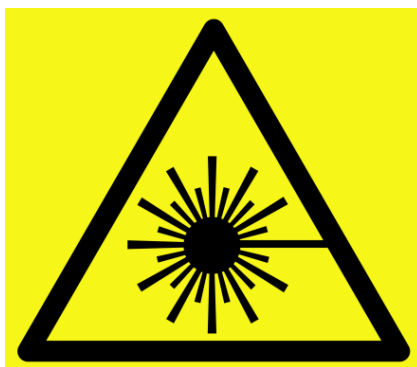


VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZIKOS FAKULTETAS  
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA  
MOKOMOJI LAZERIŲ LABORATORIJA

Laboratorinis darbas Nr. KE–6

## Lazeriniai Gauso pluoštai

Metodiniai nurodymai



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

### **Darbo tikslas**

Ištirti lazerinio Gauso pluošto transformacijas jam sklindant erdvėje bei praeinant fokusuojančius elementus. Išmatuoti lazerinių Gauso pluoštų parametrus.

### **Darbo uždutis**

1. Suderinti He-Ne lazerio optinio pluošto sklidimą išilgai optinio bėgio.
2. Ištirti He-Ne lazerio pluošto kitimą jam sklindant erdvėje.
3. He-Ne lazerio optinio pluošto  $M^2$  parametro matavimas.
4. Suderinti lazerio diodo modulio optinio pluošto sklidimą išilgai optinio bėgio.
5. Ištirti lazerinio diodo pluošto kitimą jam sklindant erdvėje.
6. Lazerinio diodo optinio pluošto  $M^2$  parametro matavimas.

### **Kontroliniai klausimai**

1. Gauso pluoštai lazeriuose.
2. Kokiais parametrais charakterizuojami lazeriniai Gauso pluoštai?
3. Artima ir tolima zona.
4. Kompleksinis Gauso pluošto parametras.
5. Gauso pluošto skėstis.
6. Gauso pluoštų transformacija praeinant lęšį.

### **Naudojami prietaisai**

1. He-Ne lazeris Thorlabs HNL020L, 2mW,  $\lambda = 632\text{nm}$
2. Lazerinio diodo modulis,  $\lambda = 650\text{nm}$
3. 1/1.8" CCD kamera Spiricon SP620U (matricos dydis: 7.1mm x 5.4mm, taško dydis: 4.4 $\mu\text{m}$  x 4.4 $\mu\text{m}$ )
4. Aliumininiai veidrodžiai
5. Lęšis,  $f = 20\text{cm}$
6. Optinis bėgelis ir laikikliai
7. Ruletė

### Metodiniai paaiškinimai

Idealaus optinio Gauso pluošto kompleksinės amplitudės kitimą, kai banga sklinda  $z$  kryptimi, galima aprašyti:

$$U(r, z) = A_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \times \exp\left(-ikz - ik \frac{r^2}{2R(z)} + i \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)\right) \quad (1),$$

kur  $A_0$  – bangos amplitudė,  $w_0$  – pluošto radiusas sąsmaukoje,  $k = 2\pi/\lambda$  – bangos skaičius,  $z_R$  – Relėjaus ilgis, atstumas kai  $w(z_R) = \sqrt{2}w_0$ , Gauso pluošto radiusas  $w(z)$  kinta:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2),$$

bangos fronto spindulys kinta atitinkamai:

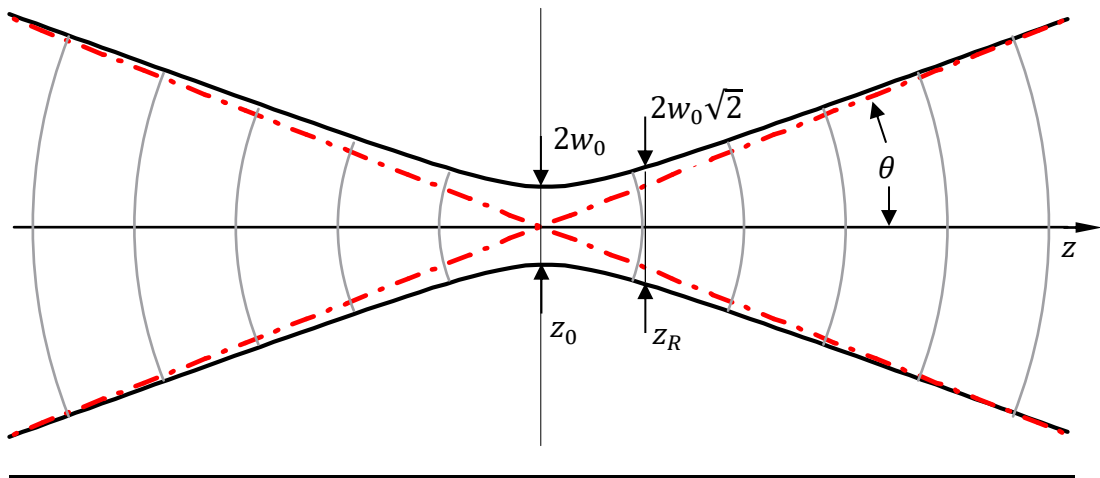
$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2\right] \quad (3),$$

kur Relėjaus ilgis lygus

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (4).$$

Toli nuo pluošto sąsmaukos pluošto skėsties kampas lygus

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (5).$$

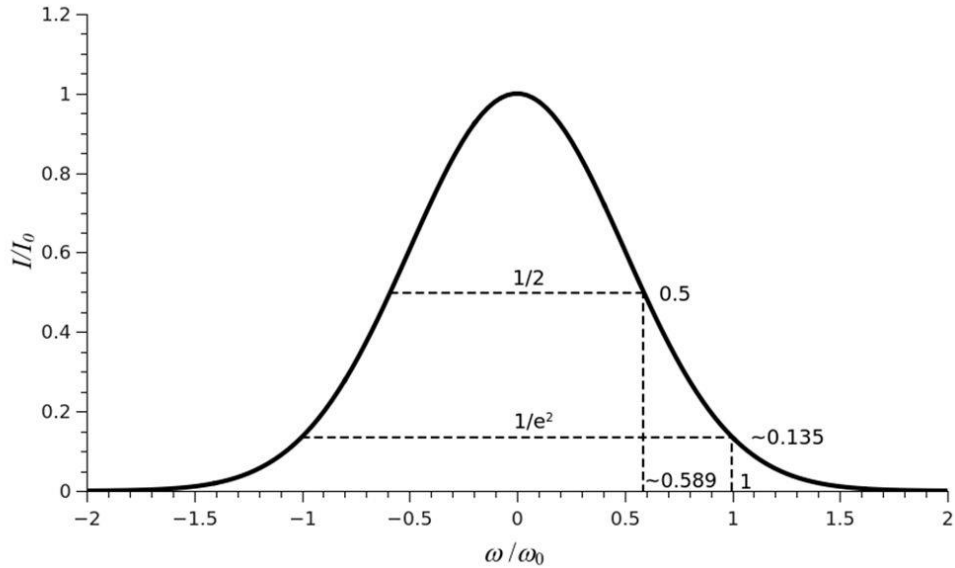


1 pav. Optinis Gauso pluoštas

Eksperimente paprastai registruojamas lauko intensyvumas  $I(r, z) = |U(r, z)|^2$  :

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right) \quad (6).$$

Pluošto radiusas matuojamas  $1/e^2 \approx 13.5\%$  intensyvumo lygyje. Taip pat praktikoje taikomas pluošto diametras pusės intensyvumo lygyje (FWHM– full width at half maximum) dydis, kuris Gauso pluoštui lygus 1.18 Gauso pluošto radiuso  $1/e^2$  intensyvumo lygyje.



2 pav. Gauso pluošto intensyvumo skirstinys

Realūs lazerių generuojami optiniai pluoštai nėra idealūs Gauso pluoštai. Norint įvertinti realaus pluošto nukrypimą nuo idealaus Gauso pluošto buvo įvestas bedimensinis pluošto kokybės parametras  $M^2$ , kuris yra realaus pluošto radiuso sąsmaukoje ( $w_{0R}$ ) ir skėsties kampo ( $\theta_{0R}$ ) santykis su idealaus Gauso pluošto radiusu sąsmaukoje ( $w_0$ ) ir skėsties kampu ( $\theta_0$ ):

$$M^2 = \frac{w_{0R}\theta_{0R}}{w_0\theta_0} \quad (7).$$

Idealiam Gauso pluoštui  $M^2 = 1$ . He-Ne lazeriui generuojančiam TEM<sub>00</sub> skersinės modos pluoštą  $M^2 < 1.1$ . Daugiamodžiams lazeriams, generuojančiams didelės galios pluoštus, parametras  $M^2$  gali būti 10 ir daugiau.

Realiems optiniams pluoštams:

$$w_{0R}\theta_{0R} = \frac{M^2\lambda}{\pi} > \frac{\lambda}{\pi} \quad (8).$$

Realaus optinio pluošto radiusas  $1/e^2$  intensyvumo lygyje  $z$  padėtyje lygus:

$$w_R(z) = w_{0R} \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda M^2}{\pi w_{0R}^2}\right)^2} \quad (9),$$

bangos fronto spindulys kinta atitinkamai:

$$R_R(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{\pi w_{0R}^2}{z\lambda M^2}\right)^2 \right] \quad (10).$$

Relėjaus ilgis bus lygus

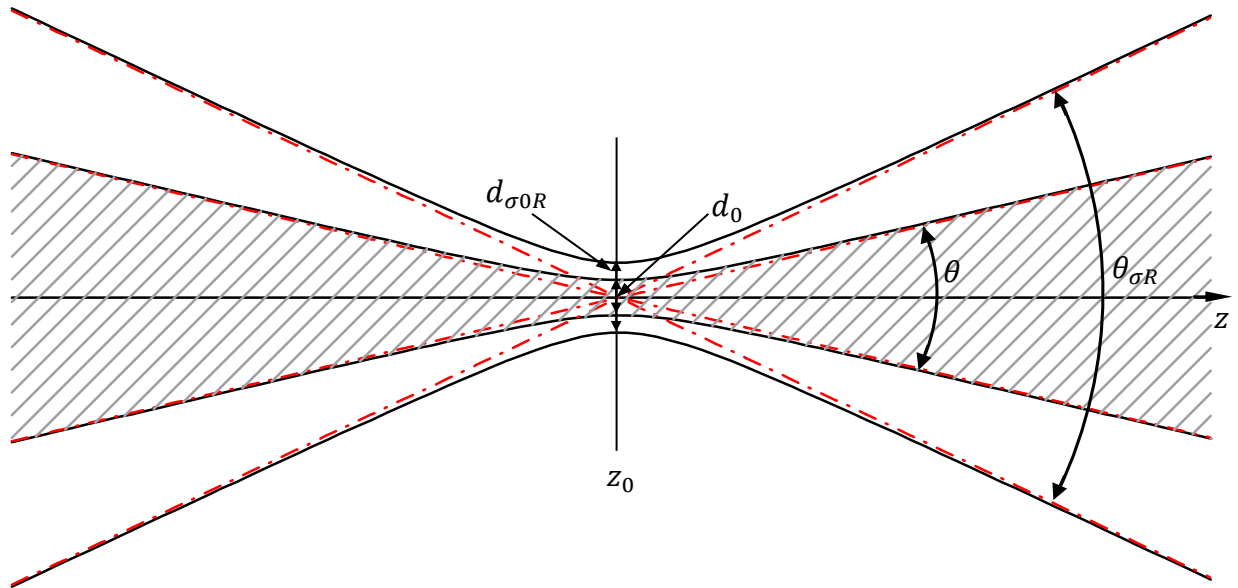
$$z_R = \frac{\pi w_{0R}^2}{M^2\lambda} \quad (11).$$

Pagal ISO 11146 standartą pluošto sklaidimą apibūdinantis parametras  $M^2$  apibrėžiamas kaip:

$$M^2 = \frac{\pi d_{\sigma 0}\theta_{\sigma}}{\lambda} \quad (12),$$

kur  $\lambda$  – bangos ilgis,  $d_{\sigma 0}$  – pluošto diametras sąsmaukoje,  $\theta_{\sigma}$  – pilnas pluošto skėsties

kampas.



3 pav. Realus lazerio pluošto sklaidimas

Pluošto diametras  $z$  padėtyje apskaičiuojamas naudojant lazerio pluošto galios tankio skirstinio antrojo momento šaknį:

$$d_{\sigma x,y}(z) = 4\sigma_{x,y}(z) \quad (13).$$

Pluošto galios tankio skirstinio antrasis momentas  $\sigma_{x,y}^2(z)$  yra apibrėžiama kaip

$$\sigma_x^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\bar{x})^2 E(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x,y,z) dx dy} \quad (14a),$$

$$\sigma_y^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (y-\bar{y})^2 E(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x,y,z) dx dy} \quad (14b),$$

kur  $(x - \bar{x})$  ir  $(y - \bar{y})$  yra atstumai nuo pluošto centro ( $\bar{x}, \bar{y}$ ),  $E(x, y, z)$  – pluošto optinės galios tankio skirstinys. Centroido padėtis apskaičiuojama kaip

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x E(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x,y,z) dx dy} \quad (15a),$$

ir

$$\bar{y} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y E(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x,y,z) dx dy} \quad (15b).$$

Skėsties kampas  $\theta_\sigma$  yra kūgio, aprašančio lazerio pluošto radiuso ar diametro didėjimą jam sklindant tolyn nuo pluošto sąsmaukos, kampas:

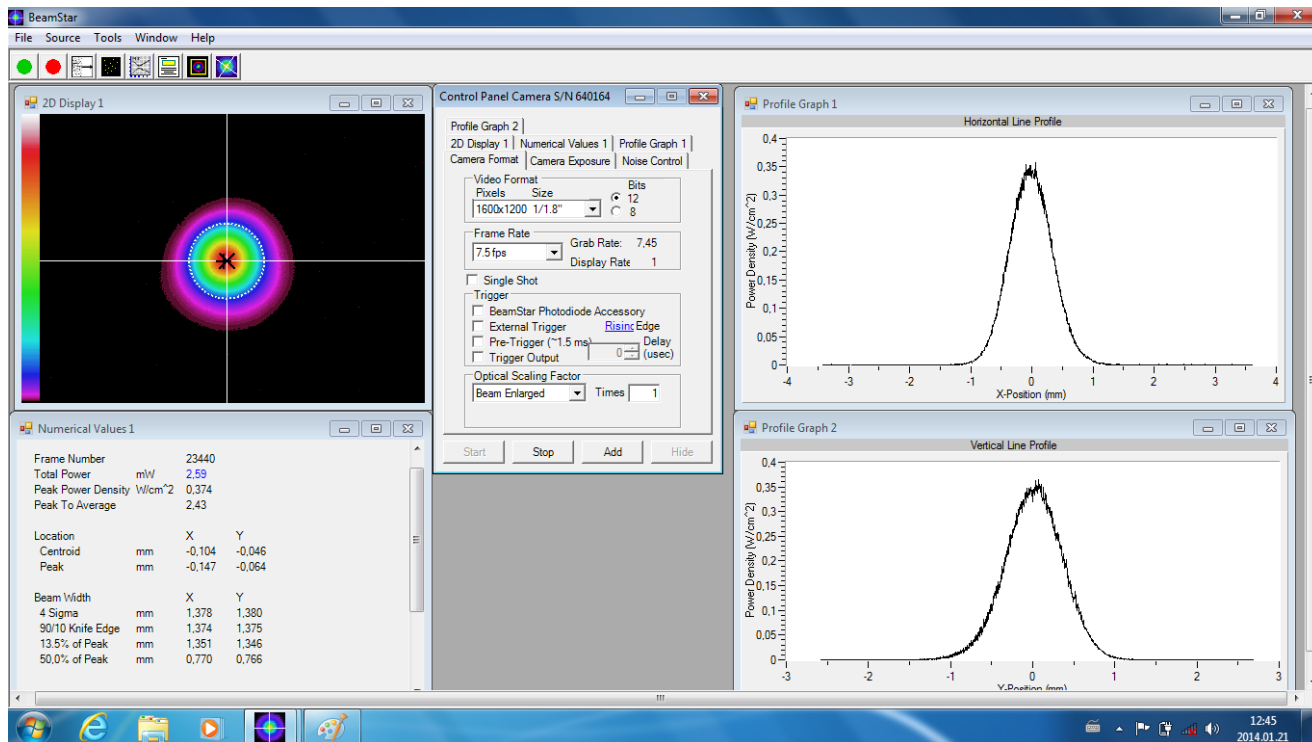
$$\theta_\sigma = \frac{d_{\sigma f}}{f} \quad (16),$$

kur  $d_{\sigma f}$  – lazerio pluošto diametras matuojamas židinio nuotolyje nuo fokusuojančio elemento galinės pagrindinės plokštumos,  $f$  – fokusuojančio elemento židinio nuotolis.

# NAUDOJIMOSI PROGRAMINE ĮRANGA BEAMSTAR METODINIAI NURODYMAI

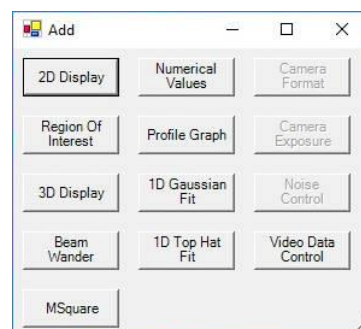


Programa atveriamas darbalaukyje dukart pele paspaudus ikoną. Jeigu kamera yra prijungta, atsidarius pagrindiniam langui galima stebėti 4 pav. matomą vaizdą.





4 pav. BeamStar Pagrindinis langas

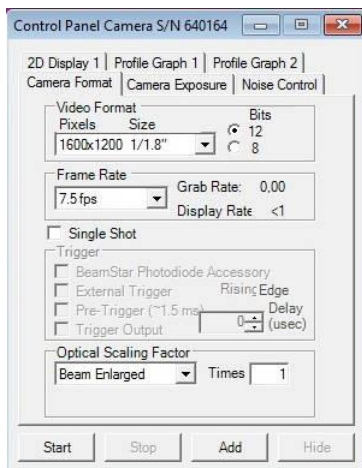
Pagrindiniame lange galima matyti valdymo langą „Control Panel“, 2D („2D Display 1“) ir pjūvių („Profile Graph 1“ ir „Profile Graph 2“) atvaizdavimo langus bei skaičiavimų rezultatų langą „Numerical Values 1“, taip pat gali būti atidaryti atitinkamomis funkcijomis pjūvius aproksimuojantys langai „1D Gaussian Fit“ ir „1D Top Hat Fit“, bei kiti papildomi langai. Atvaizduojančių langų kiekį galima keisti savo nuožiūra. Papildomus langus galima pridėti paspaudus valdymo lange „Control Panel“ **Add** mygtuką. Valdymo lange yra atverti skirtukai atsakingi už kameros ir atidarytų langų valdymą. Uždarius langą atitinkamas skirtukas išnyksta.



5 pav. Pridedamų papildomų langų pasirinkimo langas.

Matavimą galima sustabdyti paspaudus **Stop** mygtuką valdymo lange „Control panel“ arba mygtuką  pagrindiniame lange. Matavimą iš naujo pradėti galima paspaudus **Start** mygtuką valdymo lange „Control panel“ arba mygtuką  pagrindiniame lange.

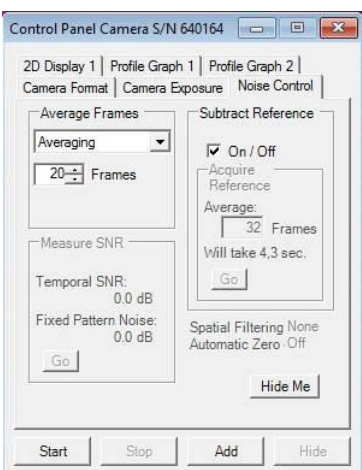
„Camera Format“ skirtuke yra pasirenkamas video formatas (**Video Format**), dinaminis ruožas (**Bits**) ir kadrų dažnis (**Frame rate**), bei sinchronizavimo sąlygos (**Trigger**) (Optinio



6 pav. Kameros formato nustatymo skirtukas

6 pav. Kameros formato nustatymo skirtukas

„Noise Control“ skirtuke nustatoma ar vidurkinti pamatuotus



8 pav. Vaizdo triukšmo valdymo skirtukas

Taip pat **Align XY Cursors**: skirsnyje galima pasirinkti kokiū būdu bus nustatoma XY kursoriaus padėtis: rankiniu - **Manual**, matematiškai nustatant piko padėtį - **Peak** ar matematiškai nustatant centroido padėtį - **Centroid**. **Freeze/UnFreeze** mygtuku yra sustabdomas/paleidžiamas „2D display“ lango atnaujinimas. **Save** mygtuką išsaugomi lange atvaizduojami duomenys pasirinktu formatu.

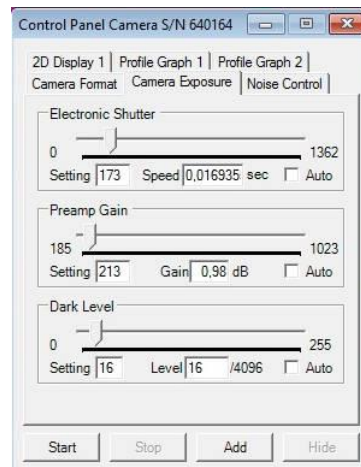
„Numerical Values“ lange atvaizduojami pluošto matematinio charakterizavimo rezultatai. „Control Panel“ lange esančiame skirtuke nustatomi kokie paskaičiuoti dydžiai bus atvaizduojami skaičiavimo rezultatų lange. **Freeze/UnFreeze**

didinimo ar mažinimo faktorius nustatomas nelygus 1, kai naudojamas pluošto plėstuvus ar objektyvas (**Optical Scaling Factor**). Šiuo atveju, optinio didinimo ar mažinimo faktorių pasirinkti lygiu 1). Šiame skirtuke reikia pasirinkti **1600x1200 1/1.8“** video formatą, **12** bitų dinaminį ruožą, bei tinkama kadru dažnį.

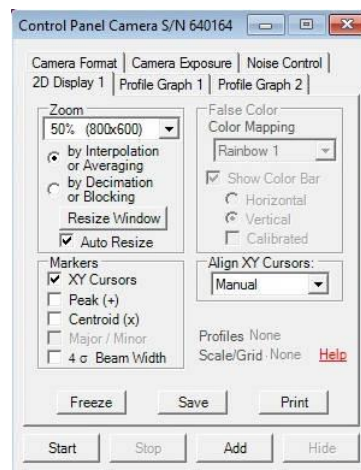
„Camera Exposure“ skirtuke nustatomas išlaikymas (**Electronic Shutter**), stiprinimas (**Preamp Gain**), bei dinaminio fono lygis (**Dark Level**).

„Noise Control“ skirtuke nustatoma ar vidurkinti pamatuotus skirstinius ir ar atimti atraminį intensyvumo skirstinį. **Average Frames** skirsnyje nustatyti 5-10 kadru vidurkinimą.

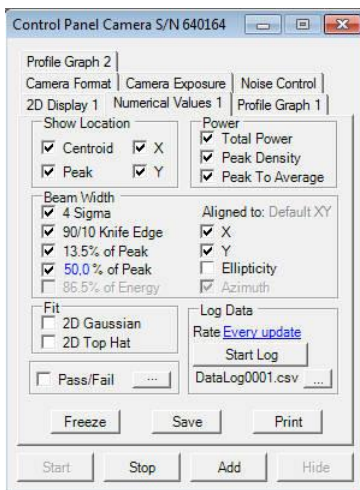
„2D Display“ lange yra atvaizduojamas intensyvumo skirstinys XY plokštumoje. „Control Panel“ lange esančiame skirtuke nustatoma atvaizduojamo kadro skyra ir dydis (**Zoom** skirsnis), pasirinkti XY kursoriaus (**XY Cursors**), piko (**Peak(+)**), centroido (**Centroid(x)**) žymenų atvaizdavimą (**Markers** skirsnis).



7 pav. Kameros laikinių parametrų nustatymo skirtukas.




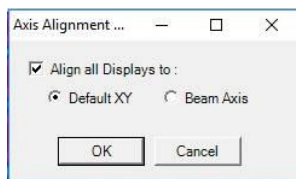
9 pav. Intensyvumo skirstinio atvaizdavimo lango valdymo skirtukas.



10 pav. Matavimo rezultatų atvaizdavimo lango valdymo skirtukas

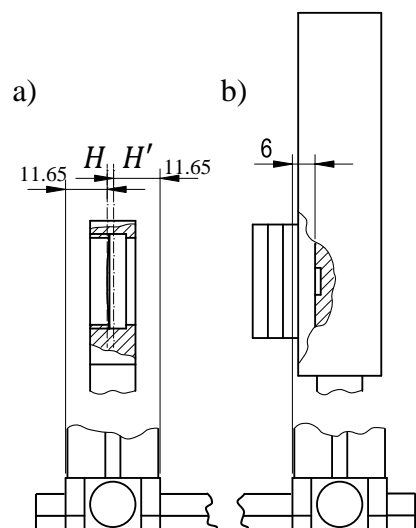
mygtuką išsaugomi lange atvaizduojami duomenys pasirinkti formatu.

Prieš matavimus nustatyti koordinačių ašių kryptis išilgai x ir y. Paspaukę arba  pasirinkę iš meniu **Tools>Options** atsivers „Axis Alignment Control“ langas, kuriame reikia pasirinkti **Default XY**.



12 pav. Pluošto matavimo ašių nustatymo langas.

Tiksliau nustatant kameros padėtį ir matuojant atstumus iki lęšio, bei matuojant atstumus tarp lęšio ir CCD kameros reikia atsižvelgti į lęšio priekinės pagrindinės plokštumos  $H$ , galinės pagrindinės plokštumos  $H'$  ir CCD matricos kameroje padėtis. Ant lęšio pažymėta rodyklė rodo pluošto sklaidimo kryptį. Lęšio priekinė pagrindinė plokštuma  $H$  yra 11.65 mm atstumu nuo kairiojo laikiklio krašto. Lęšio galinė pagrindinė plokštuma  $H'$  yra 11.65 mm atstumu nuo dešiniojo laikiklio krašto. CCD matrica yra 6 mm atstumu nuo kairiojo laikiklio krašto.



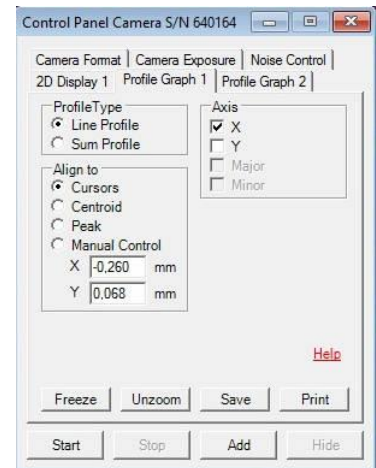
13 pav. a) Lęšio priekinės pagrindinės plokštumos  $H$  padėtis ir galinės pagrindinės plokštumos  $H'$  padėtis lęšio laikiklio kraštų atžvilgiu. b) Kameros CCD matricos padėtis kameros laikiklio krašto atžvilgiu.

mygtuku yra sustabdomas/paleidžiamas „Numerical Values“ lango atnaujinimas.

„Profile Graph“ languose atvaizduojami skirstinio pjūviai, kurių savybės nustatomos atitinkamame „Control Panel“ lango skirtuke. Pjūvio tipe **Profile Type** reikia pasirinkti **Line Profile**.

Ašių skirsnyje **Axis** pasirenkama viena iš ašių (**X** ar **Y**). **Align to** skirsnyje pasirenkamas būdas kaip bus nustatoma pjūvio padėtis.

**Freeze/UnFreeze** mygtuku yra sustabdomas/paleidžiamas „Profile Graph“ lango atnaujinimas. **Save**



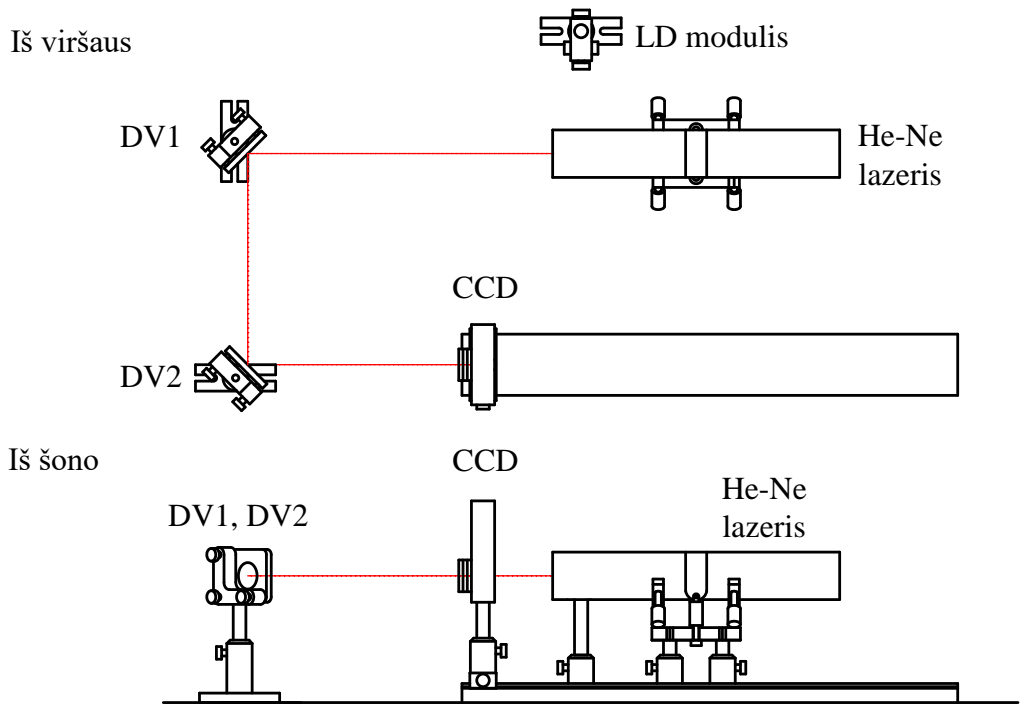
11 pav. Intensyvumo skirstinio atvaizdavimo lango valdymo skirtukas.



## Matavimai

### 1. He-Ne lazerio optinio pluošto sklaidimo išilgai optinio bėgio derinimas.

- CCD kamerą naudoti kartu su visais 3 uždedamais filtrais. Prijungti CCD kamerą prie kompiuterio. Įjungti kompiuterį.
- Įsitikinti ar lazerio maitinimo blokas prijungtas prie He-Ne lazerio galvos ir maitinimo tinklo. Įjungti He-Ne lazerį, pasukant pagal laikrodžio rodyklę įjungimo raktą lazerio maitinimo bloke.
- Pastumti CCD kamerą (CCD) link kairiojo optinio bėgio krašto.
- Pastatyti ir pritvirtinti su varžtais derinimo veidrodžius DV1 ir DV2.



14 pav. Optinė grandinė. He-Ne lazeris, LD modulis – lazerinio diodo modulis, DV1 ir DV2 – derinimo veidrodžiai, CCD – CCD kamera.

- Naudojant veidrodį DV1 suderinti lazerio pluoštelį, kad pataikytų į CCD kameros CCD matricos centrą.
  - Pastumti CCD kamerą į kita bėgio galą. Naudojant veidrodį DV2 suderinti lazerio pluoštelį, kad pataikytų į CCD kameros CCD matricos centrą.
  - Pastumti CCD kamerą į optinio bėgio padėtį (0). Pakartoti veidrodžio DV1 derinimą.
  - Kartoti derinimo veiksmus, kol pluoštas nesklis išilgai optinio bėgio.
- ### 2. He-Ne lazerio pluošto kitimo jam sklindant erdvėje tyrimas.
- Pastumti CCD kamerą į optinio bėgio padėtį (0). Lazerio optinio pluošto centras turi sutapti su CCD kameros CCD matricos centru.
  - Išmatuoti atstumą nuo lazerio išvadinio veidrodžio iki kameros.

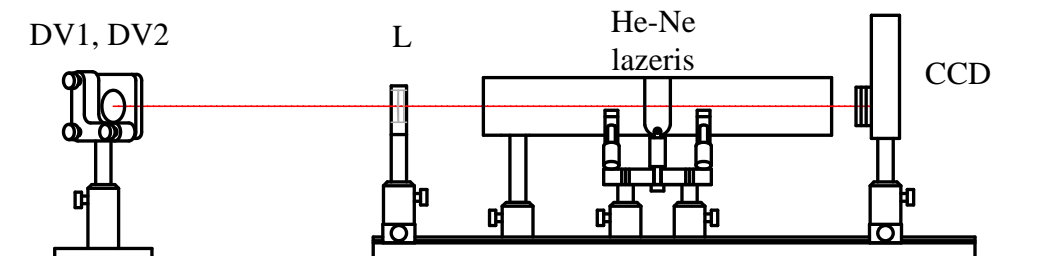
- Įsitikinti ar piko (**Peak(+)**) padėtis sutampa ar yra artima centroido (**Centroid(x)**) padėčiai. Jeigu stebimas didelis nesutapimas uždengiamas lazerinis pluoštas ir paspaudus „Zero the Background“ atimamas fonas arba „Noise Control“ skirtuke pamatuojamas ir atimamas atraminis intensyvumo skirstinys uždengus lazerinį pluoštą.
- Užfiksavus pluošto erdvinį pasiskirstymą, nustatyti pluošto diametrą  $d_{13.5} 1/e^2$  (13,5%) aukštyje ir pluošto diametrą  $d_{\sigma} = 4\sigma$  X ir Y ašyse.
- Pamatuoti pluošto diametrą  $d_{13.5} 1/e^2$  (13,5%) aukštyje ir pluošto diametrą  $d_{\sigma} = 4\sigma$  X ir Y ašyse, stumiant CCD kamerą išilgai bėgio 50mm žingsniu į kitą optinio bėgio galą.
- Atvaizduoti pluošto diametrą  $d_{13.5}(z)$ , išmatuoto  $1/e^2$  lygyje, ir  $d_{\sigma}(z)$  priklausomybę nuo atstumo  $z$ .
- Iš grafiko  $d(z) = f(z)$  dalies, kuri gali būti aproksimuota tiese, rasti skėsties kampą

$$\theta_i = 2 \cdot \arctan \left( \frac{d_{i2}/2 - d_{i1}/2}{z_2 - z_1} \right) \quad (17),$$

ir sąsmaukos padėtį  $z_{0i}$  optinio bėgio (0) padėties atžvilgiu, kur  $i$  yra  $x$  arba  $y$  indeksai.

### 3. He-Ne lazerio optinio pluošto $M^2$ parametro matavimas.

- Pastumti CCD kamerą į optinio bėgio dešinią galą.
- Pastatyti lęšį L optinio bėgio padėtyje (0). Suderinti lęšio laikiklio aukštį. Lazerio optinio pluošto centras turi sutapti su CCD kameros CCD matricos centru.

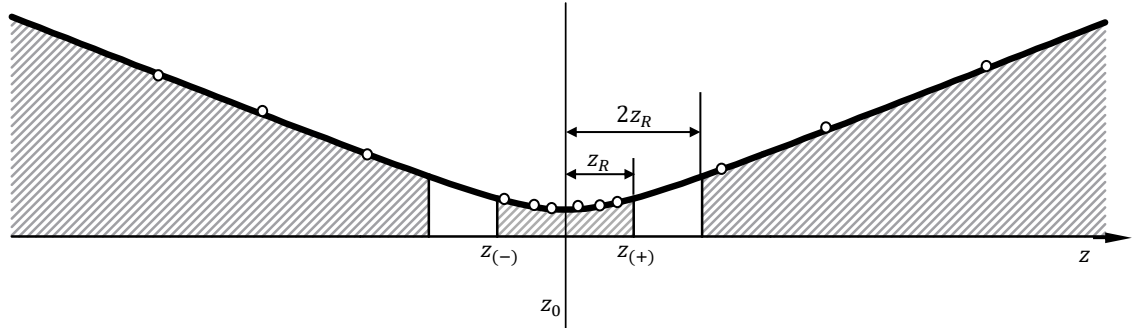


15 pav.  $M^2$  parametro matavimo schema. He-Ne lazeris, , DV1 ir DV2 – derinimo veidrodžiai, L – lęšis, CCD – CCD kamera.

- Keičiant CCD kameros padėtį išilgai optinio bėgio, rasti optinio pluošto sąsmaukos, tai yra mažiausio lazerio pluošto diametro  $d_{\sigma_0} = 4\sigma_0$  X ir Y ašyse, padėtį  $z_0$ .
- Keičiant CCD kameros padėtį išilgai optinio bėgio, rasti padėtis prieš  $z_{(-)}$  ir už  $z_{(+)}$  sąsmaukos, kuriose lazerio optinio pluošto diametras  $d_{\sigma R} = \sqrt{2}d_{\sigma_0}$  X ir Y ašyse.
- Pamatuoti lazerio optinio pluošto diametrus  $d_{\sigma x} = 4\sigma_x$  ir  $d_{\sigma y} = 4\sigma_{xy}$  ne mažiau kaip 6 skirtingose padėtyse tarp  $z_{(-)}$  ir  $z_{(+)}$ . Ne mažiau kaip 3 matavimai turi būti prieš sąsmauką ir ne mažiau kaip 3 matavimai už sąsmaukos.
- Pamatuoti lazerio optinio pluošto diametrus  $d_{\sigma x} = 4\sigma_x$  ir  $d_{\sigma y} = 4\sigma_{xy}$  ne mažiau kaip 3 skirtingose padėtyse prieš optinio pluošto sąsmauką  $z_0$  atstumu didesniu nei

$2|z_0 - z_{(-)}|$  nuo optinio pluošto sąsmaukos  $z_0$ .

- Pamatuoti lazerio optinio pluošto diametrus  $d_{\sigma_x} = 4\sigma_x$  ir  $d_{\sigma_y} = 4\sigma_{xy}$  ne mažiau kaip 3 skirtingose padėtyse už optinio pluošto sąsmaukos  $z_0$  atstumu didesniu nei  $2|z_{(+)} - z_0|$  nuo optinio pluošto sąsmaukos  $z_0$ .



16 pav. Matuojamų taškų padėtys.

- Išmatuotas optinio pluošto diametrų  $d_{\sigma_x}(z)$  ir  $d_{\sigma_y}(z)$  priklausomybes nuo padėties  $z$  aproksimuoti hiperboline funkcija:

$$d_{\sigma_x}(z) = \sqrt{a_x + b_x z + c_x z^2} \quad (18a)$$

ir

$$d_{\sigma_y}(z) = \sqrt{a_y + b_y z + c_y z^2} \quad (18b).$$

Parametrai  $a_x, b_x, c_x$  ir  $a_y, b_y, c_y$  apskaičiuojami naudojant skaitmeninius kreivių aproksimavimų būdus.

Atvaizduoti išmatuotus optinio pluošto diametrus ir aproksimacijos kreives grafiškai.

- Naudojant parametrus  $a_x, b_x, c_x$  ir  $a_y, b_y, c_y$  apskaičiuoti optinio pluošto sklaidimo parametrus:

$$z_{0i} = \frac{-b_i}{2c_i} \quad (19),$$

$$d_{\sigma i0} = \frac{1}{2\sqrt{c_i}} \sqrt{4a_i c_i - b_i^2} \quad (20),$$

$$\theta_{\sigma i} = \sqrt{c} \quad (21),$$

$$z_{Ri} = \frac{1}{2c_i} \sqrt{4a_i c_i - b_i^2} \quad (22),$$

$$M_i^2 = \frac{\pi}{8\lambda} \sqrt{4a_i c_i - b_i^2} \quad (23),$$

kur  $i$  yra  $x$  arba  $y$  indeksai,  $\lambda$  – lazerio spinduliuotės bangos ilgis.

- Apskaičiuoti astigmatinį pluošto sąsmaukos skirtumą  $\Delta z_z$ :

$$\Delta z_z = |z_{0x} - z_{0y}| \quad (24).$$

- Apskaičiuoti lazerio optinio pluošto sąsmaukos padėtį lęšio priekinio pagrindinio

paviršiaus  $H$  atžvilgiu  $X$  ašiai:

$$z_{0x}^{\text{prieš}} = V^2 x_2 + f \quad (25),$$

kur

$$x_2 = z_{0x}^{\text{už}} - f \quad (26)$$

ir

$$V = \frac{f}{\sqrt{z_{Rx}^2 + x_2^2}} \quad (27),$$

kur  $f$  – lęšio židinio nuotolis,  $z_{0x}^{\text{už}}$  – optinio pluošto sąsmaukos padėtis už lęšio galinės pagrindinės plokštumos  $H'$  atžvilgiu, skaičiuojama pagal (19) formule,  $z_{Rx}$  – optinio pluošto Relėjaus ilgis už lęšio, skaičiuojamas pagal (22) formule.

Apskaičiuoti optinio pluošto skersmenį sąsmaukoje prieš lęšį:

$$d_{\sigma x 0}^{\text{prieš}} = V d_{\sigma x 0}^{\text{už}} \quad (28).$$

Apskaičiuoti optinio pluošto Relėjaus ilgį prieš lęšį:

$$z_{Rx}^{\text{prieš}} = V^2 z_{Rx}^{\text{už}} \quad (29).$$

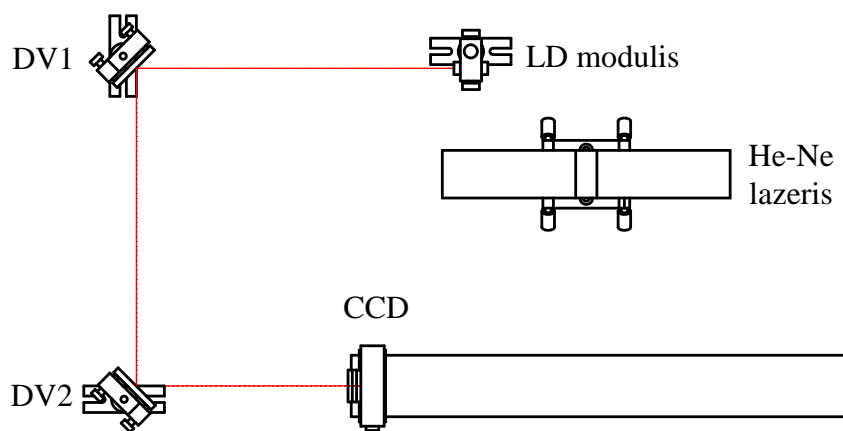
Apskaičiuoti optinio pluošto skėsties kampą prieš lęšį:

$$\theta_x^{\text{prieš}} = \frac{\theta_x^{\text{už}}}{V} \quad (30).$$

- Naudojant (25) – (30) formules apskaičiuoti lazerio optinio pluošto parametrus prieš lęšį  $Y$  ašiai.
- Palyginti apskaičiuotus pagal (25) formule optinio pluošto sąsmaukos padėtis ir apskaičiuotas pagal (30) formule skėsties kampus su 2 užduotyje išmatuotais dydžiais.

#### 4. Lazerinio diodo modulio optinio pluošto sklaidimo išilgai optinio bėgio derinimas.

- Įjungti lazerinio diodo modulį.
- Perstatyti ir pritvirtinti su varžtais derinimo veidrodžius DV1 ir DV2.



17 pav. Optinė grandinė. LD modulius – lazerinio diodo modulius, He-Ne lazeris, DV1 ir DV2 – derinimo veidrodžiai, CCD – CCD kamera.

- Remiantis 1 užduotimi suderinti optinę grandinę.

**5. Lazerinio diodo pluošto kitimo jam sklindant erdvėje tyrimas.**

- Remiantis 2 užduotimi išmatuoti lazerinio diodo pluošto skėsties kampus  $\theta_x$  ir  $\theta_y$ , bei pluošto sąsmaukos padėtį.
- Palyginti su He-Ne lazerio optiniu pluoštu parametrais.

**6. Lazerinio diodo optinio pluošto  $M^2$  parametro matavimas.**

- Remiantis 3 užduotimi išmatuoti lazerinio diodo optinio pluošto sklidimo parametrus.
- Palyginti su He-Ne lazerio optiniu pluošto sklidimo parametrais.

**Literatūra**

1. W.T.Silfvast, Laser fundamentals, (Cambridge University Press, Cambridge, 2004 ),
2. B.E.A.Saleh, M.C.Teich, Fundamentals of photonics, (J. Wiley, New York, 1991),
3. A.Yariv, Quantum electronic, 3rd ed. (J.Wiley, New York, 1988).
4. P.W.Milonni, J.H. Eberly, Laser physics (Wiley, Hoboken, 2010),
5. N.Hodgson, H.Weber, Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications, 2nd ed. (Springer, New York, 2005).
6. ISO Standard 11146, “Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios” (2005).