Elektronų įgreitėjimo stipriame elektriniame lauke įtaka fotolaidžios terahercų antenos savybėms

Gediminas Šlekas

2019 05 07

VGTU

Matematinio Modeliavimo Katedros seminaras

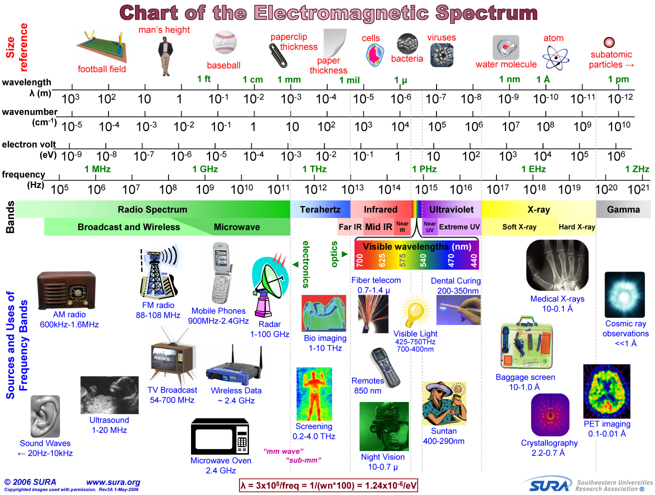
Padėka

Podoktorantūros stažuotė finansuojama **Europos socialinio fondo** lėšomis pagal priemonę "Mokslininkų, kitų tyrėjų, studentų mokslinės kompetencijos ugdymas per praktinę mokslinę veiklą". Projekto Nr. 9.3.3-LMT-K-712-02-0037.

Planas

1. Terahercų spinduliuotė
2. Fotolaidi THz antena
3. Matematiniai–fizikiniai modeliai
4. Sprendimo metodai
5. Modelių palyginimas

Elektromagnetinių bangų spektras



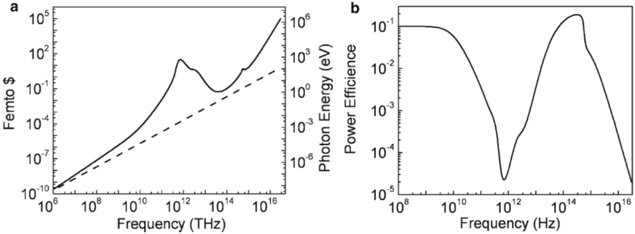
Terahercų savybės

- Mažas bangos ilgis (0.1 mm – 1 mm)
- Nejonizuoja medžiagos atomų
- Stipriai absorbuojami vandens garų
- Sąveikauja su molekulių rotaciniais ir vibraciniais spektrais
- Gerai sklinda per dielektrikus

THz panaudojimas

- Skenavimui per drabužius ar įpakavimus
- Defektų nustatymui
- Medicininei diagnostikai
- Cheminių medžiagų aptikimui
- Puslaidininkių savybių tyrimui
- Telekomunikacijai

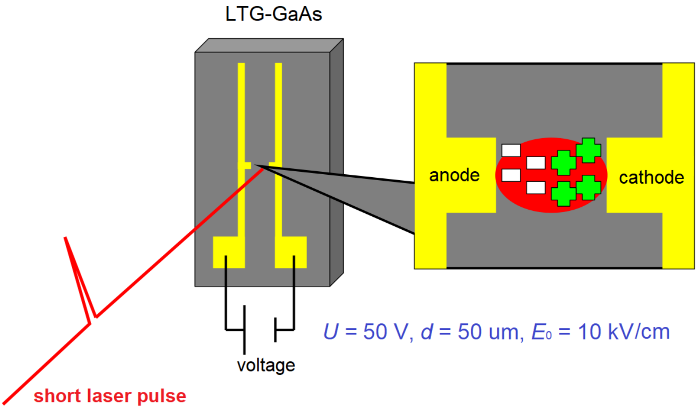
Panaudojimo problemos



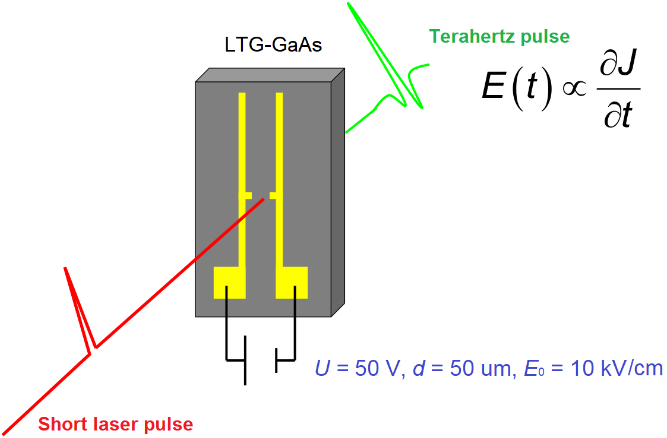
X.-C. Zhang, Jingzhou Xu, Introduction to THz Wave Photonics, Springer 2010.

- Žemas antenų efektyvumas
- Stipri absorbcija atmosferoje
- Ribotas supratimas apie THz generavimo procesą
- Tikslių antenų teorinių modelių trūkumas

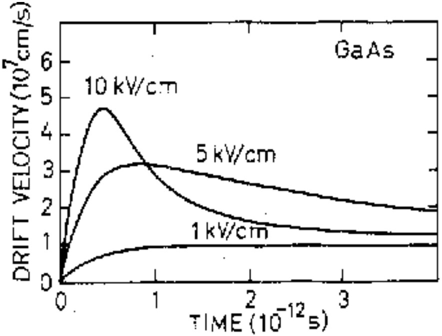
Fotolaidi antena



Veikimo principas

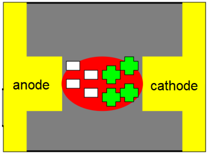


Elektronų įgreitėjimas stipriame elektriniame lauke

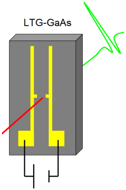


S. Teitel, J. Wilkins, Ballistic transport and velocity overshoot in semiconductors: Part I; Uniform field effects, IEEE Transactions on Electron Devices, 1983.

Multifizika



Boltzman'o kinetinė lygtis



Maxwell'o lygtys

$$n := n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \boldsymbol{\nabla} n + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial n}{\partial \mathbf{p}} = \mathrm{S}(n)$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = -\frac{e}{m} \int \mathbf{p}\, n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \mathrm{d}\mathbf{p}.$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} [\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{H} - \mathbf{j}]$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{E}$$

Du sprendimo būdai

1. Deterministiniai modeliai
    - paremti diferencialinėmis lygtimis
    - BKL aproksimacijos
    - nežinomieji - būsenų tankio funkcijos momentai
    - sumažinta uždavinio dimensija
    - mažiau kompiuterio resursų
    - lygtyse yra nežinomų parametrų
2. Monte Carlo metodas
    - stochastinis
    - modeliuojamas dalelių ansamblis
    - įskaitomi pagrindiniai sklaidos mechanizmai
    - koordinatės, impulso ir energijos kitimas laike
    - tiksliausias metodas
    - reiklus kompiuterio resursams

Bolcmann'o kinetinės lygties momentai

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\mathbf{k}}{m} \cdot \nabla n + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial n}{\partial \mathbf{k}} = \mathrm{S}(n)$$

$$n(\mathbf{r}, t) = \int n(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)\, \mathrm{d}\mathbf{k}$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{m} \int \mathbf{k} n(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)\, \mathrm{d}\mathbf{k}$$

$$\epsilon(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2m} \int \mathbf{k}^2 n(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)\, \mathrm{d}\mathbf{k}$$

Dreifo-difuzijos modelis

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{e}\frac{\partial \mathrm{j}(x,t)}{\partial x} + \frac{\alpha\kappa I(x,t)}{\hbar\omega} - \frac{n(x,t)}{\tau_r},$$

$$\mathrm{j}(x,t) = e\mu\,\mathrm{E}_0 n(x,t) + eD_n\frac{\partial n(x,t)}{\partial x}.$$

Normuoti dydžiai

$$I' = \frac{I}{I_0},$$
$$n' = \frac{n}{n_0},$$
$$j' = \frac{j}{j_0},$$

kur

$$E_0 = \frac{U_0}{d},$$
$$n_0 = \frac{\alpha\kappa I_0 \tau_r}{\hbar\omega},$$
$$j_0 = e\mu n_0 \mathrm{E}_0.$$

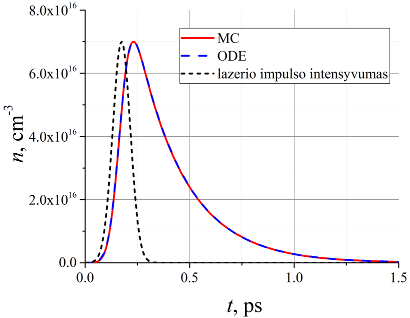
Normuotos lygtys pagal parametrus LTG-GaAs

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = 1 \times 10^{-3} \cdot \frac{\partial \mathrm{j}(x,t)}{\partial x} + I(x,t) - n(x,t),$$

$$\mathrm{j}(x,t) = n(x,t)\,\mathrm{E}_0 + 5 \times 10^{-4} \cdot \frac{\partial n(x,t)}{\partial x}.$$

Homogeniškos relaksacijos modelis (ODE)

$$\frac{\partial n(t)}{\partial t} = I(t) - n(t),$$
$$\mathrm{j}(t) = e\mu \mathrm{E}_0 n(t).$$



Monte Carlo metodas. BKL sklaidos narys

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla n + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial n}{\partial \mathbf{p}} = \mathrm{S}(n)$$

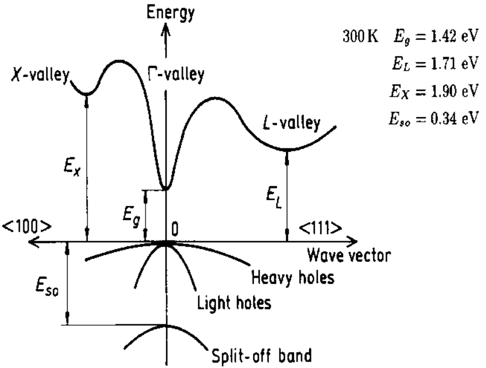
$$\mathrm{S}(n) = \int_{\mathbf{k}'} \left[n(\mathbf{r}, \mathbf{k}', t) P(\mathbf{k}', \mathbf{k}) - n(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t) P(\mathbf{k}, \mathbf{k}') \right] d^3\mathbf{k}' d^3\mathbf{k}$$

$P(\mathbf{k}, \mathbf{k}')d^3\mathbf{k}'dt$ dalelės sklaidos tikimybė iš būsenos su impulsu $\mathbf{p}$ į būseną su impulsu $\mathbf{p}'$.

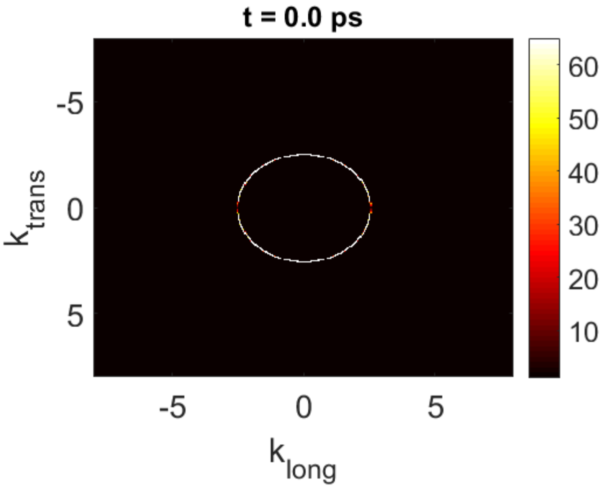
Dominuojantys sklaidos mechanizmai LTG-GaAs

- Jonizuotos priemaišos
- Deformaciniai akustiniai fononai
- Poliariniai optiniai fononai
- Tarpslėninė sklaida

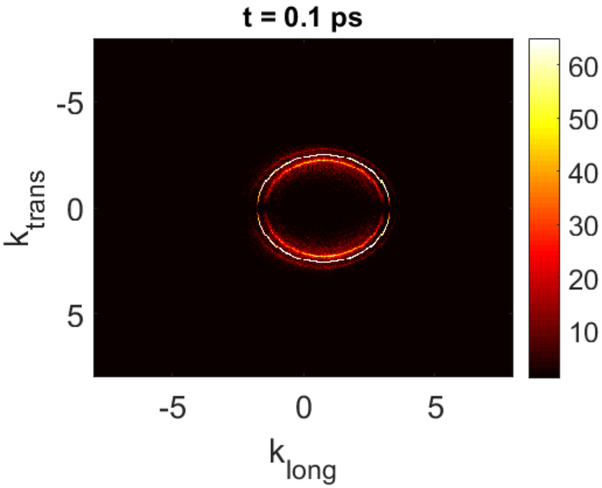
GaAs energetinių zonų struktūra



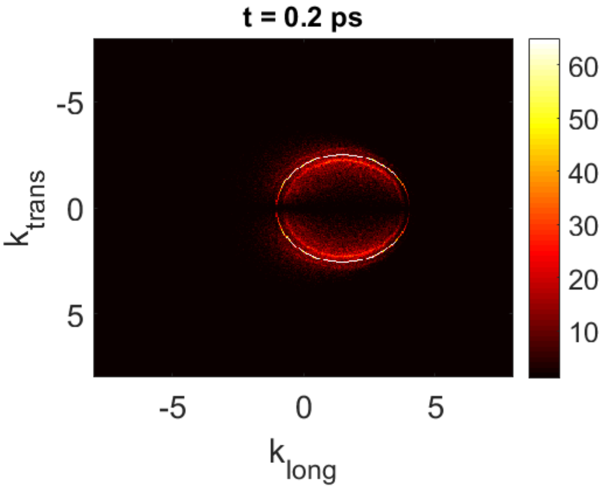
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



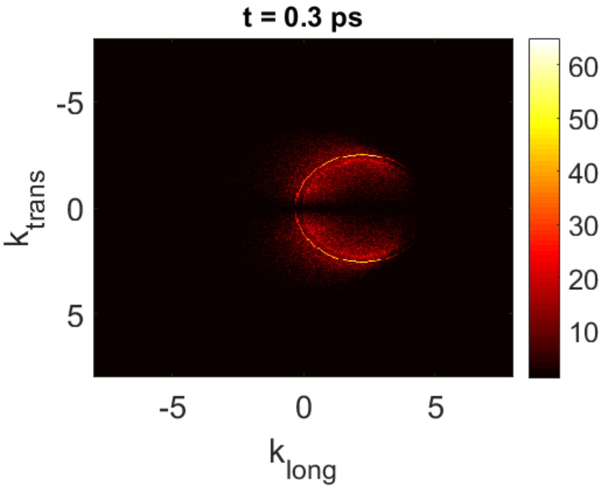
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



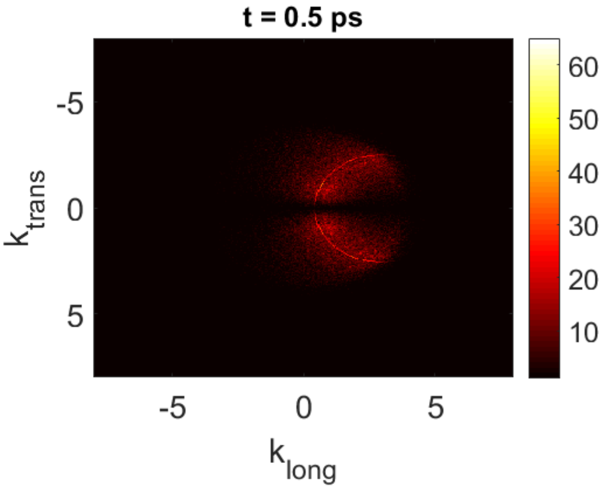
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



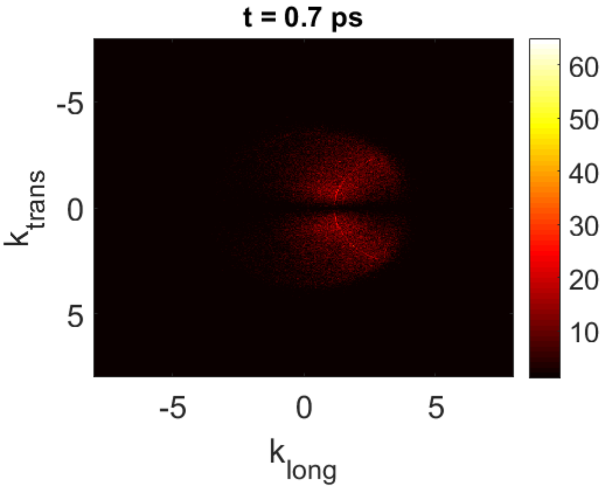
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



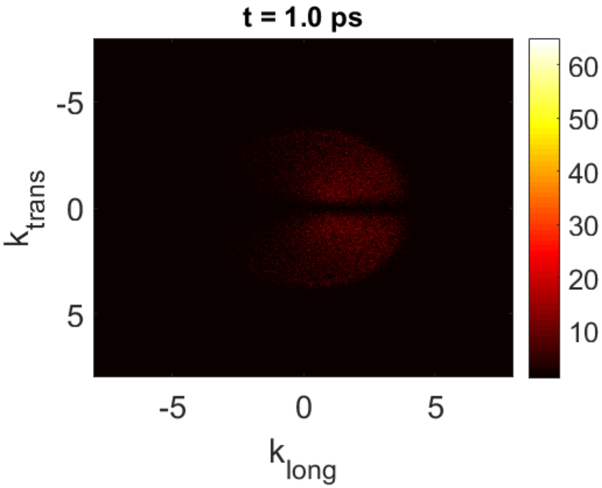
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



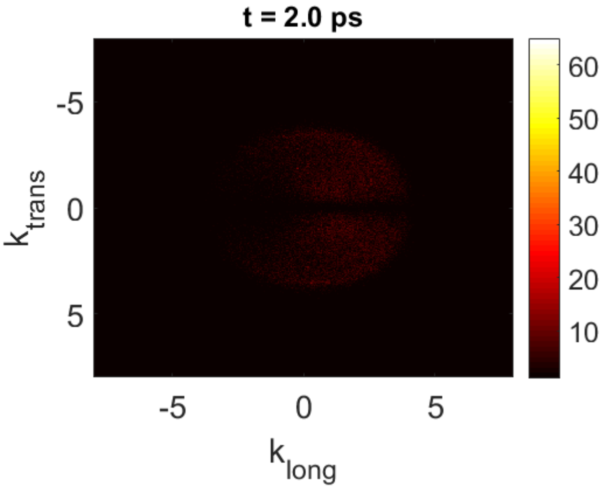
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



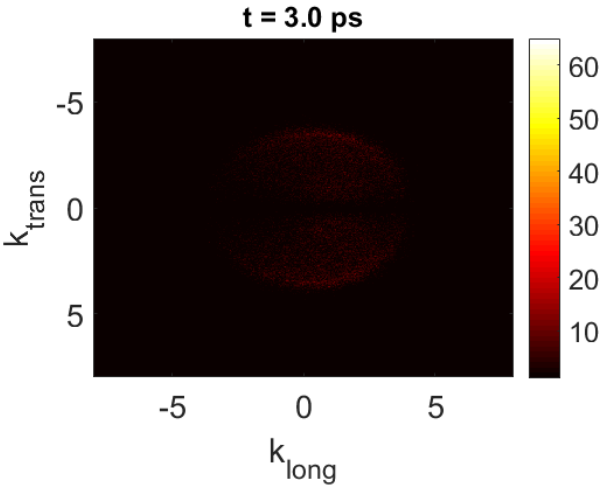
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



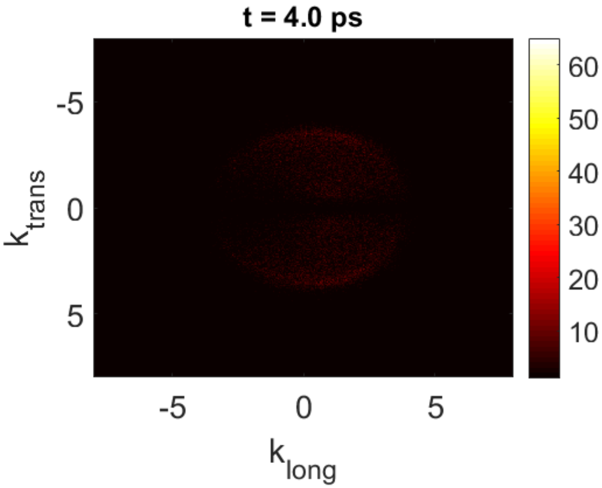
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



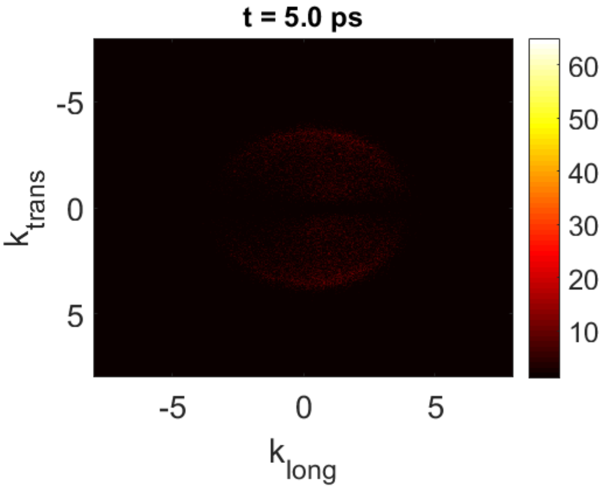
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



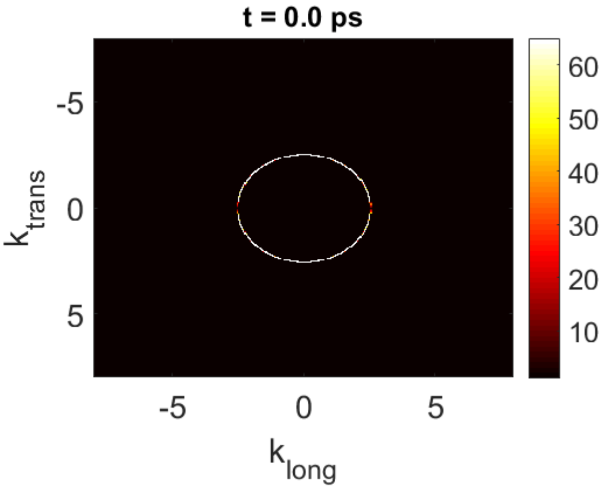
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



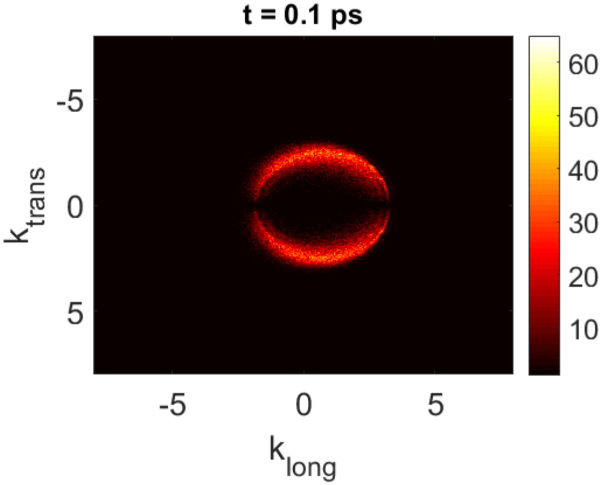
Elektronų dinamika be jonizuotų priemaišų



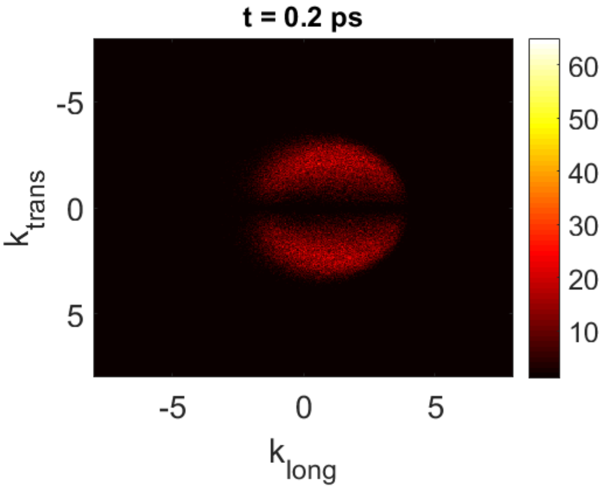
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



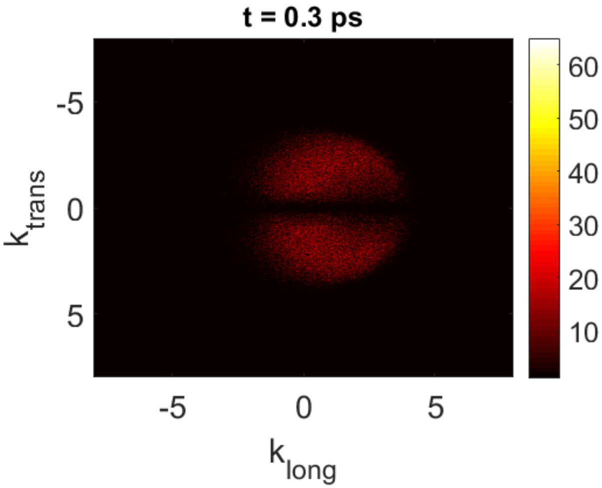
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



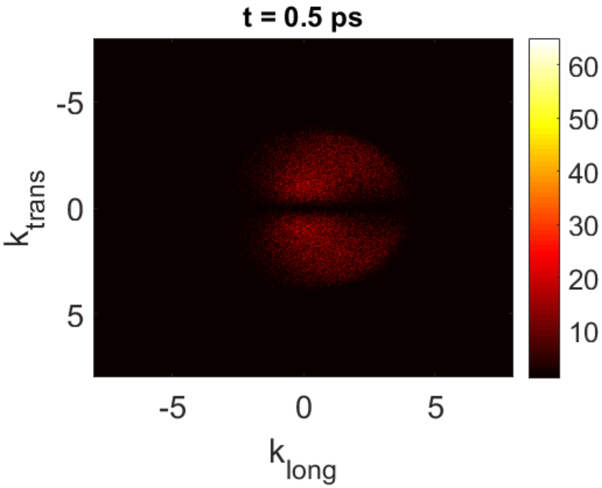
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



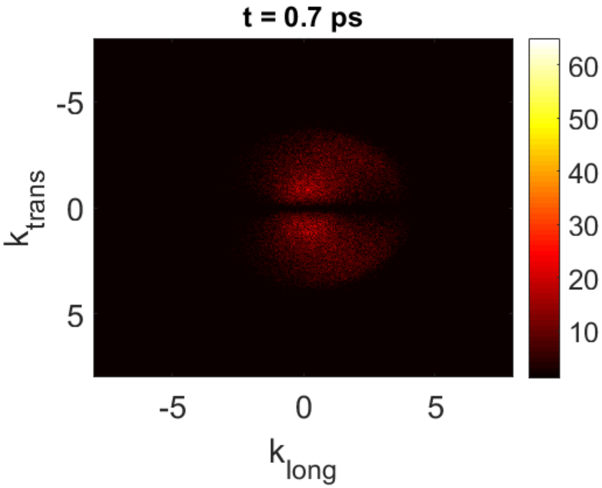
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



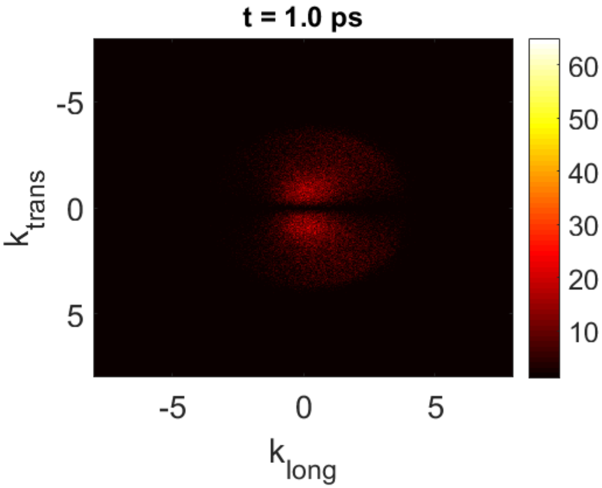
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



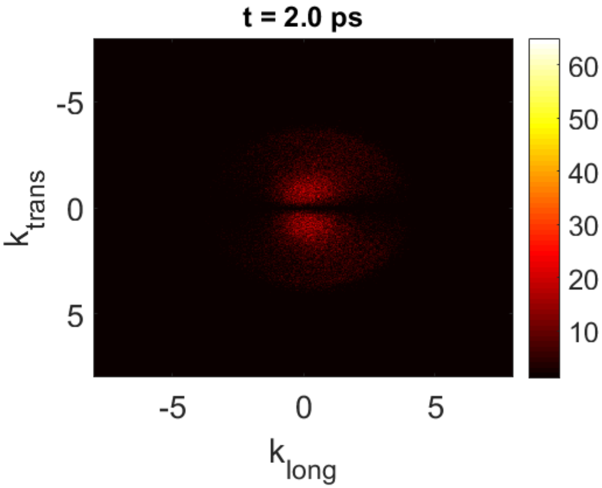
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



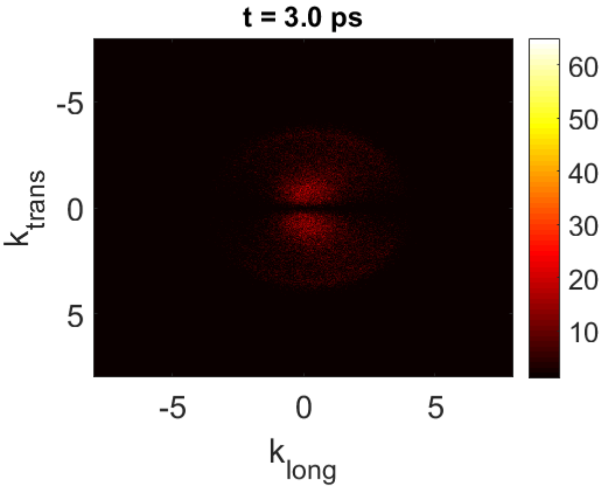
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



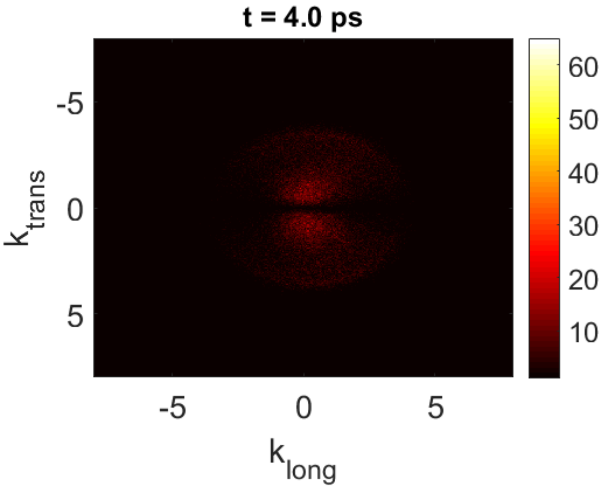
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



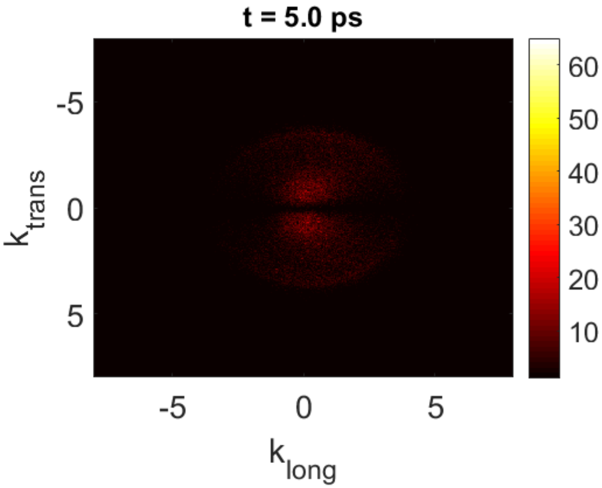
Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



Elektronų dinamika su jonizuotomis priemaišomis



Srovės tankio skaičiavimas

Kiekviena dalelė turi:

- Koordinatę
- Impulsą
- Energiją

$$v_{drift}(x,t) = \frac{1}{N}\sum_i \mathbf{v_i}(x,t)\cdot \mathbf{x_0}$$

$$j_{MC} = e\, v_{drift}(x,t)\, n(x,t)$$

$$j_{DD} = e\mu \mathrm{E}_0\, n(t)$$

Modelių parametrai

$$j_{MC} = e\, v_{drift}(x,t)\, n(x,t)$$
$$j_{DD} = e\mu \mathrm{E}_0\, n(t)$$

1. Monte Carlo
   - N_i — jonizuotų priemaišų koncentracija
   - τ — elektronų rekombinacijos laikas
2. ODE
   - μ — elektronų judris
   - τ — elektronų rekombinacijos laikas

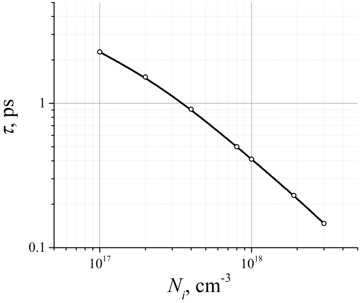
Rekombinacijos laikas LTG-GaAs

$$\tau = \frac{1}{\sigma_n N_D \nu_{th}},$$

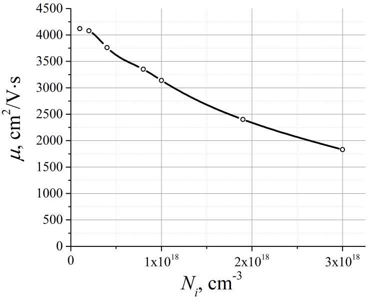
$\sigma_n = 1.1 \cdot 10^{-13}$ cm^2 — elektronų pagavimo skerspjūvis Be legiruotame LTG-GaAs
N_D — Be koncentracija
$\nu_{th} = 4 \cdot 10^9$ cm^2 — elektronų šiluminis greitis.

$$N_i = (N_D + N_A),$$
$$N_e = (N_D - N_A) = 10^{17}\mathrm{cm}^{-3}.$$

MC ir ODE parametrų sąryšis

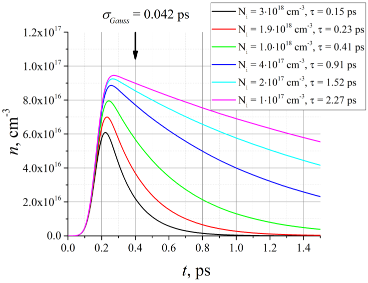


Rekombinacijos laiko priklausomybė nuo jonizuotų priem. koncentracijos

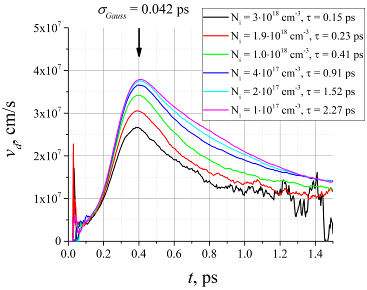


Pritaikyta elektronų judrio vertė

Fotosužadintų elektronų dinamika

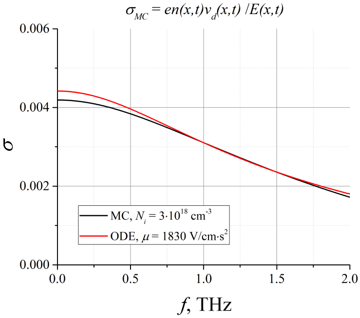


Elektronų koncentracijos kitimas laike

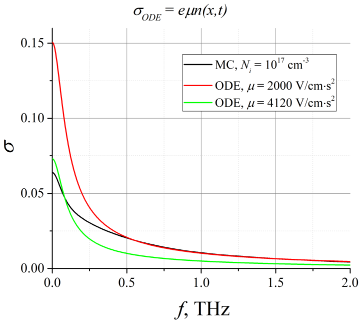


Dreifinio greičio kitimas laike

Elektronų judrio priderinimas

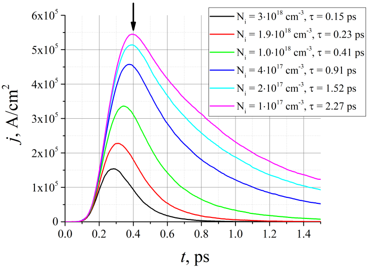


Daug jonizuotų priemaišų

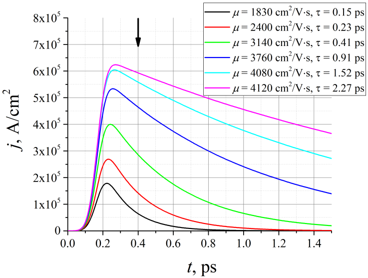


Mažai jonizuotų priemaišų

Fotosrovė

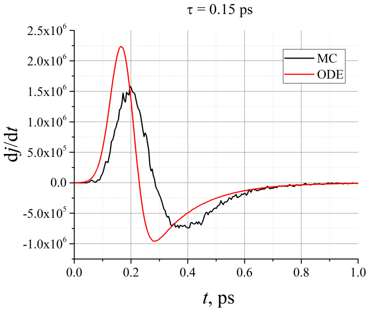


Fotosrovė pagal MC modelį

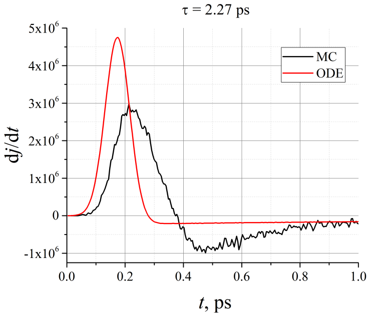


Fotosrovė pagal ODE modelį

Fotosrovės išvestinė

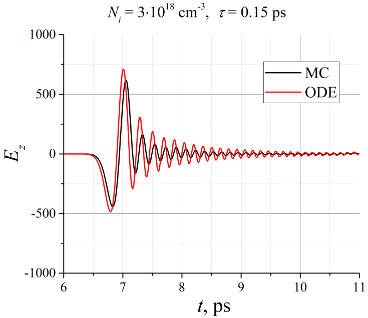


Greita rekombinacija $\tau = 0.15$ ps

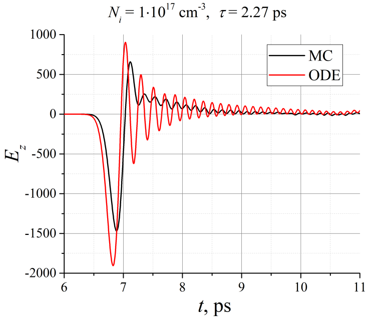


Greita rekombinacija $\tau = 2.23$ ps

THz impulsas

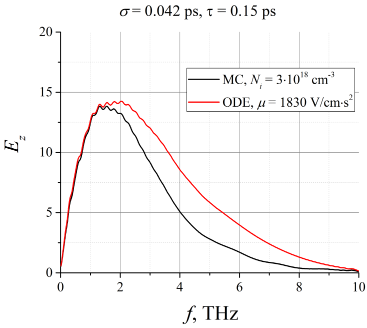


THz impulsas kai **daug** jon. priem. ($\tau = 0.15$ ps)

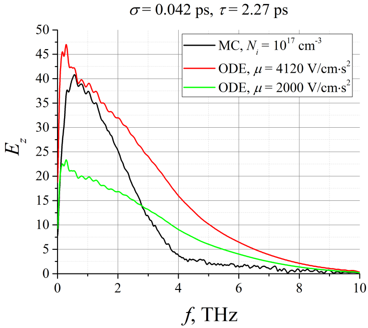


THz impulsas kai **mažai** jon. priem. ($\tau = 2.27$ ps)

THz impulso spektras

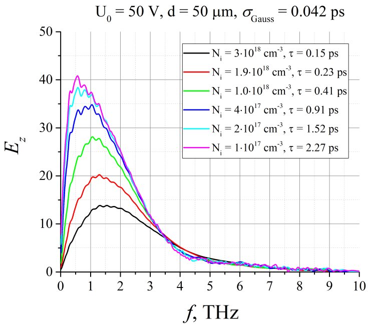


Daug jonizuotų priemaišų
greita rekombinacija

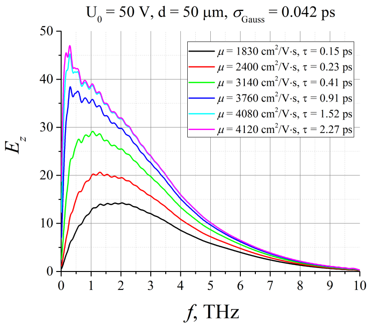


Mažai jonizuotų priemaišų
lėta rekombinacija

THz spektrų palyginimas

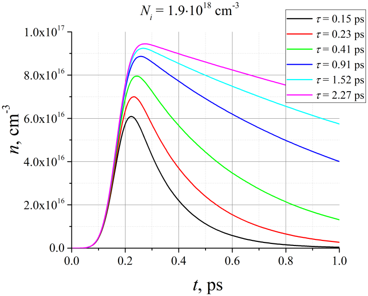


THz spektrai pagal MC modelį

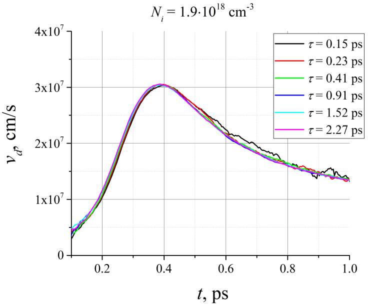


THz spektrai pagal ODE modelį

Tyrimas nuo elektronų rekombinacijos laiko τ

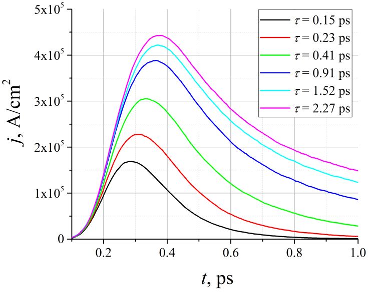


Elektronų koncentracijos kitimas laike

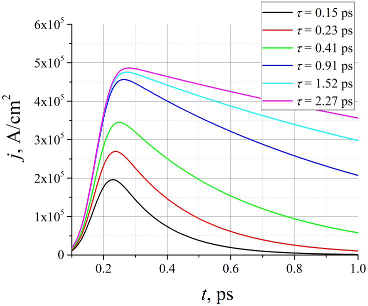


Dreifinio greičio kitimas laike

Fotosrovė

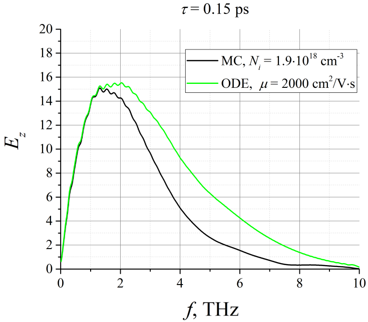


Fotosrovė pagal MC modelį

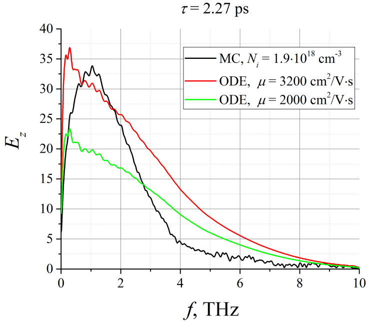


Fotosrovė pagal ODE modelį

THz spektrai

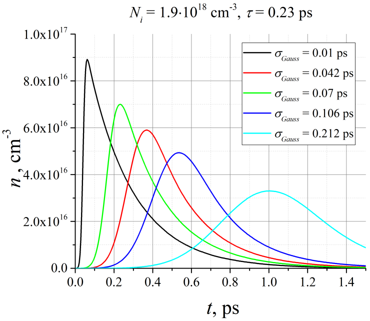


Greita rekombinacija

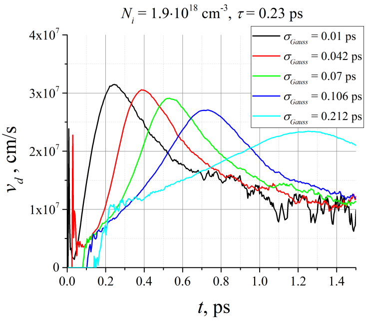


Lėta rekombinacija

Fotosužadintų elektronų dinamika prie skirtingos lazerio impulso trukmės

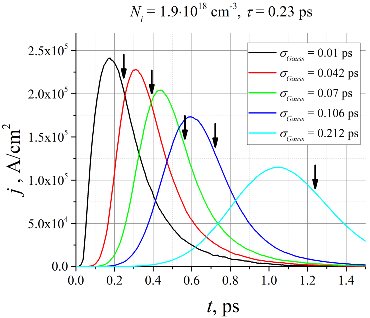


Elektronų koncentracijos kitimas laike

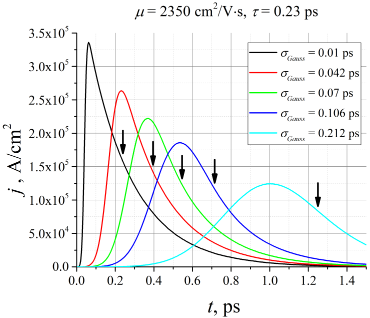


Dreifinio greičio kitimas laike

Fotosrovė

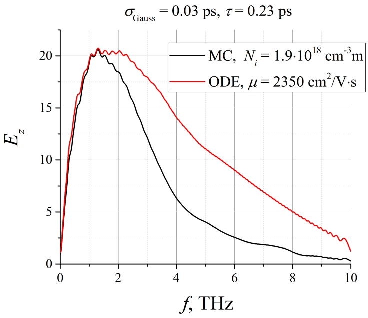


Fotosrovė pagal MC modelį

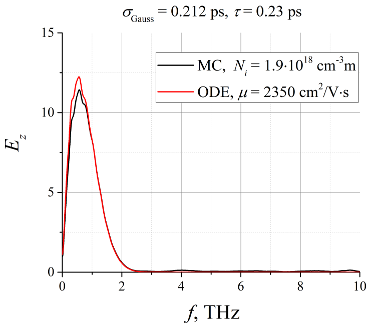


Fotosrovė pagal ODE modelį

THz spektrų palyginimas

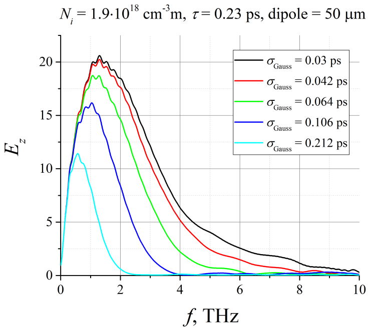


Trumpo impulso THz spektras

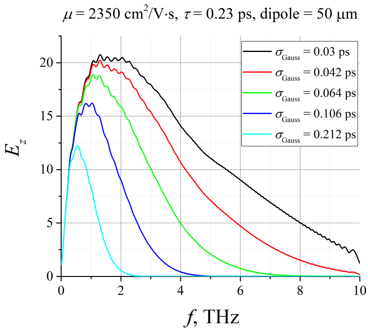


Ilgo impulso THz spektras

THz spektrai



THz spektrai pagal MC modelį



THz spektrai pagal ODE modelį

Išvados

- ODE modelis prognozuoja platesnį THz impulso spektrą aukštuose dažniuose
- ODE modelio tikslumas mažėja:
  - Mažėjant jonizuotų priemaišų koncentracijai
  - Ilgėjant elektronų rekombinacijos trukmei
  - Trumpėjant lazerio impulsui
- Esant greitai rekombinacijai THz impulso spektras žemuose dažniuose ODE ir MC modeliuose sutampa
- ODE modelį tam tikrais atvejais galima naudoti THz antenos optimizavimui

Dėkoju už dėmesį!