**Звіт про науково-дослідну роботу: „ Розробка технології та фізичні властивості вузькозонних і шаруватих кристалів для сенсорів і джерел ”**

**Мета роботи** - синтез  фундаментальні дослідження монокристалів і гетероструктур на основі сполук AIVBVI і AIIIBVI, придатних для роботи в терагерцовому та інфрачервоному діапазонах спектра.

Терміни виконання наукової роботи: початок І кв. 2016 р.

закінчення IV кв. 2018 р.

**Керівник роботи**: Ковалюк Захар Дмитрович, д.ф.-м.н., ( Email: chimsp@ukrpost.ua)

**Скорочений зміст висновків рецензентів.**

В роботі викладено результати досліджень багатокомпонентних твердих розчинів телуридів свинцю, олова і германію, легованих домішками перехідних і рідкісноземельних елементів (1-й розділ), та селенідів індію, галію і гетероструктур на їх основі (2-й розділ). Одним з найбільш вагомих результатів, представлених в 1-му розділі, є виявлення терагерцової фотопровідності в зразках Pb1-xSnxTe(In), яка спостерігалась у вигляді широкої спектральної смуги без фіксованої червоної межі навіть для енергій світлових квантів, суттєво менших за ширину забороненої зони або енергію активації основного стану домішки. Велика увага приділена вивченню глибоких домішкових рівнів, розташованих як в дозволених, так і в забороненій зонах PbTe і сплавів на його основі. З огляду на глибокий звʼязок між оптичними і магнітними властивостями напівпровідників, проведено детальні дослідження магнітних характеристик серії сполук на основі PbTe і GeTe.

В 2-му розділі авторами представлено вдосконалену методику вирощування шаруватих кристалів InSe та GaSe і запропоновано оригінальний спосіб контролю їх якості методом ядерного квадрупольного резонансу (без розгерметизації ростових ампул). Досліджено фотоелектричні властивості гетероструктур на основі шаруватих кристалів InSe, GaSe, FeIn2Se4 та In4Se3, випромінювальні властивості структур на основі шаруватих кристалів, їх електролюмінесценція та фотолюмінесценція. Вперше на сформованих гетеропереходах n-InSe/p-InSe, p-GaSe/n-InSе і n-In2O3/p-InSe виявлена електролюмінесценція при кімнатній температурі, що відкриває можливості для створення випромінювачів світла на цих гетеропереходах. Фотодіоди n-InSe/p-InSe і р-GaSe/n-InSe чутливі до випромінювання в ближньому інфрачервоному та видимому діапазонах спектра на рівні вже відомих аналогів, таких як MoS2 і WS2, чи краще, при більш простій технології виготовлення. Проведено генерацію і детектування когерентних акустичних фононів в зразках InSe в субтерагерцовому діапазоні. Синтезовані і досліджені авторами структури графіт/InSe є перспективними моделями для вивчення і теоретичного моделювання різних оптичних ефектів.

Авторами побудовані фізичні моделі, що описують зонну структуру нових матеріалів на основі A4B6 і A3B6 та гетероструктур на основі A3B6, придатних для створення сенсорів і випромінювачів терагерцового та інфрачервоного діапазонів спектра. Результати проведених досліджень є оригінальними й новими, їх достовірність підтверджена численними публікаціями у високорейтингових фізичних журналах і є вагомим внеском в сучасне напівпровідникове матеріалознавство.

**Пропозиції про подальше використання результатів роботи.**

На основі отриманих результатів продовжити експериментальні і теоретичні дослідження нових матеріалів і структур для інфрачервоної оптоелектроніки на основі сполук A4B6 і A3B6, з метою покращення їхніх характеристик і для вдосконалення існуючих теоретичних моделей. Особливу увагу звернути на можливість практичного застосування даних сполук в терагерцовій області спектра і на керовану зміну оптичних характеристик за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Дані про реєстрацію роботи: № 0116U003514

**РЕФЕРАТ**

**Об’єкти дослідження** – багатокомпонентні тверді розчини телуридів свинцю, олова і германію, леговані домішками перехідних елементів, та селеніди індію, галію і гетероструктури на їх основі.

**Мета роботи** – синтез  фундаментальні дослідження монокристалів і гетероструктур на основі сполук AIVBVI і AIIIBVI, придатних для роботи в терагерцовому та інфрачервоному діапазонах спектра.

**Методи дослідження** – рентгенівська дифрактометрія, рентгенівський флуоресцентний аналіз, рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, скануючи електронна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія, гальваномагнітні виміри 6-зондовим методом (в тому числі при гідростатичному стисканні), виміри вольт-амперних характеристик гетеропереходів при прямих і зворотних напругах, Фур&apos;є-спектроскопія фотопровідності, раманівська спектроскопія, виміри спектрів електро- і фотолюмінесценції, лазерна спектроскопія, статична, динамічна і вібраційна магнітометрія, генерація і детектування когерентних акустичних фононів у терагерцовому та субтерагерцовому діапазоні частот, ядерний квадрупольний резонанс, теоретичне моделювання.

Результатом роботи є синтез монокристалів твердих розчинів на основі AIVBVI, легованих перехідними та рідкісноземельними елементами, і розробка технології вирощування та інтеркалювання шаруватих кристалів і гетероструктур на основі AIIIBVI. Проведено комплексні дослідження структурних, електричних, магнітних і оптичних властивостей дослідних зразків вказаних сполук і гетероструктур на їх основі. Здійснено оптимізацію технологічних параметрів та побудову фізичних моделей, що описують енергетичну структуру нових матеріалів на основі AIVBVI і AIIIBVI, придатних для створення сенсорів і випромінювачів терагерцового та інфрачервоного діапазонів спектра. Результати, отримані в співпраці з провідними вітчизняними і зарубіжними науковими центрами, свідчать про високу перспективність даного напрямку досліджень.

**Ключові слова**: КУБІЧНІ І ШАРУВАТІ МОНОКРИСТАЛИ, ГЕТЕРОСТРУКТУРИ, ЛЕГУВАННЯ ТА ІНТЕРКАЛЮВАННЯ, НАНОРОЗМІРНІ ДОМІШКОВІ КЛАСТЕРИ, ГЛИБОКІ ТА РЕЗОНАНСНІ ДОМІШКОВІ РІВНІ, ІНФРАЧЕРВОНА ОПТОЕЛЕКТРОНІКА, ТЕРАГЕРЦОВИЙ ДІАПАЗОН.

**Публікації**

1. Lee Y. Magnetotransport and lateral  confinement in a InSe van der Waals heterostructure / Y. Lee, R. Piconi, H. Overweg, M. Eich, P. Rickhans, A. Patane, Z.R. Kudrynskyi,  Z.D. Kovalyuk, R. Gorbachev, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Ihn, K. Ensslin // 2D Materials. – 2018. – V. 5. – P. 035040-1 – 035040-6.
2. Balakrishnan N. Engeeniring p-n junctions and bandgap tuming of InSe nanolayers by controlled oxidation / N. Balakrishnan, Z. Kudrynkyi, E. Smith, M. Fay, Makarovsky O., Z. Kovalyuk, Eaves L., P. Beton, A. Patane // 2D Materials. – 2017. – V. 4. – P. 025043-0250523.
3. Beardsley R. Nanomechanical probing of the layer/substrate interface of an exfoliated InSe sheet on sapphire / R. Beardsley, А.V. Akimov, J. Greener,  G.W. Mudd, Z.R. Kudrinskyi, Z.D. Kovalyuk, A. Patanè, A. J. Kent // Scientific Reports.  – 2016. – V. 6, N 1. – P. 26970-1 – 26970-7.
4. Greener J. Coherent acoustic phonons in van der Waals nanolayers and heterostructures / J. Greener,  А.V. Akimov,  V.E. Gasev, Z.R. Kudrinskyi, P.H. Beton, Z.D. Kovalyuk, A.R. Beardsley, T. Taniguchi, K. Watanabe,  A.J. Kent, A. Patanè // Physical Review B.  – 2018. – V. 98. – P. 075408-1 – 075408-15.
5. Velichko A.V. Highly-mismatched InAs/InSe heterojunction diode / A.V. Velichko, Z.R. Kudrynskyi, D.M. Di Paola, Makarovsky, M. Kasaria, A. Krier, I.C. Sandall, C.H. Tan, Z.D. Kovalyuk, A. Patane  // Applied physics Letters. – 2016. – V. 109. – P. 182115-1 – 182115-4.
6. Skipetrov E.P. Temperature and pressure coefficients of iron resonant impurity level in PbTe / E.P. Skipetrov, O.V. Kruleveckaya, L.A. Skipetrova, V.E. Slynko // Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 121, No. 4. – P. 045702-1 – 045702-7.
7. Podgórni A. Magnetic order and the role of inhomogeneities in Ge1-x-yPbxCryTe bulk nanocomposite crystals / A. Podgórni, L. Kilanski, M. Górska, R. Szymczak, A. Avdonin, M. Arciszewska, W. Dobrowolski, A. Reszka, B.J. Kowalski, V. Domukhovski, V.E. Slynko, E.I. Slynko // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 686 – P. 184-193.
8. Kilanski L. Magnetic and magnetotransport properties of Sn1-x-yCrxEuyTe crystals: the role of magnetic inhomogeneities / L. Kilanski, M. Górska, R. Szymczak, A. Podgórni, A. Avdonin, A. Reszka, B.J. Kowalski, V. Domukhovski, W. Dobrowolski, V.E. Slynko, E.I. Slynko // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 658. – P.  931-938.
9. Podgórni A. Anomalous Hall Effect and Magnetoresistance in Ge1-x-yPbxMnyTe Cluster-Glass System / A. Podgórni, L. Kilanski, M. Górska, R. Szymczak, V. Domukhovski, A. Reszka, B.J. Kowalski, B. Brodowska, W. Dobrowolski, V.E. Slynko, E.I. Slynko // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 658. – P. 265-271.
10. Skipetrov E. P. Convergence of iron resonant level with heavy-hole valence band in Pb1-xSnxTe alloys / E.P. Skipetrov, B.B. Kovalev, L.A. Skipetrova, A.V. Knotko, V.E. Slynko // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – V. 775. – P. 769–775 (in press).
11. Tkachuk I.G. Electrical properties of fotosensitive heterostructures n-FeS2/p-InSe / I.G. Tkachuk, I.G. Orletsky, Z.D. Kovalyuk, P.D. Marianchuk // Functional materials. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 463 – 470.
12. Liang G. Improved performance of InSe field-effect transistors by channel encapsulation  / G. Liang, Y. Wang, L. Han, Z-X. Yang, Q. Xin, Z. Kdrynskyi, Z. Kovalyuk, A/ Patane, A/ Song  // Semicond. Sci. Technol. – 2018. – V. 33. – P. 06Lt01-1 – 06Lt01-5.
13. Skipetrov E.P. Magnetic properties of Pb1-x-ySnxVyTe alloys / E.P. Skipetrov, N.S. Konstantinov, L.A. Skipetrova, A.V. Knotko, V.E. Slynko // EPJ Web of Conferences. – 2018. – V. 185. – P. 06010-1 – 06010-4.
14. Kilanski L. Magnetic interactions and magnetotransport in Ge1-xTMxTe diluted magnetic semiconductors / L. Kilanski, R. Szymczak, E. Dynowska, M. Górska, A. Podgórni, W. Dobrowolski, V.E. Slynko, E.I. Slynko, M. Romcevic, N. Romcevic // Proceedings of the III Advanced Ceramics and Applications Conference (Ed. W.E. Lee, Atlantis Press). – 2016. – P. 69-84.
15. Boledzyuk V. Preparation of nanocomposite Magnetic Compounds Based on layered semiconductors by Means of Electrochtmical Intercalation in a Gredient magnetic field /  V. Boledzyuk, A. Bakhinov, Z. Kovalyuk, Z. Kudrynskyi, V. Ivanov, V. Slyn’ko // Aсta Phys. Polonica A. – 2016. –  V. 130, № 3. – Р. 773 – 777.
16. Skipetrov E.P. Magnetic properties of diluted magnetic semiconductors Pb1-yFeyTe / E.P. Skipetrov, A.A. Solovev, A.V. Knotko, V.E. Slynko // Low Temperature Physics. – 2017. – V. 43, No. 4. – P. 466-474.
17. Górska M. Magnetic properties of clusters in IV-VI and II-IV-V2 diluted magnetic semiconductors / M. Górska, L. Kilanski, A. Podgórni, W. Dobrowolski, R. Szymczak, J.R. Anderson, I.V. Fedorchenko, S.F. Marenkin, V.E. Slynko, E.I. Slynko // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 10174. – P.  1017408-1 –  1017408-11.
18. Katerynchuk V.M. Excitonic photoconductivity of heterostructures based on gallium and indium selenides / V.M. Katerynchuk, Z.D. Kovalyuk, I.G. Tkachuk // Functional materials. – 2017. – V. 24, № 2. – P. 203 -205.
19. Kushnir B.V. Layered crystals FeIn2Se4, In4Se3 and heterojunctions of their basis / B.V. Kushnir, Z.D. Kovalyuk, V.N. Kateriynchuk, V.V. Netyaga, I.G. Tkachuk // Functional Materials. – 2017. – V. 24, № 3. – P. 372 – 375.
20. Самила А.К. Оперативный контроль полупроводниковых кристаллов InSe и GaSe методом ЯКР / А.К. Самила, Г.И. Ластивка, В.А. Хандожко, З.Д. Ковалюк // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 8. – С. 1055-1058.
21. Орлецкий И.Г. Электрические и фотоэлектрические свойства гетеро-переходов n-TiN/p-InSe. / И.Г. Орлецкий,  М.И. Иванчук, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук, М. Солован, З.Д. Ковалюк // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 339-343.
22. Скипетров Е.П. Вклад кластеров железа в магнитные свойства сплавов Pb1-yFeyTe / Е.П. Скипетров, А.А. Соловьев, В.Е. Слынько // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 6. – С.538-543.
23. Скипетров Е.П. Кинетика изменения концентраций магнитных ионов примеси в сплавах Pb1−x−ySnxVyTe при легировании / Е.П. Скипетров, Н.С. Константинов, Л.А. Скипетрова, А.В. Кнотько, В.Е. Слынько // Физика и техника полупроводников. – 2018. –  Т. 52, № 7. – С. 686-693.
24. Ковалюк З.Д. Гетеропереходи на основі шаруватих кристалів InSe/In4Se3 / З.Д. Ковалюк, В.М. Катеринчук, Б.В. Кушнір, М.В. Товарницький  // Журнал  фізики  та  інженерії поверхні. – 2016.  – Т. 1,  № 3.  –  С. 242-245.
25. Ковалюк З.Д. Створення гетеропереходів nInSe-графіт / З.Д. Ковалюк, І.Г. Ткачук, Р.Л. Поцілуйко, В.М. Катеринчук, В.В. Нетяга, В.М. Камінський //  Журнал  фізики  та  інженерії поверхні. – 2016.  – Т. 1,  № 3.  –  С. 251-254.
26. Катеринчук В.М. Фотоелектричні властивості гетеропереходів власний оксид - p In4Se3 / В.М. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, Б.В. Кушнір, О.С. Литвин  // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 03032-1 – 03032-4.
27. Ластівка Г.І. Температурна залежність спектрів ЯКР і параметрів кристалічної гратки InSe // Г.І. Ластівка, А.П. Саміла, М.Д. Раранський, З.Д. Ковалюк, В.Н. Балазюк, В.О. Хандожко // Журнал нано- та електронної фізики. – 2017. – Т. 9,  № 2. – С. 02023-02027.