

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ФОТОРЕЗИСТОРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 8–12 мкм, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР CdHgTe, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

© 2009 г. А. В. Филатов, канд. техн. наук; Е. В. Сусов, канд. техн. наук; А. В. Гусаров;
Н. М. Акимова; В. В. Крапухин, канд. физ.-мат. наук;
В. В. Карпов, канд. физ.-мат. наук; В. И. Шаевич

ОАО Московский завод “Сапфир”, Москва

E-mail.: info_sapphir@mail.ru

Разработана технология изготовления высокостабильных фоторезисторов для диапазона спектра 8–12 мкм из гетероэпитаксиальных структур твердого раствора CdHgTe, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из арсенида галлия. Исследована стабильность фотоэлектрических параметров многоэлементных фоторезисторов длительным прогревом при повышенных температурах (65–85 °C). Фоторезисторы имели обнаружительную способность, ограниченную шумами фонового излучения. Показано, что главной причиной деградации фоточувствительного элемента фоторезистора является диффузия вакансий ртути с фронтальной и боковых поверхностей. Устранение причин возникновения вакансий и создание защитных покрытий поверхностей позволяют обеспечить стабильность фоторезисторов в течение 2500 ч при 70 °C.

Ключевые слова: ИК техника, гетероэпитаксиальные структуры CdHgTe, технология фоторезисторов, стабильность параметров.

Коды OCIS: 040.1240, 040.3060.

Поступила в редакцию 18.03.2009.

В технологии фотоэлектрических приборов на основе твердого раствора CdHgTe (КРТ) широко используется ионная обработка низкоэнергетическими ионами аргона, а исследованию влияния ее на свойства КРТ посвящено большое количество работ [1]. При изготовлении фоточувствительных элементов (ФЧЭ) фоторезисторов как из гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) твердого раствора CdHgTe [2, 3], так и из объемных монокристаллов КРТ [4, 5] такая обработка используется при формировании ФЧЭ для создания между ними необходимых зазоров, для образования n^+ -слоя в контактной области полупроводника и при нанесении защитных покрытий.

В данной работе проводилось исследование влияния ионной обработки низкоэнергетическими ионами аргона фронтальной и боковых поверхностей ФЧЭ и защитных покрытий на долговременную стабильность фотоэлектрических параметров ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) на подложке из GaAs.

ФЧЭ многоэлементных фоторезисторов для спектрального диапазона 8–12 мкм изготавливались из образцов ГЭС КРТ МЛЭ электронного типа проводимости [6], произведенных в ИФП СО РАН. Использовались также объемные монокристаллы КРТ электронного типа проводимости. Электрофизические параметры образцов КРТ приведены в таблице. Основные элементы технологии изготовления ФЧЭ описаны в [2, 3]. Использовалась классическая конструкция ФЧЭ, при которой оптическая длина ФЧЭ равна расстоянию между контактами. Размер фоточувствительной площадки составлял 50×50 мкм, шаг в линейке – 100 мкм. Контакты были получены электрохимическим осаждением индия с предварительной ионно-плазменной обработкой (ИПО) поверхности КРТ ионами аргона [5] на глубину 0,1–0,15 мкм. Контроль глубины травления подконтактных областей и толщины ФЧЭ осуществлялся на профилометре Dektak-150 фирмы “VECCO Instruments” (США).

В таблице приведены комбинации различных защитных просветляющих покрытий, которые

Расчетные и исходные значения концентрации основных носителей заряда и их подвижности при температуре кипения азота в объеме материала ФЧЭ, изготовленных с использованием различных технологических приемов

Способ выделения ФЧЭ	Расчетные электрофизические параметры			Электрофизические параметры исходных кристаллов
	ФЧЭ без АО на фронтальной поверхности, CdTe, ZnSe, YtScO ₃	ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности, CdTe, ZnSe, YtScO ₃	ФЧЭ с АО на фронтальной и боковых поверхностях, ZnS	
ИТ	$2,2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $1,0 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	$2,6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $1,1 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	—	ГЭС КРТ МЛЭ $(4,5-5,4) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ $(0,8-1,1) \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$
ХТ	$1,15 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $1,1 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	$1,45 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $1,1 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	$1,13 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $0,82 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	
ИТ	$1,1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $2,3 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	$1,2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $2,5 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	—	Объемные монокристаллы КРТ $(2-3) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ $(2,2-2,5) \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$
ХТ	—	$6,3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ $2,2 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	$(6-8) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ $2,3 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	

использовались на фронтальной и боковых поверхностях ФЧЭ. Перед их нанесением осуществлялась обработка поверхности КРТ ФЧЭ ионами аргона. На фронтальной и боковых поверхностях ФЧЭ использовалась также пленка собственного анодного окисла (АО) толщиной 0,07–0,09 мкм. Все ФЧЭ, изготовленные из объемных монокристаллов КРТ, имели АО на нижней поверхности.

Встроенный положительный заряд в анодном окисле [5] обеспечивает при хорошей подготовке поверхности КРТ низкую скорость поверхностной рекомбинации и приводит к некоторому снижению темнового сопротивления ФЧЭ. Наличие АО на фронтальной поверхности ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ с варизонном слоем не оказывает существенного влияния на фотоэлектрические параметры ФЧЭ из-за встроенного в него электрического поля. Ионное травление (ИТ) осуществлялось коллимированным пучком ионов аргона при ускоряющем напряжении 1 кэВ при комнатной температуре образцов в установке SID-I фирмы "Secon" (Австрия). Оптимальная плотность ионного тока составила $0,2 \pm 10\% \text{ мА/см}^2$, остаточное давление порядка 10^{-3} Па . Химическое разделение проводилось травлением (ХТ) раствором брома в деионизованной воде.

В процессе исследований ФЧЭ при температуре $T \approx 80 \text{ К}$ контролировались их темновое сопротивление, удельная обнаружительная способность (на частоте 1200 Гц) и вольтовая чувствительность в максимуме спектральной характеристики в согласованном по сопротивле-

нию нагрузки режиме измерения. Стабильность фотоэлектрических параметров ФЧЭ проверялась методом ускоренного старения путем длительного прогрева фоточувствительного элемента при температуре 65–85 °С в вакуумном криостате.

Темновое сопротивление всех изготовленных ФЧЭ было значительно ниже значений, которые должны быть получены исходя из электрофизических параметров монокристаллов и геометрических размеров ФЧЭ. В таблице приведены расчетные значения концентрации основных носителей заряда и их подвижности при $T \approx 80 \text{ К}$ в объеме материала ФЧЭ, полученные из темнового сопротивления ФЧЭ, и их исходные значения для ФЧЭ, изготовленных с использованием различных технологических приемов. Исходные значения определялись по эффекту Холла, при этом холл-фактор рассеяния носителей принят равным 1. При расчете предполагалось, что дрейфовая подвижность носителей заряда при изготовлении ФЧЭ не изменяется и АО не влияет на темновое сопротивление. Кроме того, были изготовлены ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ без использования ИПО и ИТ, а также ФЧЭ с дополнительной ИПО-обработкой подконтактных областей на глубину 1,5–2 мкм. В первом случае темновое сопротивление ФЧЭ (200 Ом) полностью соответствовало расчетным значениям, полученным исходя из электрофизических параметров исходных монокристаллов ГЭС КРТ МЛЭ ($n = 4,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $\mu = 1,03 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$). Во втором случае расчет концентрации электронов дал значение $n = 3,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Как видно из полученных результатов, ИТ и ИПО существенно изменяют электрофизические параметры полупроводникового материала ФЧЭ. Эти результаты позволяют сделать некоторые предположения о структуре точечных дефектов в исходных монокристаллах. В дальнейшем воспользуемся диффузионной моделью изменения электрофизических свойств монокристаллов при воздействии ионного травления (обработки) [1], в которой при ИТ в кристалле на поверхности КРТ образуется источник диффузии межузельной ртути с чрезвычайно высокой неравновесной концентрацией и после релаксации в дефектном слое остаются некомпенсированные вакансы ртути, которые создают проводимость p -типа, а в объеме КРТ – n^+ -типа. Пластины из объемных монокристаллов КРТ после их выращивания подвергаются гомогенизирующему отжигу в парах ртути при температуре 180–270 °C. Монокристаллические пластины ГЭС КРТ МЛЭ не подвергаются такому отжигу и выращиваются при температуре 180–200 °C при насыщенном давлении паров теллура. Поэтому концентрация вакансий ртути в них должна быть больше по сравнению с пластины из объемных монокристаллов. С этим можно связать разное увеличение концентрации электронов в объеме ФЧЭ, изготовленных с помощью ИТ из объемных монокристаллов и из ГЭС КРТ МЛЭ (см. таблицу), так как диффузия ртути при ИТ приводит к уменьшению концентрации вакансий ртути. Считая, что концентрация электронов определяется разностью концентраций ионизированных остаточных фоновых донорных примесей и вакансий ртути, можно заключить, что используемые в данной работе образцы ГЭС КРТ МЛЭ имеют более высокую степень компенсации по сравнению с объемными монокристаллами.

На рис. 1 приведены экспериментальные результаты и расчетные зависимости изменения темнового сопротивления от времени прогрева при 70 °C для ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ: 1 – для ФЧЭ без АО на фронтальной поверхности, с защитным покрытием из CdTe, ZnSe, YtScO₃, подвергнутых ИТ (после 3360 ч прогрев проводился при 85 °C); 2 – для ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности, с защитным покрытием из CdTe, ZnSe, YtScO₃, подвергнутых ИТ; 3 – для ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности и с защитным покрытием из CdTe, ZnSe, YtScO₃, подвергнутых ИТ и дополнительной ионной обработке; 4 – для ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности и боковых гранях и защитным покрытием из ZnS, с применением ХТ.

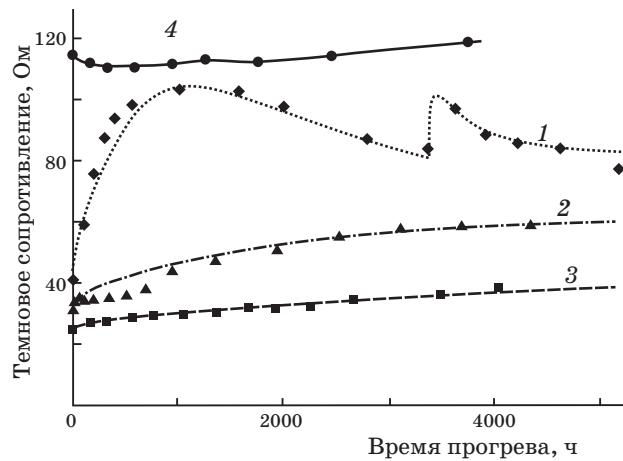


Рис. 1. Экспериментальные результаты и расчетные зависимости изменения темнового сопротивления от времени прогрева при 70 °C для ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ: 1 – для ФЧЭ без АО (после 3360 ч прогрев проводился при 85 °C); 2 – для ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности; 3 – для ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности с дополнительной ионной обработкой; 4 – для ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности и боковых гранях (экспериментальные данные).

При расчете зависимости изменения темнового сопротивления ФЧЭ от времени прогрева была использована модель диффузии заряженных вакансий ртути (дырок) из бесконечно тонкого слоя, расположенного на поверхности фоточувствительной площадки, в объем фоточувствительной площадки фоторезистора. При этом использовалось выражение для распределения концентрации диффундирующего вещества, приведенное Б.И. Болтаксом [7] для тела конечных размеров со связанными границами:

$$p(x,t) = p_0 + \frac{2Q}{l} \times \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \exp\left(-\frac{(2k+1)^2 \pi^2 D t}{l^2}\right) \sin \frac{(2k+1)\pi x}{l}, \quad (1)$$

где в нашем случае $Q = 2Ph$ – количество вакансий ртути (дырок), приходящееся на единицу площади поперечного сечения тонкого слоя (P – концентрация вакансий в слое толщиной h); l – характерный размер фоторезистора в направлении диффузии, $D = D_0 \exp(-E_a/k_B T)$ – коэффициент диффузии вакансий ртути, p_0 – равновесная концентрация дырок в объеме фоторезистора, k – число сумм, t – время прогрева.

В случае когда определяющий вклад в изменение темнового сопротивления вносит только тонкий слой с повышенной концентрацией дырок (вакансий ртути), находящийся на верхней поверхности фоточувствительной площадки фоторезистора (кривая 1 на рис. 1), расчет темнового сопротивления осуществлялся в соответствии с выражением

$$R(t) = \frac{l}{ea} \left[\int_0^d \left(\frac{n_i^2 \mu_n}{p(x,t)} + \mu_p p(x,t) \right) dx \right]^{-1}, \quad (2)$$

где l , a и d – соответственно длина, ширина и толщина фоторезистора; μ_n , μ_p – дрейфовая подвижность электронов и дырок ($\mu_p = 500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$); n_i – собственная концентрация носителей ($n_i^2 = 11 \times 10^{26} \text{ см}^{-6}$); e – заряд электрона, при этом в выражении (1) характерный размер фоторезистора в направлении диффузии был равен $2d$.

В том случае, когда определяющий вклад в изменение темнового сопротивления вносит тонкий слой с повышенной концентрацией дырок (вакансий ртути), находящийся только на боковых поверхностях фоточувствительной площадки фоторезистора (на поверхности фоточувствительной площадки ФЧЭ создан слой собственного анодного окисла – кривые 2 и 3 на рис. 1), расчет темнового сопротивления осуществлялся в соответствии с выражением

$$R(t) = \frac{l}{ed} \left[\int_0^a \left(\frac{n_i^2 \mu_n}{p(x,t)} + \mu_p p(x,t) \right) dx \right]^{-1}; \quad (3)$$

при этом в выражении (1) характерный размер фоторезистора в направлении диффузии был равен его ширине.

Расчет зависимостей темнового сопротивления ФЧЭ от времени прогрева выполнялся с помощью программы MathCAD13. Суммирование в выражении (1) проводилось при $k = 120$. Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных значений темнового сопротивления для ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ и монокристаллов КРТ, получены при использовании в расчетах по формулам (1)–(3) следующих параметров: концентрация дырок в тонком поверхностном слое $P = 8 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, толщина поверхностного слоя на фронтальной поверхности (поверхность без анодного окисла) $h = 0,1\text{--}0,3 \text{ мкм}$, толщина поверхностного слоя на боковых гранях (на фронтальной поверхности имеется анодный окисел) $h = 0,65\text{--}0,85 \text{ мкм}$,

равновесная концентрация электронов и их дрейфовая подвижность – согласно данным, приведенным в таблице. Отметим, что в соответствии с [8] при 70°C коэффициент диффузии для однократно заряженных вакансий ртути равен $3,2 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ ($E_a = 0,65 \text{ эВ}$), а для двукратно заряженных – $4,75 \times 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ ($E_a = 0,95 \text{ эВ}$). В расчетах применялись значения $D = (1\text{--}9) \times 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ и $E_a = 0,95\text{--}0,98 \text{ эВ}$. В рамках данной модели объясняется скачок сопротивления при повышении температуры прогрева ФЧЭ с 70°C после 3360 ч до 85°C (кривая 1 на рис. 1). Это связано с увеличением коэффициента диффузии с $1,4 \times 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ до $7,9 \times 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ ($E_a = 0,98 \text{ эВ}$) и с активацией дополнительной концентрации дырок $P = 1,8 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в тонком поверхностном слое. Максимум сопротивления можно объяснить переходом большей части объема ФЧЭ в p -типа проводимость. Как видно из рис. 1, в случае когда на фронтальной поверхности ФЧЭ образован АО, главным источником вакансии ртути становятся его боковые стенки. Это приводит к резкому уменьшению темпа роста сопротивления за счет изменения характерного размера в направлении диффузии с $l = d = 4\text{--}12 \text{ мкм}$ до $l = a = 50 \text{ мкм}$. Для ФЧЭ с АО на фронтальной поверхности и боковых гранях и с защитным покрытием ZnS, полученным магнетронным распылением (кривая 4 на рис. 1), увеличения темнового сопротивления в течение 1000 ч не наблюдалось.

Таким образом, наличие пленки собственного АО на фронтальной поверхности ФЧЭ и боковых гранях повышает стабильность темнового сопротивления ФЧЭ, так как устраняет воздействие ионов на поверхность КРТ.

На рис. 2 приведены зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения для ФЧЭ с АО, изготовленных из одного образца ГЭС КРТ МЛЭ с помощью ионного травления (кривая 1) и химическим травлением (кривая 2).

Как видно из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 2, использование химического травления позволяет увеличить чувствительность ФЧЭ, изготовленного из данного образца, более чем в 2,2 раза в режиме пролета носителей. Это находится в хорошем соответствии с изменением темнового сопротивления ФЧЭ (с 55 до 105 Ом). Так как вольтовая чувствительность не зависит от дрейфовой подвижности основных носителей заряда (электронов), то такое изменение чувствительности при переходе от ИТ к ХТ можно связать только с уменьшением их концентрации в ФЧЭ (см. таблицу).

ФЧЭ имели обнаружительную способность, ограниченную шумами фонового излучения. Снижение температуры фонового излучения с $T_{\phi} \approx 300$ К до $T_{\phi} \approx 80$ К (апертура 180°) приводило к уменьшению напряжения шума на частоте 1200 Гц в полосе 140 Гц в 1,6–2,2 раза для ФЧЭ, изготовленных с помощью химического травления.

На рис. 3 приведены зависимости средних значений удельной обнаружительной способности (кривая 1) и вольтовой чувствительности (кривая 2) при рабочем напряжении смещения 0,15 В от времени прогрева при 70 °С для 32-элементного ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ с использованием ИТ и дополнительной ИПО

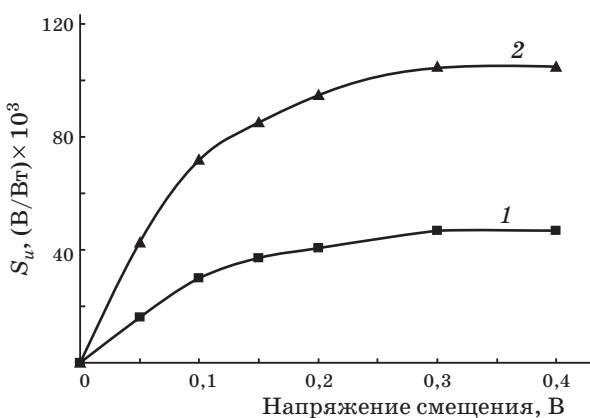


Рис. 2. Зависимость вольтовой чувствительности S_u от напряжения смещения для ФЧЭ с АО, изготовленных с помощью ионного травления (1) и химическим травлением (2).

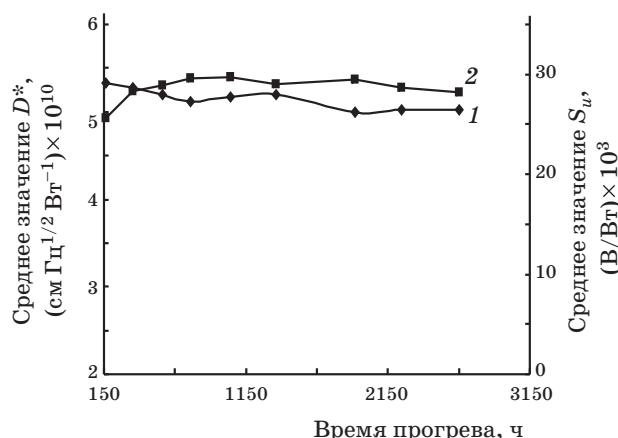


Рис. 3. Зависимости средних значений удельной обнаружительной способности D^* (1) и вольтовой чувствительности S_u (2) от времени прогрева при 70 °С для 32-элементного ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ с использованием ИТ и дополнительной ИПО.

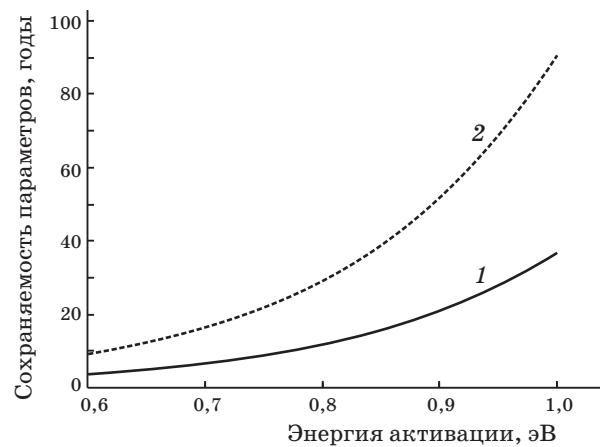


Рис. 4. Зависимость времени сохраняемости параметров ФЧЭ при комнатной температуре (20 °С) от энергии активации процесса диффузии при времени сохранения стабильности параметров при температуре 70 °С в течение 1000 (1) и 2500 ч (2).

подконтактных областей (апертура примерно 45°). Из графиков следует, что длительный прогрев ФЧЭ при 70 °С в течение 2500 ч практически не влияет на параметры ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ.

Используя полученные результаты, оценим стабильность параметров ФЧЭ при длительном хранении при комнатной температуре (20 °С). Будем считать, что при повышенной температуре прогрева ФЧЭ (70 °С) и комнатной температуре протекают одинаковые диффузионные процессы, связанные с диффузией вакансий ртути с поверхности в объем ФЧЭ, и при одинаковой длине диффузии процессов при данных температурах происходят одинаковые изменения параметров ФЧЭ. На рис. 4 приведены результаты расчета сохраняемости параметров ФЧЭ при комнатной температуре в зависимости от энергии активации процесса диффузии (для времени сохранения стабильности параметров в течение 1000 и 2500 ч при температуре 70 °С). Как видно, даже при стабильности параметров ФЧЭ в течение 1000 ч при температуре 70 °С и энергии активации диффузионного процесса, ответственного за эти изменения, равной 0,9 эВ, при комнатной температуре обеспечивается сохраняемость параметров в течение не менее 20 лет.

Выводы

Разработаны высокостабильные фотодиоды для диапазона спектра 8–12 мкм из ГЭС КРТ МЛЭ. Показано, что наиболее вероятным

механизмом деградации параметров ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ и ОМ КРТ является диффузия вакансий ртути с поверхности вглубь ФЧЭ. Ионное травление, используемое в технологии выделения ФЧЭ, приводит к ухудшению свойств КРТ (повышение концентрации носителей) и снижению ФЭП. Применение в качестве защитного покрытия поверхности ФЧЭ собственного анодного окисла обеспечивает вместе с другими технологическими процессами высокую сохраняемость параметров ФЧЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мынбаев К.Д., Иванов-Омский В.М. Модифицирование свойств $Hg_{1-x}Cd_xTe$ низкоэнергетичными ионами. Обзор // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. В. 10. С. 1153–1178.
2. Susov E.V., Sidorov Yu.G., Severtsev V.N., Komov A.A., Chekanova G.V., Dvoretsky S.A., Varavin V.S., Mikhailov N.N. and Diakonov L.I. Multi-element cooled photoconductor based on CdHgTe heteroepitaxial structures // Optoelectronics, instrumentation and data processing (Avtometriya). 1996. № 4. Р. 32–36.
3. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Чеканова Г.В. 128-элементный охлаждаемый фотоприемник на основе гетероэпитаксиальных структур CdHgTe // Автометрия. 1998. № 4. С. 21–26.
4. Трошкин Ю.С., Филатов А.В., Алексеевичева В.С., Гусаров А.В., Коршунова А.П., Поповян Г.Э., Посевин О.П. Вакуумные фотоприемники для диапазона 8–12 мкм на основе фоторезисторов из CdHgTe // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 63–69.
5. Филатов А.В., Лукша В.И., Поповян Г.Э., Трошкин Ю.С., Шаронов Ю.П. Влияние режимов ионного травления на параметры фоторезисторов из CdHgTe // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 123–128.
6. Varavin V.S., Dvoretsky S.A., Liberman V.I., Mikhailov N.N., Sidorov Yu.G. Molecular beam epitaxy of high quality $Hg_{1-x}Cd_xTe$ films with control of the composition distribution // J. Cryst. Growth. 1996. V. 159. P. 1161–1166.
7. Болтакс Б.И. Диффузия в полупроводниках // М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1961. С. 143.
8. Заитов Ф.А., Исаев Ф.К., Горшков А.В. Дефектобразование и диффузионные процессы в некоторых полупроводниковых твердых растворах // Баку: Азерб. гос. изд-во, 1984. С. 89.