

Vilniaus Universitetas
Lazerinių Tyrimų Centras

Viačeslav Kudriašov

FEMTOSEKUNDINIŲ IMPULSŲ
SKLIDIMO KVARCINIAME
STIKLE TYRIMAI

2002 - 2003

Reiškiniai vykstantys fokusuojant intensyvius femtosekundinius impulsus į netiesinę terpę:

1. Fokusavimasis ir fazinė savimoduliacija
2. Daugiafotonė sugertis
3. Impulsų bangolaidinis sklidimas (šviesos gijos)
4. Superkontinuumo generacija (spektro išplitimas)
5. Pažeidimai medžiagos tūryje

Optinis Kero efektas

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{e}A(x, y, z, t)e^{i(\omega t - kz)} \quad \text{Šviesos signalas}$$

$$A(x, y, t) = A_0 e^{-\frac{x^2 + y^2}{\rho_0^2}} e^{-\frac{t^2}{\tau_0^2}} \quad \text{Gauso formos signalo gaubtinė}$$

$$I(x, y, t) \propto |A(x, y, t)|^2 \quad \text{Intensyvumas}$$

$$\varphi = \omega t - kz \quad k = \frac{\omega}{c}n \quad \text{Fazė ir bangos skaičius}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 + 4\pi\chi(\vec{E})} \quad \text{Lūžio rodiklis}$$

$$\chi(\vec{E}) = \underline{\chi^{(1)}} + \chi^{(2)}\vec{E} + \underline{\chi^{(3)}}\vec{E}\vec{E} + \dots \quad \text{Netiesinis jautris}$$

$$n(x, y, t) = n_0 + \Delta n = \boxed{n_0 + n_2 I(x, y, t)} \quad \text{Kero efektas} \quad n_2 \propto \chi^{(3)}$$

$$\Delta\varphi(x, y, t) = -\Delta kz = -\frac{\omega}{c}\Delta n z = -\frac{\omega z}{c}n_2 I(x, y, t) \quad \text{Fazės pokytis}$$

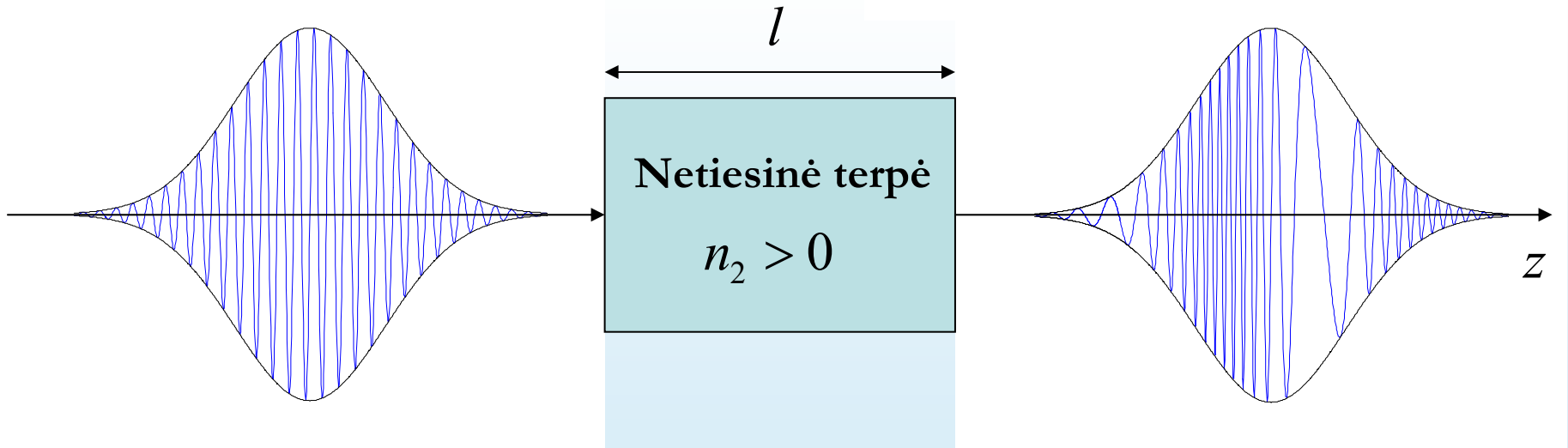
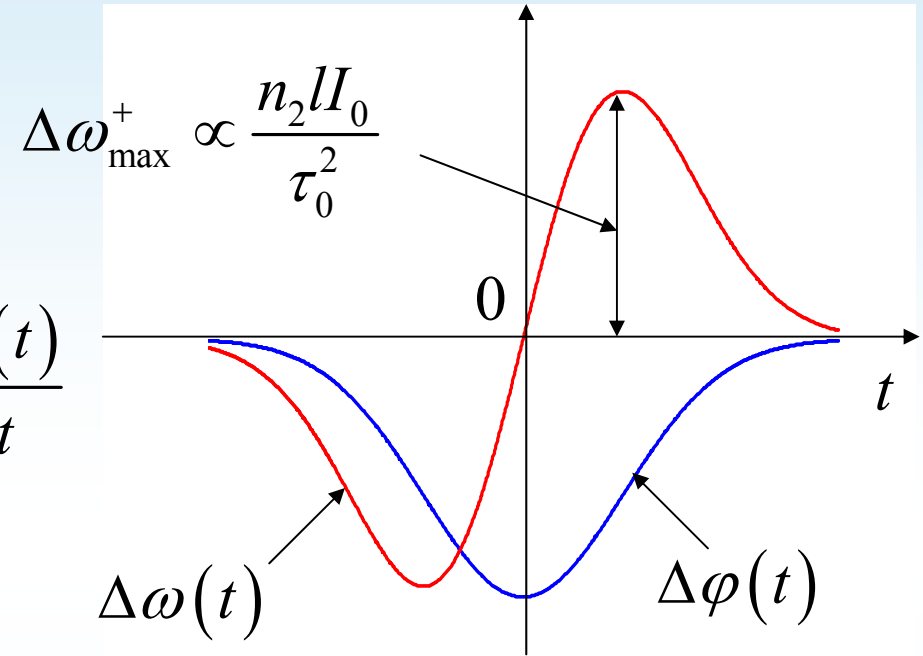
Impulso fazinė savimoduliacija

$$n(t) = n_0 + n_2 I(t)$$

$$\Delta\varphi(t) \propto -n_2 I(t) \quad \text{Fazės pokytis}$$

$$\text{Dažnio pokytis} \quad \Delta\omega(t) = \frac{\partial\Delta\varphi(t)}{\partial t} \propto -\frac{\partial I(t)}{\partial t}$$

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{2t^2}{\tau_0^2}}$$



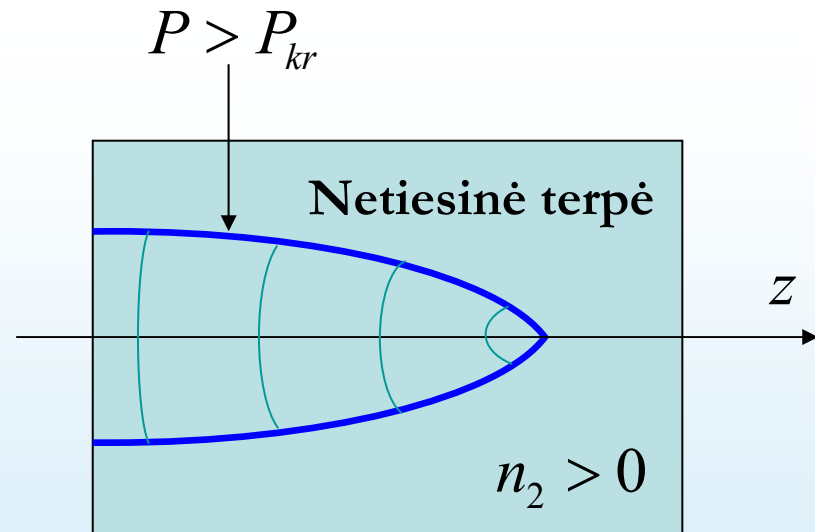
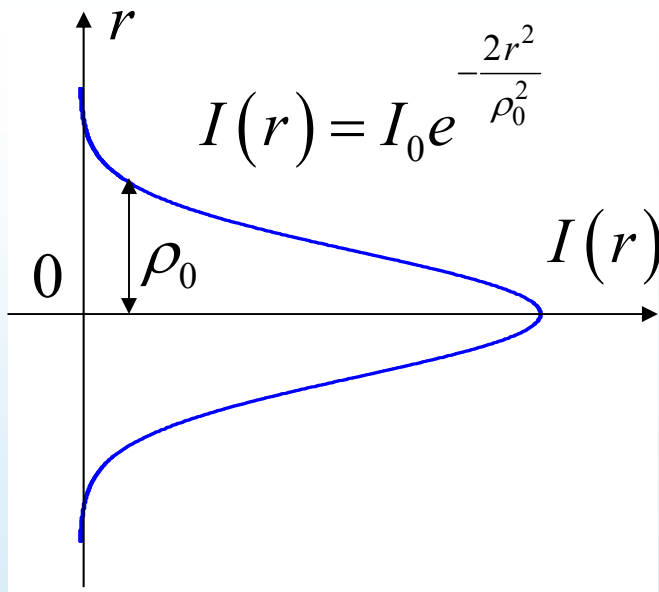
Pluošto fazinė savimoduliacija (fokusavimasis)

$$n(r) = n_0 + \Delta n = n_0 + n_2 I(r)$$

$$\Delta\varphi(r) \propto -n_2 I(r) \quad \text{Pluošto fronto iškraipymas dėl netiesiškumo}$$

$$\Delta\varphi(r) \propto r^2 / \rho_0^2 \quad \text{Pluošto fronto iškraipymas dėl difrakcijos}$$

$$P_{kr} \propto \lambda^2 / n_2 \quad \text{Fokusavimo slenkstinė galia (fokusavimasis = difrakcija)}$$

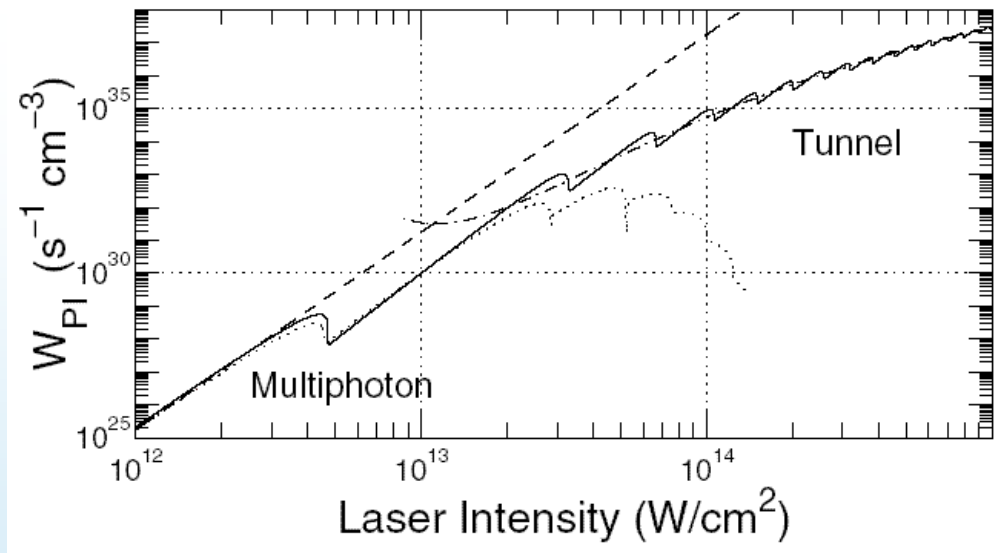
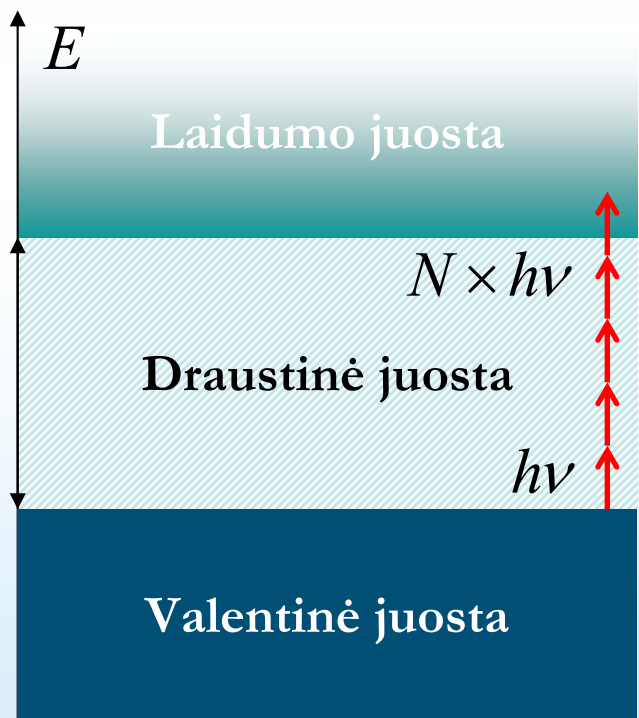


Daugiafotonė sugertis ir laisvų elektronų generacija

Sugerties sparta $W_{MPI}^{(N)}(I) = \sigma_N I^N \rho_{at}$ $\frac{\sigma_{N+1}}{\sigma_N} \approx 10^{-34}$

Laisvų elektronų tankio kitimas $\frac{\partial \rho}{\partial t} = A + B - C$

A ← Daugiafotonės jonizacijos sparta
 B ← Griūtinės jonizacijos sparta
 C ← Rekombinacijos sparta



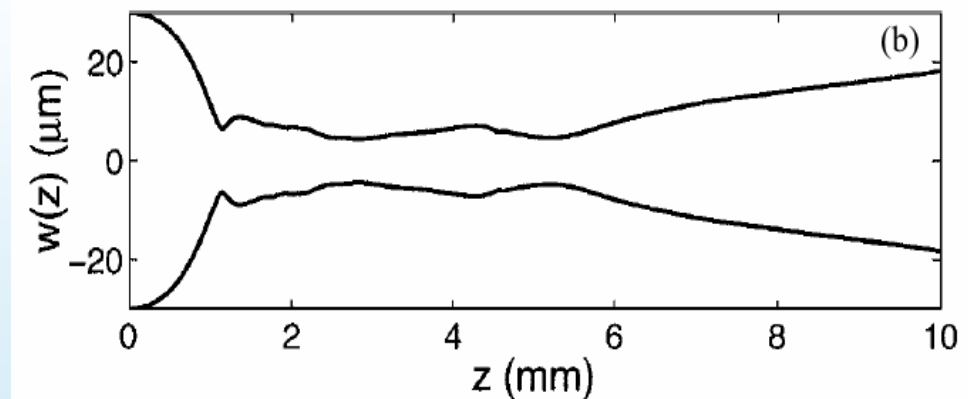
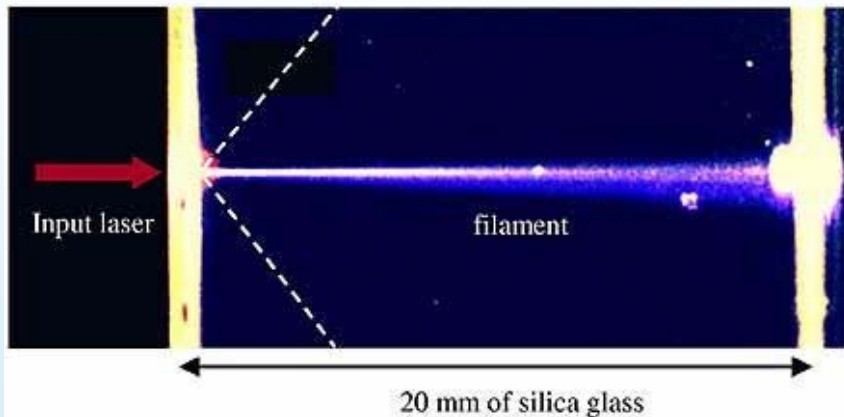
Pluošto bangolaidinis sklidimas

$$\Delta n = n_2 I(r) \quad \text{Lūžio rodiklio pokytis dėl Kero efekto}$$

$$\Delta n_e = -\frac{2\pi e^2 N_e}{n_0 m_e \omega_0^2} \quad \text{Lūžio rodiklio pokytis dėl laisvų elektronų atsiradimo}$$

$$n = n_0 + \Delta n + \Delta n_e$$

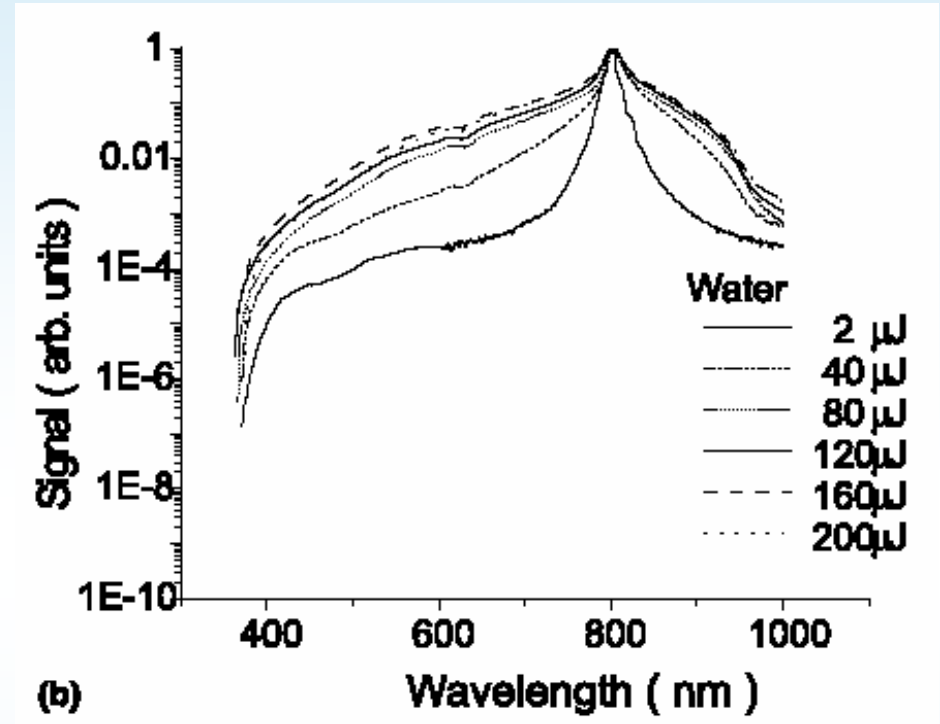
$$\Delta n = -\Delta n_e \quad \text{kai} \quad N_e \approx 10^{17} \div 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$



Superkontinuumo generacija

Savybės:

- Yra slenkstinio pobūdžio $P_{th}^{WL} \approx P_{th}^{SF}$
- Spektras yra stipriai asimetrinis
- Generuojamas terpėse su $E_{gap} > E_{gap}^{th}$



Pagrindiniai mechanizmai:

- Fokusavimas (inicijuoja superkontinuumą)
- Fazinė savimoduliacija
- Laisvų elektronų įtaka
- Impulso fronto statėjimas

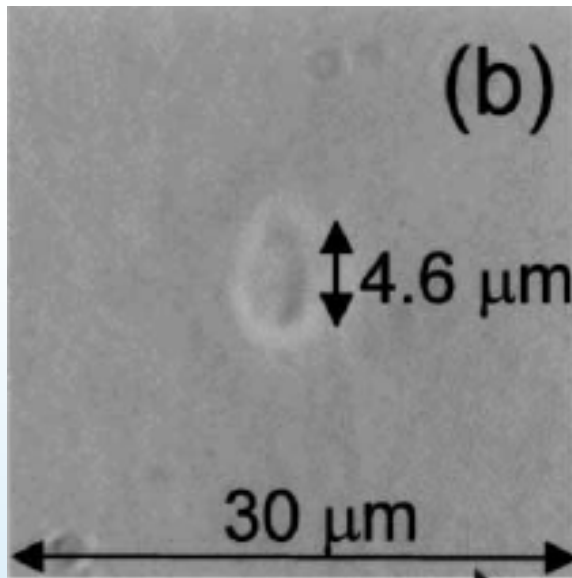
Trumpabangis spektro išplitimas

Tūriniai pažeidimai

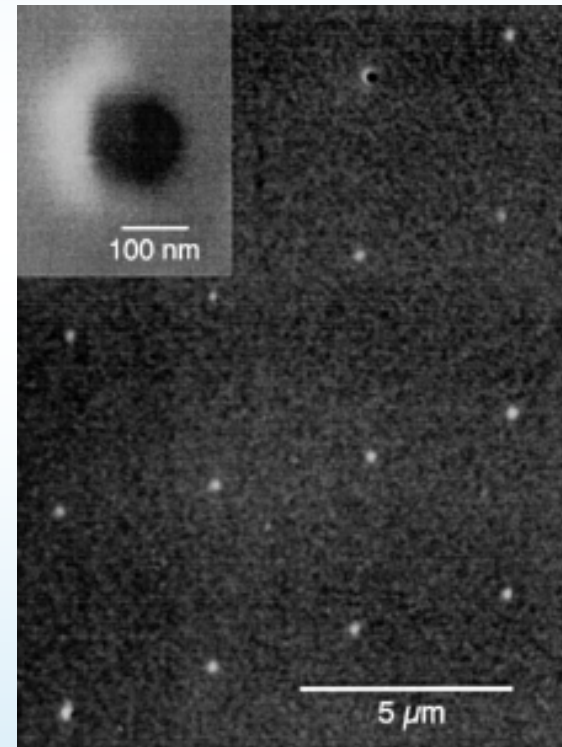
2 tipai:

- Lokalinis tankio ir lūžio rodiklio padidėjimas (tiesinis fokusavimas)
- Žymūs medžiagos struktūros pasikeitimai, makropažeidimai (netiesinis sklidimas)

$$\Delta n = 10^{-2} \div 10^{-4}$$



$E=20 \text{ nJ}$, $\tau=100 \text{ fs}$, $\text{NA}=0,60$



$E=0,5 \mu\text{J}$, $\tau=100 \text{ fs}$, $\text{NA}=0,65$

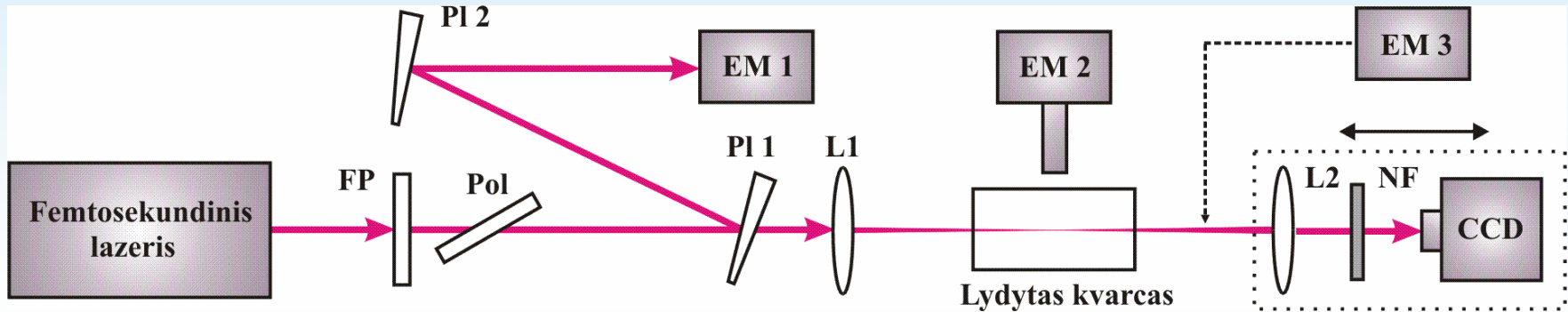
Šiame eksperimentiniame darbe buvo tiriamas sufokusuotų į kvarcinį stiklą 800 nm bangos ilgio, 1 kHz pasikartojimo dažnio ir 130 fs trukmės impulsų sklidimas ir tokiomis sąlygomis vykstantis šviesos gijų ir tūrinių pažeidimų atsiradimas.

Darbo tikslai:

Atlikti sklindančios spinduliuotės erdvinių, laikinių ir energetinių parametru tyrimus.

Išnagrinėti indukuotus tūrinius pažeidimus ir jų formavimąsi.

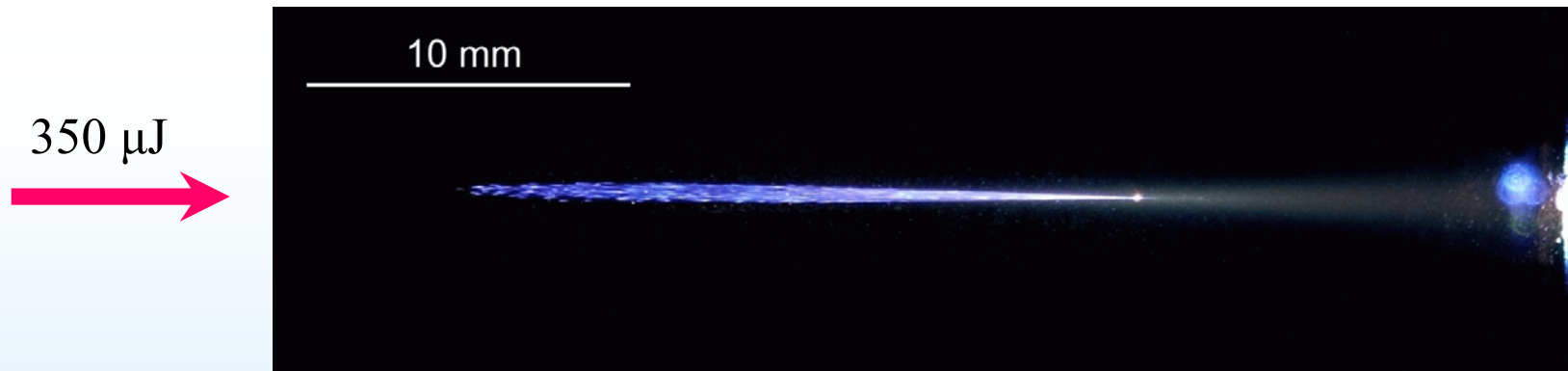
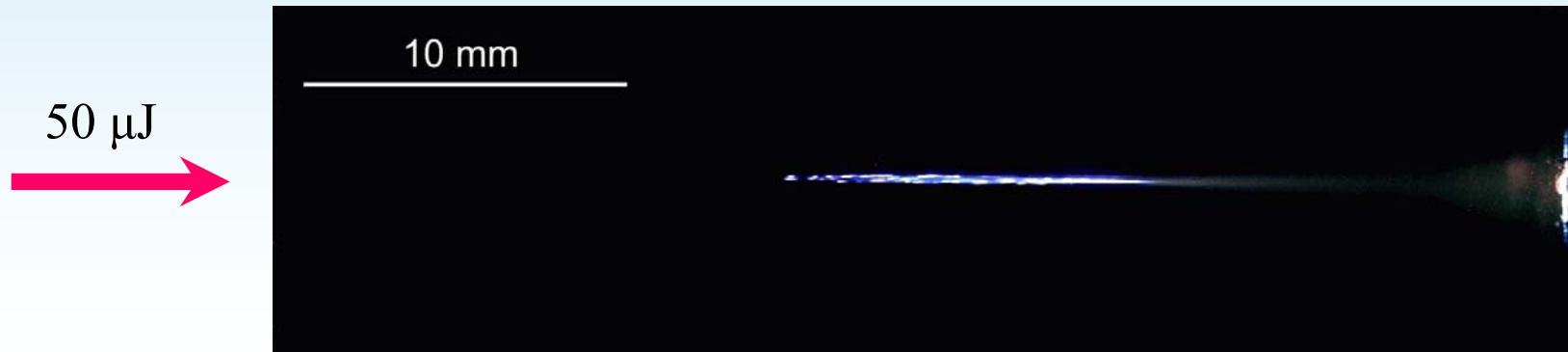
Pluošto diametro ir impulsų energijos matavimai



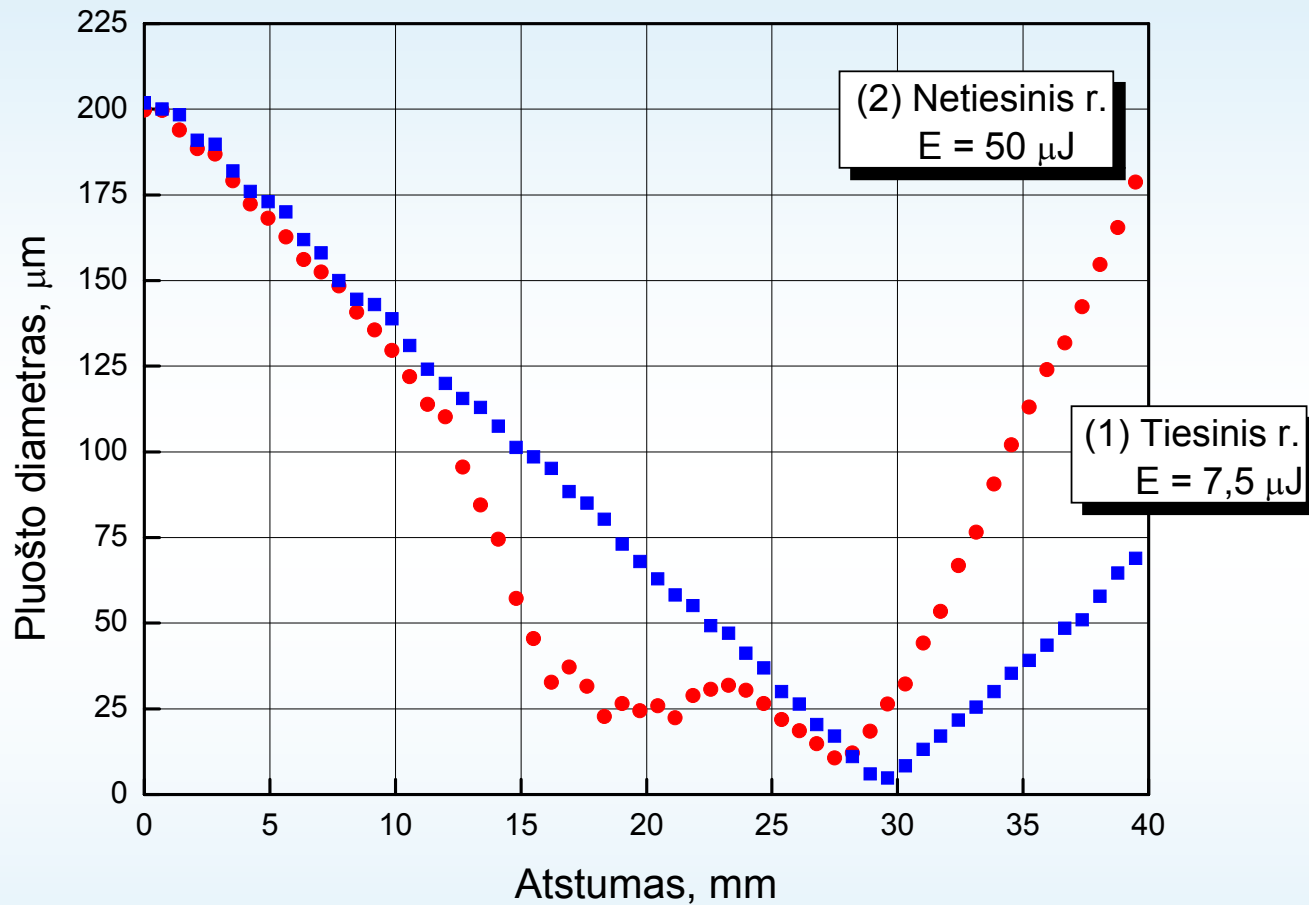
1 pav. Eksperimento schema, skirta pluošto sklaidimo matavimams ir tūrinių pažeidimų tyrimams kvarciniame stikle

(FP – $\lambda/2$ fazinė plokštelė, Pol – poliarizatorius, Pl 1, Pl 2 – optiniai pleištai, L1 – fokusuojantis lęšis ($f = 75$ mm), L2 – atvaizduojantis lęšis, NF – neutralūs filtrai, EM1, EM2, EM3 – energijos matuokliai).

Šviesos gijų kvarciniame stikle iliustracijos

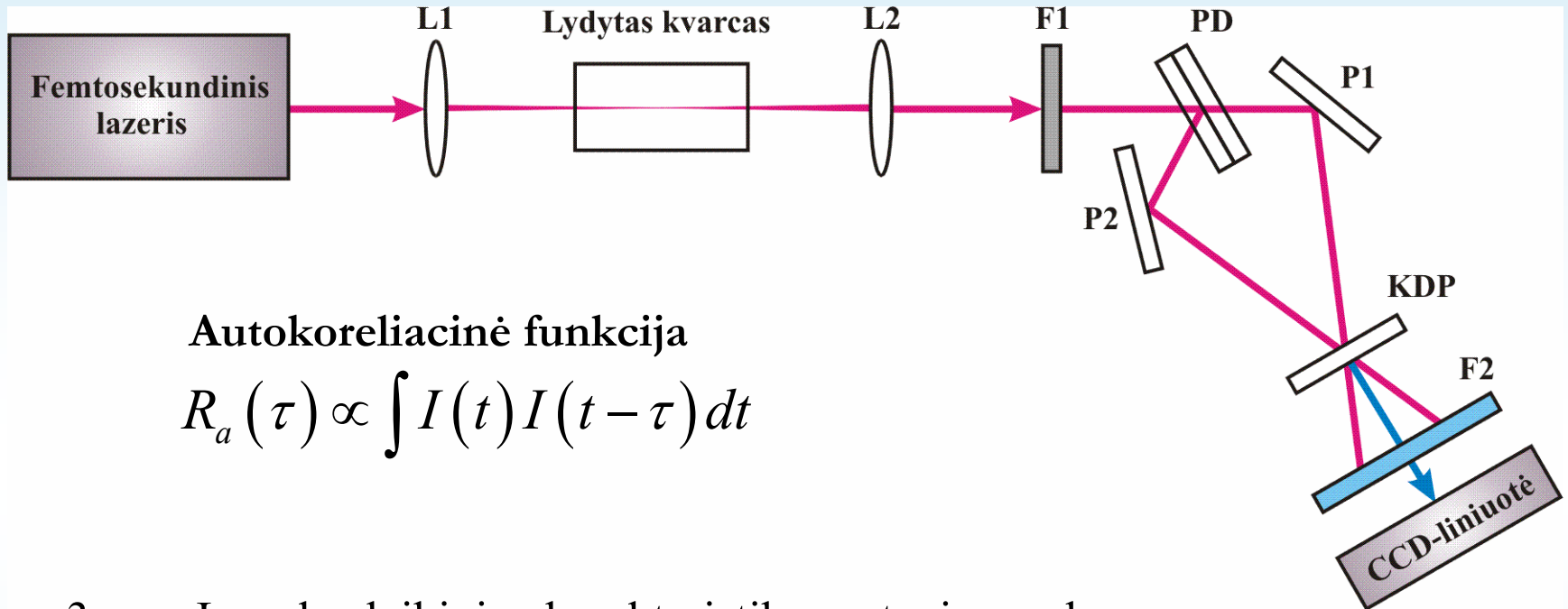


Pluošto diametro kitimas bandinyje



2 pav. Pluošto diametro priklausomybė nuo koordinatės tiesinio ir netiesinio sklaidimo atveju.

Impulsų laikinės formos matavimai



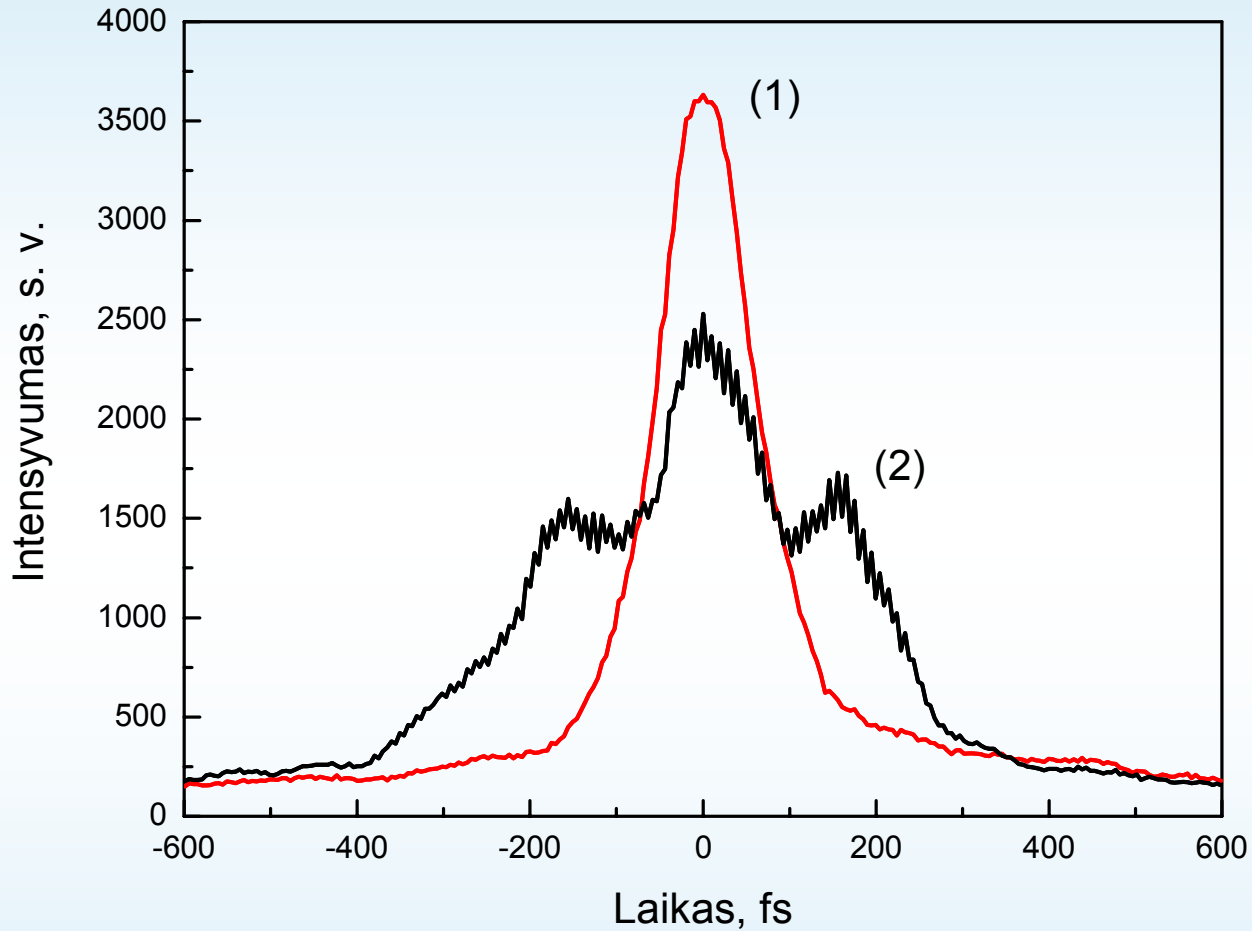
Autokoreliacinė funkcija

$$R_a(\tau) \propto \int I(t)I(t-\tau)dt$$

3 pav. Impulsų laikinių charakteristikų matavimo schema, panaudojant vieno šūvio nekolinearų autokoreliatorių

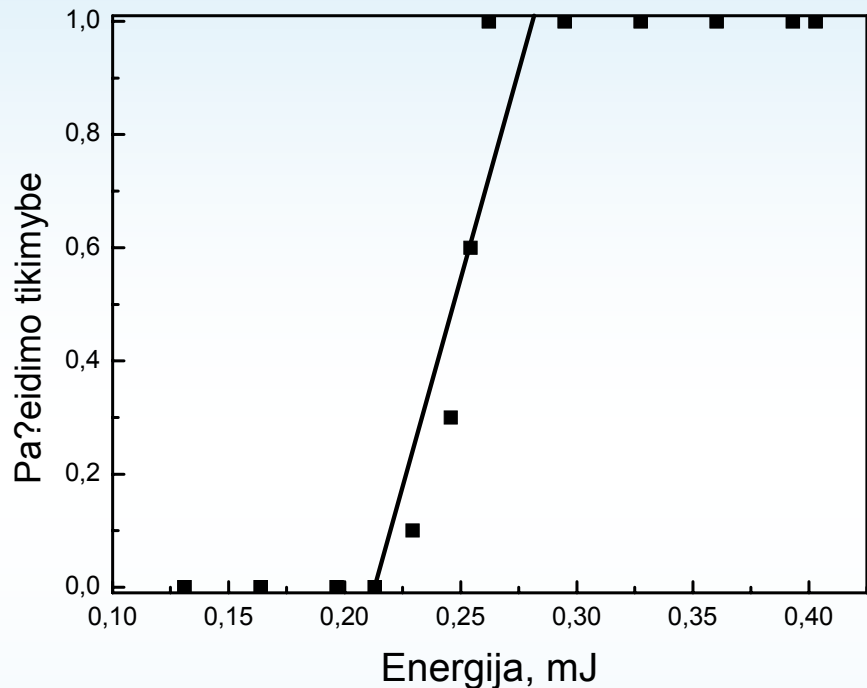
(L1 – fokusuojantis lęšis, L2 – kolimuojantis lęšis, F1 – 800 nm filtras, PD – pluošto daliklis, P1, P2 – stiklo plokštelės, KDP – netiesinis kristalas, F2 – 400 nm filtras, CCD linuotė).

Impulsų autokoreliacinės funkcijos

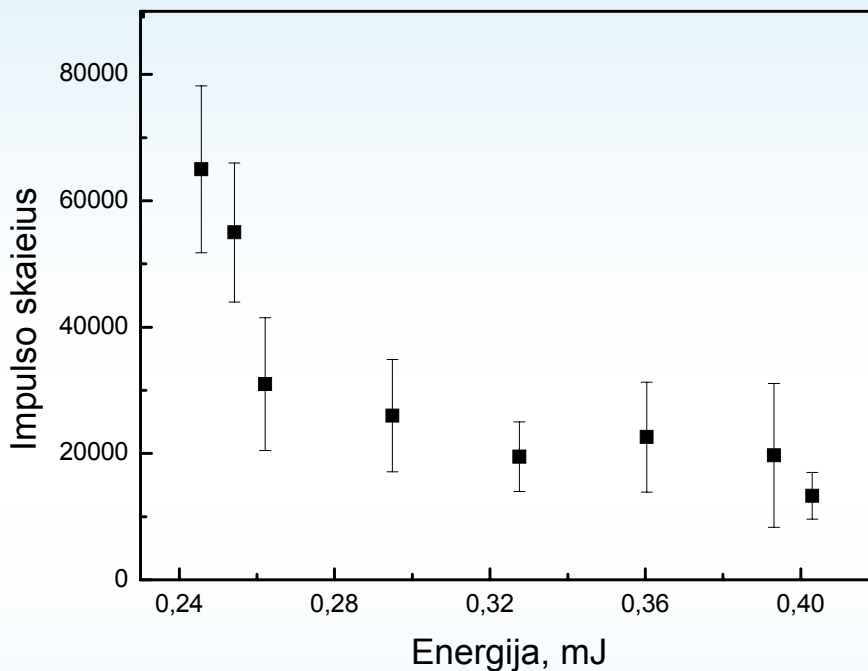


4 pav. Impulsų autokoreliacinės funkcijos
(nefokusuoto impulso (1); sufokusuoto į bandinį impulso (2)).

Tūrinių pažeidimų tyrimas

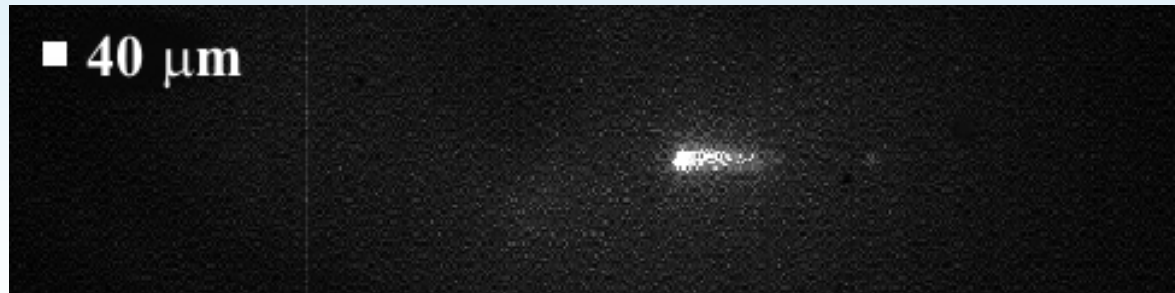


5 pav. Tūrinio pažeidimo tikimybės priklausomybė nuo impulso energijos.



6 pav. Impulsų skaičiaus (su standartiniu nuokrypiu), reikalingo pažeidimo susiformavimui, priklausomybė nuo impulso energijos.

Tūrinių pažeidimų iliustracijos



220 μJ



300 μJ



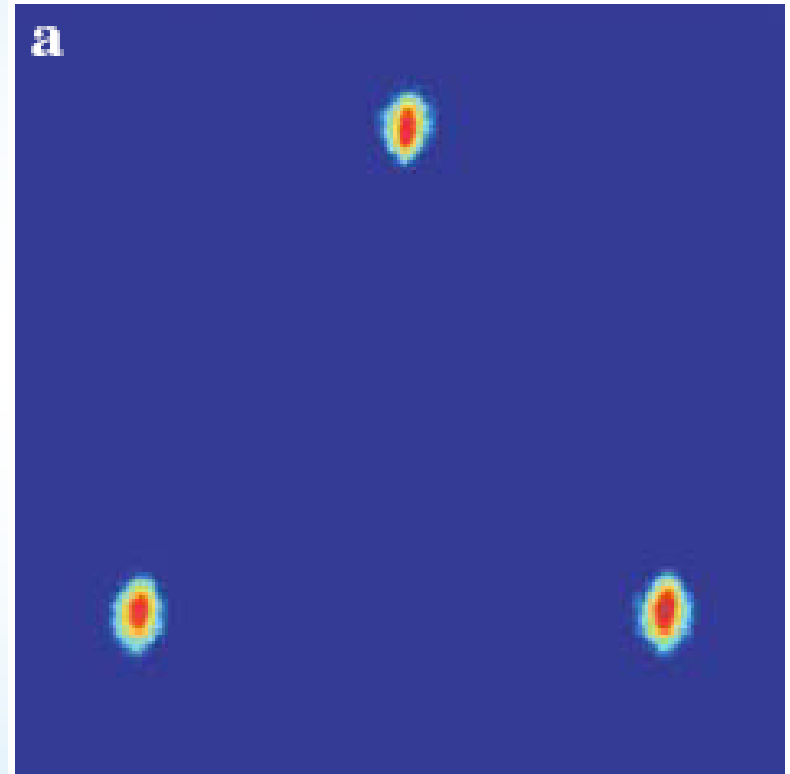
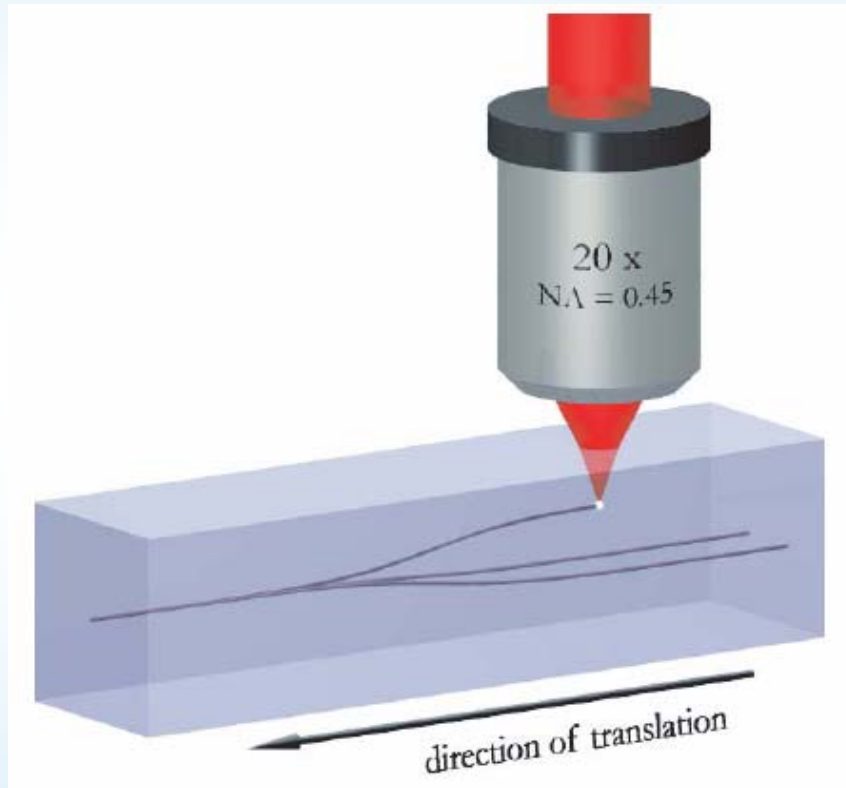
550 μJ

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

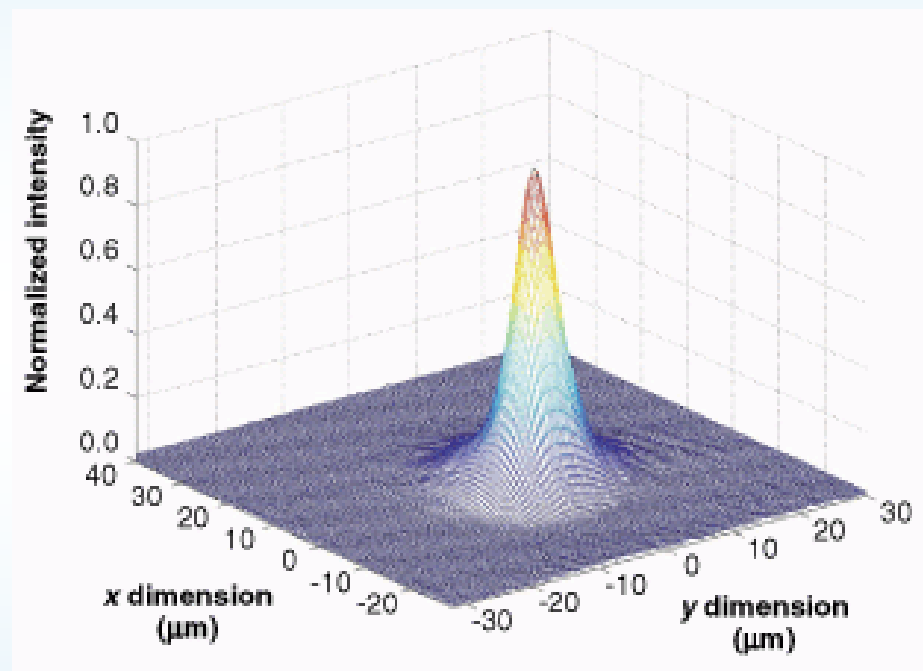
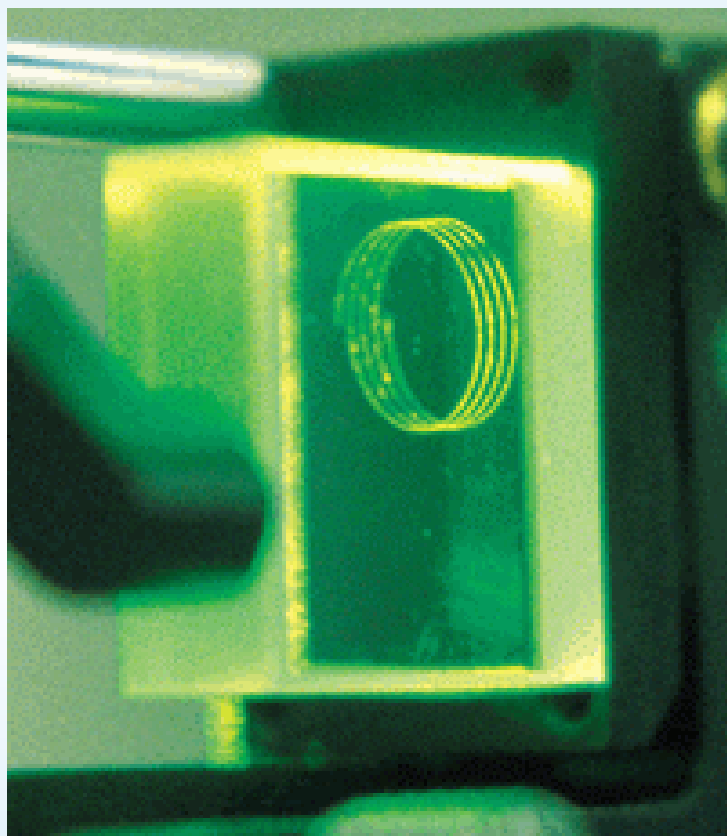
1. Fokusuojant 800 nm bangos ilgio 1 kHz pasikartojimo dažnio ir 130 fs trukmės impulsus į ~4 cm ilgio kvarcinį stiklą, buvo stebėtas ilgų (ilgesnių už 1 cm) šviesos gijų susidarymas ir jų lydinti intensyvi superkontinuumo generacija.
2. Iš impulsų autokoreliacinių funkcijų nustatyta, kad netiesinio sklidimo metu vyksta impulsų skilimas.
3. Tiriant pažeidimų formavimąsi, nustatyta, kad pažeidimai formuojasi šviesos gijos gale, kur pluošto diametras minimalus; pažeidimų formą ir dydį apsprendžia lazerio impulso energija.
4. Pažeidimų atsiradimą bandinyje nulemia susikaupimo efektai ir impulsų energija.

Femtosekundinių technologijų taikymai

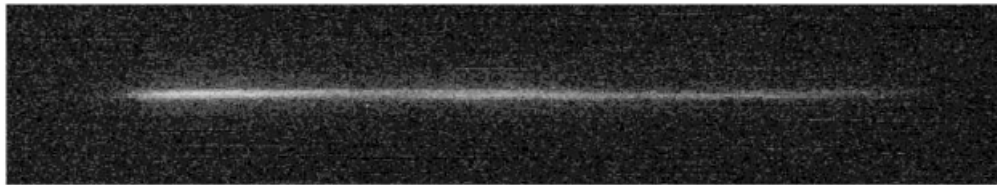
Šviesolaidžių įrašymas skaidrios medžiagos tūryje



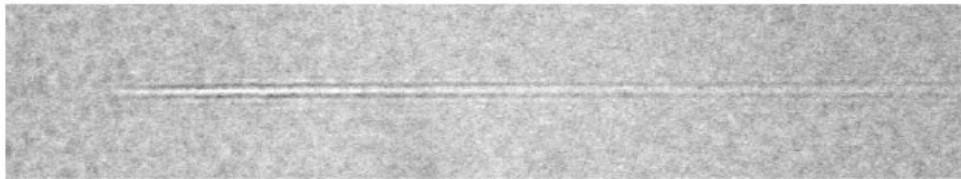
Šviesolaidis stiklo tūryje



Šviesos gija ir jos indukuotas šviesolaidis kvarciniame stikle

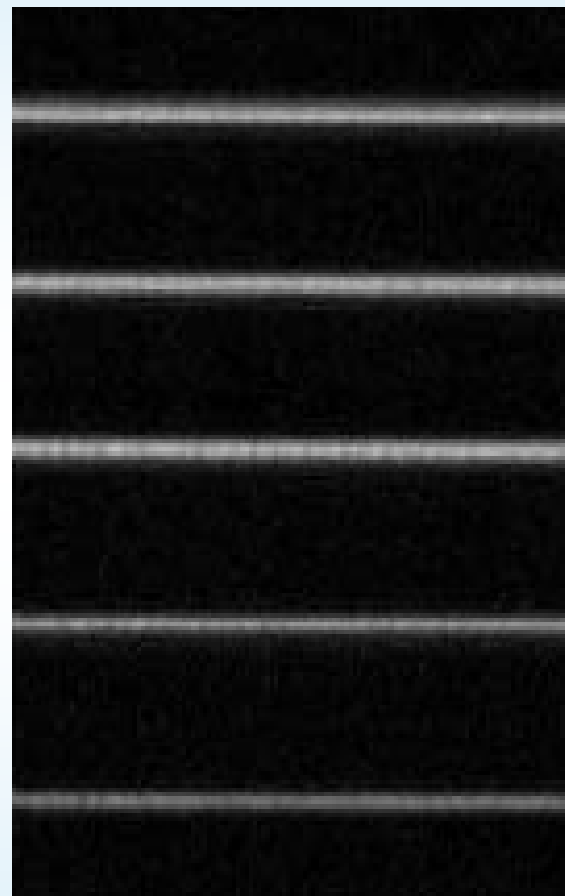
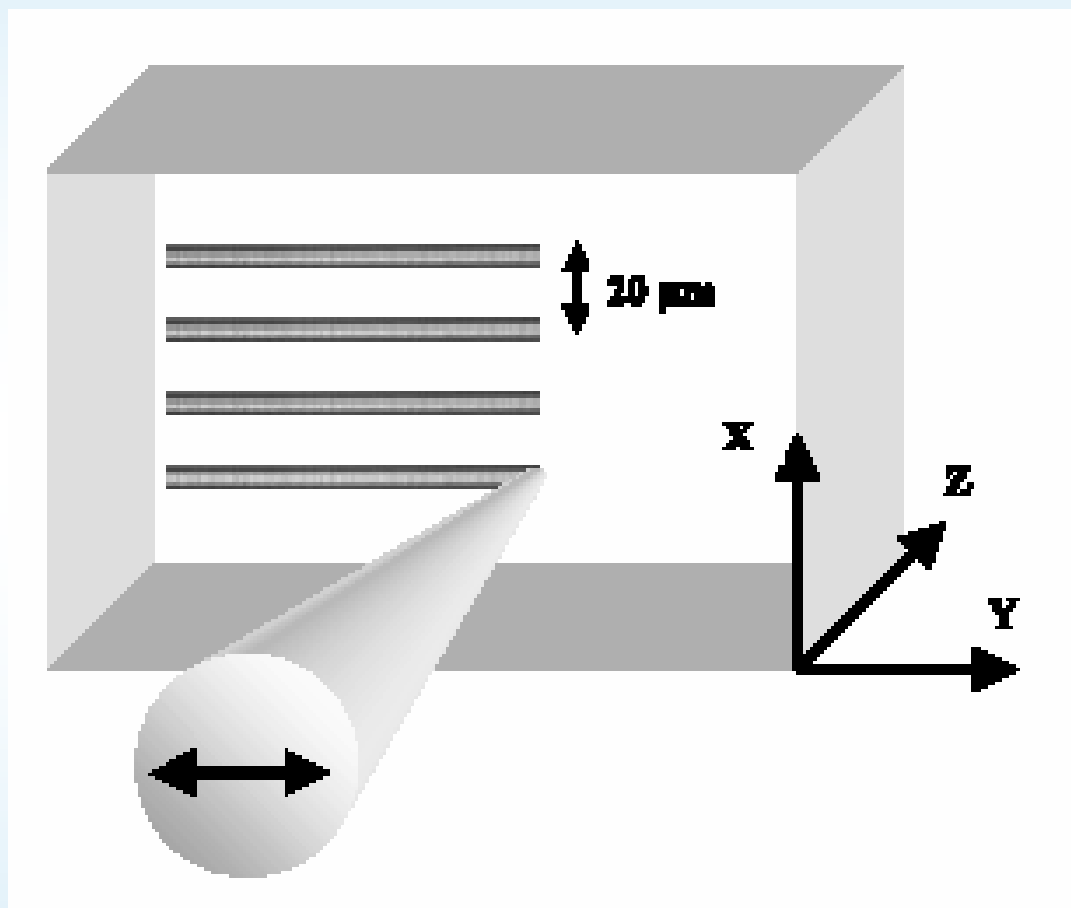


←→ 200 μm



←→ 200 μm

Tūrinė difrakcinė gardelė



Tūrinis duomenų įrašymas

□ 10^{13} bitų/cm³

