

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZIKOS FAKULTETAS  
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA  
MOKOMOJI LAZERIŲ LABORATORIJA

Laboratorinis darbas Nr. KE-5

# Išilginio diodinio kaupinimo Nd:YVO<sub>4</sub> lazerio tyrimas

Metodiniai nurodymai



**Dėmesio! Darbo metu naudojami lazerinės spinduliuotės šaltiniai – būtina susipažinti ir griežtai laikytis atitinkamų saugos reikalavimų**

**Būtina naudoti apsauginius akinius**

## **Darbo tikslas**

Ištirti išilginio diodinio kaupinimo Nd:YVO<sub>4</sub> lazerio veiką, jo laikines charakteristikas.

## **Darbo užduotys**

1. Suderinti lazerio išvadinį veidrodį, kurio atspindžio koeficientas yra 95%.
2. Optimizuoti lazerio kaupinimą.
3. Nustatyti optimalų lazerio rezonatoriaus ilgį.
4. Išmatuoti lazerio generuojamos spinduliuotės optinės galios priklausomybę nuo kaupinimo galios.
5. Išmatuoti lazerio relaksacinių svyravimų laikinius parametrus.
6. Suderinti lazerio išvadinį veidrodį, kurio atspindžio koeficientas yra 70%.
7. Išmatuoti lazerio generuojamos spinduliuotės optinės galios priklausomybę nuo kaupinimo galios ir lazerio relaksacinių svyravimų laikinius parametrus, kai išvadinio veidrodžio atspindžio koeficientas yra 70%.
8. Lazerio relaksacinių svyravimų laikinių parametrų skaičiavimas.

## **Kontroliniai klausimai**

1. Kokie lazerinio diodinio kaupinimo lazerių pranašumai ir trūkumai, lyginant su lempinio kaupinimo lazeriais?
2. Kaip veikia kaupinimui naudojami lazeriniai diodai?
3. Kaip apibrėžiamas ir nuo ko priklauso rezonatoriaus stabilumas? Kas yra stabilumo zonos?
4. Nuo ko priklauso lazerio slenkstinės kaupinimo galios vertė?
5. Dėl ko lazerio spinduliuotėje atsiranda relaksaciniai svyravimai?
6. Kas yra skersinės lazerio modos ir kaip jos indeksuojamos?

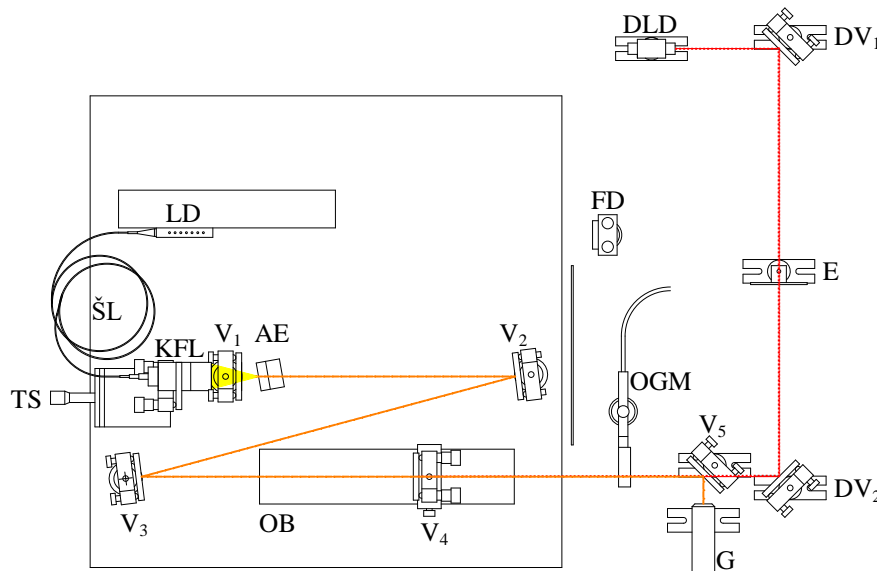
## METODINIAI PAAIŠKINIMAI.

Dėmesio! Prieš pradėdant darbą, būtina susipažinti su naudojamų prietaisų aprašais ir saugaus darbo ypatumais.

### Darbe naudojami priemonės ir prietaisai

Darbe naudojamo lazerio optinė grandinė pavaizduota 1 pav.. Lazerį sudaro rezonatorius, aktyvus elementas ir aktyviojo elemento kaupinimo sistema.

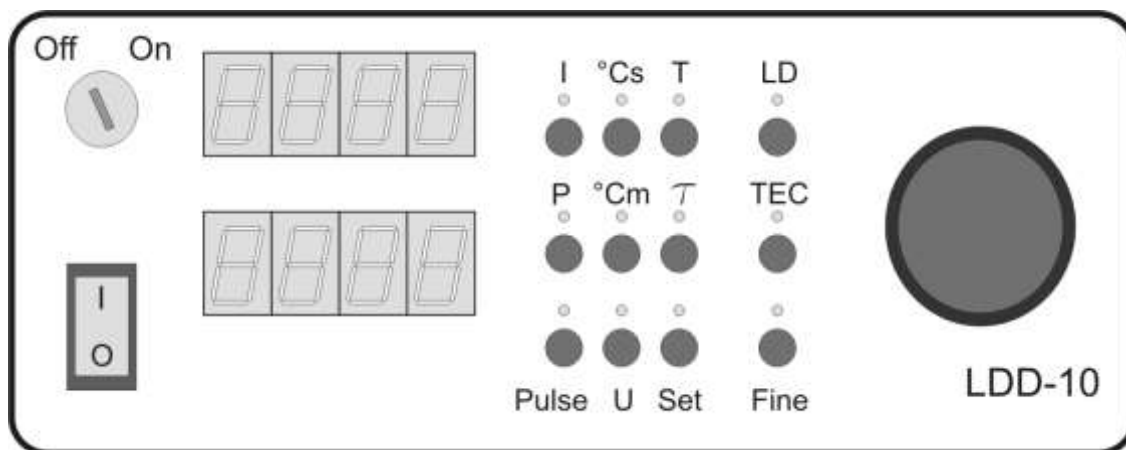
Rezonatorių sudaro 4 veidrodžiai:  $V_1$  – sferinis veidrodis, kurio kreivumo spindulys  $r = -80$  mm;  $V_2$  – sferinis veidrodis, kurio kreivumo spindulys  $r = -400$  mm;  $V_3$  – plokščias veidrodis,  $V_4$  – plokščias išvadinis veidrodis, kurio atspindžio koeficientas 1064 nm spinduliutei  $R_{1064} = 95\%$  arba 70%. Išvadinis veidrodis  $V_4$  yra pastatytas ant optinio bėgio OB. Keičiant veidrodžio  $V_4$  padėtį galima keisti lazerio rezonatoriaus ilgį. Atstumas tarp  $V_1$  ir  $V_2$  yra 290mm. Atstumas tarp  $V_2$  ir  $V_3$  yra 410mm. Atstumas nuo  $V_3$  iki optinio bėgio (0) padėties 135mm.



1 pav. Lazerio optinė grandinė

Rezonatoriaus derinimas atliekamas sukant veidrodžio  $V_4$  laikiklio vertikalaus ir horizontalaus derinimo rankenėles. Kaip aktyvusis elementas AE lazeryje naudojamas 5mm ilgio Nd:YVO<sub>4</sub> kristalas. Kaupinimui naudojama 808 nm bangos ilgio lazerinio diodo LD spinduliuotė, kuri iš lazerinio diodo LD surenkama į šviesolaidį ŠL. Išėjusi iš šviesolaidžio ŠL kaupinimo spinduliuotė praeina kolimavimo-fokusavimo lęšių porą KFL, bei nukreipiama į aktyvųjį elementą AE per veidrodį  $V_1$ , kuris praleidžia kaupinimo 808 nm spinduliuotę. Šviesolaidžio ŠL išvadinis galas ir kolimavimo-fokusavimo lęšių pora KFL yra pritvirtinta ant poslinkio staliuko TS, kuriuo galima keisti kaupinimo pluošto židinio padėtį aktyviojo elemento AE atžvilgiu. Kaupinimo pluošto sąsmauka yra 50mm atstumu nuo kolimavimo-fokusavimo lęšių poros KFL laikiklio krašto, diametras sąsmaukoje yra  $92\mu\text{m}$   $1/e^2$  lygyje,

Relėjas ilgis – 460µm, skėsties kampas – 11.5°. Sugeneruota lazeryje spinduliuotė išėjusi pro išvadinį veidrodį V<sub>4</sub> veidrodžiu V<sub>5</sub> yra nukreipiama į lazerio spinduliuotės gaudyklę G. Tarp veidrodžių V<sub>4</sub> ir V<sub>5</sub> statomas optinės galios matuoklis OGM arba fotodiodas FD. Lazerio veidrodžio V<sub>4</sub> derinimui naudojamas lazerinio diodo modulis DLD, spinduliuojantis 650 nm šviesą. Lazerinio diodo DLD pluoštas, atsispindėjęs nuo dviejų aliumininių veidrodžių DV<sub>1</sub> ir DV<sub>2</sub>, nukreiptas taip, kad sklistų išilgai lazerio rezonatoriaus ašies. Nuo veidrodžio V<sub>4</sub> dalis lazerinio diodo spinduliuotės atsispindi. Tiriamojo lazerio rezonatoriaus pradinis derinimas atliekamas pagal veidrodžio V<sub>4</sub> atspindžių padėtį ant ekrano E.



2 pav. Lazerinių diodų maitinimo šaltinio LDD-10 valdymo panelės schema

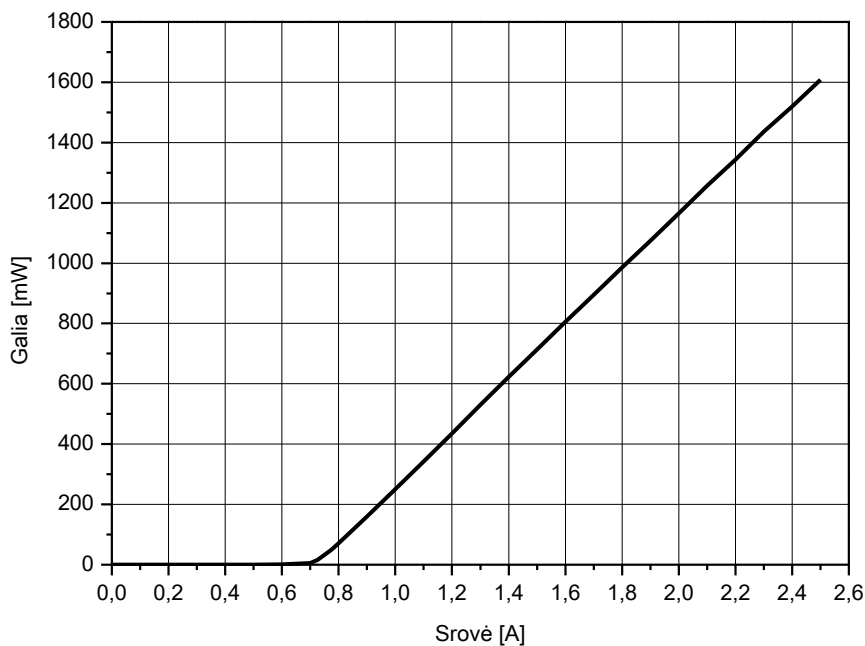
Kaupinimo lazerinio diodo LD maitinimui naudojamas maitinimo blokas LDD-10. Maitinimo blokas įjungiamas paspaudus mygtuką **I/O**. Maitinimo bloko švieslentėje turi užsidegti „----“. Pasukti raktelį į **On** padėtį. Maitinimo bloko švieslentėse turi pasirodyti skaičiai. Įsitikinti ar užsidegė maitinimo bloko valdymo pulto žali indikatoriai **I**, **°Cm** ir geltonas indikatorius **TEC**. Esant tokiai padėčiai, viršutinėje švieslentėje rodoma lazerinio diodo maitinimo srovė, apatinėje – diodo temperatūra. Įsitikinkite, kad nustatyta srovė yra minimali (0 A), o lazerinio diodo temperatūra neviršija 30° C. Jei viskas veikia tvarkingai, galima aktyvuoti lazerinį diodą paspausdami mygtuką **LD**. Maitinimo bloko paduodama srovė reguliuojama valdymo panelės dešinėje pusėje esančia rankenėle. Esant reikalui, į tikslesnį reguliavimo režimą galima pereiti paspaudus mygtuką **Fine**. Lazerinio diodo maitinimo srovę **DRAUDŽIAMA KELTI AUKŠČIAU 3 A**.

Lazerinio diodo spinduliuotės galia priklauso nuo lazerinio diodo srovės (0.8÷2.5 A):

$$W = 907.402 \cdot I - 651.76 \quad (1),$$

kur  $W$  – kaupinimo spinduliuotės galia milivatais (mW),  $I$  – lazerinio diodo maitinimo srovė amperais (A).

Paspaudus **Pulse** perjungiama į impulsinį režimą. Kaupinimo impulso trukmė – 25ms, periodas – 50ms.



3 pav. Lazerinio diodo kalibravimo kreivė



4 pav. Optinės galios matuoklio displejus Ophir Nova II

Lazerio generuojamos spinduliuotės galia yra matuojama optinės galios matuokliu PD-300-1W (Ophir Optronics), kuris prijungtas prie displejaus NOVA-2. Optinės galios matuoklis PD-300-1W naudojamas kartu su optiniu filtru.

1 – įjungimo/išjungimo/pašvietimo mygtukas. Paspaudus mygtuką įjungiamas matuoklio displejus. Optinės galios matuoklis turi būti prijungta prieš displejaus įjungimą. Pakartotinai paspaudus įjungiamas ekrano pašvietimas. Paspaudus ir palaikius ~3 s displejus išjungiamas.

2 – navigacijos mygtukais, kuriais ekrane vykdomas matuoklio nustatymų pasirinkimas.

3 – pasirinkimo patvirtinimo mygtukas.

4 – ekrano apačioje esančio meniu pasirinkimas.

5 – optinės galios atvaizdavimo ekranas.

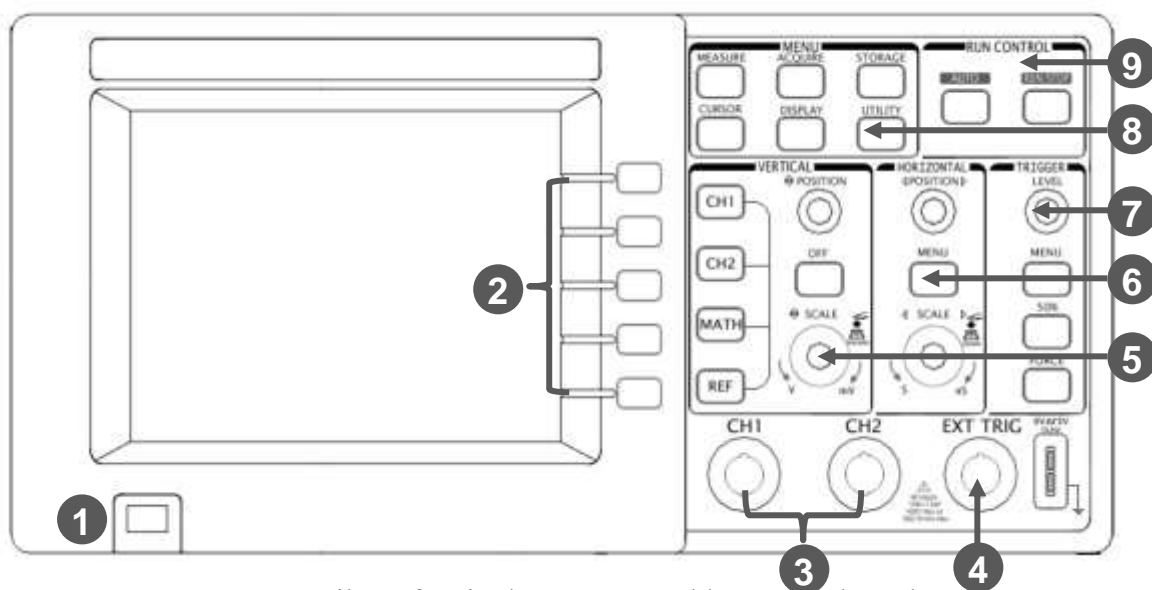
6 – optinės galios matuoklio nustatymai.

Prieš pradėdant matavimus, ekrano apačioje esančiame meniu pasirinkti **Filter**. Įsitikinti, ar nustatyta **Filter**

**In**, jei ne tai pakeisti į **Filter In** paspaudus **Change**. Paspaudus **Offset** nustatyti foną. Optinės

galios matuoklio nustatymuose matavimo diapazoną (**Range**) pasirinkti **Auto**. Lazerio bangos ilgį (**Laser**) pasirinkti lygu **1024**. **Menu** pasirinkti galios matavimą **Power**.

Lazerio generuojamos spinduliuotės laikiniai parametrai matuojami naudojant fotodiodą FD DET36A/M (Thorlabs), kuris prijungtas prie oscilografą RIGOL DS5102C. Prieš naudojant fotodiodą FD, reikia prijungti fotodiodo maitinimo šaltinį ir įjungti fotodiodo maitinimą (jungiklis fotodiodo šone). Paspaudus raudoną mygtuką fotodiodo šone oscilografas turi registruoti 11-12 V įtampą (kai nėra prijungta 50Ω varža). Laikinių parametų matavimo metu turi būti prijungta 50Ω varža.



5 pav. Oscilografo Rigol DS5102C valdymo panelės schema

- 1 – įjungimo/išjungimo mygtukas.
- 2 – aktyvios meniu, atvaizduojamos ekrane, funkciniai mygtukai.
- 3 – signalo įvesties jungtys.
- 4 – išorinio sinchronizavimo signalo įvesties jungtis.
- 5 – signalo parinkties valdymo mygtukai ir signalo vertikalios pozicijos ir amplitudinės skalės mastelio pasirinkimo rankenėlės.
- 6 – signalo horizontalios pozicijos ir laikinės skalės mastelio pasirinkimo rankenėlės ir laikinių parametų meniu pasirinkimo mygtukas.
- 7 – sinchronizavimo signalo parinktys.
- 8 – meniu, kuri atvaizduojama ekrane, parinkties mygtukai.
- 9 – paleisties valdymo mygtukai.

Prijungti fotodiodo išvadą prie vienos iš dviejų oscilografo įvesties jungčių. Pasirinkus **VERTICAL** dalyje signalo parinkties mygtuką **CH1** arba **CH2** ekrane atsiranda signalo parametų meniu. Parametų nustatymuose turi būti nustatyta: **Coupling** – **DC**; **BW Limit** –

**OFF; Probe – x1; Invert – OFF.** Nustatyti **Volts/Div – Coarse**, jei norima grubiai keisti amplitudinės skalės mastelį, ir **Fine**, jei norima keisti amplitudinės skalės mastelį mažais žingsniais. **POSITION** rankenėle keičiama pasirinkto signalo vertikali pozicija. **SCALE** rankenėle keičiamas pasirinkto signalo amplitudės skalės mastelis. Išjungti signalo rodymą galima pasirinkus signalą paspaudus mygtuką **CH1, CH2** ar **MATH** ir paspaudus **OFF** mygtuką. **HORIZONTAL** dalyje **POSITION** rankenėle keičiama laikinė koordinatė sinchronizmo atskaitos atžvilgiu. **SCALE** rankenėle keičiamas laikinės skalės mastelis. Sinchronizavimo dalyje **TRIGGER LEVEL** rankenėle reguliuojamas sinchronizavimo įtampos dydis. **MENU** mygtuku pasirenkama sinchronizmo parametrų meniu, kurioje turi būti nustatyta: **Mode – Edge; Source –** kanalas, prie kurio prijungtas fotodiodas; **Slope – Rising Edge; Mode – Auto; Coupling – DC.** Paspaudus **ACQUIRE** mygtuką ekrane atvaizduojama duomenų rinkimo pasirinkimo meniu, kuriame **Acquisition** nustačius **Average** skaičiuoja signalo vidurkį. **Averages** nustatomas vidurkinamų matavimų skaičius. Matuojant laikinius parametrus nustatyti 16 matavimų vidurkinimą. **Acquisition** nustačius **Normal**, matavimų vidurkiniams nevykdomas. Matuojant laikinius parametrus, pasirinkti **CURSOR** meniu, kuriame nustatyti: **Mode – Manual; Type – Time; Source –** kanalas, prie kurio prijungtas fotodiodas. A žymeklis valdomas su **VERTICAL POSITION** rankenėle. B žymeklis valdomas su **HORIZONTAL POSITION** rankenėle.

## **Matavimai**

### **1. Lazerio išvadinio veidrodžio, kurio atspindžio koeficientas yra 95% derinimas.**

- Veidrodžio  $V_4$  ( $R=95\%$ ) laikiklį pastatyti optinio bėgio padėtyje ~20.
- Poslinkio staliuką TS, ant kurio yra pritvirtinta kaupinimo šviesolaidis ŠL galas ir kolimavimo-fokusavimo lęšių pora KFL, nustatyti į 5mm padėtį.
- Įjungti derinimo lazerį DLD.
- Sukant veidrodžio  $V_4$  laikiklio vertikalaus ir horizontalaus derinimo varžtus, suderinti išvadinį veidrodį taip, jog atspindys nuo jo sutaptų su skylute ekrane E.
- Įjungti kaupinimo lazerio LD maitinimo bloką. Pakelti kaupinimo srovę iki 1.5A.
- Už lazerio išvadinio veidrodžio  $V_4$  su vizualizatoriumi įsitikinti ar yra generuojama spinduliuotė. Jei nėra generuojama lazerinė spinduliuotė, derinti  $V_4$  laikiklio vertikalaus ir horizontalaus derinimo varžtus. Atsiradus spinduliuotei, derinant veidrodį  $V_5$ , nukreipti lazerio spinduliuotę į gaudyklę G.
- Įjungti optinės galios matuoklio OGM displėjų ir pastatyti matuoklį lazerio spindulio kelyje.
- Derinant veidrodį  $V_4$ , nustatyti didžiausią išvadinę optinę galią.

### **2. Lazerio kaupinimo derinimas.**

- Atsargiai sukuti poslinkio staliuko TS mikrometrą link 0 mm padėties. Sustoti, jei dingsta lazerio generacija.
- Sukuti poslinkio staliuko TS mikrometrą nuo 0 mm padėties arba padėties, kurioje dingo lazerio generacija, priešinga kryptimi 0.05÷0.10 mm žingsniu, registruojant lazerio generuojamą optinę galią, iki 10mm padėties arba kol vyksta lazerio generacija. Kiekviename žingsnyje derinant veidrodžio  $V_4$  derinimo varžtus gauti maksimalią išvadinę optinę galią.
- Atvaizduoti grafiškai išvadinės lazerio spinduliuotės optinės galios priklausomybę nuo poslinkio staliuko TS padėties.
- Nustatyti poslinkio staliuką TS padėtyje, kurioje buvo registruojama didžiausia išvadinės lazerio spinduliuotės optinė galia.

### **3. Lazerio optimalaus rezonatoriaus ilgio nustatymas.**

- Po truputį keičiant veidrodžio  $V_4$  padėtį ir derinant jį, nustumti veidrodį  $V_4$  į optinio bėgio (25) padėtį.
- Keičiant veidrodžio  $V_4$  padėtį 5÷10 mm žingsniu link optinio bėgio (0) padėties, išmatuoti generuojamos spinduliuotės optinės galios priklausomybę nuo veidrodžio  $V_4$  padėties. Kiekviename žingsnyje derinti veidrodžio  $V_4$  derinimo varžtus kol gaunama maksimali išvadinė optinė galia.



- Atvaizduoti grafiškai išvadinės lazerio spinduliuotės optinės galios priklausomybę nuo veidrodžio  $V_4$  padėties.
- Nustatyti veidrodį  $V_4$  padėtyje, kurioje buvo registruojama didžiausia išvadinės lazerio spinduliuotės optinė galia.

#### 4. Lazerio generuojamos spinduliuotės optinės galios priklausomybės nuo kaupinimo galios matavimas.

- Mažinant kaupinimo lazerinio diodo maitinimo srovę kas 0.1 A, rasti apytikslę lazerio generacijos slenksčio maitinimo srovę.
- Prie lazerio generacijos slenksčio (likus  $\sim 0.2$  A iki lazerio generacijos slenksčio) derinti veidrodžio  $V_4$  derinimo varžtus kol gaunama maksimali išvadinė optinė galia.
- Paspaudus maitinimo bloke **Fine** mygtuką, tiksliai nustatyti lazerio generacijos slenksčio maitinimo srovę.
- Maitinimo srovę didinant 0.02A žingsniu, pamatuoti generuojamos spinduliuotės galios priklausomybę nuo maitinimo srovės kol bus pasiekta  $\sim 0.2$ A virš lazerio generacijos slenksčio. Didinant lazerinio diodo maitinimo srovę kas 0.1A iki 2A, pamatuoti generuojamos spinduliuotės galios priklausomybę nuo maitinimo srovės.
- Atvaizduoti grafiškai lazerio generuojamos spinduliuotės optinės galios priklausomybę nuo kaupinimo optinės galios, kuri apskaičiuojama remiantis (1) formule.
- Apskaičiuoti kaupinimo spinduliuotės pavirtimo į lazerio spinduliuotę efektyvumo koeficientą  $\eta_{o-o}$ :

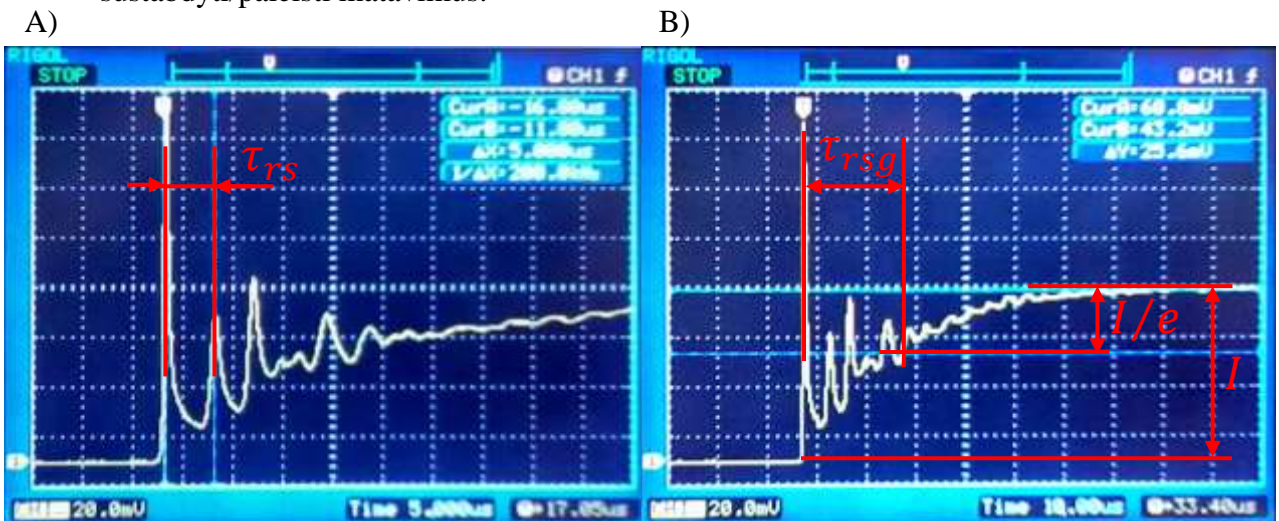
$$\eta_{o-o} = \frac{W_l}{W_k} \quad (2),$$

kur  $W_l$  – lazerio spinduliuotės galia,  $W_k$  – kaupinimo spinduliuotės galia.

#### 5. Lazerio relaksacinių svyravimų laikinių parametrų matavimas.

- Vietoje optinės galios matuoklio OGM pastatyti fotodiodą FD. Įjungti fotodiodo FD maitinimą.
- Paspaudus maitinimo bloke **LD** mygtuką, išjungti kaupinimą. Paspaudus maitinimo bloke **Pulse**, nustatyti kaupinimo impulsinį režimą.
- Nustatyti lazerio generacijos slenksčio lazerinio diodo maitinimo srovę 0.1A tikslumu.
- Paspaudus maitinimo bloke **LD** mygtuką, įjungti kaupinimo lazerinio diodo maitinimą.
- Didinant maitinimo srovę 0.1A žingsniu iki 2A, išmatuoti relaksacinių svyravimų dažnį  $\omega_{rs} = 1/\tau_{rs}$  (6 pav. (A)). Matavimų metu oscilografe matuoti trukmę  $\tau_{rs}$  tarp pirmų dviejų virpesių smaيليų. Taip pat išmatuoti relaksacinių svyravimų gesimo laiko

$\tau_{rsg}$  (6 pav. (B))  $1/e$  aukštyje priklausomybę nuo maitinimo srovės. Matavimo metu oscilografe nustatyti 16 matavimų vidurkinimą ir paspaudus **RUN/STOP** mygtuką sustabdyti/paleisti matavimus.



6 pav. A) Relaksacinių svyravimų dažnio matavimas. B) Relaksacinių svyravimų gesimo laiko  $\tau_{rsg}$  matavimas.

- Atvaizduoti grafiškai lazerio generuojamos spinduliuotės relaksacinių svyravimų dažnio  $\omega_{rs}$  ir relaksacinių svyravimų gesimo laiko  $\tau_{rsg}$  priklausomybę nuo kaupinimo optinės galios, kuri apskaičiuojama remiantis (1) formule.

#### 6. Lazerio išvadinio veidrodžio, kurio atspindžio koeficientas yra 70%, derinimas.

- Veidrodžio  $V_4$  ( $R=70\%$ ) laikiklį pastatyti optinio bėgio padėtyje, kurioje buvo atliekami optinės galios nuo kaupinimo galios ir laikinių parametrų matavimai su išvadiniu veidrodžiu, kurio atspindžio koeficientas  $R=95\%$ .
- Sukant veidrodžio  $V_4$  laikiklio vertikalaus ir horizontalaus derinimo varžtus, suderinti išvadinį veidrodį taip, jog atspindys nuo jo sutaptų su skylute ekrane E.
- Įjungti kaupinimo lazerio LD maitinimo bloką. Pakelti kaupinimo srovę iki 1.5A.
- Už lazerio išvadinio veidrodžio  $V_4$  su vizualizatoriumi įsitikinti ar yra generuojama spinduliuotė. Jei nėra generuojama lazerinė spinduliuotė, derinti  $V_4$  laikiklio vertikalaus ir horizontalaus derinimo varžtus. Atsiradus spinduliuotei, derinant veidrodį  $V_5$ , nukreipti lazerio spinduliuotę į gaudyklę G.
- Pastatyti optinės galios matuoklį OGM lazerio spindulio kelyje.
- Derinant veidrodį  $V_4$ , nustatyti didžiausią išvadinę optinę galią.

#### 7. Lazerio generuojamos spinduliuotės optinės galios priklausomybės nuo kaupinimo galios ir lazerio relaksacinių svyravimų laikinių parametrų matavimas, kai išvadinio veidrodžio atspindžio koeficientas yra 70%.

- Pakartoti 4 ir 5 punkto matavimus su išvadiniu veidrodžiu, kurio atspindžio koeficientas  $R=70\%$ .

## 8. Lazero relaksacinių svyravimų laikinių parametrų skaičiavimas.

- Lazerinės generacijos slenksčio signalo stiprinimo koeficientas proporcingas slenkstiniai kaupinimo galiai  $g_{sl} \propto W_{sl}$ . Apskaičiuoti lazerio rezonatoriaus nuostolius  $L$  naudojant formulę:

$$2lg_{sl} \equiv KW_{sl} = L - \ln R \quad (3),$$

kur  $l$  – aktyviojo elemento ilgis,  $K$  – proporcingumo koeficientas,  $W_{sl}$  – slenkstinės kaupinimo galios pamatuotos su veidrodžiais, kurių atspindžio koeficientai yra atitinkamai 95% ir 70%,  $R$  – veidrodžio atspindžio koeficientas lygus 0.95 ir 0.7.

- Apskaičiuoti fotono gyvavimo trukmes rezonatoriuje:

$$\tau_{rez} = \frac{2L_{rez}}{c(L - \ln R)} \quad (4),$$

kur  $L_{rez}$  – rezonatoriaus ilgis,  $c$  – šviesos greitis,  $L$  – lazerio rezonatoriaus nuostoliai,  $R$  – veidrodžio atspindžio koeficientas.

- Apskaičiuoti lazerio relaksacinių svyravimų dažnį:

$$\omega_{rs} = \sqrt{\left(\frac{W}{W_{sl}} - 1\right) \frac{1}{\tau_{fl}\tau_{rez}}} \quad (5),$$

kur  $W$  – aktyviojo elemento kaupinimo galia,  $W_{sl}$  – slenkstinė kaupinimo galia,  $\tau_{rez}$  – fotono gyvavimo trukmė rezonatoriuje,  $\tau_{fl}$  – viršutinio lygmens gyvavimo trukmė lygi fluorescencijos trukmei 90μs.

- Apskaičiuoti relaksacinių svyravimų gesimo laiką  $\tau_{rsg}$  :

$$\tau_{rsg} = \frac{W_{sl}}{W} \tau_{fl} \quad (6),$$

kur  $W$  – aktyviojo elemento kaupinimo galia,  $W_{sl}$  – slenkstinė kaupinimo galia,  $\tau_{fl}$  – viršutinio lygmens gyvavimo trukmė.

- Palyginti su eksperimentiškai išmatuotomis vertėmis.

### Literatūros sarašas

1. I.E.Gaižauskas, V.Sirutkaitis, Kietojo kūno lazeriai, (Vilniaus universiteto leidykla, 2008),
2. W. T.Silfvast, Laser fundamentals, (Cambridge University Press,Cambridge, 2004 ),
3. O.Svelto, Principles of lasers, 5th ed.(Springer,New York, 2010),
4. B.E.A.Saleh, M.C.Teich, Fundamentals of photonics, (J. Wiley, New York, 1991),
5. A.Yariv, Quantum electronic, 3rd ed. (J.Wiley, New York, 1988).
6. W.Koechner, Solid-state laser engineering, 6th ed. (Springer, New York, 2006),
7. P.W.Milonni, J.H. Eberly, Laser physics (Wiley, Hoboken, 2010),
8. N.Hodgson, H.Weber, Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications, 2nd ed. (Springer, New York, 2005).