

Foto-laidžių terahercų antenų fizikinių modelių hierarchija

Gediminas Šlekas, Raimondas Čiegis

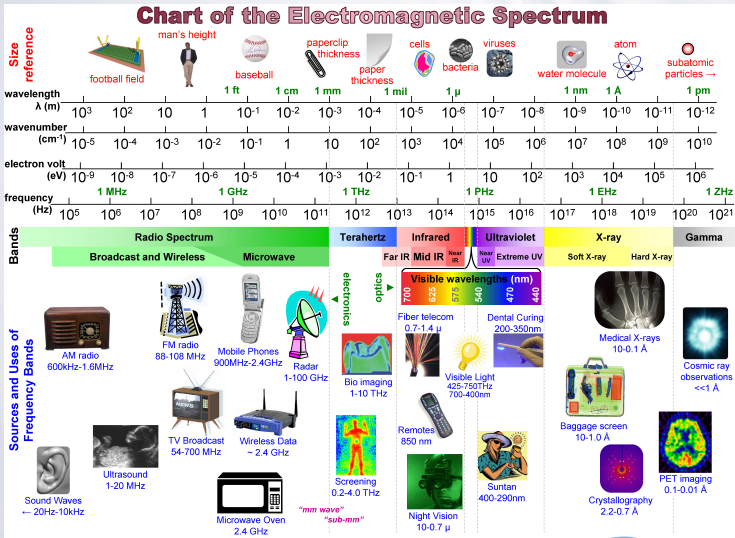
20-oji MMK jaunųjų mokslininkų konferencija

2018 m. balandžio 13 d.

Pranešimo planas

1. Terahercų spinduliuotė
2. Foto-laidžios antenos veikimas
3. Foto-sužadintų krūvininkų dinamikos modeliai
4. Numatyti darbai

EM spektras



© 2006 SURA www.sura.org
Copyrighted images used with permission. Rev.26 1 May 2006

$$\lambda = 3 \times 10^8 / \text{freq} = 1 / (\text{wn} \times 100) = 1.24 \times 10^{-6} / \text{eV}$$

THz spinduliuotės savybės

- Nedidelis bangos ilgis
- Nejonizuoja medžiagos atomų
- Absorbuojami drėgmės
- Sklinda per dielektrikus

THz spinduliuotės taikymai

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

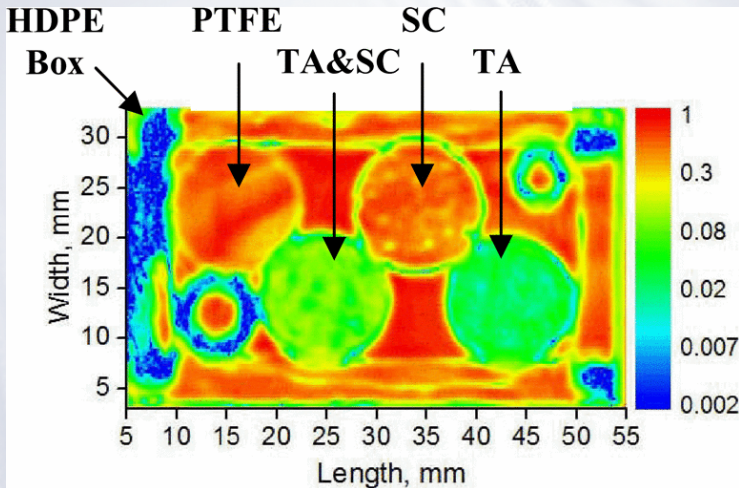
Skenuoti vaizdai



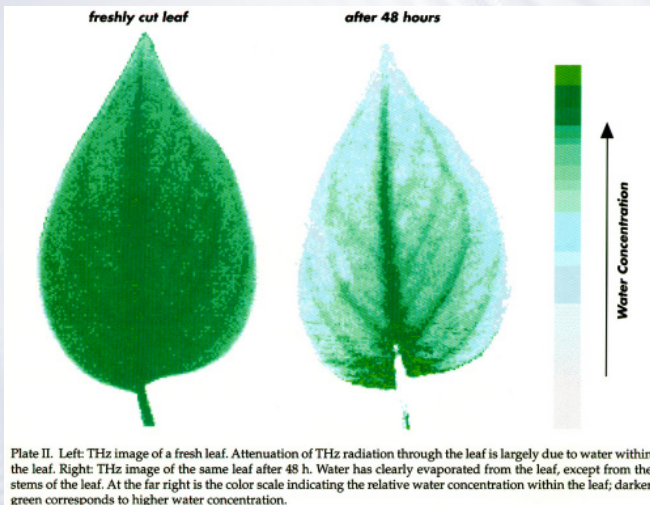
Skenuoti vaizdai



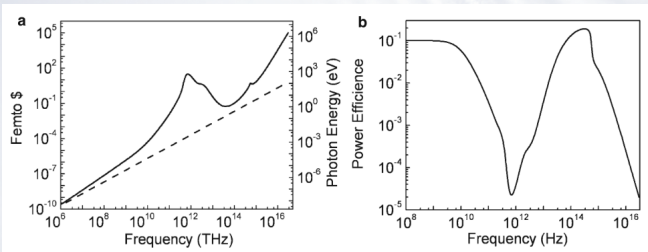
Skenuoti vaizdai



Skenuoti vaizdai



Ribotas panaudojimas



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

- Žemas antenų ir detektorių efektyvumas
- THz spinduliuotės absorbcija ore
- Tikslių matematinų modelių trūkumas

Foto-laidžios THz antenos veikimo principas

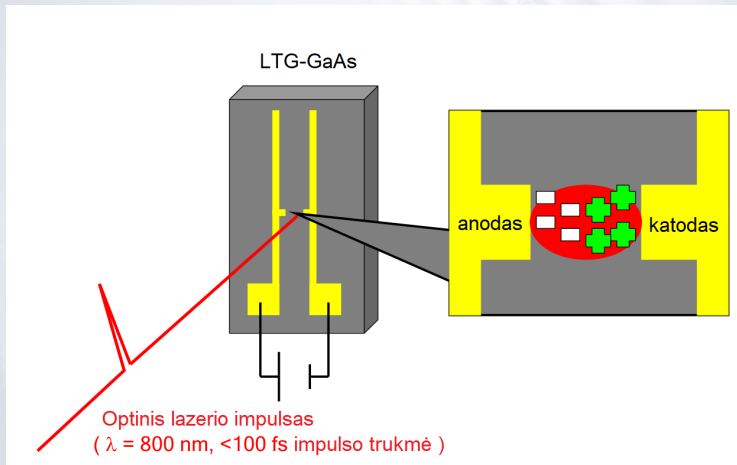
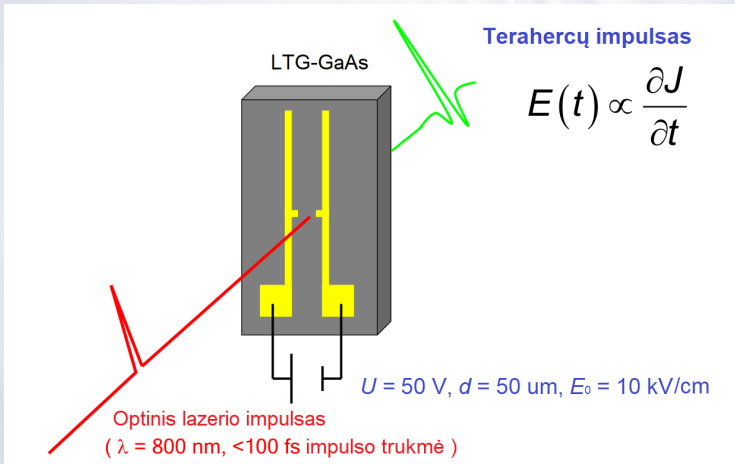
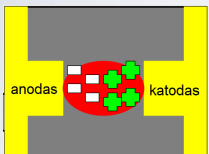


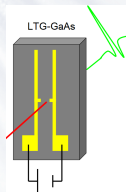
Foto-laidžios THz antenos veikimo principas



Multi-fizika



Bolcmano kinetinė lygtis



Maksvelo lygtys

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

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

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

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

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

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -e \int n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}$$

Bolcmano kinetinė lygtis

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

$$\frac{dn}{dt} = S(n)$$

$$dn = \frac{\partial n}{\partial t} dt + \nabla n \cdot d\mathbf{r} + \frac{\partial n}{\partial \mathbf{p}} \cdot d\mathbf{p}$$

$$dn = \frac{\partial n}{\partial t} dt + \nabla n \cdot \mathbf{v} dt + \frac{\partial n}{\partial \mathbf{p}} \cdot \mathbf{F} dt$$

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

Skaidos narys

Kai dalelės sąveikauja tik susidūrimų metu, ir susidūrimai yra nepriklausomi įvykiai:

$$S(n) = \int_{\mathbf{p}'} [n(\mathbf{r}, \mathbf{p}', t) W(\mathbf{p}', \mathbf{p}) - n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) W(\mathbf{p}, \mathbf{p}')] d^3 \mathbf{p}'$$

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

BGK (*Bhatnagar–Gross–Krook*) aproksimacija

Sutrikdytos sistemos būsenos funkcija:

$$n = n_0 + n_1$$

Taylor'o eilutės pirmas n_1 laipsnis:

$$S(n) \approx -\nu n_1 = -\frac{n_1}{\tau}$$

$\nu = \tau^{-1}$ – susidūrimų dažnis

τ – relaksacijos laikas

Negalioja, kai sklaida neelastinė

Homogeniškos relaksacijos modelis

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla n + e\mathbf{E} \cdot \frac{\partial n}{\partial \mathbf{p}} = S(n)$$
$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\alpha I(t)}{\hbar\omega} - \frac{n(t)}{\tau_r}$$

n – foto-sužadintų elektronų būsenų tankio funkcija

α – optinės absorbcijos koeficientas

$I(t)$ – optinio impulso intensyvumas

$\hbar\omega$ – optinio kvanto energija

τ_r – elektronų rekombinacijos trukmė

Dreifo-difuzijos modelis

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

$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \frac{\alpha I(\mathbf{r}, t)}{\hbar\omega} - \frac{n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)}{\tau_r}$$

$$\int_{\mathbf{p}} \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p} = \frac{1}{e} \nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \approx e n(\mathbf{r}, t) \mathbf{v}_{\text{drift}}(\mathbf{r}, t) + e D_n \nabla n(\mathbf{r}, t)$$

$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot [\mu(n) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) n(\mathbf{r}, t)] + D_n \nabla^2 n(\mathbf{r}, t) + \frac{\alpha I(\mathbf{r}, t)}{\hbar\omega} - \frac{n(\mathbf{r}, t)}{\tau_r(\epsilon)}$$

DD + Maxwell + Poisson

$$\mathbf{J}_n = e\mu_n n_n (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}) + eD_n \nabla n_n$$

$$\mathbf{J}_p = -e\mu_p n_p (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}) + eD_p \nabla n_p$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} = \frac{1}{e} \nabla \cdot \mathbf{J}_n + \frac{\alpha I(x, t)}{\hbar \omega} - \frac{n_n}{\tau_r}$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{1}{e} \nabla \cdot \mathbf{J}_p + \frac{\alpha I(x, t)}{\hbar \omega} - \frac{n_p}{\tau_r}$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{e(n_n - n_p)}{\varepsilon}$$

$$\mathbf{E}_0 = -\nabla \phi$$

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

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H} - \mathbf{J}_n - \mathbf{J}_p$$

1D dreifo-difuzijos modelis

$$\mathbf{J}_n \approx e\mu_n n_n \mathbf{E} + eD_n \frac{\partial n_n}{\partial x}$$

$$\mathbf{J}_p \approx 0$$

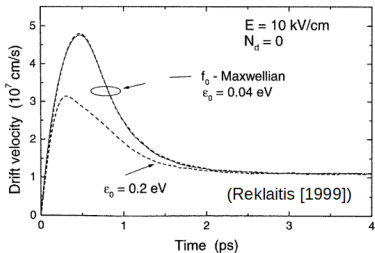
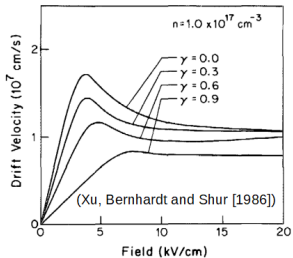
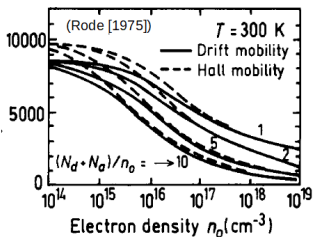
$$\frac{\partial n_n}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial \mathbf{J}_n}{\partial x} + \frac{\alpha I(x, t)}{\hbar\omega} - \frac{n_n}{\tau_r}$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{\alpha I(x, t)}{\hbar\omega} - \frac{n_p}{\tau_r}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{e(n_n - n_p)}{\epsilon}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$$

Dreifinis greitis ir judris



Lokalaus energijos balanso modelis

$$\mathbf{J} = e(n\mu\mathbf{E} + D\nabla n + nD_T\nabla T_n)$$

Lokalaus energijos balanso lygtis:

$$T_n = T_L + \frac{2}{3} \frac{q}{k_B} \tau_{\epsilon} \mu \mathbf{E}^2 = T_L \left(1 + \left(\frac{E}{E_c} \right)^2 \right), \quad E_c \approx 10 \text{ kV/cm}$$

Aukšto dažnio elektriniame lauke tarp elektronų energijos ir elektrinio lauko atsiranda fazių skirtumas

Būsenų tankio funkcijos momentai

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

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

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

$$W(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2m} \int \mathbf{p}^2 n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}$$

Hidrodinaminiai modeliai

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} n) = \frac{\alpha I(t)}{\hbar \omega} - \frac{n}{\tau_r}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{p}) - en\mathbf{E} + \nabla(nkT) = -\frac{\mathbf{p}}{\tau_p}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} W) - en(\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}) + \nabla \cdot (\mathbf{v} nkT) + \nabla \cdot \mathbf{q} = -\frac{W}{\tau_W}$$

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T$$

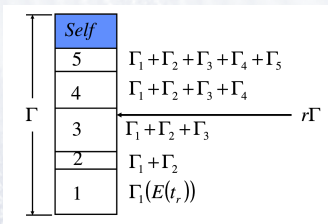
$$\mathbf{p} = mn\mathbf{v}$$

$$W = \frac{3}{2} nkT + \frac{m}{2} n\mathbf{v}^2$$

Monte Carlo metodas

$$\frac{dn}{dt} = S(n) = \int_{\mathbf{p}'} [n(\mathbf{r}, \mathbf{p}', t) W(\mathbf{p}', \mathbf{p}) - n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) W(\mathbf{p}, \mathbf{p}')] d^3 \mathbf{p}'$$

$$dn(x, \mathbf{p}, t) \approx I(x, t) d - n(x, \mathbf{p}, t) \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_4} + \frac{1}{\tau_5} \right) dt$$



Numatyti darbai

- Sukurti skaitmeninius įrankius THz antenų modeliavimui
- Palyginti Bolcmano kinetinės lygties aproksimacijas
- Nustatyti aproksimacijomis pagrįstų modelių panaudojimo ribas
- Pasiūlyti modelių patobulinimus
- Atlikti THz antenos parametų optimizavimą

Dėkoju už dėmesį