

Silicio griūtinių diodų, naudojamų dalelių detektoriuose, kompiuterinis modeliavimas

Computer simulation of silicon avalanche diodes for particle detectors

Lukas Dundulis¹, Juozas Vyšniauskas¹, Eugenijus Gaubas²

¹Vilniaus universitetas, Radiofizikos katedra, Saulėtekio al. 3, LT-10222 Vilnius

²Vilniaus universitetas, Taikomųjų mokslų institutas, Saulėtekio al. 3, LT-10222 Vilnius

juozas.vysniauskas@ff.vu.lt

Mažo stiprinimo silicio griūtiniai diodai (LGAD) susilaukia ypatingo dėmesio didelių energijų fizikos srityje dėl geresnių jonizuojančios spinduliuotės detektavimo savybių, nei dabar dalelių greitintuvuose naudojamų pin diodų. LGAD yra panašūs į griūtininius fotodiodus, tačiau dėl tinkamai parinkto $n^{++}p^+p^{++}$ legiravimo profilio, pasižymi vidutinėmis (2-20) stiprinimo vertėmis ir padidintu signalas/triukšmas santykiu [1]. Tačiau, kaip ir visi fotodetektoriai, veikiami didelės energijos hadronų srauto, laikui bėgant degradoja. Degradacijos priežastys šiuose dioduose susijusios su didelės energijos dalelės generuojamais defektais, didinančiais tamsinę srovę, ir išmuštais p^+ sluoksnio priemaišiniai atomais, keičiančiais legiravimo profilį ir diodo stiprinimo koeficientą [2]. Pagrindiniai šios problemos sprendimo būdai yra tokie: (1) p^+ sluoksnį formuoti epitaksiniu būdu, taip tikintis sumažinti dauginimosi koeficiento kitimą, (2) keisti legiravimą kitais III grupės elementais [3].

Literatūroje nėra pakankamos informacijos apie p^+ sluoksnio formuoto epitaksiniu būdu įtaką LGAD veikiai. Šiame darbe pateikti silicio LGAD modeliavimo rezultatai: n^{++} difuzijos nuotolio bei p^+ epitaksinio sluoksnio storio įtaka voltamperinėms charakteristikoms, krūvininkų pasiskirstymo diode bei srovės, indukuojamos išorinėje grandinėje, dinamika, sužadinant diodą optiniu impulsu.

Diodų modeliavimui buvo pasirinktas Synopsys TCAD Sentaurus programų paketas, leidžiantis tirti 2D ir 3D puslaidininkinius darinius. Darbe buvo naudojamas dvimatis difuzinis-dreifinis LGAD modelis. Diodo ilgis – 50 μm (pagal x -ašį), plotis 5 μm (pagal y -ašį). Priemaišų tankis priklauso tik nuo x -koordinatės. Diodo legiravimo profilį sudaro p^{++} padėklas (ilgis – 2 μm , priemaišų tankis – 10^{19} cm^{-3}), silpnai legiruota p^- sritis (ilgis $d_p = 43 - 45 \mu\text{m}$, priemaišų tankis – 10^{12} cm^{-3}), epitaksinis p^+ sluoksnis (ilgis $d_{p^+} = 3 - 5 \mu\text{m}$, priemaišų tankis – 10^{16} cm^{-3}), n^{++} sritis, suformuota difuzijos būdu (difuzijos ilgis $D_L = 0.3 - 0.4 \mu\text{m}$, didžiausias priemaišų tankis prie paviršiaus – 10^{19} cm^{-3}). Detektuojamos dalelės poveikis modeliuojamas 2 ps trukmės, 870 nm bangos ilgio ir 10^4 W/cm^2 galios optiniu impulsu. Prigeneruotų krūvininkų tankis mažėja eksponentiškai x -ašies kryptimi ir užima 2 μm pagal y -ašį.

Diodo pramušimo įtampa U_{pr} stipriai priklauso nuo n^{++} difuzijos ilgio D_L ir epitaksinio sluoksnio ilgio d_{p^+} . Keičiant šiuos parametrus aukščiau nurodytose ribose, U_{pr} kinta nuo 55 iki 380 V. Didelę pramušimo įtampą yra sunkiau stabilizuoti, palaikant reikiamą krūvininkų dauginimosi koeficientą. Atlikus tyrimus buvo

pasirinktas $D_L = 0.3 \mu\text{m}$ ir $d_{p^+} = 3.2 \mu\text{m}$, užtikrinantis sąlyginai nedidelę $U_{pr} = 105 \text{ V}$. Epitaksinio p^+ sluoksnio ilgis buvo parenkamas, atsižvelgiant į tai, kad netoli pramušimo įtampos, kur yra diodo darbo taškas, būtų pilnai nuskurdinta p^- sritis. Tik tuo atveju pavyksta realizuoti greitą krūvininkų išsiurbimą sotes greičiu (apie 10^7 cm/s). Kitaip tiek skylės tiek elektronai juda lėtai ir didelė jų dalis surekombinuoja, nepasiekę elektrodų, o tai mažina krūvio surinkimo efektyvumą – labai svarbų dalelių detektorių parametą.

Sužadinus diodą optiniu impulsu, atitinkamas srovės impulsas trunka apie 4 ns. Impulsas nemonotoniškas su keletu mažėjančių maksimumų. Didžiausia srovės vertė yra impulso pradžioje, kai vyksta intensyvus krūvininkų dauginimasis aktyvioje srityje. Vėliau didelė dalis elektronų išsiurbiamą į n^{++} sritį, o skylių – į p^- sritį, krūvininkų dauginimosi procesas sulėtėja, stebimas srovės minimumas prie $t = 0.4 \text{ ns}$. Vėliau įvyksta taip vadinamas antrinis krūvininkų dauginimasis ir srovė vėl išauga iki 0.7 nuo maksimalaus lygio. Tarp $t = 1.5 - 2 \text{ ns}$ srovė stabilizuojasi, po to eksponentiškai relaksuoja iki atgalinės srovės dydžio. Suintegravus srovės impulsą ir palyginus su atitinkamu srovės integralu be krūvininkų dauginimosi, buvo nustatytas diodo stiprinimo koeficientas lygus 12.

Buvo nagrinėta elektronų ir skylių pasiskirstymo dinamika pereinamųjų procesų metu. Pastebėtas krūvininkų kaupimasis ties epitaksinio sluoksnio kraštu, įtakojantis nemonotonišką srovės impulso formą. Minėtas kaupimasis priklauso nuo legiravimo profilio statumo ties p^+ ir p^- sričių riba.

Padėka

Šis darbas buvo dalinai finansuojamas iš Lietuvos mokslo tarybos fondo projekto LAT 01/2016.

Reikšminiai žodžiai: Silicis, LGAD, Dalelių detektoriai, Krūvininkų griūtinis dauginimasis.

Literatūra

- [1] P. Fernandez-Martinez, D. Flores, V. Greco, S.Hidalgo, G. Pellegrini, D. Quirion, M. Fernandez-Garcia, I. Vila, and G. Kramberger, Low gain avalanche detectors for high energy physics, 2015 10th Spanish Conference on Electron Devices (CDE), pp 1–4 (2015).
- [2] G. Kramberger, M. Baselga, V. Cindro, P. Fernandez-Martinez, D. Flores, Z. Galloway, A. Gorišek, V. Greco, S. Hidalgo, and V. Fadeyev, Radiation effects in low gain avalanche detectors after hadron irradiations, J. Instr., **10**, P07006 (2015).
- [3] M. Yamaguchi, A. Khan, T. K. Vu, Y. Ohshita, and T. Abe, Radiation-resistant properties of Ga-doped Si analyzed by DLTS, Physica B: Condensed Matter, **340**, 596 (2003).