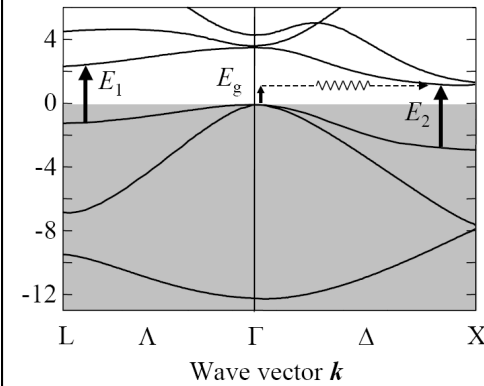


Kaudne keelutsoon  
 $E_g = 1.1 \text{ eV}$

**KRIITILISED** punktid:  
 $E_1 = 3.2 \text{ eV}$   
 $E_2 = 4.3 \text{ eV}$

9

## Neeldumine ränis



Neeldumine ~ olekute tihedus

$$g(E) \sim 2g(k)(dE/dk)^{-1}$$

Kriitilised punktid on kohtades, kus  $dE/dk=0$ , s.t. kohtades, kus juhtivustsoon on paralleelne valentsustsooniga

10

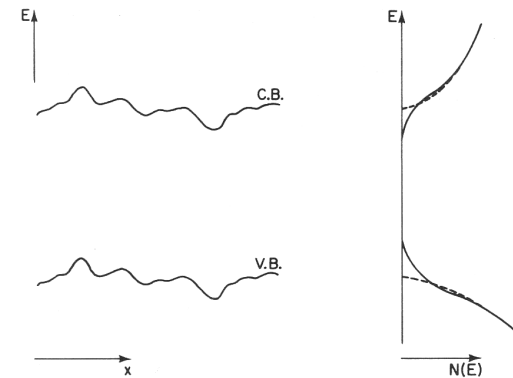
## Neeldumine üldiselt

$$\alpha = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^m \quad \alpha = \sum_i \alpha_i = \sum_i \frac{A_i}{h\nu} (h\nu - E_{g_i})^{m_i}$$

- |           |                          |
|-----------|--------------------------|
| $m = 1/2$ | otsene lubatud üleminek  |
| $m = 2$   | kaudne lubatud üleminek  |
| $m = 3/2$ | otsene keelatud üleminek |
| $m = 3$   | kaudne keelatud üleminek |

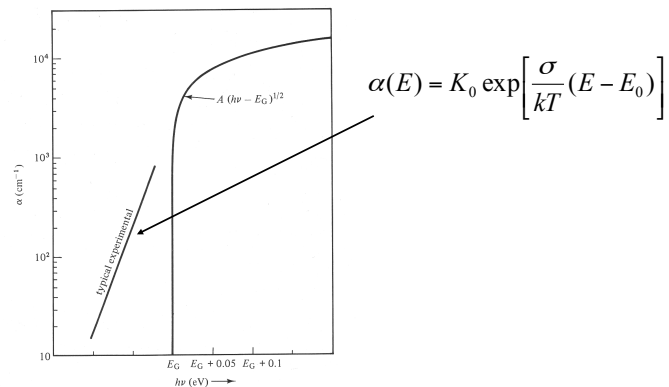
11

## Urbach'i saba



12

## Urbach'i saba



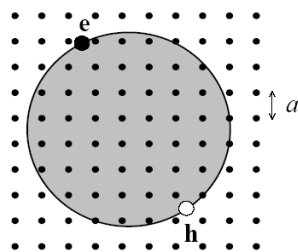
13

## Moss-Burstein'i nihe

- Tugevalt kõdunud materjalil hakkab neeldumisest leitud  $E_G$  sõltuma laengukandjate kontsentratsioonist
- Siis  $E_G = E_{G0} + E_F$
- $E_F$  tase asub sügaval juhtivustsoonis

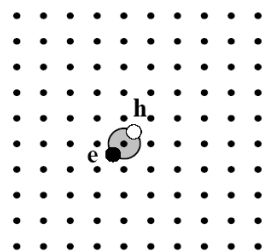
14

## Eksitonid



### Free (Wannier)

raadius  $\gg a$   
väike seoseenergia  
liigub vabalt kristallis



### Tightly-bound (Frenkel)

raadius  $\sim a$   
suur seoseenergia  
lokaliseerunud

15

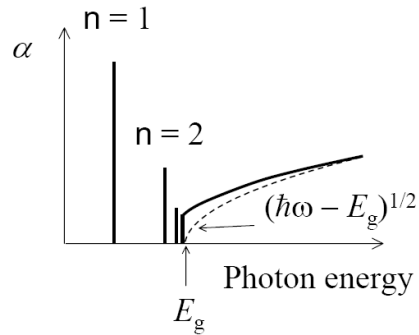
## Eksitonid

- Eksiton- elektron juhtivustsoonis ja auk valentstsoonis on füüsiliselt ruumis teineteisele lähedal ning omavad justkui ühist massitsentrit
- Eksiton ei lisa midagi juhtivusele, ta on **neutraalne**
- Vabad eksitonid- FE
- Doonoritega seotud eksitonid-  $D^0X$
- Aktseptoritega seotud eksitonid-  $A^0X$

16



## Eksitonide neeldumine



Vesinikumudel:

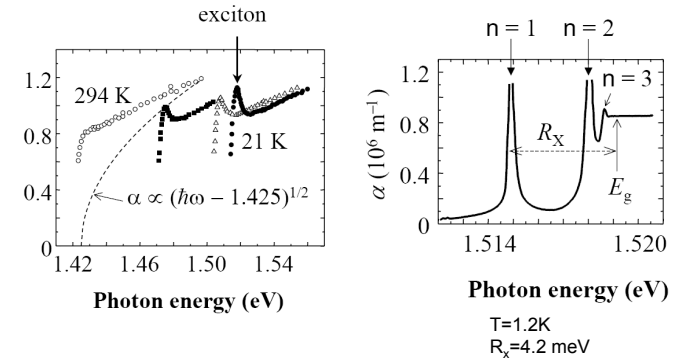
$$E_n = E_g - R_x/n^2$$

$T < (R_x/k)$  - s.t. väga madalad temperatuurid

$R_x$  - Rydbergi konstant

17

## Eksitonneeldumine (GaAs)



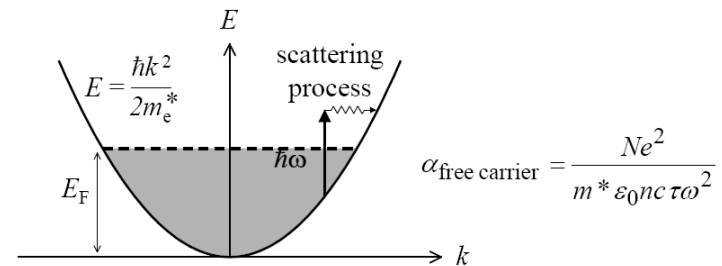
18

## Neeldumise muud mehhanismid

- Lisandneeldumine
- Tsoonidevaheline neeldumine
- Neeldumine läbi omadefektide
- Neeldumine vabadel laengukandjatel
- Neeldumine võre võnkumistel

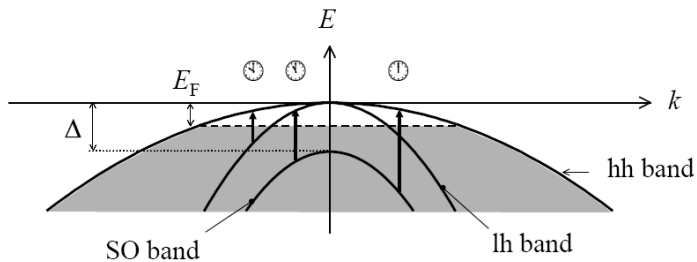
19

## Neeldumine vabadel laengukandjatel



20

## Tsoonidevaheline neeldumine



Infrapunane tsoonidevaheline neeldumine p-tüüpi pooljuhis

21

## Fotogeneratsioon

Fotogeneratsioonis genereeritakse võrdset auke ja elektrone, kusjuures iga foton genereerib ühe elektron-augu paari. Siis võib kirjutada:

$$\frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{valgusega}} = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{valgusega}} = G_L(x, \lambda) = G_{L0} e^{-\alpha x}$$

kus  $G_{L0}$  fotogeneratsiooni kiirus [e-h paare / (cm<sup>3</sup> s)] kohas  $x = 0$

22

## Fotogeneratsioon

- $n_0, p_0$  – olgu need kontsentratsioonid termilise tasakaalu korral
- $n, p$  – reaalsed kontsentratsioonid valgustades, sõltuvad ajast  $t$

- $\Delta n = n - n_0$
  - $\Delta p = p - p_0$
- $\Delta n$  ja  $\Delta p$  on kontsentratsioonide muutused võrreldes tasakaaluolekuga,  $\Delta n$  ja  $\Delta p$  võivad olla nii positiivsed kui ka negatiivsed.

- $N_t$  olgu rekombinatsioonitsentrite kontsentratsioon (tsentrid/cm<sup>3</sup>)

- **Eeldame** et ergastus pole liiga suur, s.t.

- Põhiliste laengukandjate kontsentratsiooni muutus on tühine, näit. n-tüüpi jaoks  $\Delta p \ll n_0$ ;  $n = n_0$ .

23

## Fotogeneratsioon

Vaatleme ikka n-tüüpi materjali.

Tähtsust omavad siin mittepõhilised laengukandjad, s.t. AUGUD:

Siis:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_R + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_G + G_L(x, \lambda)$$

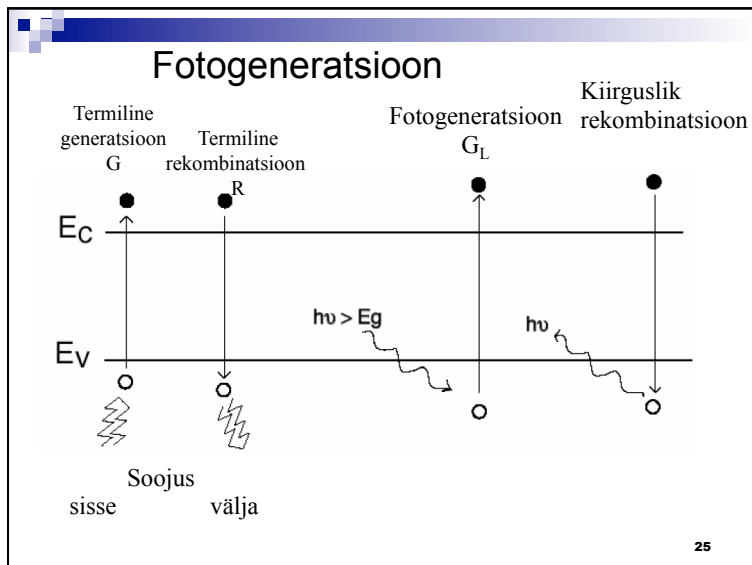
aukude (kadu) (juurdekasv) väline  
muutus rekom- tänu mõju  
binatsiooni generatsioonile valgus  
tõttu

$\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_R$  on võrdeline  $p$  ja  $N_t$  -ga.

$$\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_R = -C_p N_t p$$

$C_p$  – rekombinatsiooni konstant =  $v_{th} \sigma_{n(p)}$

24



### Fotogeneratsioon

Termilises tasakaalus on  $G_L = 0$ ; ja  $dp/dt = 0$

$$\longrightarrow \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_G = - \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_R = C_p N_t p_0$$

Seega, kui  $G_L = 0$ , saame

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -C_p N_t p + C_p N_t p_0 \\ &= -\frac{\Delta p}{\tau_p} \quad \text{defineerime} \quad \tau_p = \frac{1}{C_p N_t} \end{aligned}$$

kuna  $\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (p_0 + \Delta p) = \frac{\partial \Delta p}{\partial t}$

26

### Fotogeneratsioon

Siis võime kirjutada:  $\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p}$  aukude jaoks n-tüübis

Sarnaselt  $\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}$  elektronide jaoks p-tüübis

$\tau_p$  (või  $\tau_n$ ) on **“mittepõhiliste laengukandjate eluiga”**, mis näitab, kui kaua mittepõhilised laengukandjad keskmiselt säilivad.

**VÄGA TÄHTIS MATERJALI OMADUS.**

27

### Fotogeneratsioon ja kontsentratsiooni kahanemine ajas

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} \quad \text{Aukude jaoks n-tüüpi materjalis}$$

Võrrandi lahendiks  $t > 0$  jaoks:

$$\Delta p = \Delta p(0) \exp(-t/\tau_p)$$

Lisalaengukandjate kontsentratsioon kaheneb eksponentsiaalselt, kui fotogeneratsioon järsult lõpetada. Siit saab määrata eluiga!

28

## Mittepõhiliste laengukadrate eluea mõõtmine

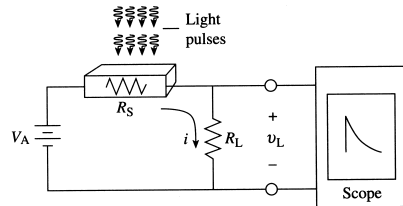


Figure 3.22

29

## Mittepõhiliste laengukadrate eluea mõõtmine

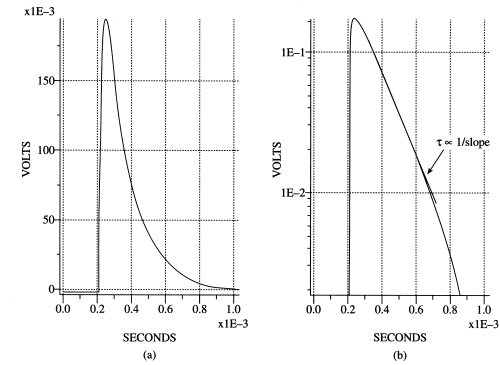


Figure 3.24

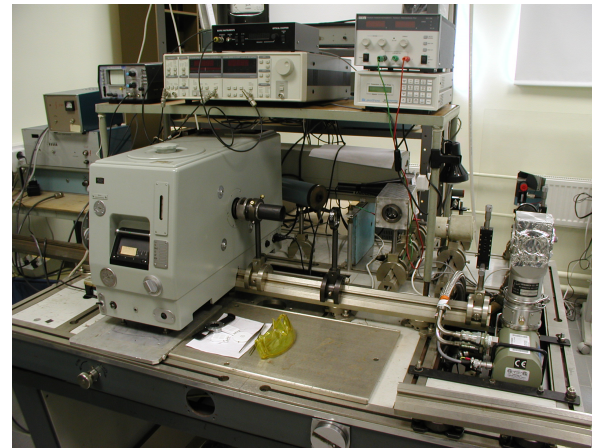
30

## Rekombinatsioonimehhanismid

- Kiirguslik rekombinatsioon e. luminesents
- Mittekiirguslik rekombinatsioon

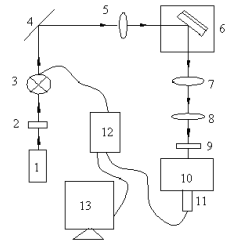
31

## Luminesentsi mõõtmine



32

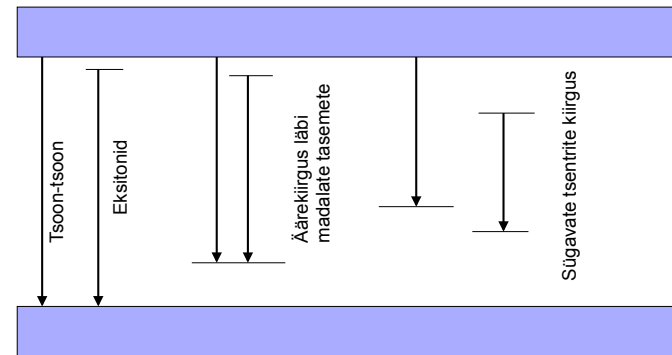
## Luminesentsentsi mõõtmine



Fotoluminesentsentsi mõõtmis skeem: 1– laser, 2– filter, 3– modulaator, 4– peegel, 5- lääts, 6– krüostaat, 7 ja 8 – läätsed, 9– filter, 10– monokromaator, 11– detektor, 12– *lock-in* võimendi, 13– arvuti.

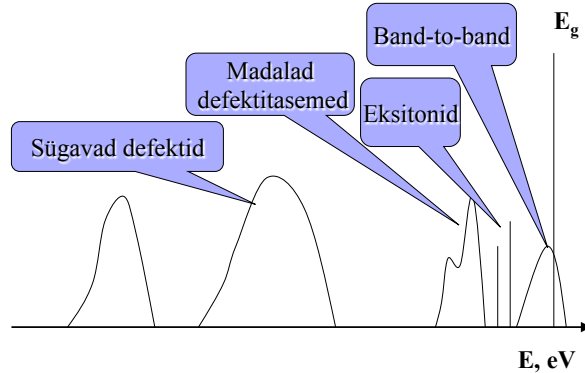
33

## Kiirgusliku rekombinatsiooni kanalid



34

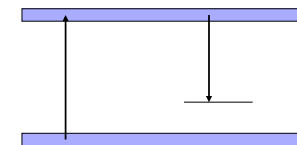
## Luminesentsentsi ribad:



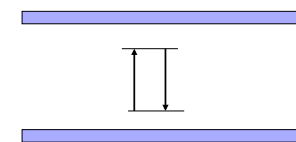
35

## Luminesentsents pooljuhtides

### ■ Rekombinatsiooniline



### ■ Tsentrisisene



36

## Luminesstsents pooljuhtides

### ■ Rekombinatsiooniline

Intensiivsus sõltub nii tühjade tsentrite kontsentratsioonist  $N$  kui ka vabade elektronide kontsentratsioonist  $n$

$$I = -\frac{dN}{dt} = \beta Nn$$

$\beta = \sigma \langle v \rangle$  - rekombinatsiooni koefitsient  
 elektronide keskmine kiirus  
 tsentri efektiivne haardestlõige

37

## Luminesstsents pooljuhtides

### ■ Rekombinatsioonilise luminesstsentsi ajaline kustumine

$$I = \frac{I_0}{[1 + (I_0 \beta)^{1/2} t]^2}$$

Seega:

$$I \approx \frac{1}{t^2}$$

38

## Luminesstsents pooljuhtides

### ■ Tsentrisisene- monomolekulaarne protsess, intensiivsus sõltub vaid tsentrite arvust.

$$I = -\frac{dN}{dt} = \alpha N = \alpha N_0 \exp(-\alpha t)$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha t)$$

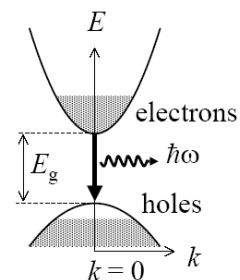
$$\tau = \frac{1}{\alpha} \quad \text{tsentri ajakonstant}$$

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

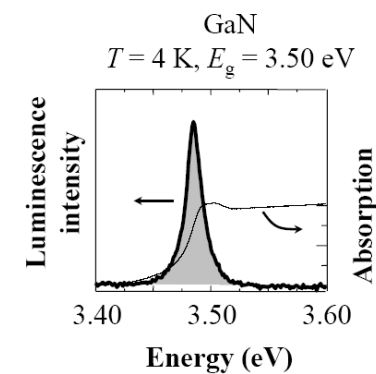
39

## Äärekiirgus otsese pooljuhi korral

### conduction band

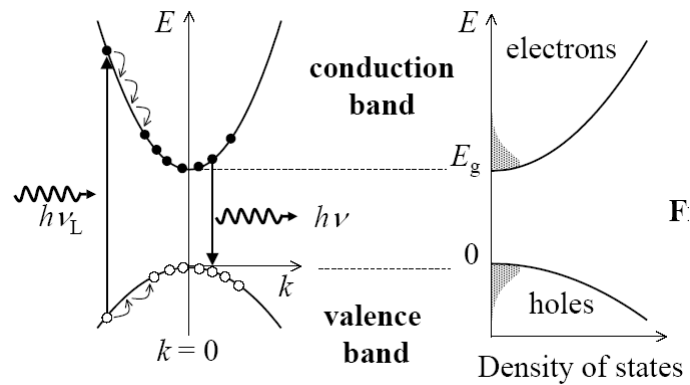


### valence band



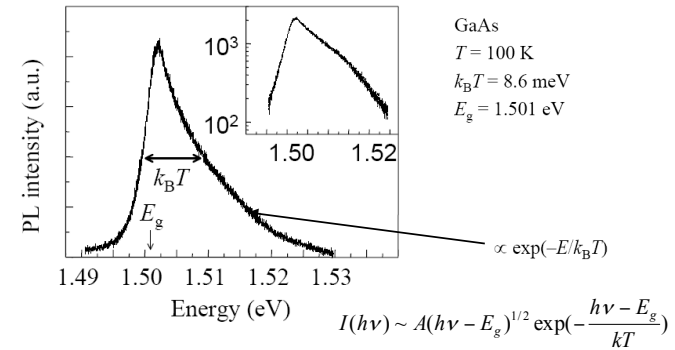
40

## Äärekiirgus otsese pooljuhi korral



41

## GaAs äärekiirgus



42

## Äärekiirguse rakendused

- Valgusdiodid
- Pooljuhtlaserid
- Kvantkaevudel ja supervõredel põhinevad laserid

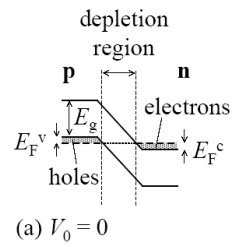
43

## Tööstuslikud valgusdiodid

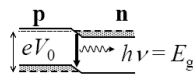
Ühend	Värvus
GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub>	PUNANE
GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub> :N	ORANZH-PUNANE
GaAs <sub>0.14</sub> P <sub>0.86</sub> :N	KOLLANE
GaP:N	ROHELINE
GaP:Zn-O	PUNANE
AlGaAs	PUNANE
AlInGaP	ORANZH
AlInGaP	KOLLANE
AlInGaP	ROHELINE
SiC	SININE
GaN	SININE

44

## GaAs elektroluminesets

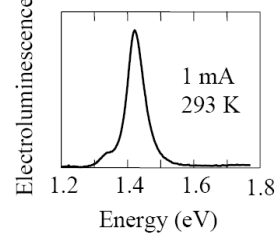


(a)  $V_0 = 0$



(b)  $V_0 \approx +E_g/e$

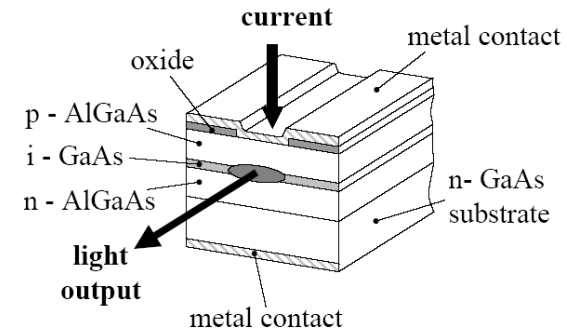
GaAs,  $E_g = 1.42$  eV



- Emission at  $E_g$
- Operating voltage  $\sim E_g/e$
- Spectral width  $\sim k_B T$

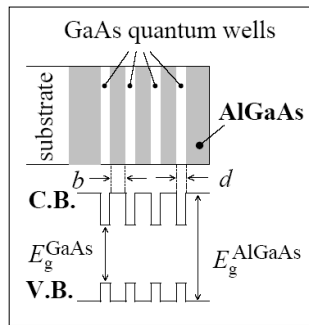
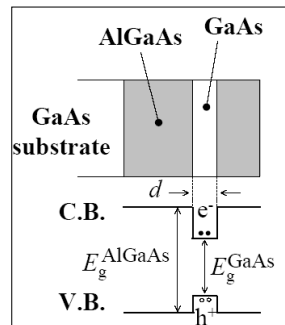
45

## GaAs laserdiod



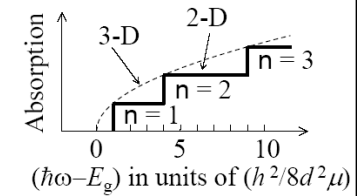
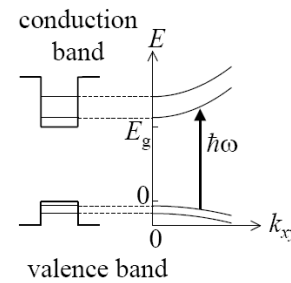
46

## Kvantkaev ja supervõre



47

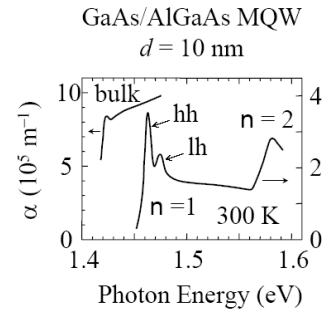
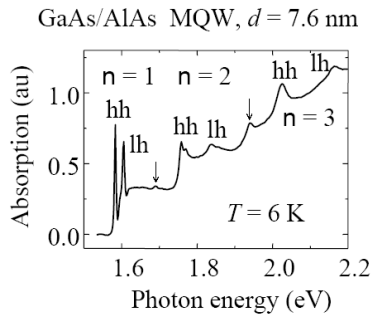
## Neeldumine kvantkaevus



48

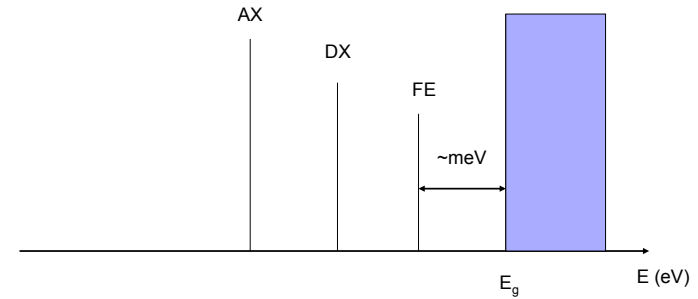


# Neeldumine kvantkaevus



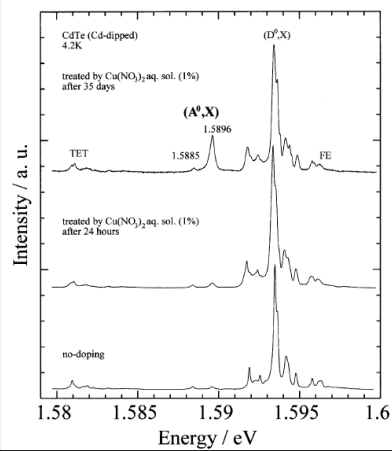
49

# Eksitonid



50

# Eksitonide luminesstents

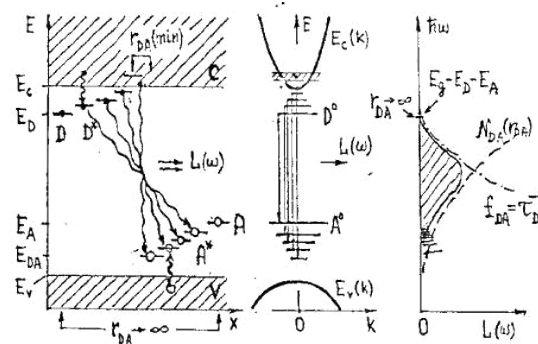


S.H. Song et al. / Journal of Crystal Growth 257 (2003) 231–236

CdTe eksitonkiirus

51

# Doonor-aktseptorpaaride luminesstents



52

## Doonor-aktseptorpaaride luminesstsents

- Elektroni ja augu omavahelise rekombinatsiooni tõenäosus:  $W_{DA} = W_0 \exp(-2R/a_0)$
- Iga DA paari kiirguse energia sõltub D ja A vahelisest kaugusest R:

$$h\nu_{DA}(R) = E_g - (E_D + E_A) + \frac{e^2}{\epsilon R}$$

- Madalate tasemete puhul mängib olulist rolli ka paaride jaotumine kauguste järgi:

$$N_{DA}(R) = N_D N_A 4\pi R^4 \exp\left(-\frac{4\pi}{3} N_D R^3\right)$$

53

## Doonor-aktseptorpaaride luminesstsents

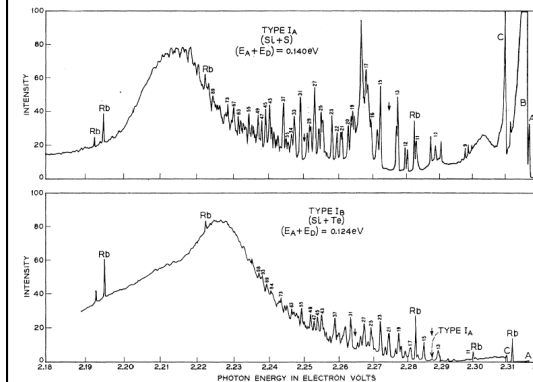
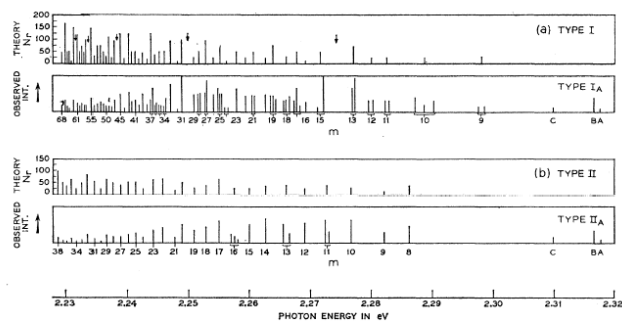


FIG. 2. The photoluminescent spectra (on arbitrary scales) of type I<sub>A</sub> and I<sub>B</sub> crystals taken at 1.6°K. The lines marked Rb are rubidium calibration lines. The small numbers indicate the shell numbers of the pair spectra. A, B, and C are bound exciton lines. The arrows indicate some positions for which  $N(r)=0$ , and mark a gap in the spectra. The type I<sub>A</sub> crystals are grown without the addition of impurities; the I<sub>B</sub> crystals are produced by adding Te.

GaP klassikaline töö  
Phys. Rev. 133,  
1964, p. A269

54

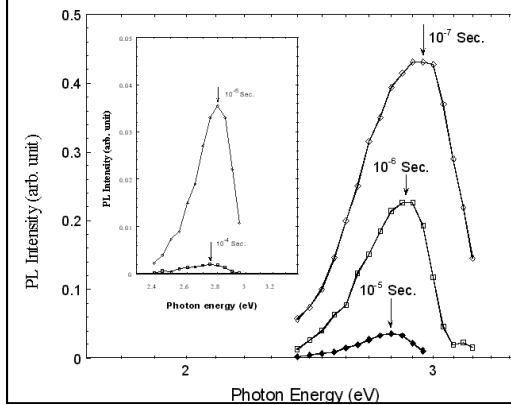
## Doonor-aktseptorpaaride luminesstsents



GaP klassikaline töö: Phys. Rev. 133, 1964, p. A269

55

## Doonor-aktseptorpaaride luminesstsents



GaN t-shift

MRS Internet J.  
Nitride Semicond.  
Res. 6, 12(2001).

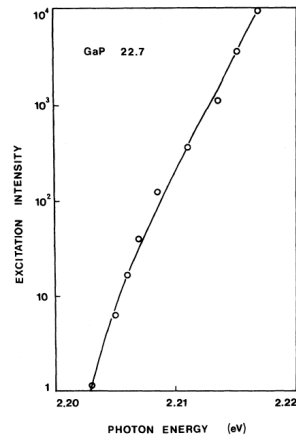
R suureneb  
W väheneb

t suureneb  
E<sub>max</sub> väheneb

s.t. kiiremini  
rekombineeruvad  
lähedased paardid

56

## Doonor-aktseptorpaaride luminesents



GaP j-shift

*Phys. Rev. B, 6, 1972, 3072*

R suureneb  
W väheneb

$I_{\text{laser}}$  suureneb  
 $E_{\text{max}}$  suureneb

s.t. kiiremini lähevad küllastusse suure R-ga paarid

57

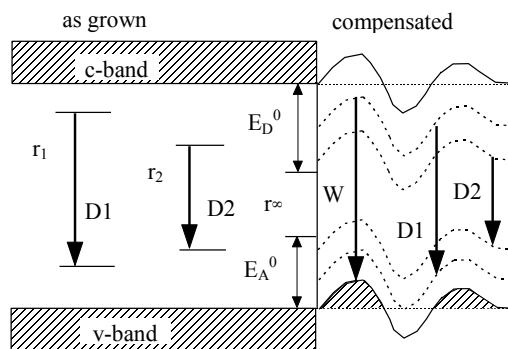
## Sügava doonori- sügava aktseptori paarid -> DD-DA paarid.

- DD-DA paarid on defektid, mis avalduvad nii kolmikühendites kui ka binaarsetes ühendites.
- Võimalikud on vaid väga lähedased paarid väga sügavate defektide vahel.
- Lähedaste paaride vahelist energiat on võimalik välja arvutada.

$$\Delta E_{mn} = \frac{e^2}{\epsilon} \left( \frac{1}{r_m} - \frac{1}{r_n} \right)$$

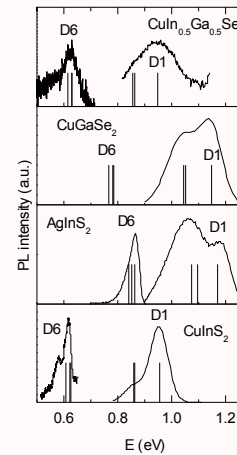
58

## DD-DA paarid



59

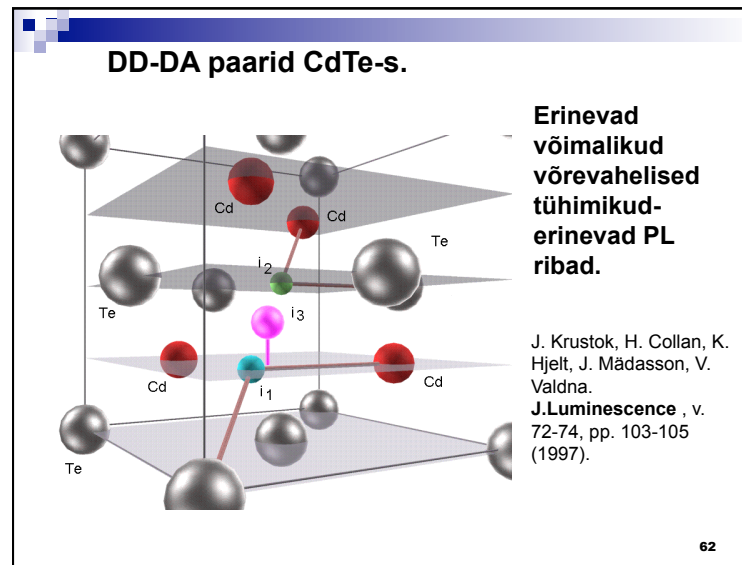
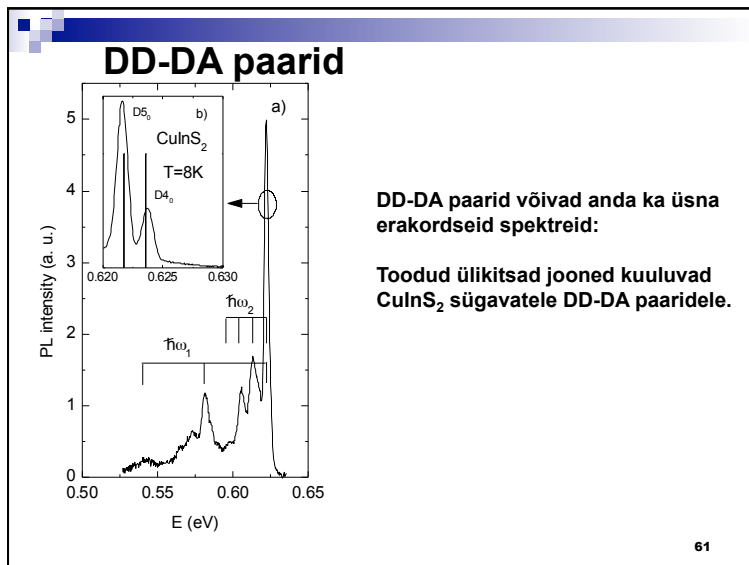
## DD-DA paarid



DD-DA paaridele vastav kiirgus erinevates kolmikühendites.

Teoreetiliselt arvatud ribade asukohad on toodud vertikaaljoontega.

60



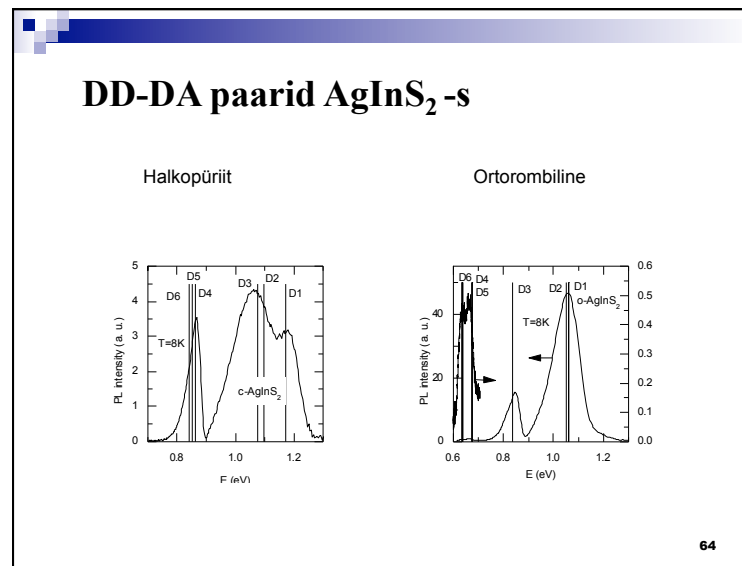
### DD-DA paarid erinevate kristallstruktuuride korral

Possible distances between the two interstitial positions (*i1* or *i2*), and the Ag or In sites, respectively, in the chalcopyrite and orthorhombic lattice of AgInS<sub>2</sub>. Starting from the shortest one, the distances are labelled D1, D2, ... etc.

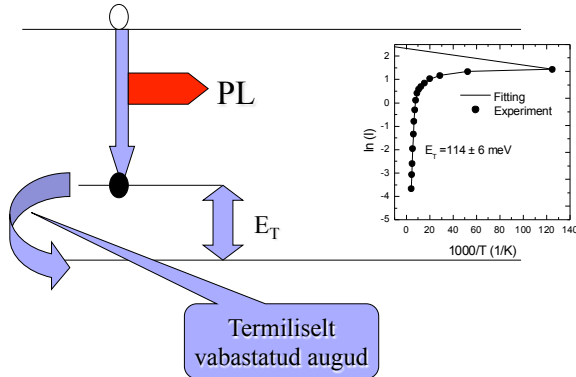
No	Chalcopyrite		Orthorhombic	
	Lattice sites	Distance, Å	Lattice sites	Distance, Å
D1	Ag-i2, In-i2	2.49	In-i2, Ag-i1	2.48
D2	Ag-i1, In-i1	2.8	Ag-i1, In-i2	2.51
D3	Ag-i1, In-i1	2.91	In-i1, Ag-i2	3.45
D4	Ag-i2, In-i2	4.68	In-i1, Ag-i2	4.8
D5	Ag-i2, In-i2	4.81	In-i1, Ag-i2	4.81
D6	Ag-i1, In-i1	4.98	In-i1, Ag-i2	5.3
D7	In-i2	6.23	In-i1, Ag-i2	6.26

**AgInS<sub>2</sub> halkopüriit ja ortorombiline struktuur**

63



## Fotoluminestsentsi termiline kustumine



65

## Fotoluminestsentsi termiline kustumine

- Olemasolevad teoreetilised käsitlused andsid vastuolulisi tulemusi madalatemperatuurises osas.
- Intensiivsuse temperatuursõltuvuse kirjeldamiseks kasutati tihti kahte aktivatsioonienergiat:

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + \alpha_1 \exp(-E_{T1}/kT) + \alpha_2 \exp(-E_{T2}/kT)}$$

- J. Krustok, H. Collan, and K. Hjelt. J. Appl. Phys. v. 81, N 3, pp. 1442-1445 (1997) .

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + \varphi_1 T^{3/2} + \varphi_2 T^{3/2} \exp(-E_T/kT)}$$

66

## Konfiguratsioon koordinaatide meetod

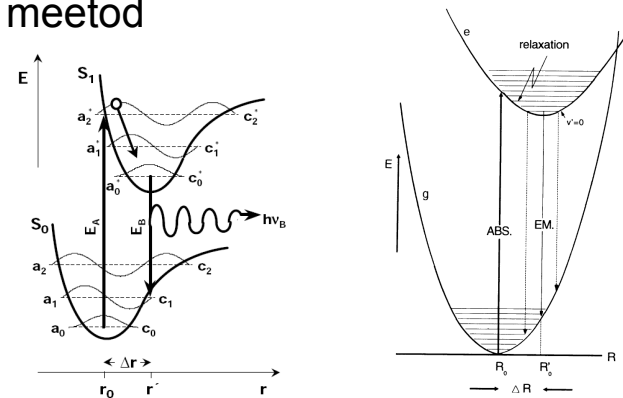
Kaheaatomilise molekuli mudel- harmooniline ostsillaator

$F = -kx$

$dE = -Fdx \Rightarrow E = \int_0^x kx dx = \frac{kx^2}{2}$  ← Parabool!!!

67

## Konfiguratsioon koordinaatide meetod



Kaheaatomiline süsteem- r reaalne kaugus

Kristall- R nn. konfiguratsiooni koordinaat

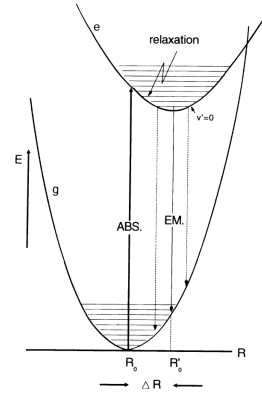
68

## Konfiguratsioon koordinaatide meetod

Frank- Condoni printsiip:

Elektronüleminekud toimuvad nii kiiresti, et aatomite omavaheline asukoht ei jõua veel muutuda:

**VERTIKAALSED ÜLEMINEKUD**  
konfiguratsioon koordinaatide ruumis



69

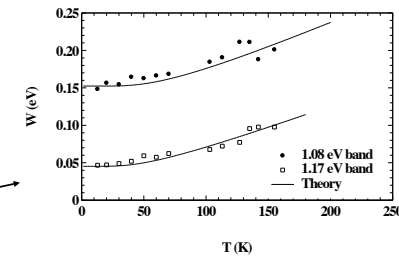
## Konfiguratsioon koordinaatide meetod

1. Kiirgusriba poollaiuse sõltuvus temperatuurist.

$$W = W_0 \sqrt{\coth\left(\frac{\hbar\omega}{2kT}\right)}$$

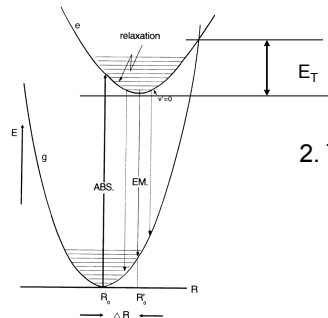
$$W_0 = \sqrt{8 \ln 2} \sqrt{S\hbar\omega}$$

CdTe



70

## Konfiguratsioon koordinaatide meetod



2. Tsentrisene kustutamine

$$I = \frac{I_0}{1 + \alpha \exp(-E_T / kT)}$$

Mott'i valem

$$E_{abs} - E_{emiss} = 2S\hbar\omega$$

S- Huang-Rhys faktor e. kesmine foononite arv üleminekul

71

## Luminestsentsiriba kuju

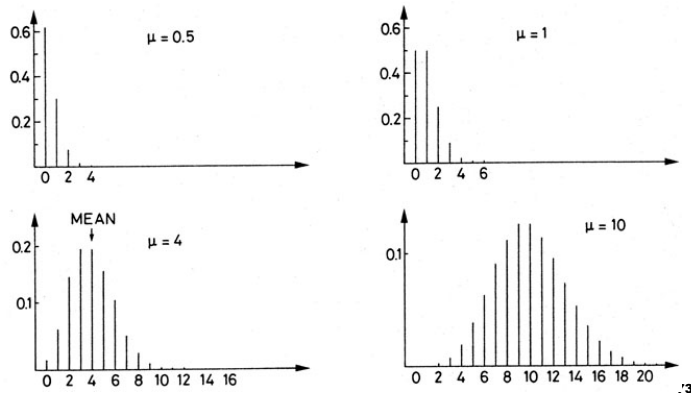
- Teooria – Pekar, Huang, Rhys, jt.
- Üldine PL riba kuju on üsna keeruline
- Lihtsustused:
  - T=0
  - vastasmõju ühe konkreetse foononiga nii ergastatud kui ka põhiolekus

Siis on võimalik välja arvutada rekombinatsiooni tõenäosust ergastatud oleku igalt tasemelt põhioleku igale tasemele- need tõenäosused alluvad Poissoni jaotusele

72

## Poissoni jaotus

$$P(r) = \frac{\mu^r \exp(-\mu)}{r!}$$



## Luminesentsiriba kuju

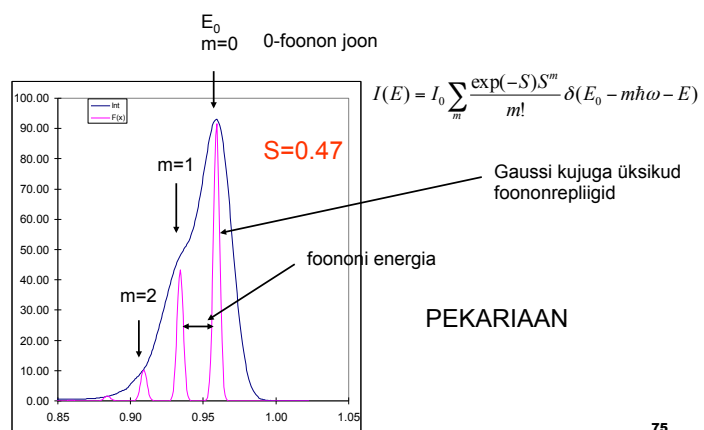
- Siis kiirgusriba kuju avaldub:

$$I(E) = I_0 \sum_m \frac{\exp(-S) S^m}{m!} \delta(E_0 - m\hbar\omega - E)$$

üksiku ribakese kuju sõltub vastasmõjust väiksema energiaga (akustiliste) foononitega

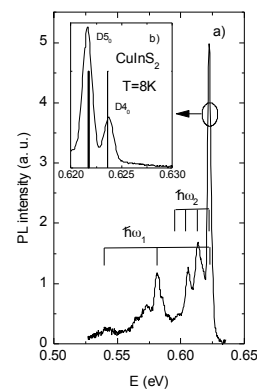
74

## Luminesentsiriba kuju



75

## Luminesentsiriba kuju



PL riba kuju  $\text{CuInS}_2$  -s

Näha on vastasmõju kahe erineva foononiga

76

## Luminesentsiriba kuju

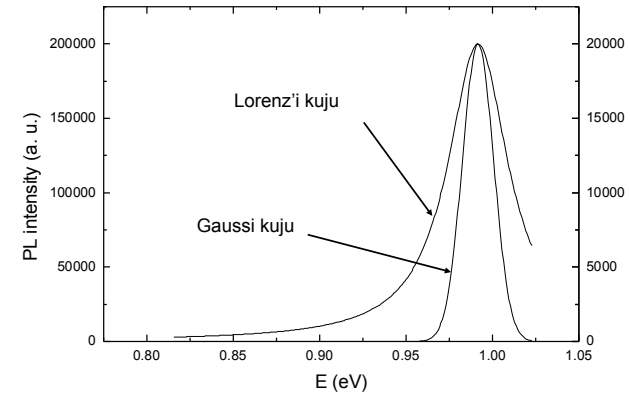
Gaussi kuju: 
$$I(E) = I_0 \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (E - E_{\max})^2}{W^2}\right]$$

Kui Pekariaanis  $S \rightarrow \infty$ , siis muutub Pekariaan samuti Gaussiaaniks:

$$I(E) = I_0 \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (E - E_0 - S\hbar\omega)^2}{8 \ln 2 S (\hbar\omega)^2}\right]$$

77

## Luminesentsiriba kuju



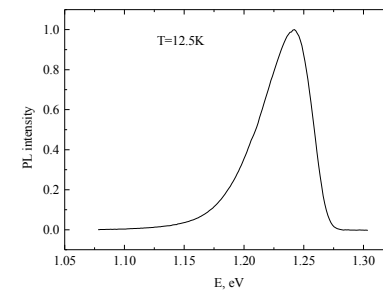
78

## Tugevalt "legeeritud" materjalide luminesents

- Suurem osa uuritavatest kolmikühenditest on nn. tugevalt legeeritud
- Tugev legeerimine: defektide vaheline kaugus on väiksem kui laengukandjate Bohri raadius.
- Juhtivus- ja valetstsooni ääri mõjutavad tugevalt potentsiaali fluktuatsioonid.

79

## Tugevalt "legeeritud" materjalide luminesents



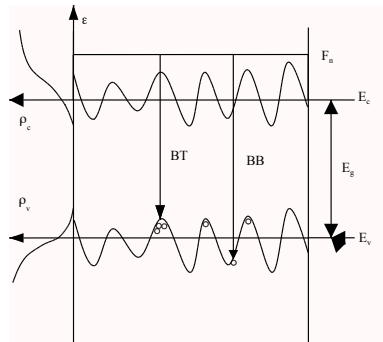
Tüüpiline tugevalt legeeritud CuInGaSe<sub>2</sub> PL spekter

• J. Krustok, H. Collan, M. Yakushev, K. Hjelt. The role of spatial potential fluctuations in the shape of the PL bands of multinary semiconductor compounds. *Physica Scripta*, T79, pp. 179-182 (1999).

80



## Teoreetiline mudel PL ribade kirjeldamiseks tugevalt legeeritud kolmikühendites.



Tugevalt “legeeritud” kolmikühendi tsoonipilt ning olekute tiheduse funktsioonid.

Teooria: Shklovskii, Efros Levaniuk, Osipov

81

## Teoreetiline mudel PL ribade kirjeldamiseks tugevalt legeeritud kolmikühendites.

- Olekute tiheduse funktsioon sabas:

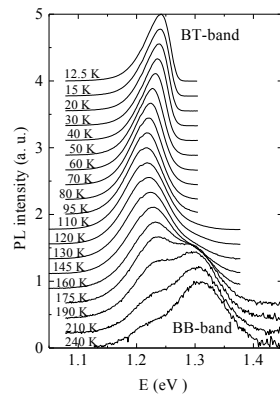
$$\rho_c(E_e) = \rho_0 \exp \left[ - \left( \frac{E_{c0} - E_e}{\gamma_0} \right)^k \right]$$

- BT riba kuju avaldub:

$$I_{BT}(h\nu) \propto \iint W_{BT}(E_e, E_h) \rho_c(E_e) f_e(E_e) \rho_v(E_h) q_h(E_h) \delta(E_e - E_h - h\nu) dE_e dE_h$$

82

## Tugevalt legeeritud CuInGaSe<sub>2</sub> äärekiirguse spekter

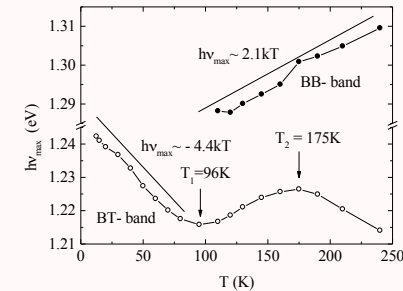


• J. Krustok, H. Collan, M. Yakushev, K. Hjelt. The role of spatial potential fluctuations in the shape of the PL bands of multinary semiconductor compounds. *Physica Scripta*, T79, pp. 179-182 (1999).

**BB ja BT kiirgused**

83

## BB ja BT ribade temperatuursõltuvused

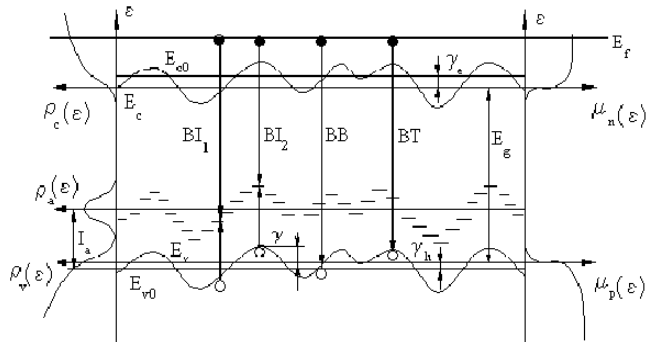


BT ja BB ribade maksimumide temperatuursõltuvused.

- J. Krustok, J. Raudoja, M. Yakushev, R. D. Pilkington, and H. Collan. *phys. stat. sol. (a)* v. 173, No 2, pp. 483-490 (1999).
- J. Krustok, H. Collan, M. Yakushev, K. Hjelt. *Physica Scripta*, T79, pp. 179-182 (1999).

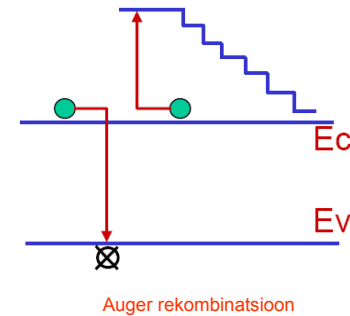
84

## Rekombinatsioon tugevalt legeritud pooljuhtides



85

## Mittekiiruslik Auger rekombinatsioon



Osalevad 3 laengukandjat.

Elektron-augu rekombinatsioonist vabanev energia antakse kolmandale elektronile.

See kolmas elektron kiirgab energia mittekiiruslikult foononite kaudu

86

## Mittekiiruslik rekombinatsioon läbi defektide

- Paljudes materjalides võib rekombinatsioon minna ka läbi defektitasemete mittekiiruslikult.
- Mittekiirusliku rekombinatsiooni osakaalu näitab kvantväljund.
- Kustutustsentrid -> s-tsentrid

87

## Lõpetuseks

- Iseseisev töö
- Loengu materjalid: [staff.ttu.ee/~krustok](http://staff.ttu.ee/~krustok)

88