

## ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

## OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

---

---

УДК 621.382.2.029.64

### ВПЛИВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВІДПАЛУ НА СТРУМИ У ФОТОДІОДНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ КРТ

*Ф. Ф. Сизов, І. О. Лисюк, Ж. В. Гуменюк-Сичевська,  
З. Ф. Цибрій, К. В. Андрєєва*

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
проспект Науки 41, Київ, 03028,  
тел. 525–57–48, e-mail: lysiuk@isp.kiev.ua.

### ВПЛИВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВІДПАЛУ НА СТРУМИ У ФОТОДІОДНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ КРТ

*Ф. Ф. Сизов, І. О. Лисюк, Ж. В. Гуменюк-Сичевська, З. Ф. Цибрій, К. В. Андрєєва*

**Анотація.** Подано результати дії серії послідовних низькотемпературних відпалів (70°C, 80°C, 90°C, 100°C тривалістю 10 годин) на розподіл струму в фотодіодних лінійках ІЧ діапазону (8–12 мкм), сформованих на епітаксійних плівках КРТ. Моделювання ВАХ фотодіода з урахуванням рівняння балансу носіїв заряду показало, що концентрація рекомбінаційних центрів зменшується, а час життя неосновних носіїв заряду збільшується. Висунуто припущення, що деградація фотодіодів після відпалу з температурою 100°C зумовлено малою товщиною епітаксійної плівки, а р-n перехід після відпалу досягає інтерфейсної границі.

**Ключові слова:** фотодіоди, низькотемпературний відпал, дифузія, КРТ

### THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURE ANNEALING ON THE CURRENTS IN MCT PHOTODIODES

*F. Sizov, I. Lysiuk, J. Gumenjuk-Sichevska, Z. Tsybrii, K. Andreeva*

**Abstract.** The results of influence of a serial low temperature (70°C, 80°C, 90°C, 100°C during 10 hours) annealings of LW IR (8–12 μm) MCT photodiode arrays on dark current distribution have been shown. Modeling of the photodiode current-voltage characteristic subject to carriers balance equation has shown that concentration of recombination centers decreased, while lifetime of minority carriers increased. A supposition that after 100°C annealing the photodiode degradation is caused by the small film thickness and p-n-junction achieves the interface has been made.

**Keywords:** photodiodes, low temperature annealing, MCT, diffusion

## ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА ТОКИ В ФОТОДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРТ

*Ф. Ф. Сизов, И. А. Лысюк, Ж. В. Гуменюк-Сычевская, З. Ф. Цибрий, Е. В. Андреева*

**Аннотация.** Приведены результаты влияния серии последовательно проведенных низкотемпературных отжигов (70°C, 80°C, 90°C, 100°C длительностью 10 часов) на распределение тока в фотодиодных линейках ИК-диапазона (8–12 мкм), сформированных на эпитаксиальных пленках КРТ. Моделирование ВАХ фотодиода с учетом уравнения баланса носителей заряда показало, что концентрация рекомбинационных центров уменьшается, а время жизни увеличивается. Предполагается, что деградация фотодиодов после отжига с температурой 100°C обусловлена малой толщиной эпитаксиальной пленки, а p-n переход после отжига достигает интерфейсной границы.

**Ключевые слова:** фотодиоды, низкотемпературный отжиг, диффузия, КРТ

### Вступ

Відомо, що при низькотемпературному відпалі фотодіодів, сформованих на епітаксійних плівках кадмій-ртуть-телур (КРТ), відбувається покращення електричних характеристик: зменшення темного струму при від'ємних зміщеннях напруги, збільшення диференційного опору фотодіодів [1, 2]. В роботах подаються дані про погіршення електрофізичних параметрів КРТ після низькотемпературного відпалу [3]. Зміни у вольт-амперних характеристиках (ВАХ) фотодіодів пов'язують з відпалом радіаційних дефектів в області *p-n* переходу, просторовим зміщенням переходу в шар з більшою структурною досконалістю [1, 6] та збільшенням довжини *p-n* переходу, яке веде до зменшення тунельних струмів. Використовують температури відпалу в межах 90–150°C [1], 60–135°C [2], 120°C [6] тривалістю від 1 години, зразок знаходиться в атмосфері нейтрального газу, азоту, у вакуумі або повітрі.

Метою роботи було дослідження розподілу характеристик фотодіодної лінійки для далекого інфрачервоного діапазону ( $\lambda = 10$  мкм) при фіксованому зміщенні до та після низькотемпературного відпалу.

Дослідження проводилися на фотодіодних структурах, сформованих на плівках  $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$ , які вирощено методом молекулярно-променевої епітаксії. Товщина епітаксійного шару  $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$  8 мкм. Фотодіодний масив форматом  $2 \times 64$  елементів розміром  $30 \times 30$  мкм<sup>2</sup> формувалася методом імплантації іонів бору  $\text{B}^+$  з енергією 100 кеВ та дозою  $2 \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Металічні контакти формувалися методом вакуумного напилення індію та вибухової

фотолітографії. Вольт-амперні характеристики фотодіодів вимірювалися мікрозондовим методом при температурі 78 К [4].

### Теоретична модель

Для визначення параметрів фотодіода, ми застосували теоретичну модель [5]. Ця модель враховує основні механізми струмопереносу для фотодіодів КРТ: дифузійний, генераційно-рекомбінаційний, тунельний. Тунельний струм обраховувався з двох складових: міжзонного тунелювання та тунелювання за допомогою рекомбінаційних центрів Шоклі-Ріда-Хола. Міжзонне тунелювання відбувається, коли носії заряду безпосередньо переходять з енергетичних станів зон через діодний бар'єр. При тунелюванні за допомогою пасток, між початковим та кінцевим станом носія заряду в зонах, носій перебуває в проміжному стані на рекомбінаційному центрі Шоклі-Ріда-Хола, а просторове положення центрів знаходиться в збідненій області. В моделі використовувалось наближення балансу носіїв заряду, коли кількість електронів, які тунелювали з зони на рекомбінаційний центр дорівнює кількості дірок, які тунелювали з рекомбінаційного центру в зону. Розподіл зайнятих станів в рекомбінаційних центрах визначається часом життя носіїв заряду. В моделі враховувався тільки один енергетичний рівень рекомбінаційних центрів Шоклі-Ріда-Хола. Таке наближення може розглядатися як спрощення моделі, але, з іншого боку, найбільший вклад в тунельні струми через рекомбінаційний центр дають центри, енергетичне положення яких найбільш близьке до середини забороненої зони.

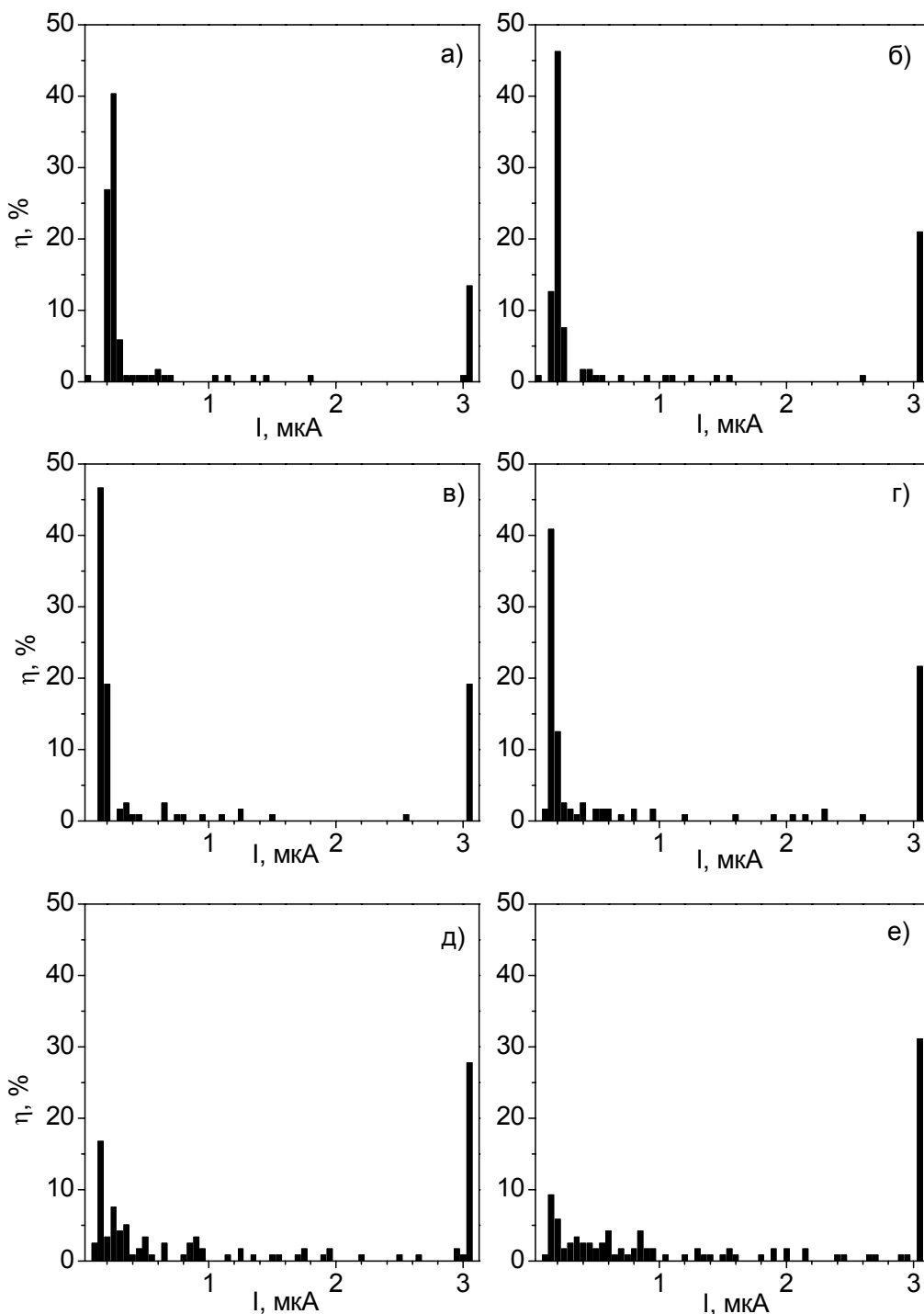


Рис. 1 Зміна розподілу темнових струмів фотодіодів при зміщенні напруги  $U = -0,1\text{В}$  до відпалу (а); після послідовних відпалів тривалістю 10 годин при температурах:  $70^\circ\text{C}$  (б);  $80^\circ\text{C}$  (в);  $90^\circ\text{C}$  (г);  $100^\circ\text{C}$  (д) та 47 діб після останнього відпалу (е)

### Результати відпалу

Проведено ряд циклів низькотемпературних відпалів фотодіодних структур при температурах  $T = 70\text{--}100^\circ\text{C}$  тривалістю 10 годин. Діаграми розподілу струмів фотодіодів від 0 до 3 мкА з кроком 50 нА при зворотному зміщенні  $U = -0,1\text{ В}$  подано на рис. 1. Так, до відпалу ви-

сота піку розподілу темнового струму фотодіодів при струмі 0,25 мкА становила 40,3 %, після відпалу з температурою  $70^\circ\text{C}$  висота піку при струмі 0,2 мкА становила 46,2 %, а після відпалу з температурою  $80^\circ\text{C}$  при струмі 0,15 мкА значення піку дорівнювало 46,7 %. Наступні відпали з температурами  $90^\circ\text{C}$  і  $100^\circ\text{C}$  не змі-

нювали положення цього піку по струму, але значно зменшували його величину до 40,8 % та 15,8 % відповідно. Після відпалу з температурою 100°C різко збільшується кількість фотодіодів з темновим струмом більше 3 мкА. ВАХ та диференційний опір одного з фотодіодів до та після відпалів показані на рис. 2, 3. Як показують розрахунки, міжзонне тунелювання у діапазоні виміряних напруг на кілька порядків менше інших складових струму, тому в подальшому аналізі не обговорюються, а згадування тунельного струму буде торкатися тільки тунельного струму через рекомбінаційні центри Шоклі-Ріда-Хола. Після відпалу при температурах 70°C та 80°C відбувається одночасне зменшення дифузійного струму та тунельного струму. Струм насичення дифузійного струму до відпалу був  $1,5 \times 10^{-7}$  А, а після послідовних відпалів 70°C та 80°C дорівнює  $9,1 \times 10^{-8}$  А та  $8,0 \times 10^{-8}$  А відповідно. Фактично на рис. 2 для напруги  $U < -50$  мВ показаний тунельний струм з постійною складовою дифузійного струму. Параметри, які ми визначили за допомогою моделювання, показані в таб. 1. Видно, що концентрація центрів Шоклі-Ріда-Хола після послідовних відпалів зменшилася з  $N_t = 7,2 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup> до  $N_t = 2,2 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, а час життя носіїв заряду збільшився з  $t = 2,6 \times 10^{-9}$  с до  $t = 8,5 \times 10^{-9}$  с.

Таким чином, зменшення зворотних темнових струмів фотодіодів можна пов'язати зі зменшенням концентрації електрично активних дефектів (центрів Шоклі-Ріда-Хола) в збідненій зоні, яке можливе за рахунок компенсації цих дефектів та їх термостимульованої дифузії зі зсувом  $n^+ - p$  переходу в глибину епітаксійного шару, який є менш ушкодженим після імплантації [1, 2].

Збільшення темного струму після відпалу з температурами 100°C може бути зумовлене суттєвим збільшенням товщини  $n$ -області, коли дифузійна довжина переважає товщину бази фотодіода, що спричиняє збільшення генераційно-рекомбінаційного струму в  $n$ -області. Крім того, збільшення фактичної площі фотодіода за рахунок латерального розширення  $p-n$  переходу [6] теж може бути причиною збільшення струму. Незрозумілою є деградація частини фотодіодів після відпалу з температурою 100°C тривалістю 10 годин, так, наприклад, в [2] при відпалі з температурою 120°C тривалістю 10 годин відбувалося збільшення диференційного опору. Можливим

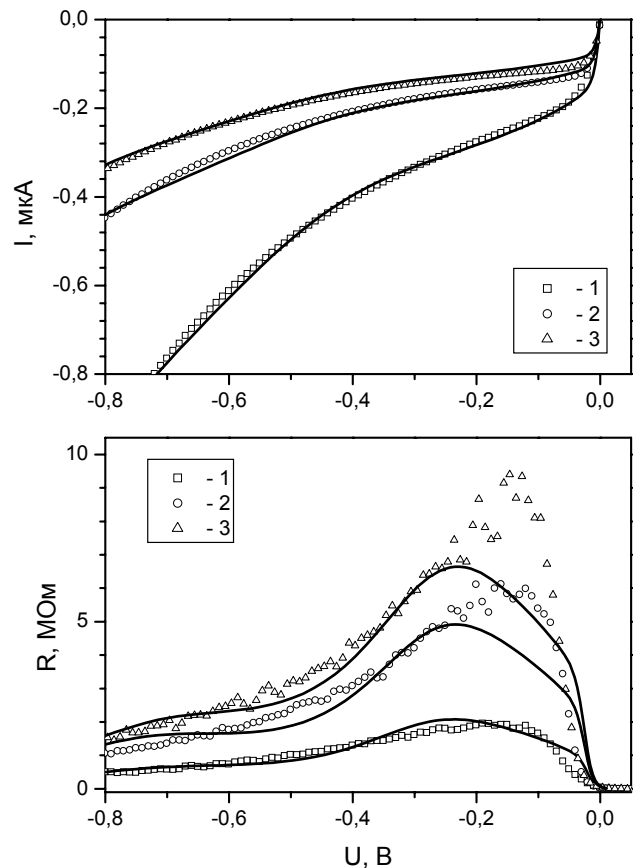


Рис. 2. Експериментальні (точки) і теоретичні (криві) ВАХ та диференційний опір фотодіода до (точки 1) та після послідовних відпалів тривалістю 10 годин: 2 — 70°C; 3—80°C відповідно. Значення підгоночних параметрів для кривих наведені в таблиці 1

поясненням може бути досягнення міжвузлями ртуті варізонної інтерфейсної границі плівка-підкладка, де може бути підвищена концентрація дислокацій. Дислокації можуть зменшувати часи життя неосновних носіїв заряду [8], бути додатковими каналами провідності та тунелювання [9], що збільшує темнові струми. Якщо ми візьмемо коефіцієнт дифузії міжвузль ртуті рівним  $D = 2.35 \times 10^{-11}$  см<sup>2</sup>/с при температурі 100°C [7], то глибина проникнення міжвузль  $w$  без врахування анігіляції міжвузль і вакансій ртуті може бути оцінена як  $w = \sqrt{Du}$ , де  $u$  — тривалість відпалу. Така оцінка дає величину 9,2 мкм, при товщині епітаксійної плівки 8 мкм. Так, в [1, 2] використовувались плівки з товщиною 20 мкм, в [6] — 12 мкм, а для епітаксійних плівок з такими товщинами необхідні більша тривалість та температура відпалу для початку деградації фотодіода, яке зумовлене досягненням  $n$ -області інтерфейсної границі плівка-підкладка, тому що в цих роботах деградація при відпалі до 100°C не спостерігалась.

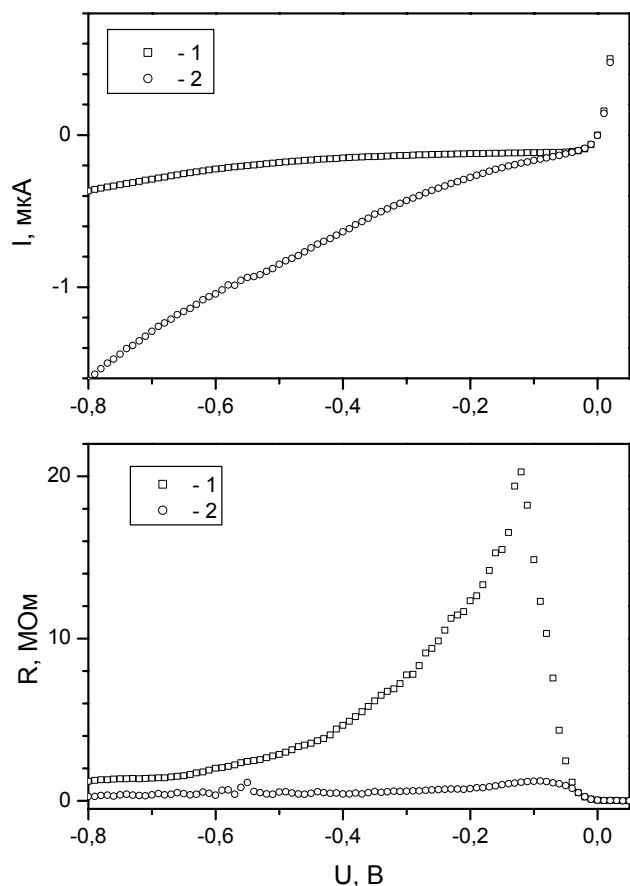


Рис. 3. Експериментальні ВАХ та диференційний опір фотодіода після послідовних відпалів тривалістю 10 годин з температурами 1–90°C, 2–100°C відповідно

Таб. 1

Значення вільних параметрів, які використовувалися для моделювання темної ВАХ і диференційного опору, показаних на мал. 1.  $E_t$  — енергія рекомбінаційного центру Шоклі-Ріда-Хола, відносно границі валентної зони,  $N_a$  — концентрація акцепторів в  $p$ -області,  $N_d$  — концентрація донорів в  $n$ -області,  $N_t$  — концентрація пасток у області  $p$ - $n$  переходу,  $t$  — час життя носіїв заряду.

Початкові	T=70°C	T=80°C
$E_t=0.64E_g$	$E_t=0.64E_g$	$E_t=0.64E_g$
$N_a=0,8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$N_a=0,8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$N_a=0,8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
$N_d=1,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$N_d=0,9 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$N_d=0,6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$
$N_t=7,2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$N_t=3,0 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$N_t=2,2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
$t=2,6 \times 10^{-9} \text{ с}$	$t=6,5 \times 10^{-9} \text{ с}$	$t=8,5 \times 10^{-9} \text{ с}$

### Висновки

Залежно від режиму відпалу можна покращувати або погіршувати електричні характеристики фотодіодів, сформованих на епітаксійних плівках КРТ. Встановлено, що з проведених

нами термічних обробок, саме відпал з температурою 80°C тривалістю 10 годин найкраще зменшує зворотні темнові струми фотодіодів КРТ, тому що, зменшуються дифузійний струм та тунельний струм через рекомбінаційні центри Шоклі-Ріда-Хола. При відпалі з температурою 90°C тривалістю 10 годин в деяких фотодіодних елементах починаються процеси деградації. Відпал з температурою 100°C тривалістю 10 годин призводить до деградації всього фотодіодного масиву. Висунуто припущення, що деградація фотодіодів зумовлена досягненням  $n$ -області інтерфейсної границі плівка-підкладка. Моделювання ВАХ характеристик до та після відпалів 70°C, 80°C вибраного фотодіода показало зменшення концентрації центрів Шоклі-Ріда-Хола з  $N_t=7,2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $N_t=2,2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  та збільшення часу життя неосновних носіїв заряду з  $t=2,6 \times 10^{-9} \text{ с}$  до  $t=8,5 \times 10^{-9} \text{ с}$  в збідненій області.

### Література

1. Akira Ajisawa, Naoki Oda. Improvement in HgCdTe diode characteristics by low temperature post-implantation annealing // Journal of Electronic Materials. — 1995. — V. 24, No. 9. — P. 1105–1111.
2. Васильев В. В., Протасов В. Н., Протасов Д. Ю., Талипов Н. Х. Влияние термообработок на параметры фотодиодов, сформированных ионной имплантацией бора в гетероэпитаксиальные слои МЛЭ  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$   $p$ -типа // Прикладная физика. — 2005. — № 2. — С. 37–42.
3. Петухов В. Ю. Влияние низкотемпературного отжига на электрические и структурные характеристики эпитаксиальных слоев кадмий-ртуутьеллур и марганец-ртуутьеллур // Прикладная физика. — 2005. — № 6. — С. 125–128.
4. Сизов Ф. Ф., Забудский В. В., Голенков А. Г., Андреева К. В., Гузенко Г. О., Лисюк И. А. Методика измерения темновых токов полупроводниковых многоэлементных структур при криогенных температурах. // Контрольно-измерительные приборы и автоматика. — 2007. — № 1. — С.4–7.
5. Gumenjuk-Sichevskaya J. V., Sizov F. F. Currents in narrow-gap photodiodes // Semicond. Sci. Tech. — 1999. — № 14. — p.1–8.
6. Vishnyakov V. S., Varavin M. O., Gariffulin A. V., Predein V. G., Remesnik, Sabinina I. V. and Sidorov G. Yu. Effect of Post-Implantation Annealing on the Current-Voltage Characteristics of IR Photodiodes Based on  $p$ -HgCdTe // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2009. — Vol. 45, No. 4. — pp. 308–315.

7. Любченко А. В., Сальков Е. А., Сизов Ф. Ф. Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники. — К.: Наук. думка, 1984. — 254с.
8. 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.
9. В. В. Евстропов, Ю. В. Жияев, М. Джумаева, Н. Назаров. Туннельно-избыточный ток в невырожденных барьерных  $p-n$  и  $m-s$  структурах  $A^{III}B^V$  на Si. // ФТП. — 1997. — т. 31, № 2. — с. 152–158.