

5. Tavkhelidze A., Skhiladze G., Bibilashvili A., Tsakadze L., Jangadze L., Taliashvili Z., Cox I., Berishvili Z.: Proc. XXI International Conf. on Thermoelectrics, August 26–29, 2002// IEEE. P. 435.

6. Hishinuma Y., Geballe T. H., Moyzhes B. Y., Kenny T. W. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. № 17. P. 2572.

7. Hishinuma Y., Geballe T. H., Moyzhes B. Y., Kenny T. W. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 7. P. 4690.

8. Mahan G. D. // Ibid. 1994. V. 76. № 7. P. 4362.

9. Mahan G. D. and Woods L. M. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. № 18. P. 4016.

10. Mahan G. D., Sofo J. O. and Bartkowiak M. // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 9. P. 4683.

11. Venkatasubramanian R., Silvota E., Colpitts T. and O'Quinn B. // Nature. 2001. V. 413. P. 597.

12. Nolas G. S., Goldsmid H. G. // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. № 8. P. 4066.

13. Xuan X. C. // Ibid. 2002. V. 92. № 8. P. 4746.

14. Tavkhelidze A. et al. Patent No. US 6,720,704 B1, Apr. 13, 2004.

15. Dahlberg R. Deutsches Patentamt No. 2547262, 22.04.77.

16. Dahlberg R. Заявка Японии 59-15195, 07.04.84 (на японском яз.).

17. Анатыхук Л. И., Булат Л. П. Полупроводники в экстремальных температурных условиях — Санкт-Петербург: Наука, 2001.

18. Bulat L. // Journal of Thermoelectricity. 1997. № 4. P. 3.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Solid-state structures with submicron and nano-scale inhomogeneities as materials for new generation of coolers

L. P. Bulat

St.-Petersburg State University of Refrigeration and Food Engineering, St.-Petersburg, Russia

G. N. Logvinov

Instituto Politecnico Nacional, D. F., Mexico, Mexico

New experimental and theoretical results on sharp increase of the efficiency of solid-state coolers (thermoelectric and thermionic ones) for photo- and microelectronics elements are analyzed. New structures with submicron and nano-scale inhomogeneities are used in the coolers. Physical models that can explain the essential increase of the efficiency in such structures are considered.

УДК 621.315.592

Влияние термообработок на параметры фотодиодов, сформированных ионной имплантацией бора в гетероэпитаксиальные слои МЛЭ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ p -типа

В. В. Васильев, В. Н. Овсяк, Д. Ю. Протасов, Н. Х. Талипов

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Проведены исследования влияния термообработок на параметры фотодиодов, сформированных с помощью ионной имплантации бора в гетероэпитаксиальные слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ p -типа и выращенных методом МЛЭ (ГЭС МЛЭ КРТ). Фотодиодные структуры подвергались изохронным и изотермическим отжигам в интервале температур 60–115 °С в инертной атмосфере либо в вакууме. Наблюдались существенное уменьшение темнового тока и увеличение динамического сопротивления R_d , величины R_0A и фототока диодов при температурах отжига 90–115 °С.

Ионная имплантация в КРТ p -типа является базовым процессом для формирования n - p -переходов. Основное ее преимущество в том, что в решетку КРТ при ионной бомбардировке вводятся радиационные дефекты донорного типа независимо от природы внедряемых ионов [1], поэтому проводить постимплантационный отжиг, как правило, не требуется, что значительно упрощает технологию формирования n - p -переходов.

Для создания n - p -переходов в КРТ p -типа предпочтительно использовать ионы бора [2], имеющего небольшую массу, что приводит к меньшей плотности дефектов в имплантированном приповерхностном слое. В области торможения ионов бора в решетке КРТ генерируются как структурные нарушения, так и радиационные дефекты донорного типа. Бор, являясь донорной примесью, частично активируется уже в процессе ионной имплантации [3]. Однако

подвижные донорные дефекты во время имплантации из области генерации диффундируют вглубь кристалла. В результате формируется $n^+/n^-/p$ -структура [4]. Толщина $n^+/n^-/p$ -слоя зависит от дозы, энергии, температуры имплантации ионов бора [5, 6], и n - p -переход, как правило, залегает на глубине 2–4 мкм — намного дальше проецированного пробега ионов бора — области максимума структурных нарушений. В результате фотоприемные структуры, полученные с помощью ионной имплантации бора на ГЭС МЛЭ КРТ, имеют высокие электрофизические параметры [7].

Работ о термической стабильности фотодиодов на основе КРТ немного. Исследованию стабильности фотодиодов, изготовленных имплантацией бора в объемные кристаллы КРТ, посвящена работа [8], в которой показано, что длительное хранение фотодиодов при температурах до 70 °С не оказывает влияния на их параметры. Работа [9] посвящена исследованию параметров диодов, созданных ионной имплантацией бора в жидкофазные пленки КРТ. Обнаружено, что кратковременный отжиг в течение 1,5 ч при температурах 120 и 150 °С существенно увеличивает динамическое сопротивление диода (R_d) и снижает темновые токи (температура отжига выбиралась в зависимости от исходной концентрации дырок в КРТ p -типа). Улучшение данных параметров авторы объясняют увеличением глубины n - p -перехода за счет формирования n^- -слоя в результате диффузии ртути из сильнолегированной n^+ -области, что приводит к снижению генерационно-рекомбинационных и туннельных токов. Увеличение R_0A с 1,6 до 8,8 Ом·см² и уменьшение темнового тока фотодиодов, созданных ионной имплантацией бора в жидкофазных пленках КРТ при кратковременных (до 1 ч, температура 120 °С) отжигах, установлены в работе [10]. Модельные расчеты показали, что в результате отжига снижаются как концентрация доноров в n - p -переходе, так и плотность ловушек, ответственных за туннелирование (эффект Пула–Френкеля). Как показано в работе [11], фотодиоды, созданные реактивным ионным травлением жидкофазного КРТ, остаются стабильными при длительных (до 40 ч) отжигах при температуре 80 °С.

Цель настоящей статьи — исследование влияния термообработок на фотоэлектрические параметры диодов, созданных на основе ГЭС МЛЭ КРТ p -типа с помощью ионной имплантации бора.

Эксперимент

Технология выращивания ГЭС МЛЭ КРТ p -типа и процессы формирования фотодиодных структур на его основе подробно описаны в мо-

нографии [12]. После выращивания и последующего отжига образцы ГЭС МЛЭ КРТ имели исходный p -тип проводимости с концентрацией дырок $(6\text{--}8)\cdot 10^{15}$ см⁻³ и их подвижностью 450–500 см²·В⁻¹·с⁻¹. Состав ГЭС МЛЭ КРТ изменялся от $x = 0,35\text{--}0,47$ на поверхности до $x = 0,220\pm 0,005$ в рабочем слое (рис. 1). Длинноволновая граница fotocувствительности образцов (по уровню 0,5), используемых в исследованиях, имела значение $\lambda_c = 10,0\text{--}12,6$ мкм (см. рис. 1).

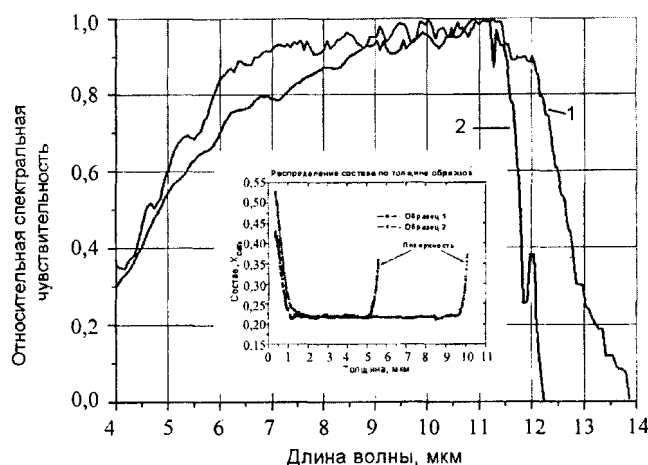


Рис. 1. Относительная спектральная чувствительность образцов 1 и 2 ГЭС МЛЭ КРТ (на вставке показано распределение состава X_{SiTe} по толщине образцов)

В образцы ГЭС МЛЭ КРТ при комнатной температуре проводилась ионная имплантация бора для формирования n - p -переходов по планарной технологии. Энергия ионов бора варьировала до 150 кэВ, доза — до $3\cdot 10^{14}$ см⁻². Постимплантационный отжиг не проводился. Диэлектрическим покрытием являлся низкотемпературный диоксид кремния с нанесенным сверху плазмохимическим нитридом кремния. Температура осаждения диэлектриков не превышала 100 °С. Контакты к n - p -переходам изготовлялись напылением индия с последующим формированием столбов. Изготовленные фотодиодные структуры подвергались изохронным и изотермическим отжигам в интервале температур 60–115 °С в инертной атмосфере либо в вакууме. Измерения ВАХ фотодиодов проводились при температуре 77 К. Одновременно методом дифференциальных холловских измерений на аналогичных образцах-спутниках ГЭС МЛЭ КРТ, имплантированных и отожженных в тех же условиях, проводилось исследование ионно-имплантированного n -слоя.

В табл. 1 приведены параметры исходных образцов ГЭС МЛЭ КРТ и режимы термообработки диодов, изготовленных на данных образцах.

Таблица 1

Параметры образцов ГЭС МЛЭ КРТ и режимы термообработок

Параметры	Номер образца		
	1	2	3
Состав $Cd_xHg_{1-x}Te$, x : на поверхности в рабочем слое	0,37 0,215—0,217	0,35 0,216—0,219	0,47 0,220—0,225
Длинноволновая граница чувствительности по уровню 0,5, мкм	12,6	11,7	9,5
Толщина пленки, мкм	10	5,5	9
Концентрация дырок при 77 К, $см^{-3}$	$7 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{15}$
Подвижность дырок при 77 К, $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$	500	450	480
Геометрическая площадь n - p -перехода (A_J), $см^2$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Режим термообработки: изохронный в течение 1 ч изотермический	— 100 °С, 18 ч	60—115 °С 100 °С, 18 ч	— 90 °С, 54 ч
Атмосфера отжига	Азот	Азот	Вакуум

Результаты

На рис. 2 и 3 приведены темновые ВАХ, дифференциальное сопротивление и фототок диода для образца 2 при различных температурах изохронного отжига в течение 1 ч в инертной среде. Видно, что дифференциальное сопротивление и фототок начинают значительно изменяться уже

показывает, что с ростом температуры отжига существенно повышается напряжение смещения, когда резко возрастает ток, связанный с туннельным пробоем. Аналогичный результат получен для данного образца при изотермическом отжиге (рис. 4).

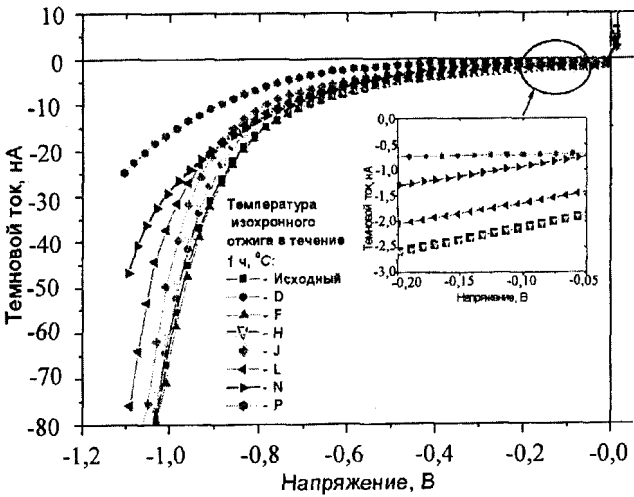


Рис. 2. Темновые ВАХ диода при различных температурах изохронного отжига в течение 1 ч в инертной среде (образец 2)

при температуре отжига 90 °С, а при 115 °С изменяются почти на порядок. Вид ВАХ на рис. 1

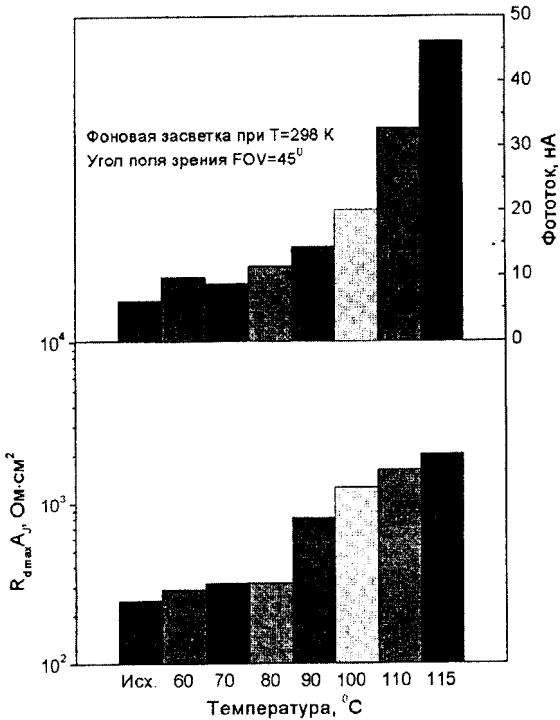


Рис. 3. Зависимость дифференциального сопротивления и фототока диода (образец 2) от температуры изохронного отжига в течение 1 ч в инертной среде: $A_J = 10^{-6} \text{ см}^2$ — геометрическая площадь n - p -перехода; R_{dmax} — дифференциальное сопротивление диода в максимуме

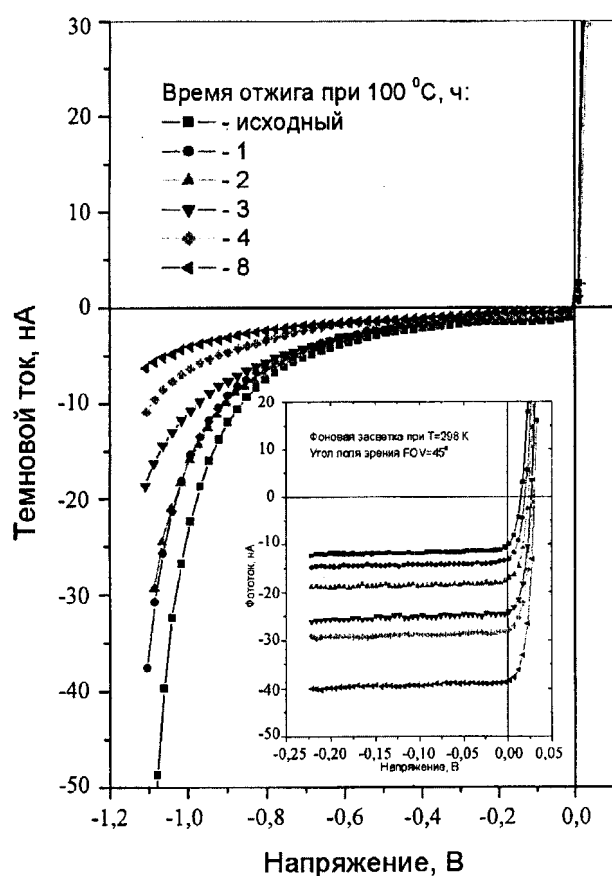


Рис. 4. Темновая ВАХ и фототок диода (на вставке) для различных времен изотермического отжига при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в инертной среде (образец 2)

Для образца 1 с большей граничной длиной волны по сравнению с образцом 2 с увеличением времени изотермического отжига при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, как видно из рис. 5 и 6, наблюдается монотонный рост R_0A_j (в расчет бралась геометрическая площадь n - p -перехода A_j) в 3–4 раза, достигающий для диода 1 величины $47\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Для диодов, изготовленных на образце 2, наблюдался (см. рис. 6) значительный рост R_0A_j уже в первые 2 ч отжига. Следует отметить, что поскольку в настоящее время точно неизвестна диффузионная длина неосновных носителей, для диодов маленькой площади действительный параметр R_0A_j должен иметь существенно большее значение. Из рис. 7 видно, что относительное изменение темнового тока и фототока для диодов разной площади (образцы 1 и 2) почти одинаковое.

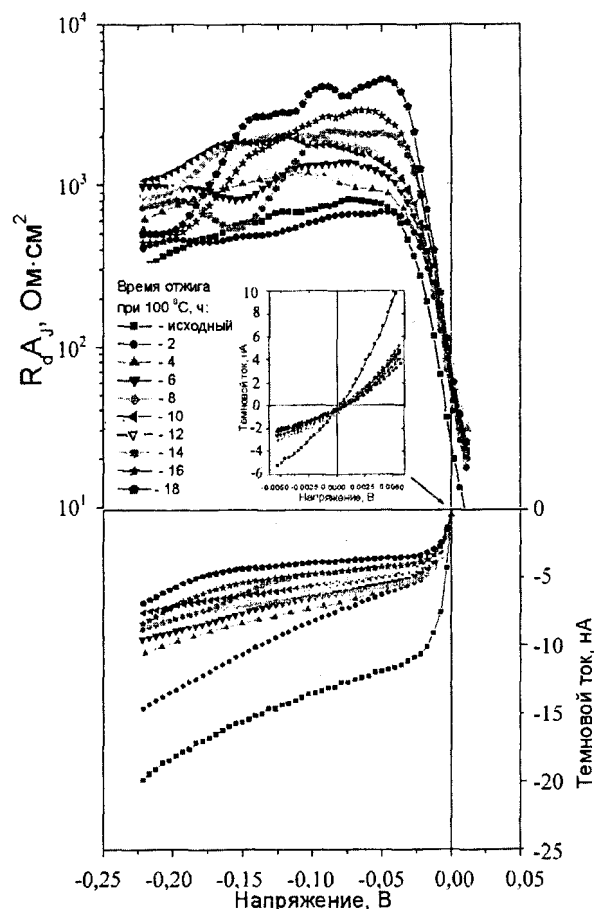


Рис. 5. Зависимость темнового тока и дифференциального сопротивления диода от времени изотермического отжига при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в инертной среде (образец 1): $A_j = 2,5 \cdot 10^{-5}\text{ см}^2$

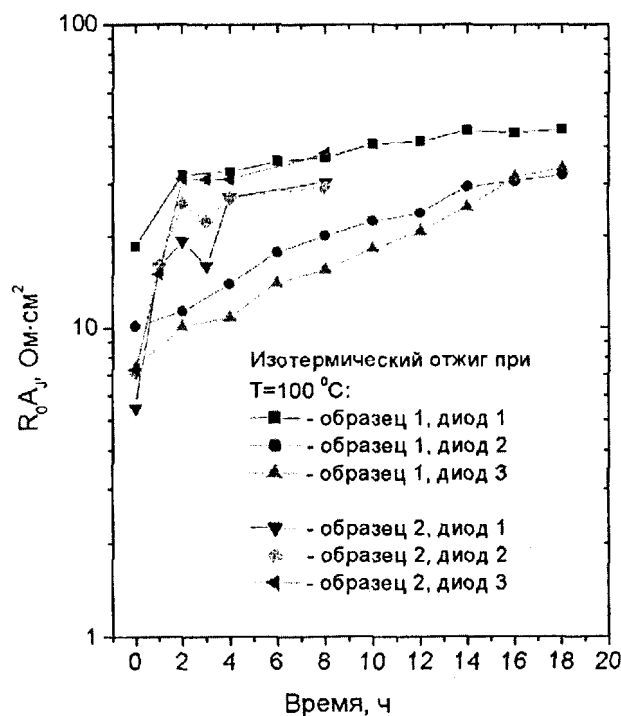


Рис. 6. Зависимость R_0A_j диода от времени изотермического отжига при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в инертной среде: образец 1 — $A_j = 2,5 \cdot 10^{-5}\text{ см}^2$; образец 2 — $A_j = 1,0 \cdot 10^{-6}\text{ см}^2$

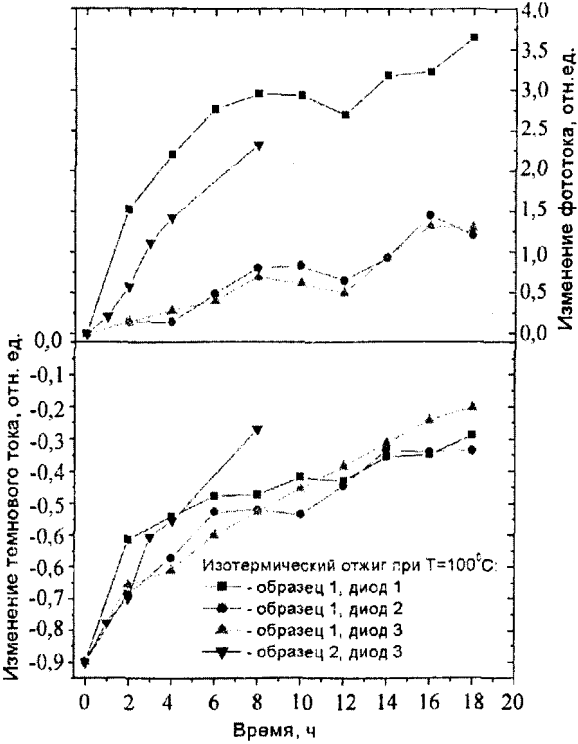


Рис. 7. Зависимость относительного изменения темнового тока и фототока диода от времени изотермического отжига при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в инертной среде

Как показали наши исследования, термическая стабильность диодов не ухудшается при отжигах в вакууме. На рис. 8 приведен результат отжига в вакууме при $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 54 ч для образца 3. Дифференциальное сопротивление увеличилось почти на порядок, фототок — в 2,5 раза.

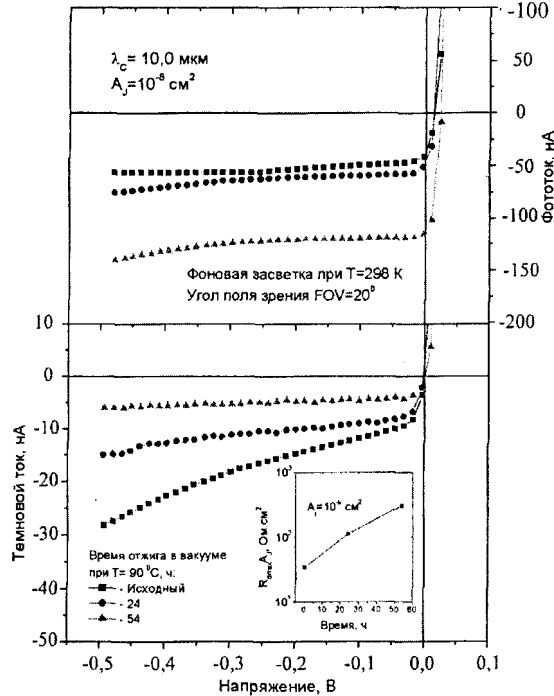


Рис. 8. Темновая ВАХ, дифференциальное сопротивление (на вставке) и фототок диода для различных времен изотермического отжига при $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в вакууме (образец 3)

Длительная выдержка диодов (образец 2) в течение 4 лет также не привела к существенному изменению темновых токов диодов (рис. 9), что свидетельствует о высоком качестве исходного материала ГЭС МЛЭ КРТ и используемой нами технологии изготовления фотодиодных структур.

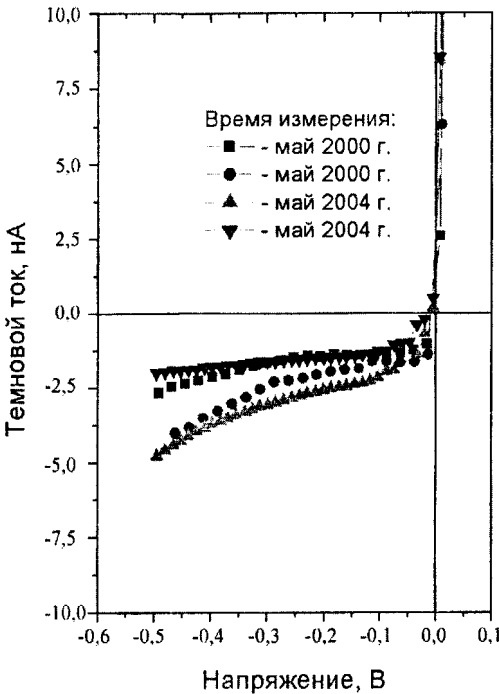


Рис. 9. Временная стабильность темновых ВАХ диодов (образец 2 хранился в нормальных условиях; время изготовления — май 2000 г.)

В настоящее время нет достоверных количественных данных об энергии залегания глубоких уровней в слоях ГЭС МЛЭ КРТ, их природе, зависимости поведения ГУ от условий роста и дальнейших технологических обработок, в частности ионной имплантации, используемой для формирования n - p -переходов. Глубокие уровни ответственны за генерационно-рекомбинационные токи в ОПЗ n - p -переходов. Поэтому точный количественный анализ механизмов протекания тока в диодах на основе ГЭС МЛЭ КРТ и процессы, проходящие в них при термических обработках, являются предметом дальнейших исследований.

Одной из возможных причин значительного улучшения параметров диодов является, на наш взгляд, частичный отжиг радиационных дефектов, генерированных ионной бомбардировкой, о чем свидетельствует снижение слоевой концентрации электронов, измеренных на образцах-спутниках (образец 2). В табл. 2 приведено изменение слоевой концентрации электронов в ионно-имплантированном слое в процессе термообработки. Образцы были защищены пленками диоксида и нитрида кремния.

Таблица 2

Зависимость слоевой концентрации электронов в ионно-имплантированном слое от температуры изохронного отжига (образец 2), время отжига — 1 ч в инертной среде

Температура отжига, °С	Слоевая концентрация электронов, см ⁻²
Исходный	$3,96 \cdot 10^{13}$
90	$3,94 \cdot 10^{13}$
100	$3,70 \cdot 10^{13}$
110	$3,66 \cdot 10^{13}$
115	$3,43 \cdot 10^{13}$

Таким образом, термические отжики диодов, изготовленных с помощью ионной имплантации бора на образцах ГЭС МЛЭ КРТ, приводят к существенному улучшению их параметров.

Авторы выражают благодарность
С. А. Дворецкому и В. С. Варавину
за предоставление образцов ГЭС МЛЭ КРТ
для исследований.

Литература

1. Igras E., Piotrowski I., Zimnoch-Higersberger I.// Electron Techn. 1977. V. 10. № 4. P. 63.
2. Pitcher P. G., Hemment P. L. F., Davis Q. V.// Electronics Letters, 1982. V. 18. № 25. P. 1090.
3. Овсюк В. Н., Талипов Н. Х.// Прикладная физика, 2003. № 5. С. 87.
4. Bubulac L. O.// J. of Cryst. Growth, 1988. V. 86. P. 723.
5. Пат. 2035801 РФ, С1 6 Н 01 L 21/265. 1995/ Мищенко А. М., Талипов Н. Х., Шашкин В. В.
6. Пат. 2023326 РФ, С1 5 Н 01 L 21/425.1994/ Мищенко А. М., Талипов Н. Х., Шашкин В. В.
7. Vasilyev V. V., Klimenko A. G., Marchishin I. V., Ovsyuk V. N., Talipov N. Ch., Zahar'yash T. I., Golenkov A. G., Derkach Yu. P., Reva V. P., Sizov F. F., Zabudsky V. V.// Infrared Physics and Technology. 2004. V. 45. P. 13.
8. Бовина Л. А., Стафеев В. И., Болтарь К. О., Лакеенков В. М., Лощина М. А.// Прикладная физика. 1999. № 3. С. 41.
9. Akira Ajisawa, Naoki Oda// J. of Electronic Materials. 1995. V. 24. № 9. P. 1105.
10. Soo-Ho Bae, Yaung-Ho Kim, Hee Chul Lee, Choong-Ki Kim// SPIE Proc. 1997. V. 3061. P. 104.
11. White J. K., Antoszewski J., Pal R., Musca C. A., Dell J. M., Faraone L., Piotrowski J.// J. of Electronic Materials. 2002. V. 31. № 7. P. 743.
12. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона/ Под ред. С. П. Синицы. — Новосибирск: Наука, 2001.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Heart treatment influence on the parameters of photodiodes obtained by the boron ion implantation into the p-type MBE grown HgCdTe heterostructures

V. V. Vasilyev, V. N. Ovsyuk, D. Yu. Protasov, N. Kh. Talipov
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

The heart treatment influence on the parameters of photodiodes fabricated by the boron ion implantation on the MBE grown HgCdTe heterostructures (MBE MCT) was investigated. The photodiodes structures have been isothermal and isochronal annealed at temperature 60–115 °C under inert gas atmosphere or vacuum. No degradation of the photodiodes parameters for the annealing temperature up to 115 °C was found. Moreover the significant dark current decreasing and increasing of the dynamical resistance R_d , R_0A product and photocurrent at the annealing temperature 90–115 °C.

УДК 621.315.593

Фотодетектор для регистрации рентгеновского и ультрафиолетового излучений на основе гетеоструктур CdTe—ZnSe

С. М. Отажонов
Ферганский государственный университет, г. Фергана, Узбекистан

Создана перспективная пара полупроводников CdTe—ZnSe, в которой, кроме прямой передачи световых сигналов, будет обеспечено накопление зарядов. Фотодетектор данного типа будет работать без внешнего источника, если поликристалличе-