



ДУБІКОВСЬКИЙ
Олександр Володимирович – доктор філософії (PhD), науковий співробітник відділу іонно-променевої інженерії і структурного аналізу Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України

МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ІЧ-ФОТОПРИЙМАЧІВ НА ОСНОВІ АНТИМОНІДУ ІНДІЮ

За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
28 грудня 2022 року

Розроблено чисельну процедуру розрахунків вольт-амперних характеристик, яку застосовано для аналізу InSb-діода з р-n-переходом. Визначено оптимальний профіль легування електрично активної домішки. Показано, що для досягнення високої ефективності фотодетектування потрібно застосовувати мультиенергетичну іонну імплантацію з енергією від 20 до 200 кеВ. Відповідну технологію було реалізовано. На різних етапах процесу використовували методи мас-спектрометрії вторинних іонів, що дало можливість коригувати технологічні параметри, зокрема контролювати профілі розподілу домішок. Встановлено, що оксиди індію та антимоніду, а також сегрегація антимоніду призводять до витоків струму. Знайдено режими додаткової обробки, які знижують такі паразитні ефекти. Досліджено процеси насивації діодних структур і показано, що оптимальними покриттями є плівки нітриду кремнію. Розроблено технологію та виготовлено експериментальні зразки фотодіодів.

Ключові слова: ІЧ-фотоприймач, мас-спектрометрія вторинних іонів, іонне легування, багатошарові наноструктури.

Напівпровідники з вузькою забороненою зоною, такі як антимонід індію (InSb), і досі залишаються актуальними ключовими елементами сучасних інфрачервоних технологій. Ці технології орієнтовано на розроблення ефективних фотоприймачів для різних галузей застосування. У межах ІЧ-діапазону є дві важливі смуги: 3–5 мкм і 8–12 мкм, які називають середньохвильовим (middle wavelength infrared – MWIR) і довгохвильовим (long wavelength infrared – LWIR) діапазонами [1] і які відповідають мінімумам абсорбції в атмосфері. Монокристалічний InSb є найбільш використовуваним матеріалом для зображень MWIR, маючи відсічку довжини хвилі на рівні

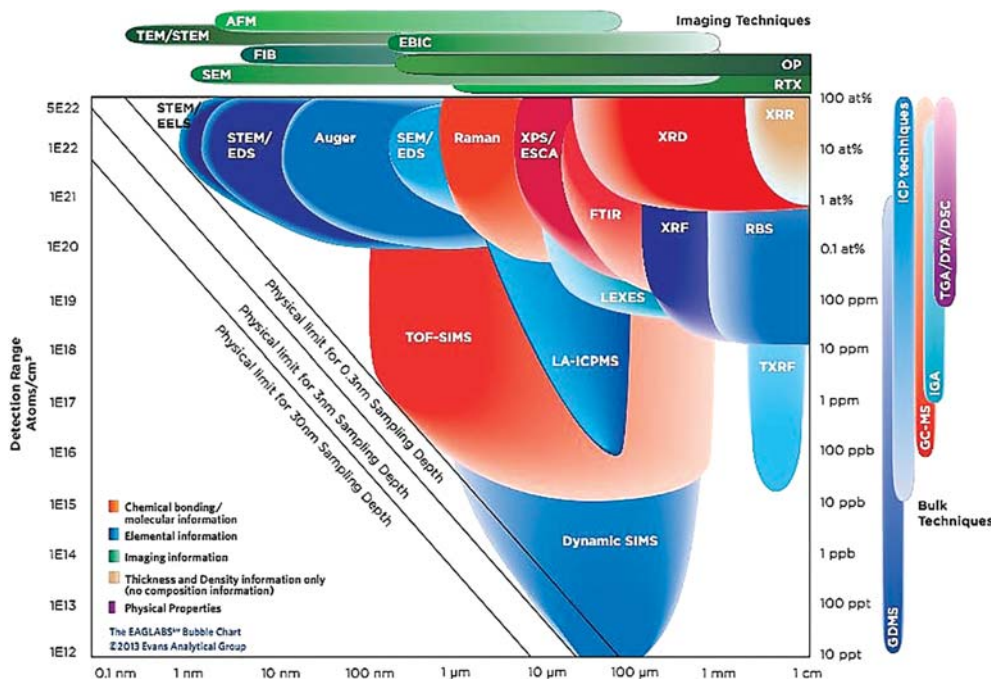


Рис. 1. Діаграма можливостей різних аналітичних методів. EAG Laboratories. <https://www.eag.com/techniques/>

5,5 мкм за температури 77 К, що є сприятливою умовою для виготовлення ефективних ІЧ-фотодетекторів.

Метою нашої роботи було розроблення технології виготовлення багатоеlementних інфрачервоних фотоприймачів на основі монокристалів антимоніду індію для оптико-електронних приладів і пристроїв. Її актуальність пов'язана переважно із застосуванням таких інфрачервоних систем у військовій галузі — приціли, головки самонаведення ракет, системи тепловидення, пошуку і супроводу цілі [2, 3].

Процес виготовлення ІЧ-фотоприймачів складається з таких основних технологічних операцій: іонне легування, термічна обробка, фотолітографія, нанесення пасивуючих діелектричних шарів, травлення, нанесення контактів. Реалізація цього процесу потребує використання різних методів контролю параметрів після кожної технологічної операції. Найбільш важливим є контроль глибини залягання і концентрації домішок на кожному етапі технологічного процесу виготовлення шаруватої багатофазної структури фотоприймача.

Для досліджень було обрано методи мас-спектрометрії вторинних іонів (secondary ion mass spectrometry — SIMS) у різних модифікаціях — *динамічний метод* (dynamic SIMS) та *часопролітний* (ToF-SIMS), що дає змогу отримувати інформацію про глибинний та латеральний розподіл домішок і домішкових комплексів.

Цей вибір стає зрозумілим у результаті аналізу діаграми (рис. 1), на якій показано можливості основних аналітичних методів. По осі ординат наведено значення чутливості методів, а по осі абсцис — показники латеральної роздільної здатності. Максимальну чутливість має динамічний метод (dynamic SIMS) — на рівні 10^{12} атомів на 1 см^3 , а часопролітний метод (ToF-SIMS) характеризується високою латеральною роздільною здатністю і дає інформацію про тип хімічного зв'язку. Всі інші методи мають на кілька порядків нижчу чутливість, недостатню для контролю технологічних процесів.

У центрі колективного користування, створеному в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, для мас-спектрометричних досліджень динамічним ме-

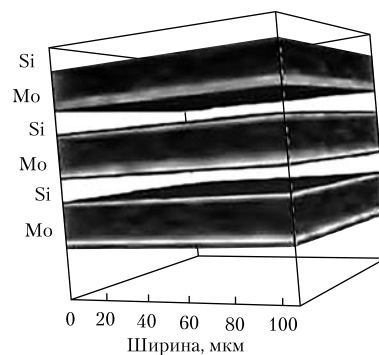
тодом використовують прилад Atomika 4000, а для досліджень часопротитним методом — аналізатор TOF-SIMS IV.

Перевагами методу часопротитної мас-спектрометрії є висока роздільна здатність по глибині (менш як 1 нм) та можливість реєстрації всього спектра мас і його реконструкції за допомогою програмного забезпечення. Розглянемо, як це реалізовано в експериментах. Короткий малопотужний імпульс тривалістю 2 нс і величиною струму 1,5 пкА збуджує генерацію вторинних іонів з 1–2 поверхневих шарів, після чого вторинні іони потрапляють в аналізатор системи, де реєструється час польоту іона, який залежить від його маси. Це дозволяє досліджувати практично непорушену структуру, отримуючи достовірну інформацію про склад і хімічні зв'язки досліджуваного об'єкта.

Ще однією важливою перевагою методу є можливість отримувати тривимірні зображення профілю розподілу елементів і мати вичерпну інформацію про його елементний склад у кожній точці досліджуваного простору. Це дуже актуально для аналізу причин відмов пристроїв. На рис. 2 наведено приклад зображення шаруватої структури [4], де кожний шар відповідає розподілу певної домішки в тривимірному просторі.

Для формування *p*-області в InSb проводять імплантацію акцепторної домішки, якою

Рис. 2. Тривимірне зображення періодичної шаруватої молибден-кремнієвої структури, відтворене з профілю розподілу



можуть бути атоми берилію або магнію [5, 6]. Використання імплантації берилію має істотні переваги, оскільки легкий іон утворює значно менше дефектів і проникає на більшу глибину за малих енергій імплантації. Ми виконали розрахунки профілів розподілу берилію і показали, що оптимальною є імплантація з різними енергіями та дозами. Малі енергії імплантації дозволяють забезпечити високу якість контакту, а великі енергії — отримати необхідну глибину залягання *p-n*-переходу.

На рис. 3 наведено профілі розподілу атомів берилію, імплантованих з різними дозами та енергіями 45 і 150 кеВ, один з яких було отримано за допомогою теоретичних розрахунків (рис. 3а), а другий — експериментально у виготовлених фотодіодах (рис. 3б). Як можна бачити, розрахований профіль максимально наближений до реального [7]. Для досліджень

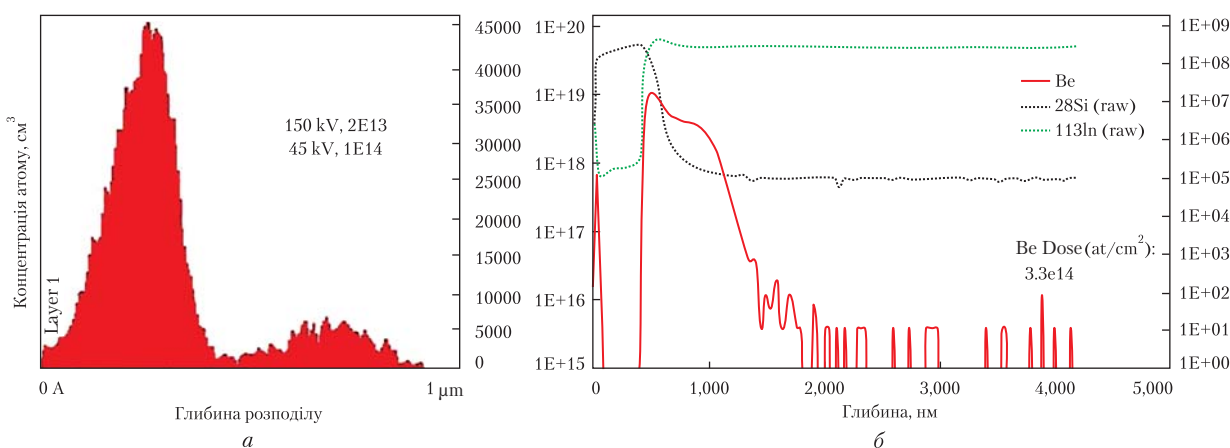


Рис. 3. Профілі розподілу берилію: *a* — розрахований; *б* — реалізований в ІЧ-фотоприймачі

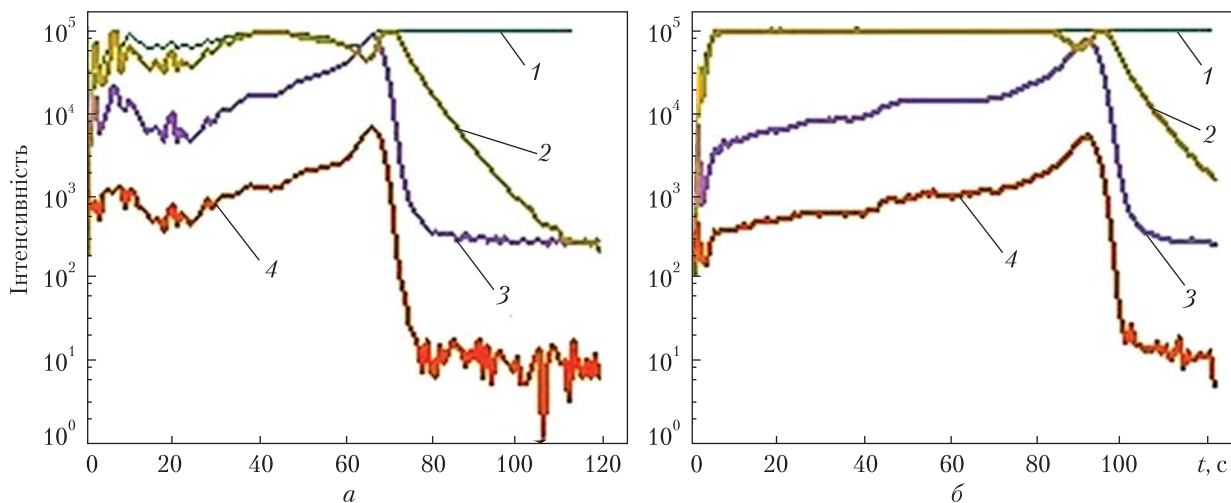


Рис. 4. Профілі розподілу елементів в оксинітридній плівці до (а) та після (б) оптимізації технологічного процесу: 1 – Si; 2 – SiN; 3 – SiO₂; 4 – O₂

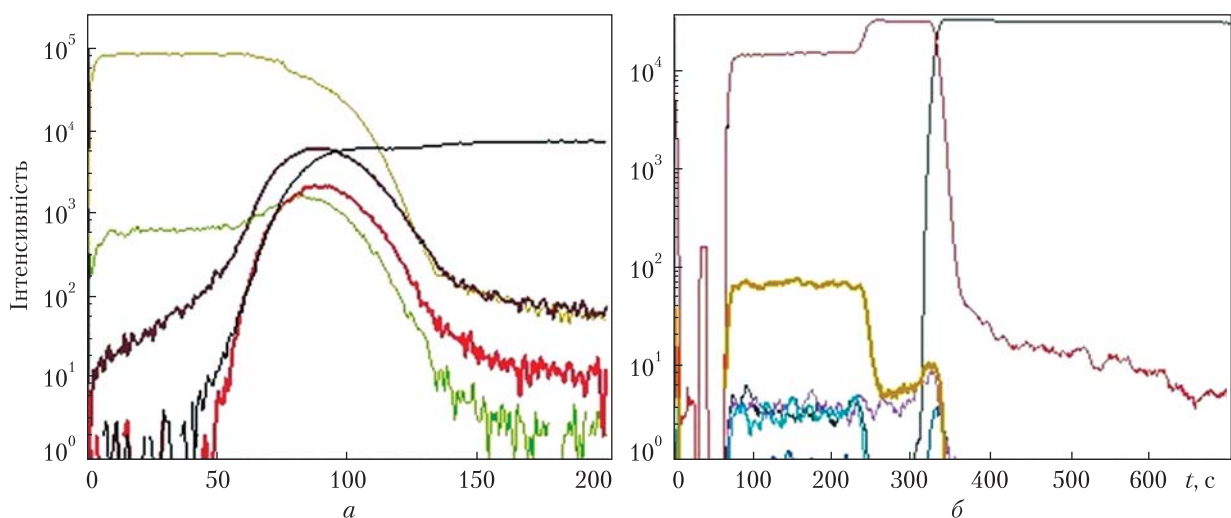


Рис. 5. Профілі розподілу домішок на межі поділу оксинітридної плівки та антимоніду індію до (а) та після (б) оптимізації технологічного процесу

профілів розподілу берилію було використано динамічний метод SIMS, оскільки з усіх мас-спектрометричних методів він має найбільшу чутливість.

Було також проведено аналіз формування пасивуючих діелектричних оксинітридних плівок. На рис. 4 зображено профілі розподілу елементів, які є складовими оксинітридної плівки. Основною проблемою під час нане-

сення плівок є формування однорідної плівки з низьким вмістом кисню. Розподіл компоненти SiN (рис. 4а, крива 2) по глибині плівки показав, що плівка є досить неоднорідною і містить значну кількість кисню (рис. 4а, крива 4). Оптимізація режимів нанесення плівки (швидкість нанесення, склад газової суміші, температура, вакуумні умови) дозволила отримати однорідні плівки зі значно меншою кон-

центрацією кисню (рис. 4б). Отже, дані мас-спектрометричного аналізу щодо розподілу компонентного складу плівок дали змогу скоригувати співвідношення компонентів газової суміші, з якої відбувається нанесення плівки, і в такий спосіб забезпечити однорідність пасивуючих покриттів (рис. 4б, крива 2).

У дослідженнях межі поділу плівки оксинітриду та антимоніду індію було виявлено, що на початковій стадії нанесення плівки на межі поділу формуються оксиди індію та антимоніду (рис. 5а), які набувають провідних властивостей при подальших температурних обробках. На рис. 5б наведено профіль розподілу іонів у пасивуючому покритті, яке було нанесено після оптимізації технологічного режиму. Як видно, запропонована технологія дозволяє уникнути формування оксидів індію та антимоніду і суттєво поліпшити характеристики ІЧ-фотоприймачів.

Важливими є також дослідження контактних областей фотодіода, які являють собою складну багатшарову структуру, що складається з шарів нікелю, хрому, золота і забезпечує адгезію та високу провідність контактної області.

З використанням часопротитного методу (ToF-SIMS) було показано, що причиною великих зворотних струмів є дифузія нікелю та хрому в область *p-n*-переходу. Для зменшення дифузії ми запропонували змінити температурні режими формування контактних областей.

Експериментально було виготовлено одноеlementні, а також 6- і 13-elementні ІЧ-фотоприймачі.

Отже, в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України розроблено методики мас-спектрометричного аналізу домішкового складу структур на різних етапах технологічного виготовлення фотоприймачів ІЧ-діапазону спектра на основі InSb. Запропоновано чисельну процедуру розрахунків вольт-амперних характеристик і застосовано її для аналізу InSb-діода з *p-n*-переходом. Показано якісний збіг розрахунків з експериментальними результатами. Визначено оптимальний профіль легування InSb іонами Be^+ , що забезпечує ефективне детектування. Розроблено технологію та виготовлено експериментальні зразки ІЧ-фотоприймачів для ділянки спектра 3–5 мкм.

REFERENCES

1. Karim A., Andersson J.Y. Infrared detectors: Advances, challenges and new technologies. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2013. **51**: 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/51/1/012001>
2. Rogalski A. Infrared detectors for the future. *Acta Physica Polonica A.* 2009. **116**(3): 389–405. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.389>
3. Downs C., Vandervelde T.E. Progress in infrared photodetectors since 2000. *Sensors (Basel)*. 2013. **13**(4): 5054–5098. <https://doi.org/10.3390/s130405054>
4. Oberemok O., Sabov T., Dubikovskiy O., Kosulya O., Melnik V., Romanyuk B., Popov V., Liubchenko O., Kladko V., Zubarev E., Pershyn Y. The elemental composition mixing in a Mo/Si multilayer structure under overheating. *Materials Today: Proceedings*. 2021. **35**(4): 579–583. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.018>
5. Liu J. Rapid thermal annealing characteristics of Be implanted into InSb. *Appl. Surf. Sci.* 1998. **126**(3-4): 231–234. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(97\)00695-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(97)00695-8)
6. Goltvyanskyi Yu.V., Gudymenko O.J., Dubikovskiy O.V., Liubchenko O.I., Oberemok O.S., Sabov T.M., Sapon S.V., Chunikhina K.I. Investigation of photodiode formation processes in InSb by using beryllium ion implantation. *Optoelectronics and Semiconductor Technique*. 2017. **52**: 141–150. <https://doi.org/10.15407/jopt.2017.52.141>
7. Korotyeyev V.V., Kochelap V.O., Sapon S.V., Romaniuk B.M., Melnik V.P., Dubikovskiy O.V., Sabov T.M. Be-ion implanted p-n InSb diode for infrared applications. Modeling, fabrication and characterization. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2018. **21**(3): 294–306. <https://doi.org/10.15407/spqeo21.03.294>

Oleksandr V. Dubikovskiy

*V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1504-8440>

MASS SPECTROMETRIC STUDIES IN THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING MULTI-ELEMENT IR PHOTODETECTORS BASED ON INDIUM ANTIMONIDE

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 28, 2022

A numerical procedure for calculating the current-voltage characteristics was developed, which was applied to the analysis of an InSb diode with a p-n junction, and the optimal doping profile of an electrically active impurity was determined. It has been shown that to achieve a high efficiency of photodetection, it is necessary to use multi-energy ion implantation with energies from 20 to 200 keV. The corresponding technology was implemented, and secondary ion mass spectrometry methods were used at different stages of the process, which made it possible to adjust the technological parameters, in particular, control the impurity distribution profiles. It has been established that oxides of indium and antimonide, as well as segregation of antimonide, lead to current leakages, additional processing modes have been found that lead to a decrease in such parasitic effects. The processes of passivation of diode structures have been studied and it has been shown that silicon nitride films are the optimal coatings. A technology has been developed and experimental models of photodiodes have been manufactured.

Keywords: IR photodetector, secondary ion mass spectrometry, ion doping, multilayer nanostructures.

Cite this article: Dubikovskiy O.V. Mass spectrometric studies in the technology of manufacturing multi-element IR photodetectors based on indium antimonide. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (2): 79–84. <https://doi.org/10.15407/visn2023.02.079>