

## ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

## OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS 73.40.LQ, 73.61.GA

УДК 621.383.522

### ФОРМУВАННЯ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ІЧ-ФОТОЧУТЛИВИХ МАТРИЦЬ ФОТОПРИЙМАЧІВ, ФОРМАТУ 128X128 ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ CdHgTe

*Ф. Ф. Сизов, З. Ф. Цибрій, М. В. Вуйчик, Є. О. Білевич, М. В. Апатська,  
М. І. Смолій, І. О. Лисюк, К. В. Андрєєва, М.М. Михайлов<sup>1</sup>*

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова Національної Академії наук України,  
пр. Науки 41, Київ 03028, Україна

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників СВ РАН, Новосибірськ, Росія  
sizov@isp.kiev.ua, vuychik@isp.kiev.ua, tsybrii@isp.kiev.ua, bilevych@isp.kiev.ua

### ФОРМУВАННЯ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ІЧ-ФОТОЧУТЛИВИХ МАТРИЦЬ ФОТОПРИЙМАЧІВ, ФОРМАТУ 128X128 ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ CdHgTe

*Ф. Ф. Сизов, З. Ф. Цибрій, М. В. Вуйчик, Є. О. Білевич, М. В. Апатська,  
М. І. Смолій, І. О. Лисюк, К. В. Андрєєва, М.М. Михайлов*

**Анотація.** Приведено результати робіт по створенню багатоелементних фотоприймальних пристроїв інфрачервоного діапазону на основі CdHgTe. Запропоновано ряд оригінальних технологічних рішень, з урахуванням механічних та електрофізичних особливостей тонкоплівкового CdHgTe, зокрема: пасивація поверхні епітаксійних плівок CdHgTe, модифікація режимів фотолітографічних процесів, багатошарова металізація та прецизійна гібридизація. За допомогою розробленої технології було сформовано матриці фотоприймачів формату 128x128 елементів.

**Ключові слова:** CdHgTe, інфрачервоний фотоприймач, епітаксія, фотолітографія

### FORMING OF A 128X128 MULTIELEMENT IR-PHOTODETECTORS BASED ON CdHgTe

*F. F. Sizov, Z. F. Tsybrii, M. V. Vuichyk, Ye. O. Bilevych., M. V. Apatskaya,  
M. I. Smoliy, I. O. Lysuk, K. V. Andreeva, N. N. Michailov*

**Abstract.** Results on CdHgTe based infrared multielement photodetectors formation are presented. Taking into account specific mechanical and electro-physical properties of CdHgTe epitaxial layers several technological solutions were proposed. These are: surface passivation, modification of photolithography procedure, multilayer metallization and hybridization, which are necessary for photodetector arrays reliable operations. By using these technological procedures 128x128 infrared focal plane arrays for 3-5  $\mu\text{m}$  wavelength regions have been produced.

**Keywords:** CdHgTe, infrared photodetector, epitaxy, photolithography

## ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИК-ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТРИЦ ФОТОПРИЕМНИКОВ, ФОРМАТА 128X128 ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ CDHGTE

*Ф. Ф. Сизов, З. Ф. Цибрий, Н. В. Вуйчик, Е. О. Билевич, М. В. Апатская, М. И. Смолий, И. А. Лысюк, Е. В. Андреева, Н. Н. Михайлов*

**Аннотация.** Приведены результаты работ по созданию многоэлементных фотоприемных устройств инфракрасного диапазона на основе CdHgTe. Предложено ряд оригинальных технологических решений с учетом механических и электрофизических особенностей тонкопленочного CdHgTe, в частности: пассивация поверхности эпитаксиальных пленок CdHgTe, модификация режимов фотолитографических процессов, многослойная металлизация и прецизионная гибридизация. С помощью разработанной технологии были сформированы матрицы фотоприемников формата 128x128 элементов.

**Ключевые слова:** CdHgTe, инфракрасный фотоприемник, эпитаксия, фотолитография

### Вступ

Розвиток тепловізійних систем іде шляхом застосування великоформатних матриць. Для розробки і виготовлення таких матриць основним матеріалом є гетероепітаксійні структури телуридів кадмію і ртуті, які вирощуються методами рідкофазної (РФЕ) та молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ).

Вузкощілинний напівпровідник CdHgTe є основним матеріалом для виготовлення інфрачервоних (ІЧ) детекторів в широкому діапазоні спектру (3 — 14 мкм) [1-6]. У зв'язку з цим важливою є розробка та вдосконалення технології формування фотоприймального пристрою на базі CdHgTe.

Матеріал твердих розчинів кадмій-ртуть-телур (КРТ) є нестійким до механічних напружень та температурних впливів. Фізико-хімічні властивості даного матеріалу накладають суворі вимоги до температурних режимів проведення технологічних процесів та при складанні фотоприймального модуля (фоточувливої матриці та кремнієвої схеми зчитування) і обмежують можливість використання стандартних технологічних операцій, прийнятих в мікроелектроніці. Вказані обмеження вимагають розробки спеціальних технологічних прийомів.

З метою виконання цих вимог було запропоновано спеціальні елементи технології нанесення пасивації та шарів металів, фотолитографічних процесів з використанням так званого методу “вибуху” (що особливо актуально для створення шарів металу великої товщини), технологію оплавлення індієвих площадок для одержання кульок з однаковою висотою,

та технологію гібридизації схем зчитування та лінійок і матриць фотоприймачів.

### Результати та обговорення.

Для виготовлення сучасних ІЧ фотодетекторів на основі вузкощілинного напівпровідника CdHgTe використовуються шари, вирощені методом рідкофазної епітаксії на підкладках CdTe та CdZnTe, а також методом молекулярно-променевої епітаксії, які були вирощені на підкладках CdTe/ZnTe/GaAs [2].

Властивості ІЧ фотодіодів на основі напівпровідників CdHgTe істотно залежать від хімічної і електронної структури поверхні, тому існує необхідність у створенні пасиваційного шару для зменшення поверхневих струмів та запобігання деградації структур. Для формування пасиваційного шару CdTe на вирощеному за допомогою рідкофазної епітаксії шарі CdHgTe на підкладці CdZnTe нами було використано метод молекулярної епітаксії “гаряча стінка” [7, 8]. Основна особливість методу “гарячої стінки” полягає в тому, що процес росту тонких плівок проходить в умовах максимально наближених до рівноважних. Такі умови забезпечуються квазізамкнутим простором, у якому вирощують плівку, а також постійним градієнтом температур. Нагрів CdHgTe приводить до зміни складу поверхневого шару, тому нами було розроблено технологічний процес, який дозволяє уникнути тривалого нагріву структури CdHgTe/CdZnTe під час вирощування пасиваційного шару телуриду кадмію. Вирощені плівки телуриду кадмію мали дрібнозернисту полікристалічну структуру. Товщина напиленних плівок CdTe визначалася за допомогою еліпсометрії і була порядку 600-800 Å.

На рис.1 показано типова мікрофотографія сколу структури, зроблена з допомогою високороздільного оптичного мікроскопа. Як видно з рисунка, структура складається з достатньо товстої підкладки CdZnTe (на рис.1 позначено 1), епітаксійного шару CdHgTe, вирощеного методом рідкофазної епітаксії (на рис.1 позначено 2), а також відносно тонкого епітаксійного шару CdTe (на рис.1 позначено 3).

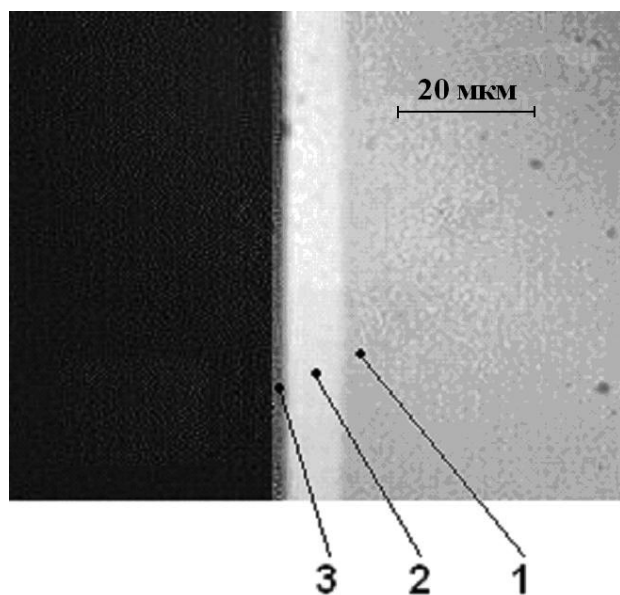


Рис. 1. Мікрофотографія сколу структури: 1 — підкладка CdZnTe, 2 — епітаксійний шар CdHgTe, 3 — епітаксійний шар CdTe

Для створення р-п переходів у вузькощілинному напівпровіднику CdHgTe, було використано іонну імплантацію іонами В<sup>+</sup>. Важливим фактором для формування якісних р-п-переходів є радіаційні дефекти, а також механічні напруження, які виникають в імплантованому шарі. Властивості і механізми формування р-п-переходів в CdHgTe вивчалися в ряді робіт [6, 9-11]. Так як іонна імплантація проводиться в епітаксійний шар CdHgTe, то основний механізм формування легованої області полягає в тому, що іони вибивають атоми ртуті і всі переходять у міжвузлові атоми. Міжвузля дифундують в епітаксійну плівку і взаємодіють з вакансіями ртуті, що приводить до зміни типу провідності з р-типу до п-типу, в результаті формується п-р перехід. В нашому випадку використано імплантацію бором, щоб формувати п-область за рахунок дифузії радіаційних дефектів, включаючи атоми ртуті в матеріалі, збагаченому вакансіями ртуті, які є акцепторами.

Іонну імплантацію було проведено на імпланторі “ВЕЗУВІЙ-5” з енергіями іонів бору 50-100 кеВ та дозами від 3,2 до 6,4 мкКл/см<sup>2</sup>.

Для забезпечення надійної роботи фотоприймального пристрою на базі CdHgTe, а саме фоточутливої матриці та кремнієвої схеми зчитування, необхідно досягти високоякісного прецизійного з’єднання його складових частин. Це було здійснено за допомогою операції гібридизації. Гібридне з’єднання повинно відповідати низці наступних вимог: забезпечувати невід’ямляючий контакт; мати низький опір; забезпечувати пластичне та міцне з’єднання частин, яке повинно компенсувати різницю коефіцієнтів термічного розширення кремнієвої схеми зчитування та лінійки (матриці) фотоприймальних елементів при робочій температурі 80 К. З метою виконання цих вимог було розроблено елементи технології фотолітографічних процесів та методику нанесення шарів металів для формування електричних контактів.

Процес виготовлення металічних контактів до фоточутливих елементів включає в себе низку технологічних операцій:

- “вскриття” вікон у пасиваційному шарі CdTe для забезпечення омичного електричного контакту. Для витравлення вікон в пасивації було підбрано спеціальний травник на основі мінеральних кислот, який забезпечує низьку швидкість травлення CdTe, що дозволяє повністю зняти шар пасивації, не пошкоджуючи епітаксійну плівку КРТ, оскільки глибина залягання р-п-переходу становить 3-4 мкм [5];

- фотолітографічні процеси. Нами було використано метод так званої “вибухової” фотолітографії. Даний метод дозволяє вилучити надлишок металу разом із шаром фоторезисту і метал залишається тільки на контактних площадках. При цьому уникаються як вплив агресивних хімічних середовищ на поверхню структури, так і процес дублення фоторезисту, який відбувається при високих температурах (більше 100 °С), що є критичним для нашого матеріалу. Ця методика потребує використання товстих шарів фоторезисту при формуванні контактних площадок з металевих плівок товщиною 3-5 мкм, тому нами були розроблені режими експонування, проявлення та сушки шарів фоторезисту, товщиною до 7 мкм. Це дало змогу одержати вікна у фоторезисті правильної форми та заданого розміру (рис.2). Дану методику було використано, як для одержання площадок

проміжних металів, так і для виготовлення останнього товстого шару індію, з якого формуються індієві кульки.

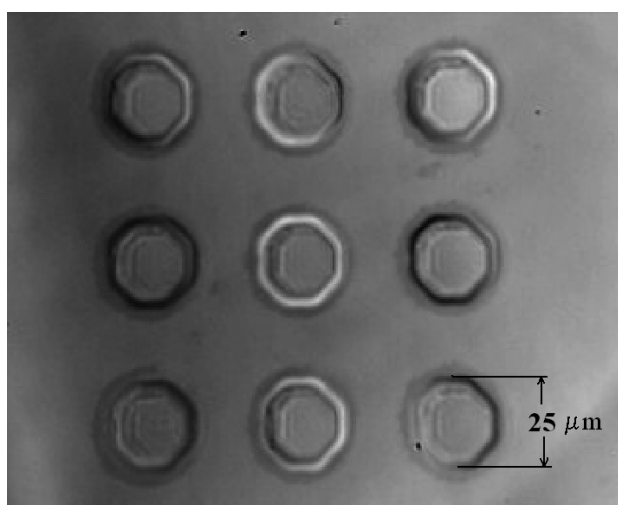


Рис. 2. Фотографія вікон, розміром 25x25 мкм, під контактні площадки у фоторезисті товщиною 5 мкм, зроблена за допомогою модернізованого інтерферометра “Мікрон-альфа”

— Завершальним етапом виготовлення матриці фотодіодів є формування контактних виводів для забезпечення електричного з’єднання із кремнієвою схемою зчитування. Для формування багатоелементної системи контактів було використано трьохшарову металізацію на базі металів індію та нікелю із різною товщиною шарів. Метали наносились методом термічного напилення у вакуумі та методом магнетронного розпилення. Проміжний шар нікелю надає контактам необхідної механічної міцності та стабільності, а шари індію забезпечують пластичність та пружність. Останній шар (товстий) індію оброблявся термічно без доступу повітря, в результаті чого було отримано контакти у вигляді кульок. Індієві контакти повинні виступати над поверхнею кристала для того, щоб уникнути впливу східчастого рельєфу мікросхеми, тобто висота контактів повинна складати 8-10 мкм. Типовий вигляд індієвих контактів сформованих у вигляді кульок показано на рис. 3.

Електричні параметри виготовлених фотодіодів контролювались за допомогою вимірювання вольт-амперних характеристик мікрозондовим методом при азотних температурах на спеціально розробленому обладнанні [11]. На рис. 4-5 приведені вольт-амперні характеристики фотодіодів із матриць формату 128x128, сформованих іонною імплантацією бору у

епітаксійні шари  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x \approx 0,3$ , товщина епітаксійних шарів була 14-18 мкм, концентрація дірок  $N_p = (0,4 \div 1) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , рухливість  $\mu = 380 \div 450 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ), вирощені методами рідкофазної та молекулярно-променевої епітаксії.

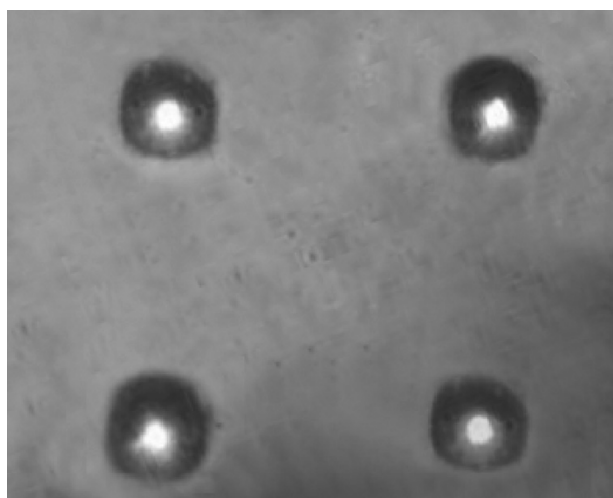
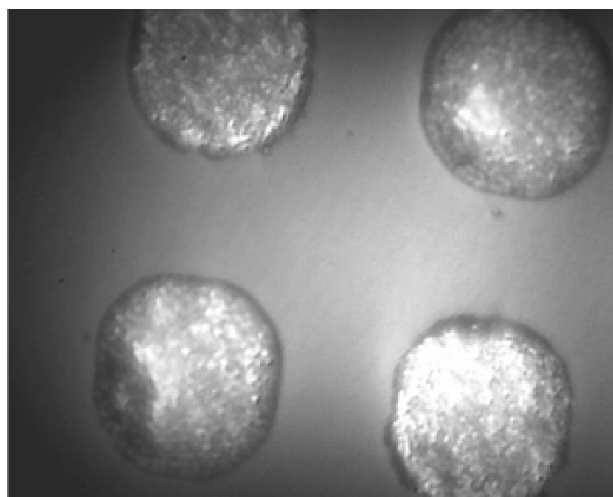
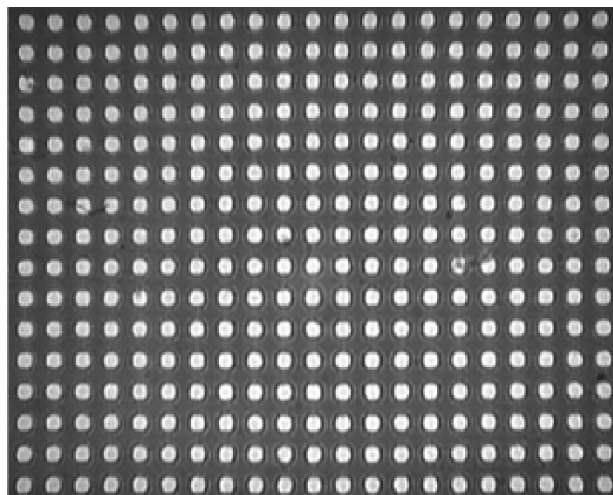


Рис. 3. Мікрофотографії контактних площадок і сформованих індієвих кульок матриці КРТ, формату 128x128 елементів

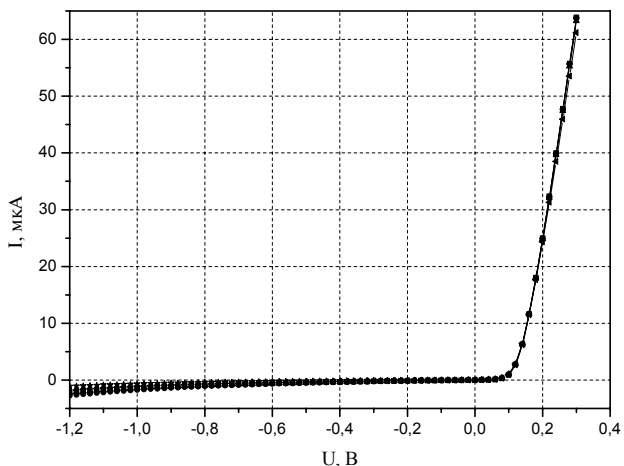
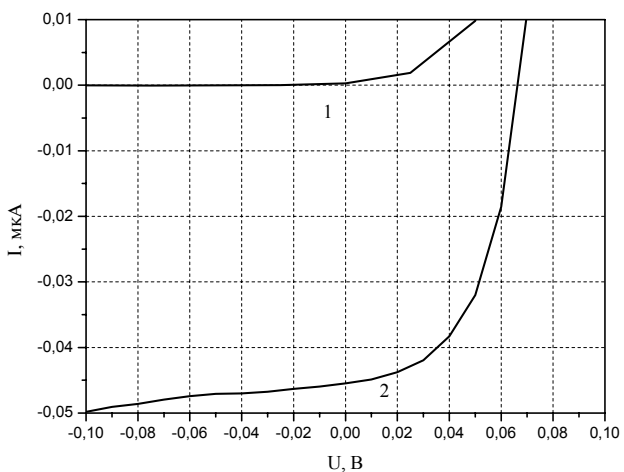
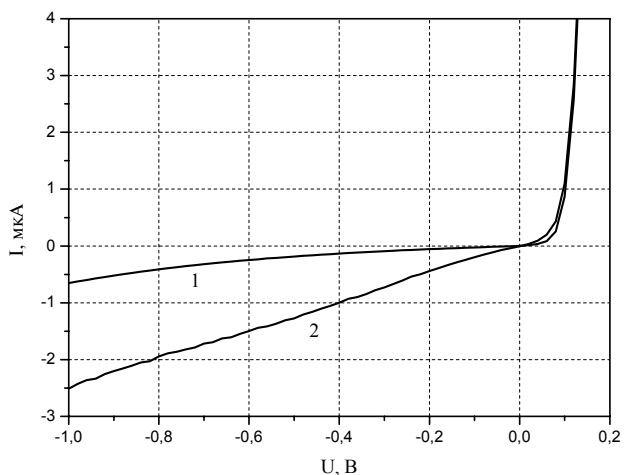


Рис. 4. Типові темнові вольт-амперні характеристики фотодіодів з масиву матриці, формату 128x128 елементів, виготовленої на основі шарів  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x \approx 0,3$ ) при  $T=80$  К



а)



б)

Рис. 5. Темнові (криві 1) та виміряні при фоновому освітленні (криві 2) вольт-амперні характеристики фотодіодів з масиву матриці, формату 128x128 елементів, виготовленої на основі шарів  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x \approx 0,3$ ), вирощених методами МПЕ (а) та РФЕ (б) при  $T=80$  К

Як видно з рисунків, величина темнових струмів фотодіодів при зворотному зміщенні - 50 мВ є у межах від ~10 до 50 нА. При фоновому освітленні фотодіодів темновий струм зростає до 300 нА.

Для формування фотоприймального модуля, з урахуванням вимог до отримання надійного гібридного з'єднання, було проведено прецизійне суміщення фотодіодної матриці на основі  $CdHgTe$  (мікрофотографія матриці, виготовленої за повним технологічним циклом, показана на рис. 6) з кремнієвою схемою зчитування. Ця операція проведена на розробленій установці "Гібрид". Мікрозбирання двох кристалів є процесом холодного зварювання (без нагріву обох чіпів). Гібридизатор дає можливість розмістити два кристали паралельно один над поверхнею другого, зорієнтувати кристали відповідно до топології схем, та провести холодне зварювання індієвих контактів, сформованих на обох кристалах у технологічному процесі їх виготовлення. за допомогою регульованої, спеціально підібраної величини механічного навантаження.

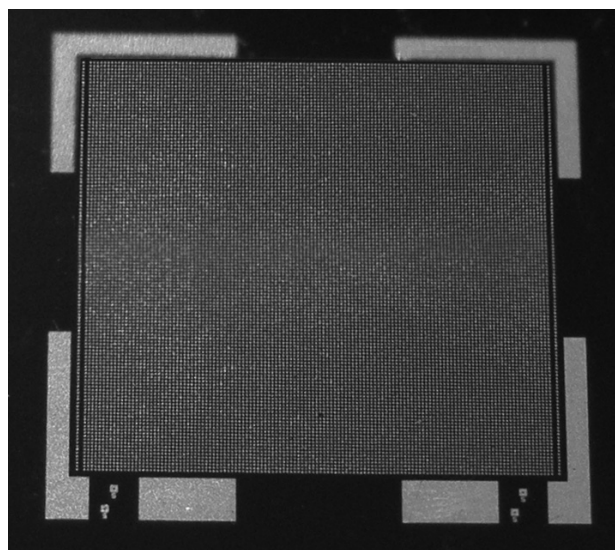


Рис. 6. Фотографія матриці КРТ, формату 128x128 елементів для спектрального діапазону 3-5 мкм

### Висновки

Розроблено елементи технологічних операцій формування багатовіментних матриць фотоприймачів за допомогою тонкоплівкової технології на основі  $HgCdTe$ . За допомогою розробленої технології були сформовані мат-

риці фотоприймачів, формату 128x128 пікселів та досліджено їх електричні параметри.

Автори вдячні колегам із Інституту фізики напівпровідників СВ РАН (м. Новосибірськ, Росія) Ю.Г. Сидорову та С.А. Дворецькому за надані зразки для проведення технологічних операцій.

### Список літератури

1. Rogalski A. Infrared detectors: status and trends. Review // *Progress in Quantum Electronics*. — 2003. — Vol. 27, Issues 2-3. — P. 59-210.
2. В. В. Васильев, А. С. Дворецкий, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов, В. Г. Ремесник, Ю. Г. Сидоров, А. О. Сусяков, А. Л. Асеев. Матричный фотоприемник на основе варизонного изотипного Р-р-перехода в слоях КРТ, выращенных методом Молекулярно-Лучевой Эпитаксии // *Автометрия*. — 2007. — №4. — С. 17-24.
3. Алфимов С.А., Анциферов А.П., Белоконев В.М., Варавин В.С., Дворецкий С.А, Дегтярев Е.В., Карташов В.А., Крайлюк А.Д., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г., Сабина И.В., Смирнов Р.Н., Сидоров Ю.Г., Асеев А.Л. Гетероэпитаксиальные структуры теллурида кадмия и ртути для инфракрасных фотоприемников // XIX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения — Москва (Россия). — 2006. — С. 14.
4. Сизов Ф.Ф., Фотоэлектроника для систем видения в “невидимых” участках спектра. — К.: Академперіодика, 2008. — 459 с.
5. Овсяк В.Н., Васильев В.В., Талипов Н.Х., Ромашко Л.Н., Козлов А.И., Клименко А.Г., Марчишин И.В., Фотоприемные устройства на основе слоев КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. — Новосибирск: Наука., 2001. — 375 с.
6. Bubulac L.O. Ion implantation study of HgCdTe // *Jpn. J. Appl. Phys.* — 1979. — Vol. 19, suppl. 19-1. — P. 495-500.
7. Ye. Bilevych, A. Soshnikov, L. Darchuk, M. Aratskaya, Z. Tsybrii, M. Vuychik, A. Boka, F. Sizov, O. Boelling, B. Sulkio-Cleff. Influence of substrate materials on the properties of CdTe thin films grown by hot-wall epitaxy // *J. Cryst. Growth*. — 2005. — Vol. 275. — P. e1177-e1181.
8. Андреева Е.В., Апатская М.В., Билевич Е.О., Вуйчик Н.В., Дарчук Л.А., Сарсембаева А.З., Сизов Ф.Ф., Цибрий З.Ф. Формирование пассивационного покрытия на основе теллурида кадмия для ИК-фоточувствительной матрицы HgCdTe // XIX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения — Москва (Россия). — 2006. — С. 110.
9. Soo-Ho Bae. Effects of post-implantation annealing on LWIR HgCdTe diode characteristics // *Proc. SPIE*. — 1998. — Vol. 3436, pt.1-2. — P.104-109.
10. Lopez-Rubio J.A.. Multi-step rapid thermal annealing or boron and indium implanted  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  // *J. Electron. Mat.* — 1994. — Vol. 23(11). — P. 1245-1249.
11. Сизов Ф.Ф., Забудский В.В., Голенков А.Г., Андреева К.В., Гузенко Г.О., Лысюк І.О. Методика измерения темновых токов полупроводниковых многоэлементных структур при криогенных температурах. // *Контрольно-измерительные приборы и автоматика*. — 2007. — №1. — С.4-7.