

Laserid

Professor Jüri Krustok
krustok@staff.ttu.ee
<http://staff.ttu.ee/~krustok>

1

Mis?

Laser on tehisvalgusallikas,

mis eristub teistest valgusallikatest, tavavalgustitest (elektripim, luminesentslamp, neoontoru jt) selle poolest, et kiirgab **kitsaid (suunatud)** valguskimpe, mis on **koherentsed, monokromaatsed** ja võivad olla **ülireedad** (intensiivsed).

Laserikiirt saab ülimalt koondada **ruumis** (ülipeeneks – µm suurusjärgus valgustäpiks) ja **ajas** (piko- koguni femtosekundi – 10^{-12} – 10^{-15} s – suurusjärgus välkeks e impulsiks).

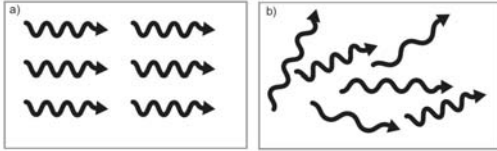
2

LASER

- **L**ight
- **A**mplification (amplifier) by
- **S**timulated
- **E**mission of
- **R**adiation
- Akronüüm, lühendsõna, vrd USA, NATO
- **Valguse võimendus (võimendi) stimuleeritud** kiirguse kaudu;
- **võimendi → generaator**

3

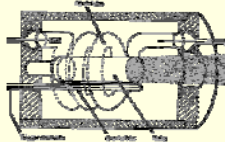
Koherentsus



Koherentsed lained (a) võnguvad ühistaktis (muutmata faasivahega), levivad kõik samas suunas, mittekoherentsed (b) – võnguvad kõik eri taktis (faasivahe ei püsi) ja levivad suvalistes suundades. Koherentseid valguslaineid kiirgavad **laserid**, mittekoherentseid – **tavavalgustid** (elektripirn, küünlal... ka Päike)

4

Esmiklaser



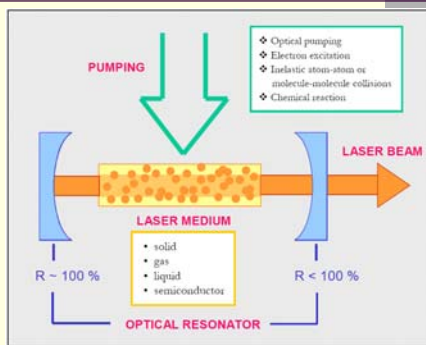
Theodore Maiman *1927; USA

-- tegi 1960 maailma esimese laseri – rubiinlaseri (16.V1960).

Rubiin: $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$; Cr: punane kristall, punane kiirgus, $\lambda = 634 \text{ nm}$; Maiman pole nobelist

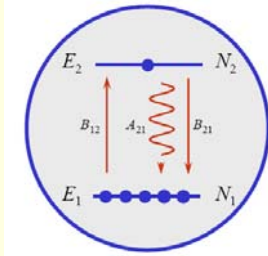
5

Üldine laseri skeem



6

Laser



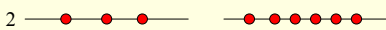
$$N_2 \gg N_1$$

Laseri tööks on vajalik tasemete täituvuse inverioon

Selleks on vajalik pumpamine!

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Tavahõive... ja pöördhõive



$$N_1 \gg N_2$$

$$N_1 < N_2$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{(E_2 - E_1)}{kT}\right] \quad \frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{(E_2 - E_1)}{-kT}\right]$$

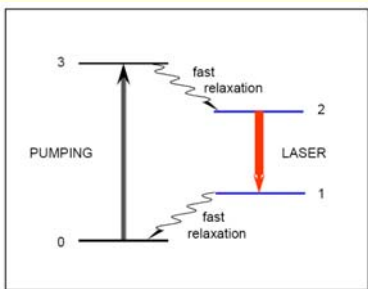
$$T > 0$$

$$"T < 0"$$

NEGATIIVNE ABSOLUUTTEMPERatuur

8

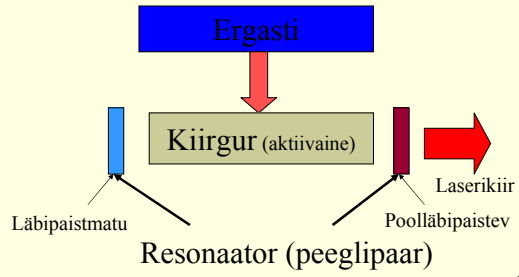
Pumpamine

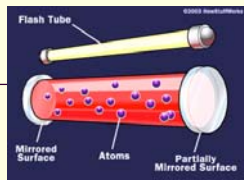


Teise laseriga
Optiliselt lambiga
Elektriväljaga
Muud võimalused

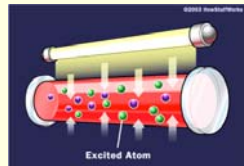
9

Laseri üldskeem



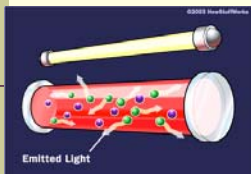


1. Stardivalmis rubiinlaser

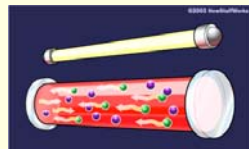


2. Väklamp sähvatas

11

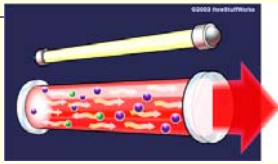


3. Väklamp sähvatas, ergastas aatomid pöörd-höivesse



4. Footonid pendeldavad peeglite vahel, stimuleerides üha uusi kiirgusakte, tekib kiirguslaviin

12

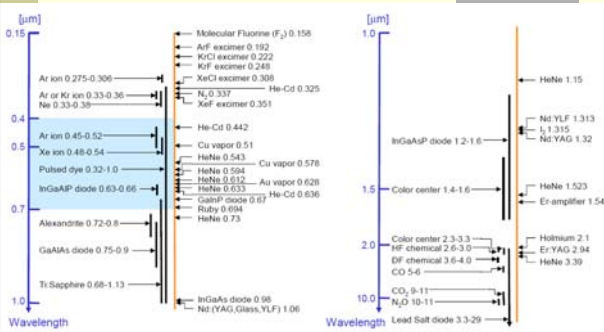


5. Valguslaavin, koherentne suunatud laserikiir väljub läbi poolläbipaistva peegli.

Suuna annavad kiirele peeglite telgjoon ja kiirguri pikergune kuju; võimevad vaid pikisuunas levivad/peegelduvad valguslained (footonid), ristruunas levivad väljuvad kiirgurist võimenemata, laserikiirde lisandumata .

13

Enamlevinud laserid



Enamlevinud laserid

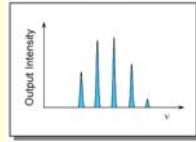
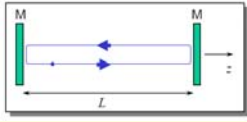
Laser Type	Wavelength (µm)	Laser Type	Wavelength (µm)
Argon fluoride (Excimer-UV)	0.193	Helium neon (yellow)	0.594
Krypton chloride (Excimer-UV)	0.222	Helium neon (orange)	0.610
Krypton fluoride (Excimer-UV)	0.248	Gold vapor (red)	0.627
Xenon chloride (Excimer-UV)	0.308	Helium neon (red)	0.633
Xenon fluoride (Excimer-UV)	0.351	Krypton (red)	0.647
Helium cadmium (UV)	0.325		
Nitrogen (UV)	0.337	Ruby (CrAlO ₃) (red)	0.694
Helium cadmium (violet)	0.441	Gallium arsenide (diode-NIR)	0.840
Krypton (blue)	0.476	Nd:YAG (NIR)	1.064
Argon (blue)	0.488	Helium neon (NIR)	1.15
Copper vapor (green)	0.510	Erbium (NIR)	1.504
Argon (green)	0.514	Helium neon (NIR)	3.39
Krypton (green)	0.528	Hydrogen fluoride (NIR)	2.70
Frequency doubled	0.532	Carbon dioxide (FIR)	9.6
Nd:YAG (green)		Carbon dioxide (FIR)	10.6
Helium neon (green)	0.543		
Krypton (yellow)	0.568		
Copper vapor (yellow)	0.570		

Key: UV = ultraviolet (0.200-0.400 µm)
 VIS = visible (0.400-0.700 µm)
 NIR = near infrared (0.700-1.400 µm)

15

Optiline resonaator

Optiline tagasiside!



Resonantsmoodid

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} = \text{constant}$$

16

Laserite omadused

- **Lainepikkused:** 10 - 15 nm → 100 - 500 μm (100 eV → 0.01 eV), muudetava lainepikkusega laserid: dye-laserid, Ti:Sapphire, pooljuhtdiodlaserid
- **Monokromaatsus:** $\Delta\nu \sim 1 \text{ MHz} - 1 \text{ GHz}$
- **Kiire vähene hajumine**
- **Koherentsus**
- **Heledus**

❖ Sun	$\beta_v \sim 1.5 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2\text{-sr-Hz}$
❖ HeNe-laser (1 mW)	$\beta_v \sim 25 \text{ W/cm}^2\text{-sr-Hz}$
❖ Nd:glass-laser (10 GW)	$\beta_v \sim 2 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2\text{-sr-Hz}$
- Nii püsiva kiirega (CW) kui impulsslaserid (~10fs)

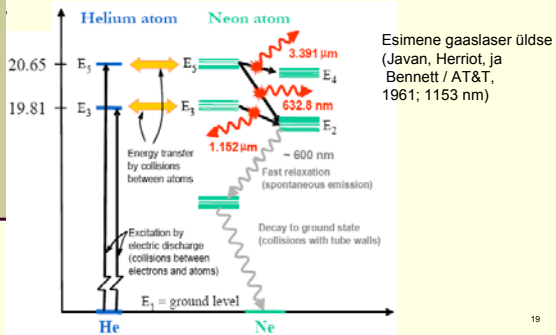
17

Laserite liigid

- Gaaslaserid (He-Ne, Ar, CO₂, He-Cd, N₂ jt)
- Tahketel ainetel baseeruvad laserid
 - Nd:YAG, rubiinlaser, Ti:Sapphire
- Pooljuhtlaserid

18

He-Ne laser



19

He-Ne laser

Helium neon wavelengths and power levels		
Wavelength (nm)	Maximum power (mW)	Gain (relative to 632.8 nm)
543.5	1.5	1/17
594.1	7.0	1/15
604	2.5	1/10
611.9	7.0	1/5
629	-	1/5
632.8	7.0	1
635	-	1/8
640.1	1.5	1/5
730.5	0.3	1/8
1152.6	17.5	4/5
1523.5	1.5	-
2386	0.5	-
3392.0	24	44/1

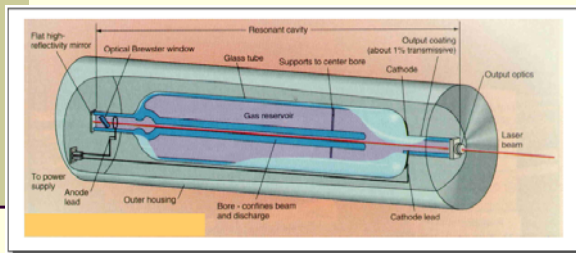
Põhiline joon!

Neooni spektrijooned



20

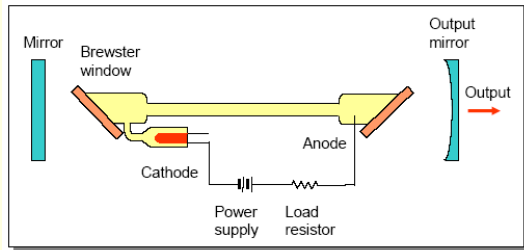
He-Ne laseri ehitus



Ergastatakse elektriväljaga!

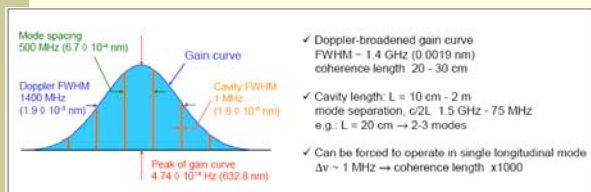
21

He-Ne laseri ehitus



22

He-Ne laseri omadused

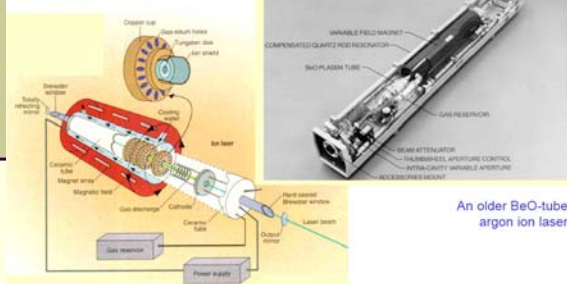


Kõige odavam gaaslaser, kuid kaasajal on ta paljudes rakendustes asendatud pooljuhtlaseringiga.

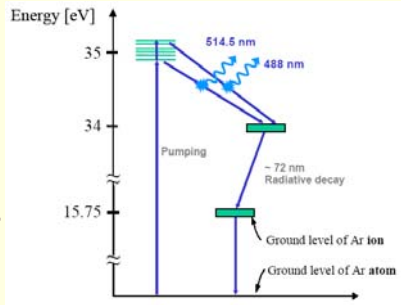
23

Ioonlaseringid- Ar ja Kr

Construction of a modern ceramic-tube ion laser

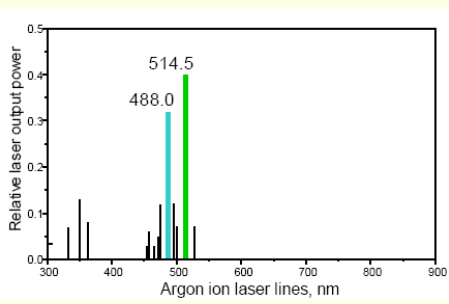


Ar laser



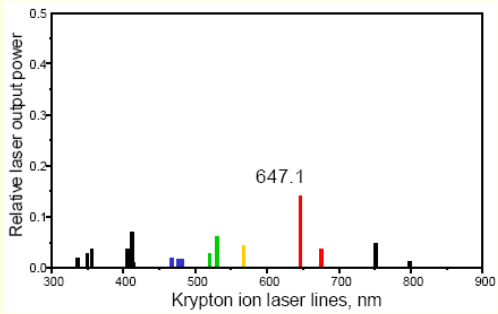
25

Ar laser



26

Kr laser



27

Ioonlaserite omadused

- Ar⁺, Kr⁺, või Ar⁺+ Kr⁺ - gaasi rõhk 1 torr (vajavad aegajalt täitmist)
- Võimsad CW laserid sinises spektriosas- kuni 10W
- Ergastatakse elektrilahendusega, vajalik väga suur voolutugevus, kuni 70A
- Kasutegur on väike, seega vaja head jahutust (vesi- või õhkjahutus)
- Laseri toru eluiga üle 10000 tunni
- Kasutatakse tihti teiste laserite pumpamiseks või ka fotoluminesentsi ergastamiseks

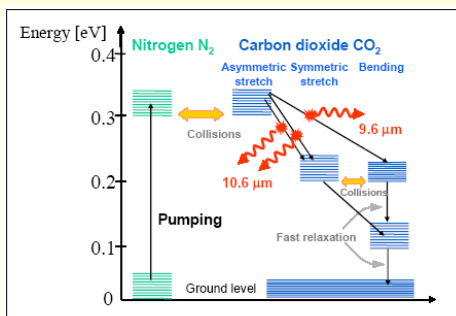
28

CO₂ laser

- Patel- 1964
- Võimas laser IR piirkonnas, võib metalli lõigata
- Kasutatakse segu: CO₂+N₂+He
- Kiirgab 9.6- 10.6 μm
- Probleemiks väljundaken (ZnSe jt)
- Põhiliselt kasutatakse tööstuses, sõjanduses, aga ka LIDARites

29

CO₂ laser



30

Eksimeerlaserid

- EXCIMER- **Excited dimer**
- Kaheaatomiline (vääriskaas+halogeenid) gaasimolekul ergastatud olekus
- Tüüpiliselt kiirgab UV osas

Rare-gas - halide excimer lasers
(Kr, Ar, Xe) (F, Cl)

common excimer lasers

	λ
ArF	193 nm
KrF	248 nm
XeF	351 nm
XeCl	308 nm

31

Eksimeerlaserid

- Pulsside sagedus $\rightarrow 1 \text{ kHz}$
- Pulsside pikkus Δt_p 10 ns - 50 ns
- Pulsi energia E 0.1 - 1 J
- Võimsus $\rightarrow 500 \text{ W}$
- Efektiivsus $\eta \sim 2 - 4 \%$
- Kasutatakse dye laserite pumpamiseks
- Laserablatsioon
- Fotolitograafia

32

Eksimeerlaserid

Nd:YAG CO₂ Eksimeer

Microdrilled 720 dpi ink-jet printer nozzle holes

Logo-labelled eyeglasses (Carl Zeiss)

Human hair

He-Cd laser

- Metalliaurudel töötav pideva kiirgusega laser
- $\lambda = 442 \text{ nm}$ ($\rightarrow 150 \text{ mW}$), 325 nm ($\rightarrow 20 \text{ mW}$)
- Cd aururõhu saavutamiseks vajab teatud soojenemisaega
- Odavam kui Ar+ laser
- Kasutatakse palju FL ergastamiseks
- Olemas ka meie laboris

34

Cu- laser

- Pulsslaser
- $\lambda = 510 \text{ nm}$, 578 nm
- Tihe pulsside sagedus (1 - 20 kHz)
- Võimsus $\sim 40 - 50 \text{ W}$
- Dye laserite pumpamine
- Meditsiinis (TUF1)

35

N₂ - laser

- Suhteliselt odav pulsslaser
- 337 nm (ca. 10 mJ , 10 ns)
- Dye laserite pumpamine
- Nd:YAG ja eksimeerlaserid on kaasajal N₂ laserid välja tõrjunud

36

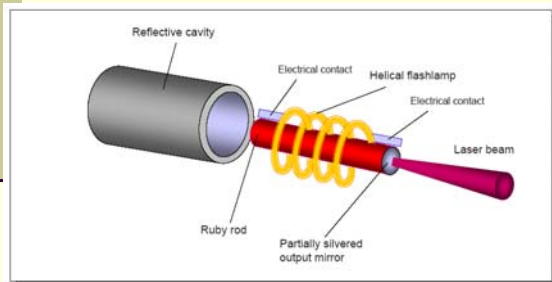
Laserikristallidel baseeruvad laserid

- Kasutatakse haruldaste muldmetallide ioone või ka metallide ioone klaasides või läbipaistvates kristallides
- Haruldased muldmetallid: Nd^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+}
- Metallioonid: Cr^{3+} , Tl^{3+}
- Kristallid: Al_2O_3 – safiir, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – ütrium-alumiinium-granaat, YLiF_4 – ütrium-litium-fluoriid, erinevad klaasid.

37

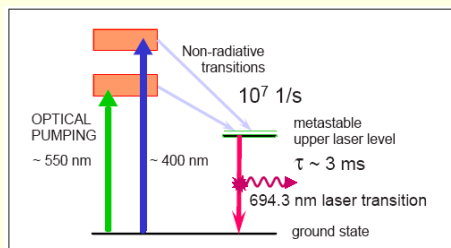
Rubiinlaser

- Esimene laser üldse: **Theodore Maiman, 16.5.1960**



Rubiinlaser

- Rubiin: sünteetiline safiir (Al_2O_3) + 0.01 % ... 0.5 % Cr^{3+} ($\sim 10^{19}$ iooni/ cm^3)



39

Rubiinlaser

- pumbatakse välklambiga
- kiirguse lainepikkus: $\lambda = 694.3 \text{ nm}$
- pulsi pikkus: $\sim 1 \text{ ms}$
- pulsi energia: $\rightarrow 100 \text{ J}$
- pulsside sagedus: mõni Hz
- keskmine võimsus: $\sim 100 \text{ W}$
- efektiivsus (elekter \rightarrow valgus): $\sim 0.1\% \dots 1\%$

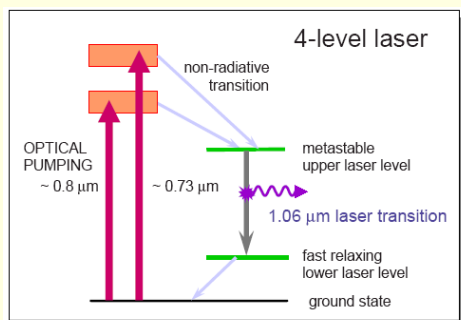
40

Neodüümlaser

- Kõige levinum kristallil baseeruv laser
- Töötab nii pidevas kui ka pulssrežiimis
- Aktiivne ioon: Nd^{+3} ($\sim 1\%$, 10^{20} iooni/cm³)
- Nd:YAG -laser: (YAG = $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ kristall)
 - Pulsside sagedus: 10 - 100 Hz
 - Pideva kiire võimsus: 10 - 100 W
 - Pulsi energia: 50 mJ - 10 J
- Pumbatakse lampidega või GaAlAs-diodlaseriga

41

Neodüümlaser



42

Neodüümlaser

- Kordistikristalle kasutades võib kiiritava valguse sagedust kordistada
- Kordistikristallid: (KTP, BBO, ...)
- Originaalne lainepikkus λ : 1.06 μm (IP)
- 2. harmoonik: 532 nm (roheline)
- 3. harmoonik: 1.06 μm + 532 nm \rightarrow 355 nm (UV)
- 4. harmoonik: 266 nm (UV)

43

Skaneeritav neodüümlaser



Hands-free wavelength tuning from 420 to 2300 nm.
 No-gap tuning from 210 nm to 2300 nm with optional UV extension
 up to 5 mJ in UV output energy
 up to 50 mJ in VIS output energy
 Less than 5 cm⁻¹ linewidth
 3-5 ns pulse duration
 10 or 20 Hz repetition rate



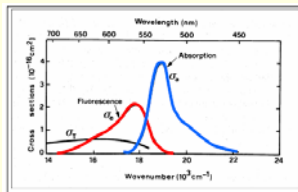
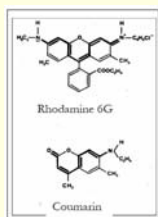
Leedus paiknev tootja.

Laser on olemas TÜ FI-s.

44

Muudetava lainepikkusega laserid

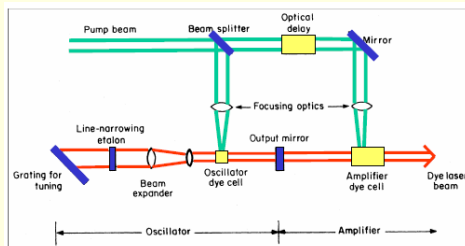
- Dye- laserid ,
 oraanilised värvained
 lahustatuna vedelikus



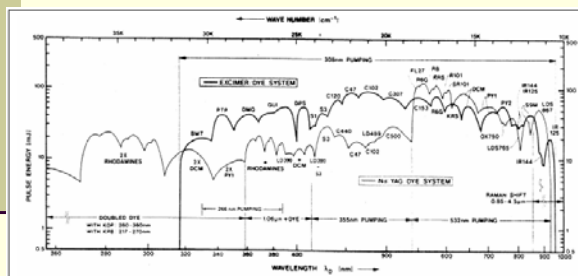
45

Dye- laserid

- Lainepikkuse muutmine: $\sim 30 - 50 \text{ nm} / \text{dye}$
- dye vahetamisega: nähtav + lähedane-IR



Värvainete valik



47

Dye- laser

- Töötavad nii pulssrežiimis kui ka pidevas.
- Pumbatakse Nd-YAG laseritega, Ar-laseritega, eksimeeridega.
- Olulised laserid laserspektroskoopias.

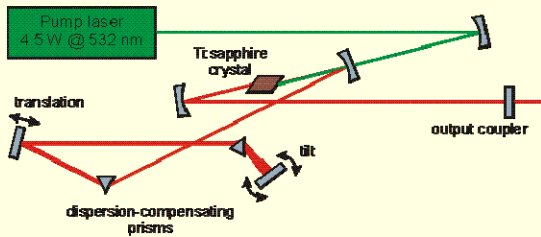
48

Ti:safiirlaser

- Ti^{3+} ioon Al_2O_3 kristallis
- Võimalus laias piires muuta laseri lainepikkust!
- $\Delta\lambda$: 660 nm – 1180 nm
- Pumbatakse Ar laseri või Nd:YAG kordistatud kiirega
- Pidev võimsus \rightarrow 50 – 100 W
- Võib saada fs-pulsse
- \sim 1 TW 100 fs puls
- Rekordiline pulsi pikkus \sim 5 fs !!

49

Ti:safiirlaser



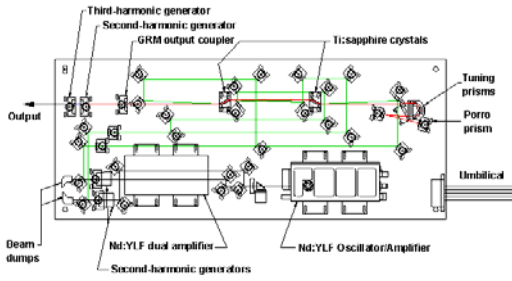
50

Ti:safiirlaser



51

Ti:safirlaser

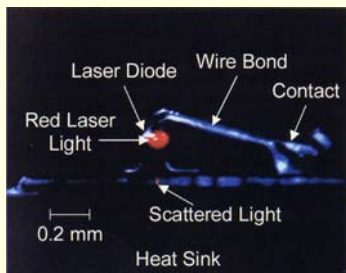


Pooljuhtlaserid



Pooljuhtlaserid

■ Esimene pooljuhtlaser 1962.



Pooljuhtlaserid

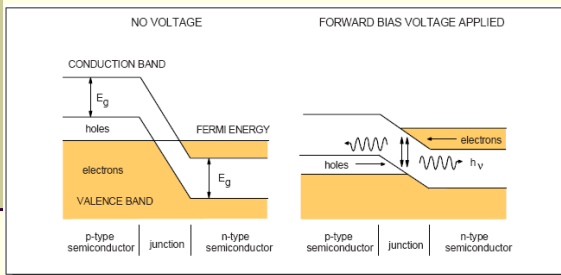
- Diod- ehk injektioonlaser
- Elektronergastusega pooljuhtlaser
- ...

Pooljuhtlaseri eeliseks teiste laserite ees on tema kompaktsus, lihtsus ja vähene energiatarve.

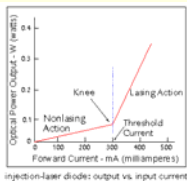
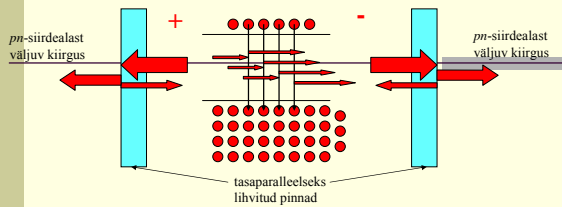


55

Pooljuhtlaserid



56



- Töstes voolutugevust, luuakse olukord, milles siirdealas on hulgaliselt elektron-augupaare, mis pole veel jõudnud spontaanselt rekombineeruda.
- Tekkinud pöördhõivel hakkavad elektroluminestsentsi kvandid stimuleerima uusi rekombinatsioone.
- Lihvides kristalli *pn*-siirdega ristuvad vastastahud tasaparalleelseks, hakkab pooljuhtdiod genereerima koherentvalgust.

57

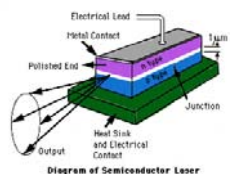
- Lisandite arv peab olema suur
- Sobivad vaid otsese keelutsooniga materjalid

•Üks sobivamaid on **GaAs**, mis annab infrapunast kiirgust vahemikus 830 ... 900 nm, sõltuvalt diodi temperatuurist ja teistest tingimustest

•Väga lühikese resonatori tõttu ei ole diodlaseri valgus nii monokromaatne ja ruumiliselt koherentne

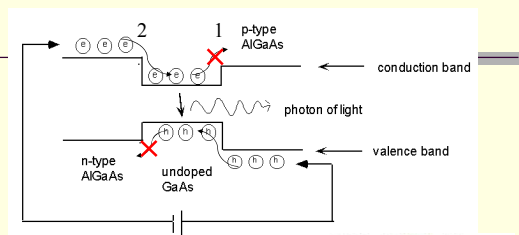
•Võimsus kuni 10W alaliskiirguses ja 100W välkes

•Kasutegur madalatel temperatuuridel 60 ... 70%, seerialaserites 20 ... 40%



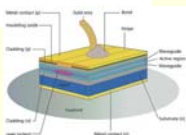
58

Heterosiirdega diodlaser



Heterosiirded 1 ja 2 moodustavad tõkked, mis piiravad elektronide ja aukude laialivalgumist genereerimisalas.

Tänu kindlalt piiritletud aktiivale genereerib heterolaser palju madalamatel voolutugevustel kui homolaser.



59

Elektronergastusega pooljuhtlaser

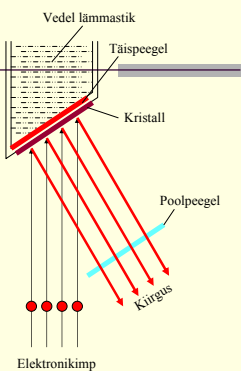
•Kilena peegli pinnale kaetud pooljuhti ergastatakse elektronide kimbuga (sel viisil saab panna kiirgama palju suurema *pn*-siirde ala)

•Täispeeglit jahutatakse kas vedela lämmastiku või heeliumiga

•Pikem resonator annab diodlaseriga võrreldes monokromaatsema ja kitsama kiirtekimbu

•Võimsused 1 ... 2 kW, kasuteguriga kuni 20%

•Suurema kasutuskõlblike pooljuhtide valiku tõttu on saadavad kiirgusjooned laiemas spektripiirkonnas (~300 ... 10 000 nm)



60

Pooljuhtlaserid

Important semiconductor laser materials		
Compound	Wavelengths (nm)	Notes
GaN	<400 →	1995
ZnSe	480-530	first demonstrated 1991
AlGaInP	630-680	
$Ga_{0.3}In_{0.7}P$	670	active layer between AlGaInP layers; long room temperature lifetime
$Ga_{1-x}Al_xAs$	620-895	$x=0$ to 0.45; lifetimes very short for wavelengths below 720 nm
GaAs	904	
$In_{0.2}Ga_{0.8}As$	980	strained layer on GaAs substrate
$In_{1-x}Ga_xAsP_{1-y}$	1100-1650	InP substrate
$In_{0.25}Ga_{0.25}As_{0.5}P_{0.42}$	1310	major fiber communication wavelength
$In_{0.25}Ga_{0.25}As_{0.5}P_{0.1}$	1550	major fiber communication wavelength possible range, developmental, on GaSb substrate
InGaAsSb	1700-4400	
PbEuSeTe	3300-5800	cryogenic
PbSbSe	4200-8000	cryogenic
PbSnTe	6300-29000	cryogenic
PbSnSe	8000-29000	cryogenic

Kiudvalgusjuhe (optiline fiiber)



„Kokkukeritud valguskiir“

Laseriohu hoiatusmärgid

