

YFR0760

Pooljuhtide füüsika

Jüri Krustok
jury.krustok@ttu.ee
staff.ttu.ee/~krustok
 Tel. 620-3364

1

Sissejuhatuseks

Internetist saadavad materjalid:

- Rensselaer Polytechnic Institute kursused (prof. Fred Schubert)
<http://www.rpi.edu/~schubert/>
- Bart Van Zeghbroeck, Principles of Semiconductor Devices, Colorado University
<http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/welcome.htm>
- Ilusate piltidega lühikursus: <http://britneyspears.ac/lasers.htm>
- Introduction to Modern Solid State Physics, Yuri M. Galperin:
<http://edu.ioffe.ru/lib/galperin/>
- Introduction to Solid State Electronics, J. P. Bird ; Arizona Ülikool <http://www.eas.asu.edu/~bird/Images/Teaching/Teaching.htm>

2


Sissejuhatuseks

Õpikud:

- *Physics of Semiconductors and their Heterostructures* J. Singh (McGraw Hill, New York)
- Yu, Peter Y. *Fundamentals of semiconductors : physics and materials properties.* xviii, 639 lk. **TTÜ-s olemas**
- Sze, S. M. *Semiconductor devices, physics and technology.* viii, 564 lk. : New York (N.Y.) **TTÜ-s olemas**
- Tyagi, Man S., *Introduction to semiconductor materials and devices.* xvii, 669 lk. : New York **TTÜ-s olemas**

■ **Lisaks venekeelsed õpikud**

3

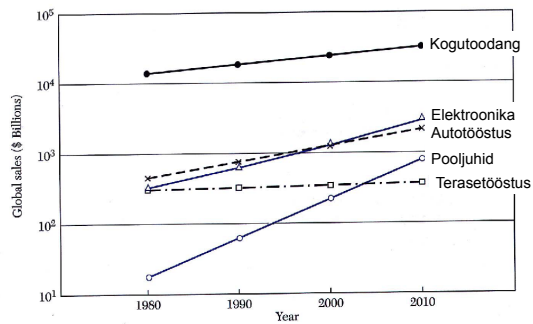


4 peamist tehnoloogiat:

metall	pooljuht	s.t. MESFET (Schottky barjäär)	
metall	oksiid	pooljuht	s.t. MOSFET
p-tüüpi pooljuht	n-tüüpi pooljuht	s.t. p-n üleminek, bipolaarne transistor	
Pooljuht A	Pooljuht B	s.t. heteroüleminekud, optoelektronika	

4

Pooljuhtide koht tööstuses



5

Natuke ajalugu:

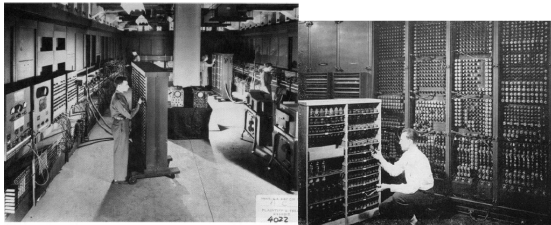
- 1874- esimene pooljuhi ja metalli töötav kontakt (Braun)
- 1899- elektroni avastamine
- 1907- esimene valgust kiirgav diod (Round)
- 1947- esimene bipolaarne transistor (Bardeen, Brattain, Shockley)
- 1949- p-n siirde teooria (Shockley)
- 1951- esimene heterosiire (Shockley)
- 1954- esimene päikesepatarei (Chapin, Fuller, Pearson)
- 1958- esimene tunneldioid (Esaki)
- 1959- esimene nn. mikroskeem
- 1960- esimene metall-oksiid-pooljuht väljatransistor (MOSFET)
- 1962- esimene pooljuhtlaser GaAs baasil (IBM laboris)
- 1966- esimene metall-pooljuht väljatransistor (MESFET)
- 1971- esimene mikroprotsessor INTEL 4004

... ja nii ta läks.....

6

Esimene arvuti lampidel.

ENIAC – First electronic computer (1946)



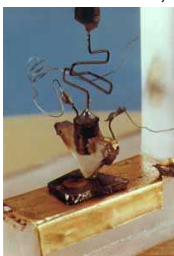
7

Vaakumlambid- esimese arvuti koostisosad



8

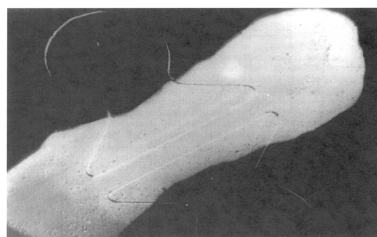
Esimene bipolaarne transistor, 1947.a. Bell Lab.



Pooljuhina kasutati germaaniumi (Ge)

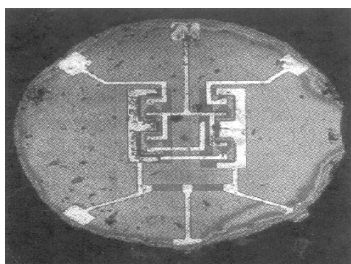
9

Esimene metall-oksiid-pooljuht väljatransistor (MOSFET) aastast 1960



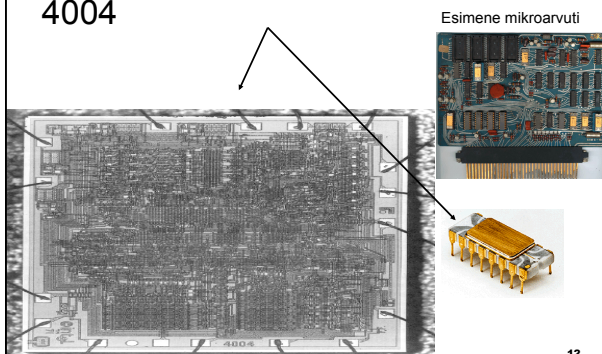
10

Esimene monoliitne mikroskeem aastast 1959.



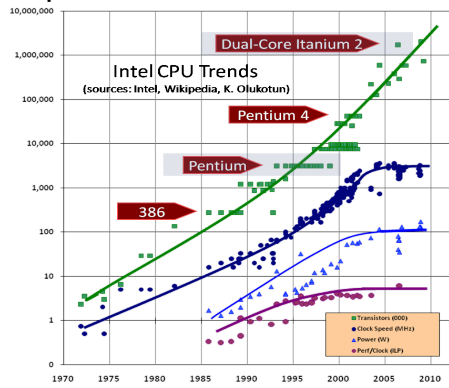
11

Esimene INTEL-i mikroprotsessor 4004

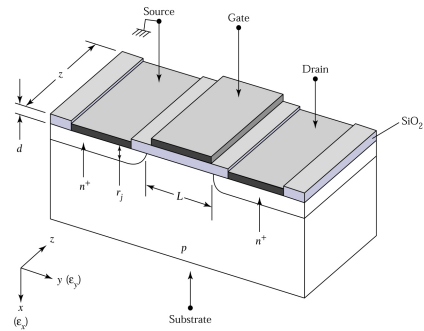


12

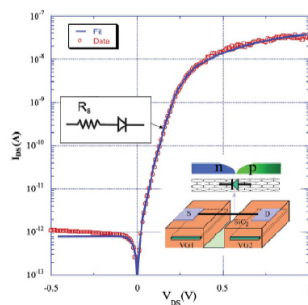
Mikroprotsessorite kiirus



MOSFET struktuur



Süsiniku nanotorul baseeruv diood



Peaaegu ideaalse karakteristikuga diood-tuleviku elektroonika?

Appl. Phys. Lett. 87 073101, 2005

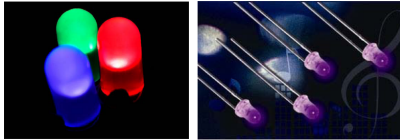
Tuleviku pooljuhtelektroonika ilma pooljuhtideta?

Pooljuhtide kasutusala

- LED-id
- Pooljuhtlaserid
- Mikroelektroonika
- Valgusdetektorid
- Päikesepatareid
- Muud kasutusala

16

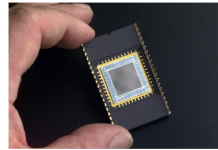
LED- light emitting diode



Eluiga- umbes 11 aastat

17

CCD- maatriksid

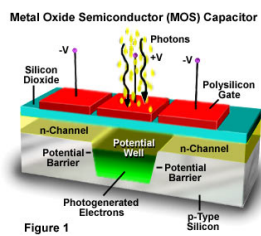


Charge-coupled devices

Kaamerad, digifotograafia

18

MOS struktuuriga CCD



19

Pooljuhtide tulevik

- Valgust kiirgav räni (Si laser IBM-ist)
- Optilised arvutid, optilised signaaliedastused.....
- Uued nanostruktuurid, fotonkristallid
- Optilised kaablid kodudesse
- GaN UV laserid
- Muud.....

20

Pooljuhtide uurimine Tallinna Tehnikaülikoolis

- algas 60-ndate alguses (dots. Jüri Varvas)
- põhiline uurimisvaldkond: II-VI tüüpi pooljuhtide (CdS, CdSe, ZnSe) defektstruktuur
- CdS fototakistid
- põhiline uurimismeetod: kõrgtemperatuurse juhtivuse mõõtmised
- Fotoluminesentsi uuringud (prof. Peeter Kukk): lähtuti kvaasikeemiast!

21

Pooljuhtide uurimine Tallinna Tehnikaülikoolis

- Momendil on uuringud keskendunud Materjaliteaduse instituuti
- Idee- odavamad päikesepatareid
- Uuritavad materjalid: CuInSe_2 , CdTe, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_2$ jt.
- Meetodid: PL, Raman, SEM, mahtvuslik spektroskoopia, XPS, Halli efekt jt.

22

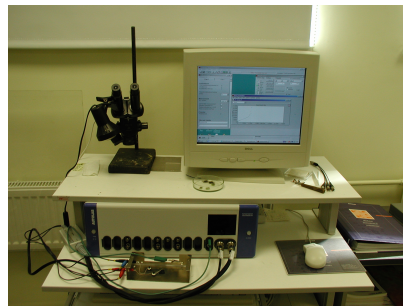
Pooljuhtide uurimine Tallinna Tehnikaülikoolis



PL ja Raman

23

Pooljuhtide uurimine Tallinna Tehnikaülikoolis



Mahtvuslik
spektroskoopia
AutoLab

24

Pooljuhtide uurimine Tallinna Tehnikaülikoolis



Scanning electron microscopy

25

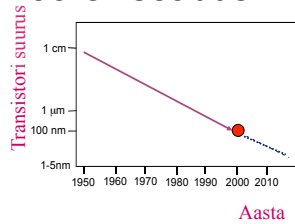
Pooljuhtide uurimine Tallinna Tehnikaülikoolis



Päikesepaneelide katsetused TTÜ V korpuse katusel

26

Moore'i seadus



Gordon Moore (INTELI üks asutaja):

1. seadus – aktiivsete elementide arv mikroskeemil kahekordistub iga 18 kuuga
2. seadus- pooljuhtide valmistamiseks tehtavad kulutused kahanevad ajas logaritmiselt

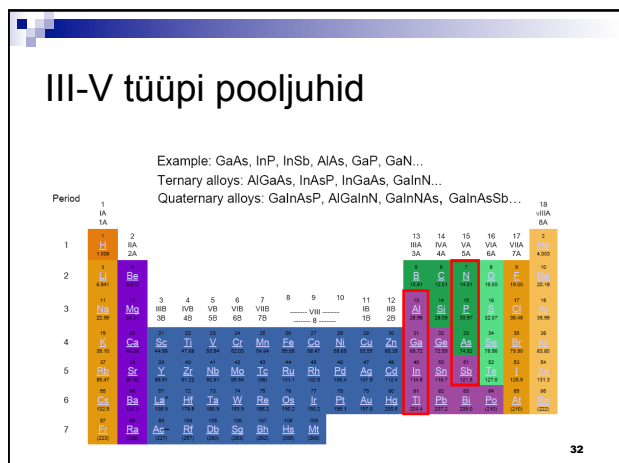
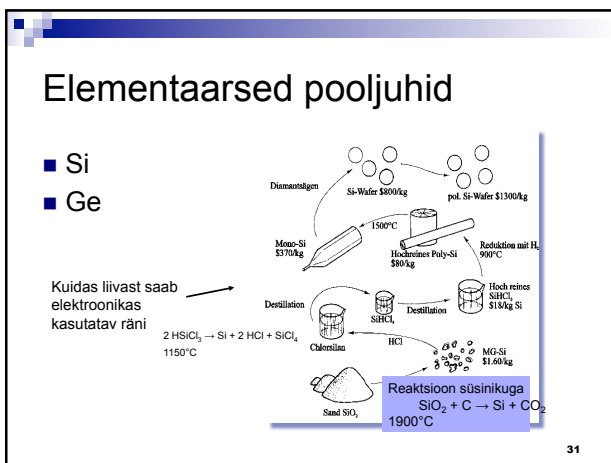
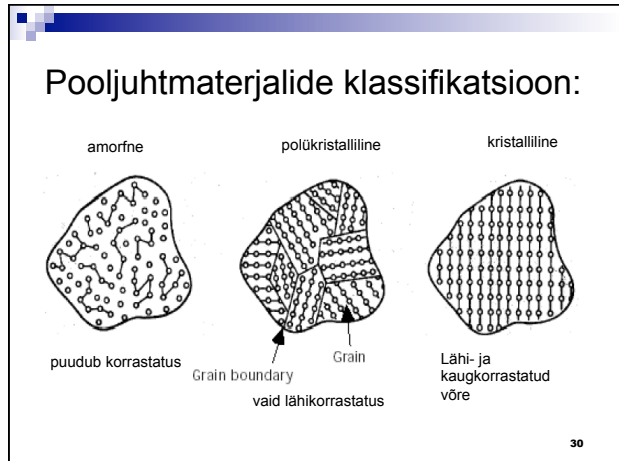
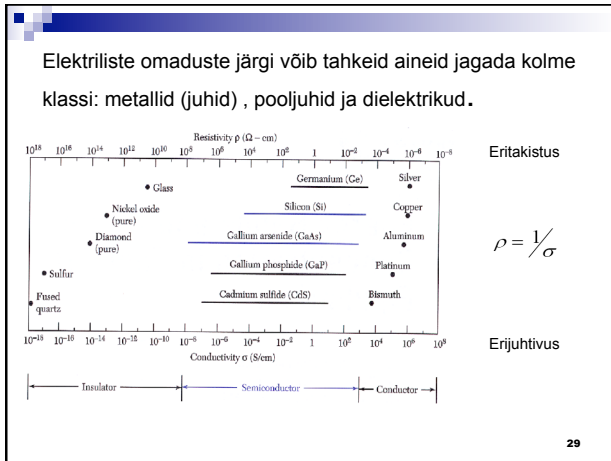
- Tehnoloogia muutub üha keerukamaks.
- Kui praegune suund jätkub, jõuame mõnekümne aasta pärast molekulide mõõtmeteni.

27

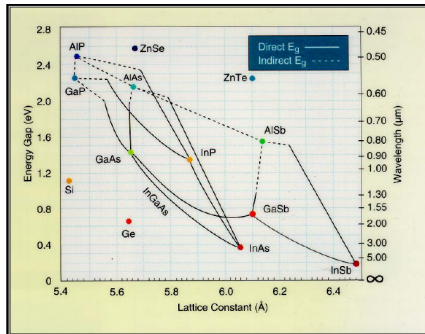
Areng aastast 1961-2003

Aasta	1961	2003
Transistori mõõtmed (μm)	25	0.009
Räni kristalli läbimõõt (mm)	25	300
Transistore kiibis	6	$8 \cdot 10^9$
Tööpinge (V)	5	1.2
Valmistatud transistore	10^7	10^{18}
Ühe transistori hind (US\$)	10	$2 \cdot 10^{-7}$

28



III-V tüüpi pooljuhid



33

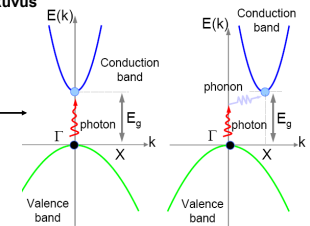
III-V pooljuhtide eelised rüni ees

Kiirus- parem laengukandjate liikuvus

Parem vastupidavus kiirgusele

Suurem keelutsooni laius (GaN)

Otsese tsooniga pooljuhid



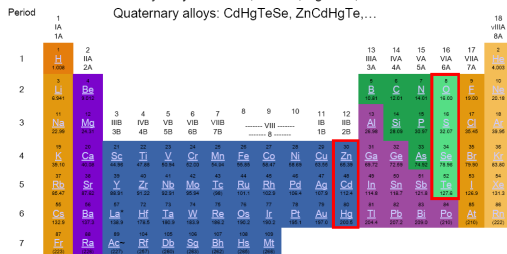
34

II-VI tüüpi pooljuhid

Example: ZnO, ZnS, ZnTe, CdS, CdSe, HgTe, HgSe,...

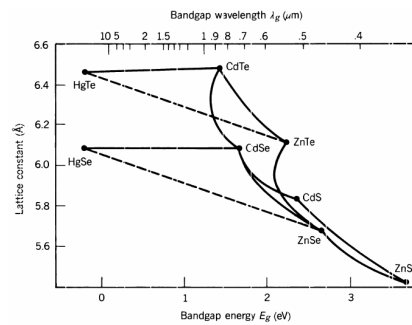
Ternary alloys: ZnCdTe, CdZnS, HgCdTe,...

Quaternary alloys: CdHgTeSe, ZnCdHgTe,...



35

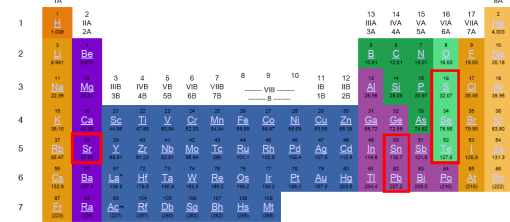
II-VI tüüpi pooljuhid



36

IV-VI tüüpi pooljuhid

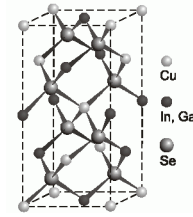
Example: PbSe, PbS, PbTe, SnTe, SnSe, ...
 Ternary alloys: PbSeTe, PbSnTe, PbSnSe, PbSrTe, ...
 Quaternary alloys: PbSnSeTe, ...



37

Kalkopüriidsed kolmikühendid

- CuInSe₂
- CuInS₂
- CuGaSe₂
- CuGaS₂
- AgInTe₂
- AgInSe₂
- jt



II-IV-V₂: CdSiAs₂, ZnGeP₂, BeSiN₂, MgGeP₂, CdSnAs₂, ...
I-III-VI₂: CuInSe₂, CuInS₂, CuAlS₂, AgGaSe₂, AgInTe₂, ...

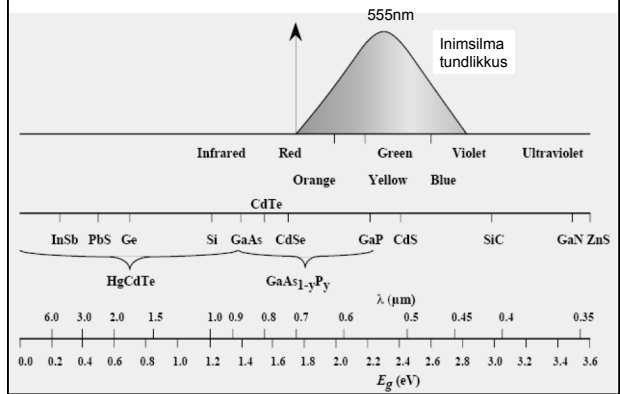
38

Pooljuhid:

General Classification	Symbol	Semiconductor Name
(1) Elemental	Si, Ge	Silicon, Germanium
(2) Compounds		
(a) IV-IV	SiC	Silicon carbide
(b) III-V	AlP, AlAs, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb	Aluminum phosphide, Aluminum arsenide, Gallium nitride, Gallium phosphide, Gallium arsenide, Gallium antimonide, Indium phosphide, Indium arsenide, Indium antimonide
(c) II-VI	ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe, HgS	Zinc oxide, Zinc sulfide, Zinc selenide, Zinc telluride, Cadmium sulfide, Cadmium selenide, Cadmium telluride, Mercury sulfide
(d) IV-VI	PbS, PbSe, PbTe	Lead sulfide, Lead selenide, Lead telluride
(3) Alloys		
(a) Binary	Si _{1-x} Ge _x	
(b) Ternary	Al _x Ga _{1-x} As, Al _x In _{1-x} As, Cd _x Mn _{1-x} Te, Ga _x As _{1-x} P, Ga _x In _{1-x} As, Ga _x In _{1-x} P, Hg _{1-x} Cd _x Te	(or Ga _x , Al _x As), (or In _x , Al _x As), (or In _x , Al _x As), (or In _x , Ga _x As), (or In _x , Ga _x P)
(c) Quaternary	Al _x Ga _{1-x} As _{1-y} Sb _y , Ga _x In _{1-x} As _{1-y} P _y	

3

Mõnede pooljuhtide keelutsiooni laiuse ja inimesilma tundlikkuse võrdlus



Mõnede pooljuhtmaterjalide võrdlus

Materjal	Eelised	Puudused
Räni (Si)	Tähtsaim pooljuht, mõndakil ligi 90% kogu tööstusest.	Kipub olema liiga aeglane. Ei sobi suurte võimsuste ja temperatuuride jaoks, ei ole võimeline kiirgama. NBI Nanokristallid!
Si-Ge	Võib kasvatada Si alustele ning kasutada Si tehnoloogiat	Vajab erilist hoolt kristallide kasvatamisel
GaAs, GaAs-AlGaAs	kiired materjalid, mikrolaine piirkond	Tunduvalt kallim kui Si
InP, InGaAs/InP	Kiiremad kui GaAs, kasutatavad ka optikas	Kallid
GaN, AlGaN	Head suurte võimsustel ja temperatuuridel, optika	Pole veel eriti kindlad, kallid
SiC	sama	sama

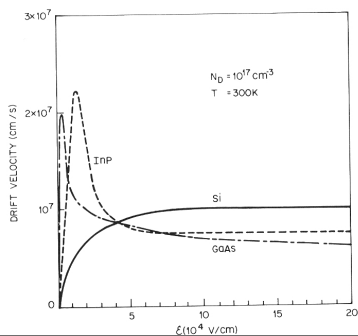
41

Miks räni (Si) on olnud nii edukas?

- Räni edu peitub oksiidis- SiO_2 !!
- SiO_2 passiveerib hästi räni pinnaolekuid
- SiO_2 on ülihea isolator
- SiO_2 moodustab hea barjääri difusioonile
- SiO_2 söövitamine Si pinnalt on kerge
- Puhtaid ränikristalle on "kerge" kasvatada
- Ränil on ka head mehhaanilised omadused
- Räni on looduses laialt levinud ja seetõttu odav

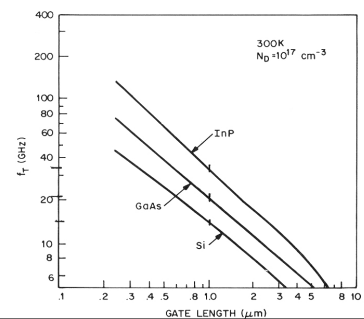
42

Mõnede pooljuhtmaterjalide triivkiiruste võrdlus

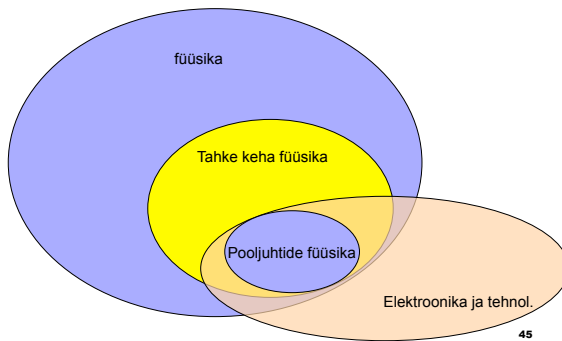


43

Mõnede pooljuhtmaterjalide töösageduste võrdlus



Pooljuhtide füüsika koht



Pooljuhtide füüsika koht

Probleemid:

- Mida käsitleda, mida mitte?
- Kui põhjalikult käsitleda?
- Paralleelsed kursused TTÜ-s.

46

Pooljuhtide füüsika kursuse sisu

- Pooljuhgid kui kristallid
(Kristallide tüübid, Milleri indeksid, röntgendifraktsioon jne....)
- Pooljuhtide tsooniteooria alused
(Näituke kvantmehaanikat, Fermi jaotusfunktsioon, olekute tihedus, efektiivne mass jne...)
- Elektronide liikumine kristallis
(difusioon, triiv, jne....)

47

Pooljuhtide füüsika kursuse sisu

- Kristallvõre dünaamika
(akustilised ja optilised foononid)
- Laengukandjate genereerimine ja rekombinatsioon.
- Kontaktnähtused pooljuhtides
(Schottky kontakt, p-n siire, heterosiire)
- Pinnanähtused
(pinnapotentsiaal, väljaefekt, pinnarekombinatsioon jne...) **EI KÄSITLE PÕHJALIKULT**

48

Pooljuhtide füüsika kursuse sisu

■ Pooljuhtide optilised omadused

(neeldumine, luminesstsents, fotojuhtivus jne)

■ Pooljuhtseadised.

(käsitleme vaid optoelektronseid seadiseid, näit. päikesepatareid jt.)

- Ettekanded (Powerpoint) seminaridel, ettekande pikkus ~10-15 min.

49

Ettekannete teemad (10-15min)

1. Kristallides eksisteerivad sidemed aatomite vahel
2. Kristallid ja kristallvõre struktuurid
3. Klassikaline Halli efekt
4. Halli kvantefekt
5. Tsüklotronresonants
6. Pooljuhtide keelutsooni laiuse sõltuvus temperatuurist
7. Dislokatsioonid ja nendega seotud efektid
8. Termoelektrilised nähtused pooljuhtides

50

Ettekannete teemad

9. Juhtivus tugevates elektriväljades
10. Gunn'i efekt pooljuhtides
11. Pooljuhtlaserid
12. Demberi efekt
13. Tugevalt legeeritud pooljuhid
14. Pooljuhtide baasil loodud valgusdetektorid
15. Elektriline müra pooljuhtides
16. Kvantkaevud ja supervõred
17. Orgaanilised pooljuhid ja nende rakendused
18. Pooljuhtide nanostruktuurid
19. Teema enda vabal valikul

51

Kontakt

- **KONTAKT:** VB korpuse II korrus VB-224
Pooljuhtmaterjalide tehnoloogia õppetool
staff.ttu.ee/~krustok
- tel. 620 3364

52