

Vilniaus universitetas  
Fizinių ir technologijos mokslų centras  
Kauno technologijos universitetas  
Vilniaus Gedimino technikos universitetas (VILNIUS TECH)  
Lietuvos fizikų draugija

# 45-oji LIETUVOS NACIONALINĖ FIZIKOS KONFERENCIJA

*2023 m. spalio 25-27 d., Vilnius*

## **PROGRAMA IR PRANEŠIMŲ TEZĖS**



VILNIAUS  
UNIVERSITETO  
LEIDYKLA

2023

Bibliografinė informacija pateikiama

Lietuvos integralios bibliotekų informacinės sistemos (LIBIS) portale [ibiblioteka.lt](http://ibiblioteka.lt).

**ISBN 978-609-07-0981-8** (skaitmeninis PDF)

**DOI:** <https://doi.org/10.15388/LNPC.2023>

Leidinį rengė

LNFK45 organizacinis komitetas

Vilniaus universiteto leidykla, Saulėtekio al. 9, LT-10222 Vilnius

[info@leidykla.vu.lt](mailto:info@leidykla.vu.lt), [www.leidykla.vu.lt](http://www.leidykla.vu.lt)

Knygos internete [knygynas.vu.lt](http://knygynas.vu.lt)

Mokslo periodikos žurnalai [zurnalai.vu.lt](http://zurnalai.vu.lt)

© 2023 LNFK45 Organizacinis komitetas. Published by Vilnius University Press <https://www.vu.lt/leidyba/>

This is an Open Access article distributed under the terms of the <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> Creative Commons Attribution Licence, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

## Nepusiausvirujų krūvininkų dinamika išsigimusiam N-poliškumo GaN

### Non-equilibrium carrier dynamics in degenerate N-polar GaN

Kazimieras Nomeika, Lukas Šiaulys, Žydrūnas Podlipskas, Mantas Vaičiulis, Marek Kolenda, Arūnas Kadys, Saulius Nargelas, Gintautas Tamulaitis, Ramūnas Aleksejūnas  
Vilniaus universitetas, Fotonikos ir nanotechnologijų institutas, Saulėtekio al. 3, LT-10257, Vilnius  
[kazimieras.nomeika@ff.vu.lt](mailto:kazimieras.nomeika@ff.vu.lt)

GaN taikymas optoelektroniniuose prietaisuose yra plačiai paplitęs – jau daugiau nei 2 dešimtmečius turime šio junginio pagrindu gaminamus našius šviestukus (angl. *light emitting diode* – LED) bei lazerinius diodus. Šiandien GaN yra patrauklus dar ir tuo, jog yra vienas iš junginių, ateityje galinčių pakeisti Si didelės galios elektronikoje. Taip yra dėl gerokai didesnio draustinės juostos tarpo ir su tuo susijusiais privalumais: aukštesnėmis pramušimo įtampomis, spartesne veikla, mažesniais triukšmais, aukštesnėmis darbinėmis temperatūromis. Visgi pilnas šios medžiagos potencialas dar nėra žinomas. GaN įprastai yra auginamas *c* kryptimi ([0001]), tačiau pastaruoju metu vis daugiau dėmesio sulaukia auginimas priešinga kryptimi ([000 $\bar{1}$ ]). Tokiu būdu yra apgretinama vidinių poliarizacinių laukų kryptis, o tai gali atverti naujas galimybes elektrinių savybių tranzistoriuose pagerinimui, skylių injekcijos šviestukuose palengvinimui, kvantinio našumo fotokatoduose padidimui. Negana to, apgretta auginimo kryptis reikalinga bangolaidžių sistemoms GaN pagrindu [1]. Deja, N-poliškumo medžiagos savybės nėra tiek ištyrinėtos, kiek įprastos, Ga-poliškumo medžiagos.

Šiame darbe dinaminį difraccinį gardelių (DDG) metodika mes tiriamo metalorganinio nusodinimo iš garų fazės būdu auginamus Ga- ir N-poliškumo GaN sluoksnius ir aiškinamės, kaip nuo žadinančiojo pluoštelio energijos tankio priklauso nepusiausvirujų krūvininkų difuzijos koeficiento ir gyvavimo trukmės vertės. Duomenis papildome laike integruotos fotoluminescencijos (LIFL) integruojančioje sferoje, katodoluminescencijos (KL) ir Holo matavimais. Galiausiai modifikuotu ABC modeliu aprašome nepusiausvirujų krūvininkų dinamiką. DDG matavimai atlikti su kompaktiška HARPIA-TG (Šviesos konversija) sistema, KL vaizdinimas atliktas hibridiniu katodoluminescencijos-skenuojančiu elektronų mikroskopu CHRONOS (Attolight).

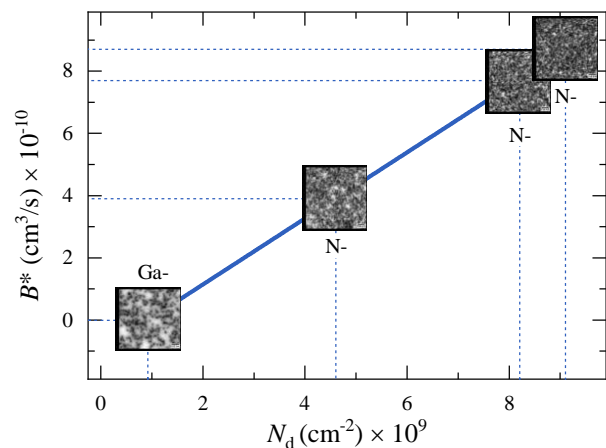
DDG matavimai atskleidžia daugiau nei 3 kartus mažesnes nepusiausvirujų krūvininkų difuzijos koeficiento ir 5-10 kartų trumpesnes gyvavimo trukmių vertes N-poliškumo sluoksniuose. Tuo tarpu KL žemėlapiai rodo nuo 5 iki 10 kartų išaugusius dislokacijų tankius  $N_d$ , kurie atvirkščiai koreliuoja su gyvavimo trukmėmis. Visa tai byloja apie prastesnę N-poliškumo darinių kokybę, tačiau, nepaisant to, juose mes fiksuojame daugiau nei eile didesnius LIFL vidinius kvantinius našumus, esant žemiems sužadinimo energijos tankiams.

Tam, kad nuodugniau išsiaiškintume matomų tendencijų priežastis, ABC modeliu aprašome nuo

nepusiausvirujų krūvininkų tankio priklausančias gyvavimo trukmių ir vidinio kvantinio našumo vertes. Toks viena laikis dviejų nepriklausomai išmatuojamų dydžių modeliavimas jau buvo sėkmingai pritaikytas InGaN LED dariniams [2]. Holo matavimai rodo, jog tamsinių elektronų tankis  $n_0$  yra dviem eilėmis didesnis N-poliškumo sluoksniuose ( $\sim 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), todėl ABC modelį atitinkamai modifikuojame prie fotosužadintų elektronų tankio  $n$  pridėję  $n_0$ . Taip pat į lygtis įtraukiame nespindulinės kvadratinės rekombinacijos narį, kurio spartą aprašome taip:

$$R^* = B^*n(n + n_0). \quad (1)$$

Modeliavimo rezultatai atskleidžia, jog  $B^*$  koeficientas, kurį siejame su gaudyklių sąlygota Ožė-Meitner rekombinacija, tiesiškai koreliuoja su dislokacijų tankiu bei yra nereikšmingas atraminiam Ga-poliškumo sluoksnyje (pav. 1). Nepaisant to, N-poliškumo sluoksniuose spindulinės rekombinacijos koeficientas  $B$  yra eile didesnis, negu Ga-poliškumo, todėl nespinduliniai gaudyklių sąlygotos Ožė-Meitner rekombinacijos nuostoliai yra atsveriami. Tuo tarpu žemų sužadinimų srityje vykstančią santykinai našią emisiją lemia didelis tamsinių elektronų tankis.



1 pav. Nespindulinės kvadratinės rekombinacijos koeficiento  $B^*$  koreliacija su dislokacijų tankiu  $N_d$ . Duomenų taškai pažymėti atitinkamais KL žemėlapiais.

*Reikšminiai žodžiai:* GaN, katodoluminescencija, dinaminė difraccinė gardelė, rekombinacija.

#### Literatūra

- [1] M. Kolenda et al., J. Mater. Sci. **55**, 12008–12021 (2020).  
[2] K. Nomeika et al., J. Mater. Chem. C **10**, 1735–1745 (2022).