

# Terahercinių impulsų žadinimo puslaidininkiuose spektroskopija

## Terahertz pulse excitation spectroscopy of semiconductors

Arūnas Krotkus

Fizinių ir technologijos mokslų centras, Saulėtekio al. 3, 02300 Vilnius  
[arunas.krotkus@ftmc.lt](mailto:arunas.krotkus@ftmc.lt)

Apšvietus puslaidininkio paviršių femtosekundinio lazerio pluošteliu jame yra generuojamas terahercinės (THz) dažnių srities spinduliuotės impulsas [1]. Kuomet lazerio bangos ilgis patenka į puslaidininkio optinės sugerties sritį, THz spinduliuotė atsiranda dėl laike kintančio elektrinio dipolio. Savo ruožtu, šis dipolis atsiranda, kai veikiant vidiniam elektros laukui arba dėl skirtingų judėjimo greičių erdvėje persiskiria šviesos sužadintieji elektronai ir skylės.

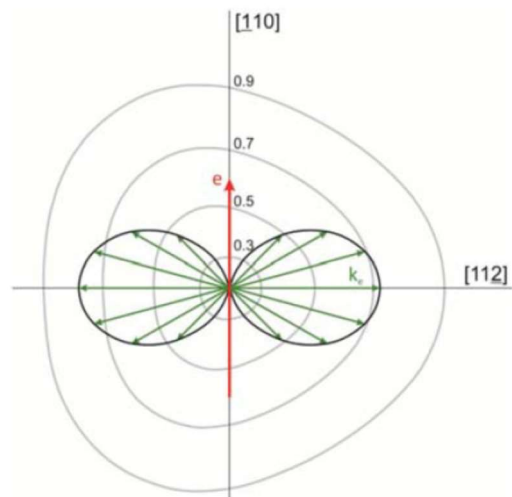
Praktikoje paviršiniai emiteriai, ypač pats efektyviausias iš jų – p-tipo InAs kristalai, yra naudojami kaip THz impulsų šaltiniai laikinės srities spektroskopijos (Time-Domain Spectroscopy, TDS) sistemose, ypač tose, kurios yra aktyvuojamos ilgabangias femtosekundiniais lazeriais, tokiais kaip lazeriai, pagaminti iš Yb ar Er legiruotų kvarcinių skaidulų. Nepaisant to, jog pagal optinių impulsų vertimo THz impulsais efektyvumą paviršiniai emiteriai vis dar atsilieka nuo plačiai naudojamų fotolaidžių antenų, jie turi prieš pastarąsias eilę svarbių pranašumų. Jiems nereikia elektrinio maitinimo ir metalinės antenos, ribojančios spinduliuojamo signalo dažnių juostą; paviršinių emiterių galima rasti bet kurio bangos ilgio spinduliuotę generuojančiam lazeriui.

Šiame pranešime bus apžvelgtas dar vienas svarbus THz emisijos iš puslaidininkių paviršių aspektas – tai, kaip šį reiškinį galima panaudoti tiriant įvairias puslaidininkinių medžiagų ir puslaidininkinių darinių fizikines savybes. Daugiausiai informacijos apie šias savybes galima gauti matuojant generuojamo THz impulso amplitudės  $E_{THz}$  priklausomybes nuo femtosekundinių lazerio impulsų fotonų energijos – THz žadinimo spektrų (TŽS).  $E_{THz}$  yra proporcinga fotosrovės išvestinei laike, todėl šias priklausomybes galima traktuoti kaip bekontakčiu būdu išmatuotus fotolaidumo spektrus. Nuo tradicinių fotosrovės spektrų jie skiriasi tuo, kad per THz impulsų trukmę (kelis šimtus femtosekundžių) elektronai nespėja termalizuoti ir juda balistiškai su greičiu, apspręstu jų perteklinės energijos. Pirmas iš TŽS nustatytas puslaidininkių parametras buvo energinis atstumas nuo pagrindinio  $\Gamma$  laidumo juostos slėnio iki aukštesniųjų L ar X slėnių [2]. Šio svarbaus didelės galios ir kvantinę sąspraudą naudojančių prietaisų konstravimui parametro vertės buvo rastos iš įvairių puslaidininkių TŽS kreivių maksimumų padėčių.

Kadangi šviesos sužadinti elektronai iki išsklidant juos gali judėti medžiaga kelis šimtus nanometrų, TŽS tinka ir energinių juostų trūkių heterosandūrose tarp dviejų puslaidininkių suradimui. Šiuo atveju yra tiriami dariniai, kurių paviršiuje yra plonas medžiagos su

mažesniu draustinių energijų tarpu sluoksniu, o juostų trūkis randamas iš fotonų, kuriais apšvietus darinį stebimas staigus THz impulsų amplitudės didėjimas, energijos [3].

Fotoelektronų impulsai išlieka suorientuoti erdvėje optinio lauko atžvilgiu iki pat pirmųjų impulsų sklaidos aktų, taigi per beveik visą THz signalo generavimo trukmę. Todėl  $E_{THz}$  priklausomybė nuo kampo tarp optinės poliarizacijos ir kristalo ašį leidžia nustatyti laidumo juostos izoenerginį paviršių anizotropiją. Tokia anizotropija, sąlygota juostos neparaboliškumo, leido atskleisti vadinamųjų optinio lyginimo ir elektriniu lauku indukuoto optinio lyginimo efektų InSb [4] ir InAs [5], atitinkamai, mikroskopinę prigimtį.



1 pav. InSb laidumo juostos izoenerginiai paviršiai įvairioms perteklinėms elektronų energijoms (pilkos linijos) ir elektronų, sužadintų iš sunkiųjų skylių valentinės juostos, kvaziimpulsų pasiskirstymas (žalios strėlės) [4]

*Reikšminiai žodžiai: puslaidininkiai, juostinė sandara, fotolaidumas, terahercai.*

### Literatūra

- [1] X. C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow, and D. H. Auston, Appl. Phys. Lett. **56**, 1011 (1990).
- [2] A. Arlauskas and A. Krotkus, Semicond. Sc. and Technol., **27**, 115015 (2012).
- [3] V. Karpus, R. Norkus, R. Butkutė, S. Stanionytė, B. Čechvičius, and A. Krotkus, Opt. Expr., **26**, 33807 (2018).
- [4] I. Nevinskas, K. Vizbaras, A. Trinkūnas, R. Butkutė, and A. Krotkus, Opt. Lett., **42**, 2615 (2017).
- [5] P. Cicėnas, A. Geižutis, V.L. Malevich, and A. Krotkus, Opt. Lett. **40**, 5164 (2015).