І. В. Мінтянський[1,*], П. І. Савицький[1], В. Т. Маслюк[2]

[1] *Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Чернівецьке відділення, Чернівці, Україна*
[2] *Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна*

*Відповідальний автор: illya.mintyanskyy@gmail.com

ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО ПЕРЕНОСУ ВЗДОВЖ ШАРІВ В ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ ШАРУВАТИХ КРИСТАЛАХ *n*-InSe

У температурній області 80 ÷ 400 К вивчено вплив різних доз електронного опромінення (10 МеВ) на електричні властивості вздовж шарів низькоомних монокристалів *n*-InSe. Порівнюються параметри зразків з однаковою накопиченою дозою (270 кГр), але з різним послідовним опроміненням. Зменшення концентрації вільних електронів після *e*-опромінення пов'язане зі зниженням кількості міжвузловинних атомів індію внаслідок їх агрегації між шарами. Виявлене зниження рухливості вздовж шарів селеніду індію (InSe) зі зростанням дози розглядається як наслідок підвищення внеску двовимірних електронів. Екстремуми на залежностях $R_H(T)$ та $\mu_{\perp C}(T)$ пояснено перерозподілом електронів між 2D-станами та основною зоною провідності InSe.

Ключові слова: шаруватий кристал, моноселенід індію, електронне опромінення, коефіцієнт Холла, рухливість, 2D-електронний газ, механізми розсіювання.

I. V. Mintyanskii[1,*], P. I. Savitskii[1], V. T. Maslyuk[2]

[1] *Frantsevych Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Sciences of Ukraine, Chernivtsi Branch, Chernivtsi, Ukraine*
[2] *Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod, Ukraine*

*Corresponding author: illya.mintyanskyy@gmail.com

PROPERTIES OF ELECTRON TRANSPORT ALONG THE LAYERS IN ELECTRON IRRADIATED LAYERED *n*-InSe CRYSTALS

The effect of various doses of electron irradiation (10 MeV) on electrical properties along the layers of low-resistivity *n*-InSe single crystals are investigated in the range of 80 to 400 K. The parameters of the samples with the same accumulated dose (270 kGy), but at different series irradiation, are compared. The decrease of free electron density after *e*-influence is caused by a decreased amount of interstitial indium atoms because of their aggregation between the layers. The established decrease of mobility along the InSe layers with increasing radiation dose is considered to be due to the increased contribution of two-dimensional electrons. The extrema of $R_H(T)$ and $\mu_{\perp C}(T)$ dependencies are explained as a result of a redistribution of electrons between the 2D states and the main conduction band of InSe.

Keywords: layered crystal, indium monoselenide, electron irradiation, Hall coefficient, mobility, 2D electron gas, scattering mechanisms.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Zh. Yang, J. Hao. Recent progress in 2D layered III-VI semiconductors and their heterostructures for optoelectronic device applications. Adv. Mater. Technol. 4 (2019) 1900108.
2. X. Zhou et al. 2D layered material-based van der Waals heterostructures for optoelectronics. Adv. Funct. Mater. 28 (2018) 1706587.
3. H. Cai et al. Synthesis and emerging properties of 2D layered III-VI metal chalcogenides. Appl. Phys. Rev. 6 (2019) 041312.
4. N. Ubrig et al. Design of van der Waals interfaces for broad-spectrum optoelectronics. Nat. Mater. 19 (2020) 299.
5. M. Dai et al. Properties, synthesis and device applications of 2D layered InSe. Adv. Mater. Technol. 7 (2022) 2200321.
6. O.M. Sydor. Spectral and photoelectric characteristics of the gamma irradiated intrinsic oxide-InSe heterostructures obtained under different conditions. Radiat. Phys. Chem. 126 (2016) 90.
7. A.V. Krasheninnikov. Are two-dimensional materials radiation tolerant? Nanoscale Horiz. 5 (2020) 1447.
8. T. Vogl et al. Radiation tolerance of two-dimensional material-based devices for space applications. Nat. Commun. 10 (2019) 1202.
9. I.V. Mintyanskii, P.I. Savitskii, Z.D. Kovalyuk. Two-band conduction in electron-irradiated n-InSe single crystals. Phys. Status Solidi B 252 (2015) 346.

10. З.Д. Ковалюк, І.В. Мінтянський, П.І. Савицький. Вплив електронного опромінення на анізотропію електропровідності в n-InSe. Ж. нано- електрон. фіз. 9 (2017) 06013. / Z.D. Kovalyuk, I.V. Mintyanskii, P.I. Savitskii. Effect of Electron Irradiation on Conductivity Anisotropy in n-InSe. J. Nano- Electron. Phys. 9 (2017) 06013. (Ukr)
11. І.В. Мінтянський та ін. Вплив електронного опромінення на електричні властивості n-InSe та їхню анізотропію. Ядерна фізика та енергетика 19 (2018) 136. / I.V. Mintyanskii et al. Effect of the electron irradiation on electrical properties of n-InSe and their anisotropy. Nucl. Phys. At. Energy 19 (2018) 136. (Ukr)
12. I.V. Mintyanskii, P.I. Savitskii, Z.D. Kovalyuk. Two-dimensionalization of electron gas in n-InSe crystals induced by electron irradiation. Acta Phys. Pol. A 137 (2020) 1031.
13. Ж. Бургуэн, М. Ланно. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты (Москва: Мир, 1985) 304 с. / J. Bourgoin, M. Lannoo. Point Defects in Semiconductors. Experimental Aspects (Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1983) 295 p.
14. J. Martinez-Pastor et al. Shallow-donor impurities in indium selenide investigated by means of far-infrared spectroscopy. Phys. Rev. B 46 (1992) 4607.
15. A. Chevy. Segregation of dopants in melt-grown indium selenide crystals. J. Appl. Phys. 56 (1984) 978.
16. Ph. Schmid. Electron-lattice interaction in layered semiconductors. Nuovo Cim. B 21 (1974) 258.
17. L.R. Weisberg. Anomalous mobility effects in some semiconductors and insulators. J. Appl. Phys. 33 (1962) 1817.
18. A. Segura et al. Three-dimensional electrons and two-dimensional electric subbands in the transport properties of tin-doped n-type indium selenide: Polar and homopolar phonon scattering. Phys. Rev. B 43 (1991) 4953.
19. L. Laiho et al. Shallow donor states of Ag impurity in ZnSe single crystals. Semicond. Sci. Technol. 21 (2006) 654.
20. E. Arushanov, Ch. Kloc, E. Bucher. Impurity band in p-type β-$FeSi_2$. Phys. Rev. B 50 (1994) 2653.
21. D.D. Nedeoglo. Formation and properties of the impurity band in n-ZnSe. Phys. Status Solidi B 80 (1977) 369.
22. О. В. Емельяненко и др. Формирование и свойства зоны примесей в n-GaAs. *Физика твердого тела* 7 (1965) 1063. / O.V. Emelianenko et al. Formation and properties of impurity band in n-GaAs. Fizika Tverdogo Tela (Sov. Phys. Solid State) 7 (1965) 1063. (Rus)
23. J.H. Schön et al. Transport properties of n-type $CuGaSe_2$. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 61 (2000) 417.
24. E. Arushanov et al. Impurity band in p-type $CuInSe_2$. Phys. Status Solidi A 176 (1999) 1009.
25. E. Arushanov et al. Transport properties of n-ZrNiSn single crystals. Phys. Status Solidi A 177 (2000) 511.
26. Y. Kajikawa, K. Okamura. Impurity-band conduction in polycrystalline films of GaSb and GaSbAs grown by molecular-beam deposition. Phys. Status Solidi C 9 (2012) 274.
27. Дж. Блекмор. Статистика электронов в полупроводниках (Москва: Мир, 1964) 392 с. / J.S. Blakemore. Semiconductor Statistics (New York, Pergamon Press, 1962) 381 p.
28. J. Martinez-Pastor, A. Segura, A. Chevy. High-temperature behavior of impurities and dimensionality of the charge transport in unintentionally and tin-doped indium selenide. J. Appl. Phys. 74 (1993) 3231.
29. G.L. Belenkii, E.A. Vyrodov, V.N. Zverev. Quantum transport studies of electron accumulation layers in InSe bulk crystals. Nuovo Cim. D 11 (1989) 1571.

Надійшла / Received 24.04.2025