

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК ГЕРМАНІЮ

¹Луцьков С.В., ¹Хвищун М.В., ²Шигорін П.П., ³Венгрин Б.Я.

¹Луцький національний технічний університет
luniovser@ukr.net

²Волинський національний університет імені Лесі Українки
shygorin.pavlo@vnu.edu.ua

³Національний університет «Львівська політехніка»
bohdan.y.venhryn@lpnu.ua

Сучасний розвиток нанотехнологій і мікроелектроніки висуває підвищені вимоги до матеріалів, які використовуються для створення елементної бази новітніх електронних і оптоелектронних пристроїв. У цьому контексті значну увагу привертають гетероструктури на основі германію, зокрема сформовані на кремнієвих підкладках (Ge/Si) або на твердих розчинах (Ge/Ge_(x)Si_(1-x)), які поєднують у собі низку переваг як з точки зору електронних, так і оптичних властивостей. Германій має вищу електронну і діркову рухливість порівняно з кремнієм, що забезпечує перспективу його використання в CMOS технологіях електронних пристроїв нового покоління. Крім того, завдяки ефектам розмірного квантування, які виникають у наноструктурах на основі германію, можливе покращення електричних та оптичних характеристик таких матеріалів.

У гетероструктурах, одержаних на основі кремнію та германію, існують значні внутрішні механічні напруження, пов'язанні з суттєвою різницею сталих ґраток цих матеріалів. Це дозволяє на поверхні підкладок вирощувати дуже тонкі плівки германію, на основі яких можуть бути створенні лазери, електрооптичні модулятори, MOSFET-транзистори [1, 2]. Варіація величин відносних деформацій в шарах гетероструктури дозволяє керувати широким спектром електричних та оптичних властивостей гетероструктур. Це може бути здійснено шляхом зміни компонентного складу підкладки Ge_(x)Si_(1-x), що призводить до зміни її сталої ґратки [3]. Таким чином можна цілеспрямовано змінювати величину відносних деформацій в наноплівці Ge/Ge_(x)Si_(1-x) і, тим самим, керувати фоточутливістю наноплівки, а також концентрацією власних носіїв струму. Однорідність електричних та оптичних властивостей наноплівки германію визначається ступенем їх кристалічності та густиною дислокацій, які залежать від технологічних умов росту плівки, подальшої термічної обробки, наявності неконтрольованих домішок та легування. Зокрема додаткове легування плівки германію донорною або акцепторною домішкою призводить до зменшення густини дислокацій [4].

У даній роботі проведений комплексний теоретичний аналіз можливостей покращення електричних та оптичних властивостей нелегованих та легованих наноплівки германію, вирощених на підкладці Ge_(x)Si_(1-x) з кристалографічною орієнтацією (001). Зокрема, розглядається вплив на електричні та оптичні властивості таких плівок легування донорними домішками, варіації товщини наноплівки та компонентного складу підкладки. Залежності концентрації власних носіїв струму та електронів для нелегованої та легованої мілкою донорною домішкою наноплівки германію від її товщини та компонентного вмісту підкладки представлені на рис. 1. Одержані криві показують, що нелегована та ненапружена наноплівка германію (рис. 1 (а) випадок $x = 1$) з товщиною $d = 2$ нм буде діелектриком. Збільшення товщини наноплівки збільшує концентрацію власних носіїв струму і, таким чином, виникає фазовий перехід діелектрик-напівпровідник. Іншим способом переходу плівки

Section 1. Fundamental problems of physics, chemistry and ecology

германію з діелектричного стану в напівпровідний полягає у збільшенні відсоткового вмісту кремнію в підкладці (рис. 1 (а) випадки $x \neq 1$). Це пов'язано зі збільшенням внутрішніх механічних напружень в наноплівці за рахунок збільшення різниці між сталими ґратки германію та підкладки $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$. Як слідує з рис. 1 (б), легування плівки германію донорною домішкою також призводить до фазового переходу діелектрик-напівпровідник.

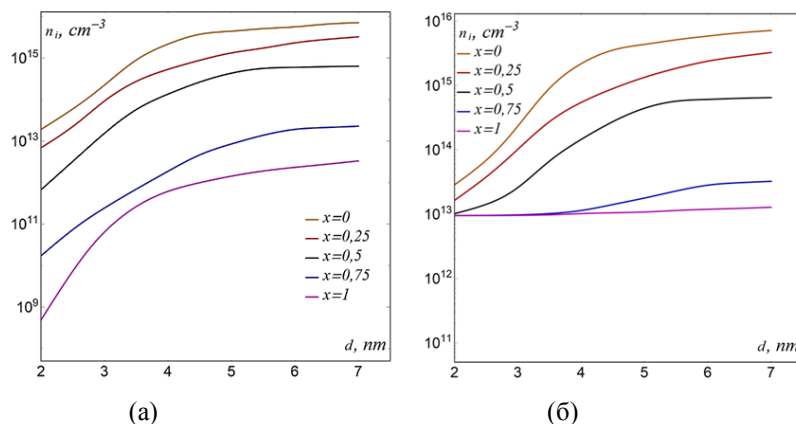


Рис. 1. Залежність концентрації власних носіїв струму для нелегованої та легованої мілкою донорною домішкою наноплівки германію від її товщини: (а) – нелегована наноплівка; (б) – легована наноплівка донорною домішкою з концентрацією $N_d=10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

На рис. 2 приведені результати чисельного моделювання поведінки відносного значення питомої електропровідності. Спостерігається зменшується його значення зі збільшенням товщини плівки, тоді як легованої наноплівки – навпаки зростає. Причиною такої поведінки відносної питомої електропровідності є те, що в нелегованій та ненапруженій наноплівці більш ефективно проявляються квантово-розмірні ефекти, котрі призводять до значної зміни в плівці концентрації власних носіїв при зміні товщини наноплівки від 2 до 7 нм. Натомість легування наноплівки донорною домішкою призводить до зменшення ролі квантово-розмірних ефектів. Зростання величини відносної питомої електропровідності при відсотковому збільшенні вмісту кремнію в підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ пов'язане зі збільшенням концентрації власних носіїв струму.

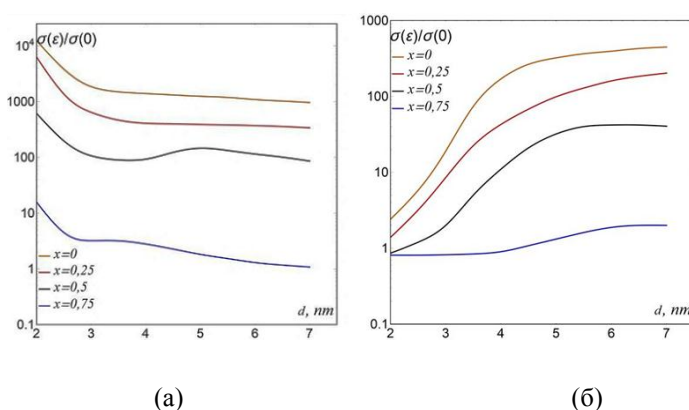


Рис. 2. Залежності відносної зміни питомої електропровідності для нелегованої та легованої мілкою донорною домішкою наноплівки германію від її товщини: (а) – нелегована наноплівка; (б) – легована наноплівка донорною домішкою, з концентрацією $N_d=10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

Теоретичні дослідження оптичних властивостей наноплівки германію були проведені авторами у роботі [6]. Розрахунки максимальної довжини хвилі власного поглинання для такої наноплівки представлені на рис. 3(а). Як слідє з даного рисунка, незначний прояв квантово-розмірних ефектів спостерігається для товщини наноплівки $d < 10$ нм. Для значень $d > 10$ нм фоточутливість наноплівки германію буде такою ж як і для об'ємного германію. Наявність значних внутрішніх механічних напружень в наноплівці германію призводять до радикальної перебудови її зонної структури. Поява значних внутрішніх механічних напружень в наноплівці германію призводить до радикальної перебудови її зонної структури. У свою чергу це впливатиме на ефективну масу носіїв струму. З Рис. 3(б) можна зробити висновок, що ефективна маса «важких» дірок у германієвій наноплівці практично не залежить від компонентного складу підкладки і відповідно від деформації. Проте, наявність внутрішніх механічних напружень в наноплівці германію призводить до появи значної анізотропії ефективних мас. Ефективна маса «важких» дірок в напруженій наноплівці германію приблизно в п'ять разів буде меншою, ніж в ненапруженій, що впливатиме на довжину хвилі власного поглинання.

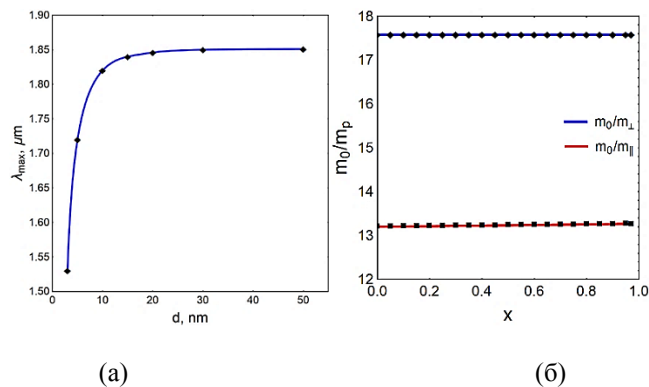


Рис. 3. Залежності максимальної довжини хвилі власного поглинання для ненапруженої наноплівки германію від її товщини (а) та ефективних мас «важких» дірок в наноплівці германію від компонентного складу підкладки $Ge_{(x)}Si_{(1-x)}$ (б).

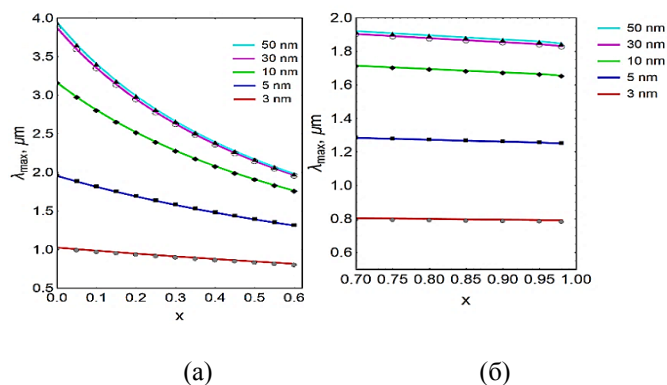


Рис. 4. Залежності максимальної довжини хвилі власного поглинання від компонентного складу підкладки $Ge_{(x)}Si_{(1-x)}$ германію для напружених наноплівки германію різної товщини в Δ_1 - моделі зони провідності (а) та L_1 - моделі зони провідності (б).

Аналізуючи Рис 4. (а) та (б), можемо зробити висновок, що вплив квантово-розмірних ефектів у власне поглинання є значним для товщин напружених наноплівки германію $d < 10$ нм та при таких внутрішніх механічних напруженнях, коли реалізується Δ_1 - модель зони провідності германію. Збільшення вмісту кремнію від 0 до 100% в підкладці та товщини наноплівки германію від 3 до 50 нм призводить до зростання мінімальної довжини хвилі ІЧ-поглинання від 0,8 до 4 мкм.

[1] Zhang, Y., Gao, J., Qin, S., Cheng, M., Wang, K., Kai, L., & Sun, J. (2021). Asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well modulators. Nanophotonics, 10 (6), 1765-1773. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0007>

- [2] Dutta, T., Yadav, N., Wu, Y., Cheng, G. J., Liang, X., Ramakrishna, S. (2024). Electronic properties of 2D materials and their junctions. *Nano Materials Science*, 6 (1), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2023.05.003>
- [3] Luniov S.V. (2019). Calculation of Electron Mobility for the Strained Germanium Nanofilm. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 11 (2), 02023.
- [4] Yu, X., Jia, H., Yang, J., Masteghin, M. G., Beere, H., Mtunzi, M., Liu, H. (2024). Effects of phosphorous and antimony doping on thin Ge layers grown on Si. *Scientific Reports*, 14 (1), 7969. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57937-8>.
- [5] Luniov S.V. (2020). Calculation of band structure of the strained germanium nanofilm, doped with a donor impurity. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 118, 113954; <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.113954>.
- [6] Luniov S., Shygorin P., Venhryn B. (2024). The influence of mechanical strains and quantum-size effects on the photosensitivity of Ge/Ge(x)Si(1-x) nanofilm. *Romanian Journal of Physics*, 69 (1-2), 602. <https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2024.69.602>.

ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОПРУЖНОСТІ БОРАТНОГО СКЛА ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), ЛЕГОВАНОГО СРІБЛОМ

**Б. Мицик¹, В. Адамів², А. Андрушак³, Т. Вороняк¹, Н. Дем'янишин¹,
О. Лішук³, І. Стасишин¹, І. Теслюк²**

¹Фізико-механічний інститут імені Г.В.Карпенка НАН України, 79601 Львів, mytsykb@ukr.net

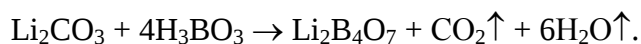
²Львівський національний університет імені Івана Франка, 79001 Львів, Україна

³Національний університет «Львівська політехніка», 79046 Львів, Україна

Монокристали боратів, такі, наприклад, як борати літію, калію та цезію ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiKB_4O_7 , $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$) відзначаються високою прозорістю в широкому спектральному діапазоні, включаючи вакуумний ультрафіолет. Ці кристали придатні для прикладного застосування в нелінійній оптиці, лазерній техніці та дозиметрії. Разом з тим вирощування боратних монокристалів є технічно складним і тривалим процесом, що робить такі кристали надто вартісними. До недоліків вказаних монокристалів слід віднести також високу в'язкість їх розплавів, що зумовлює принципові труднощі із легуванням таких матеріалів [1]. Тому увагу дослідників привертають склоподібні боратні сполуки, які легко піддаються легуванню, а технологія склоподібних боратних сумішей дозволяє синтезувати ізотропні боратні матеріали низької вартості. Крім того, з наукової та практичної точок зору важливим є порівняння властивостей кристалічних та склоподібних боратних матеріалів.

Наприклад, в роботах [2, 3] досліджено фотопружні та акустооптичні (АО) властивості монокристалів тетраборату літію (ТБЛ, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$). Доцільним є порівняти відповідні результати з аналогічними для склоподібної системи $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Відомо також, що легування боратних сполук сріблом (Ag) змінює фізичні властивості таких сполук. В даному дослідженні зроблено порівняння фотопружних та АО властивостей легованого Ag та нелегованого боратного скла. Ці ж властивості досліджено після відпапу чистого та легованого ТБЛ скла, оскільки невідпалені зразки мають неоднорідні ділянки, зумовлені внутрішніми механічними напруженнями.

Технологія отримання нелегованого $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ та легованого $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ скла. Для приготування ТБЛ скла використовували карбонат літію Li_2CO_3 , борну кислоту H_3BO_3 і азотнокисле срібло AgNO_3 від фірми Sigma-Aldrich особливо високої степені чистоти. Підготовлену згідно стехіометричного складу $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ подрібнену суміш вихідних хімічних речовин поміщали в керамічний тигель і проводили багатоступінчатий високотемпературний синтез за хімічною реакцією:



Після подрібнення отримували порошок $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ з температурою плавлення 1198 К. Склад шихти підтверджено рентгеноструктурним аналізом.