

УДК 621.383.45: 621.793.09

Образование, природа и отжиг дефектов в гетероэпитаксиальных структурах $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ и фоторезисторах, подвергнутых ионному травлению

© 2017 г. **А. В. Филатов, канд. техн. наук; Е. В. Сусов, канд. техн. наук; В. В. Карпов, канд. физ.-мат. наук**

ОАО «Швабе – Фотосистемы», Москва

E-mail: info@shvabe-fs.ru

Поступила в редакцию 09.11.2016

Исследовано образование дефектов в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \approx 0,2$) при травлении ионами аргона (1 кэВ) и их поведение при отжиге. Установлена природа этих дефектов. Методом измерения зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения фоторезисторов, изготовленных из гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \approx 0,2$), полученных молекулярно-лучевой эпитаксией, определялась концентрация основных носителей заряда в процессе отжига. Показано, что изменение концентрации основных носителей заряда в процессе отжига определяется диффузией однократно заряженных доноров, являющихся комплексами вакансий ртути с избыточной межузельной ртутью, и коэффициентами диффузии однократно и двукратно заряженных вакансий ртути, концентрация которых определяется равновесными концентрациями точечных дефектов.

Ключевые слова: гетероэпитаксиальные структуры кадмий-ртуть-теллур, фоторезистор, ионное травление, диффузия вакансий ртути.

Коды OCIS: 230.5160, 040.3060, 160.6840.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения влияния воздействия низкоэнергетических ионов (аргона) на свойства твёрдого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) проведено большое количество исследований, обзору которых посвящена работа [1]. Практически бесспорно принято, что при таком воздействии происходит диффузия межузельных атомов ртути в кристалл в условиях сильного пересыщения кристалла ртутью на поверхности, приводящая к инверсии типа проводимости с образованием *n*-слоя толщиной более 10 мкм. Причём концентрация электронов в приповерхностной области (1–2 мкм толщиной) на порядок превышает её величину в глубине инверсного слоя, равную $(1-4) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Однако предметом дискуссий остается тип центров, отвечающих за электрические свойства материала после обработки. Так авторы работы [2] считают, что в гетероэпитаксиальных структурах КРТ присутствуют исходно нейтральные дефекты с концентрацией приблизительно 10^{17} см^{-3} , образовавшиеся на стадии роста структур. Эти дефекты, по мнению авторов, активируются ионным травлением и образуют донорные центры. При изготовлении

фоторезисторов на основе КРТ ионное травление (ИТ) используется при изготовлении фоточувствительного элемента (ФЧЭ) объёмом $2,5 \times 10^{-7} \text{ мм}^3$. Измерения параметров ФЧЭ после термообработки (отжига) позволяет исследовать дефекты, образованные после ИТ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы было исследование изменения концентрации основных носителей заряда в фоточувствительных элементах фоторезисторов после термообработки при температурах (70–117) °С.

Фоточувствительные элементы фоторезисторов (ФЧЭ) были выполнены в классической конструкции, при которой оптическая длина фоточувствительной площадки ФЧЭ равна расстоянию между контактами. Размер фоточувствительной площадки составлял $50 \times 50 \text{ мкм}$, шаг в линейке — 100 мкм.

Фоточувствительные элементы изготавливались из гетероэпитаксиальных структур КРТ, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией (ГЭСКРТМЛЭ) [3] в Институте физики полупроводников Сибирского

отделения РАН (ИФП СО РАН), и монокристаллических пластин КРТ, полученных объёмной кристаллизацией из расплава с последующим двухтемпературным отжигом в парах ртути (ОМККРТ). В таблице приведены основные фотоэлектрические параметры использованного в данной работе материала КРТ. Концентрация основных носителей заряда в материале электронного типа проводимости соответствует уровню электрически активных фоновых примесей ($N_D - N_A$). Дырочный тип проводимости плёнки ГЭСКРТМЛЭ был получен в ИФП СО РАН отжигом при температуре около 230 °С плёнки n -типа с $N_D - N_A$ приблизительно $1,1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Электрически активные дефекты в объёме ФЧЭ специально создавались путем удаления слоя КРТ толщиной 1–1,2 мкм (перед созданием контактов) и разделения ФЧЭ на элементы ионным травлением (ИТ). Ионное травление осуществлялось в установке «SID-1» фирмы «Secop» (Австрия) коллимированным пучком ионов аргона при ускоряющем напряжении 1 кэВ при комнатной температуре подложки. Плотность ионного тока составила $0,2 \pm 10\% \text{ мА/см}^2$. Электрические контакты были получены электрохимическим осаждением индия на поверхность, обработанную ИТ. На фронтальной поверхности фоточувствительных площадок ФЧЭ, а также на нижней поверхности ФЧЭ из ОМККРТ формировались плёнки собственного оксида КРТ толщиной 0,08 мкм с помощью анодного окисления [4]. В отдельных случаях после ионного разделения ФЧЭ на элементы с их боковых стенок удалялись струйным аэрозольным травлением (АТ) приповерхностные области толщиной 0,5–1 мкм с повышенной концентрацией электронов. В качестве газа носителя аэрозоля на основе раствора брома в воде использовался азот.

В процессе исследований измерялась зависимость вольтовой чувствительности в максимуме спектральной характеристики от напряжения смещения при температуре жидкого азота ФЧЭ в вакуумном криостате. Входное окно криостата было сделано из просветлённого сульфидом цинка германия. Конструкция измерительного криостата позволяла изменять плоский угол зрения (2β) фоточувствительных площадок от 180 до 14 градусов. Прогрев ФЧЭ проводился в вакуумных криостатах или на воздухе.

Для измерения эффективного времени жизни носителей ФЧЭ фоторезисторов по спаду фотосигнала на длине волны 10,6 мкм использовался импульсный периодический CO_2 лазер модели «ИЛ-100». Длительность импульса излучения — около 100 нс. Эффективное время жизни неосновных носителей определялось по времени спада амплитуды сигнала в 2,72 раза.

Концентрация основных носителей заряда в ФЧЭ определялась из зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения, которая при согласованном по сопротивлению нагрузки режиме измерения описывается выражением [5] (В/Вт)

$$Su = \frac{\eta U \tau}{2h\nu(n + p_F)Lad}, \quad (1)$$

где η — квантовая эффективность принята равной 0,9; U — напряжение смещения в В, прикладываемое к ФЧЭ; τ — эффективного времени жизни носителей; $h\nu$ — средняя энергия падающего кванта 2×10^{-20} Дж; n — концентрация основных носителей заряда в ФЧЭ; p_F — концентрация фоновых носителей заряда в ФЧЭ; L, a, d — длина, ширина и толщина ФЧЭ. Эффективное время жизни носителей в отсутствие пролёта носителей зависит от времени жизни неосновных носителей заряда в объёме полупроводника (τ_v), скорости поверхностной рекомбинации на нижней и верхней (S_1) сторонах ФЧЭ и на боковых гранях (S_2) ФЧЭ следующим образом:

$$1/\tau = 1/\tau_v + 2S_1/d + 2S_2/a, \quad (2)$$

а в условиях пролёта носителей заряда для материала электронного типа проводимости

$$\tau = L^2/(\mu_p U). \quad (3)$$

При расчёте зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения ФЧЭ из ОМККРТ и ГЭСКРТМЛЭ принималось, что $\mu_p = 530 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, $S_2 = 3000 \text{ см}^2/\text{с}$ при ИТ и $1500 \text{ см}^2/\text{с}$ при АТ, для ГЭСКРТМЛЭ с варизонными слоями на нижней и верхней сторонах ФЧЭ $S_1 = 0$, для ОМККРТ $S_1 = 200 \text{ см}^2/\text{с}$ [6]. Концентрация фоновых носителей заряда в ФЧЭ описывается выражением [5]

$$p_F = \eta \Phi \tau / d, \quad (4)$$

где Φ — фоновый поток носителей в диапазоне спектра 2–12 мкм для температуры фона 300 К, равный 1×10^{18} фотонов/см²с [5]. Следует отметить, что изменение в разумных пределах скорости рекомбинации и времени жизни неосновных носителей заряда не влияет на точность определения концентрации основных носителей заряда из зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения, так как при работе ФЧЭ в режиме пролёта носителей вольтовая чувствительность определяется концентрацией носителей основных носителей и подвижностью дырок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены экспериментальные данные и результаты расчёта (сплошные линии) зависимости вольтовой чувствительности в максимуме спектральной характеристики от напряжения смещения в соответствии с выражениями (1–4) для трёх ФЧЭ, изготовленных из ГЭСКРТМЛЭ. Наилучшее соответствие расчётным зависимостям вольтовой чувствительности (кривые 1 и 2, рис. 1) экспериментальным результатам при $2\beta = 180^\circ$ для ФЧЭ, изготовленного из образца 1 ГЭСКРТМЛЭ (табл.) и прогретого в течение 134 часов при 70 °С, получено при $n = 3,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\tau_v = 0,35 \times 10^{-6} \text{ с}$ до прогрева и при $n = 1,24 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\tau_v = 0,89 \times 10^{-6} \text{ с}$ после прогрева. Наилучшее соответствие расчётной зависимости вольтовой чувствительности (кривая 3, рис. 1) экспериментальным результатам при $2\beta = 21^\circ$

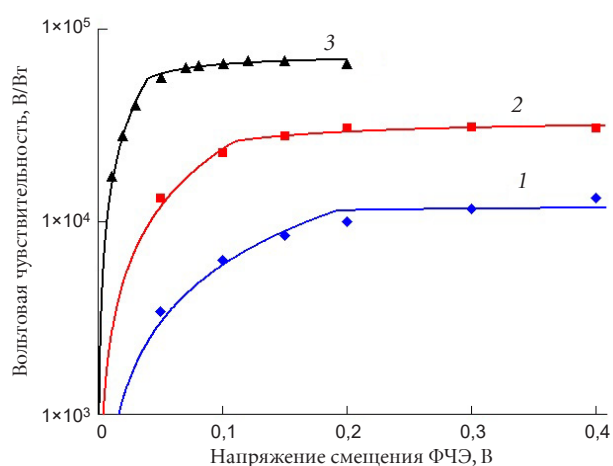


Рис. 1. Зависимость вольтовой чувствительности ФЧЭ от напряжения смещения до прогрева (1) и после прогрева в течение 134 часов при 70 °С (2) и 265 часов при 117 °С (3).

для ФЧЭ, изготовленного из образца 2 ГЭСКРТМЛЭ (табл.) и прогретого сначала в течение 120 часов при 70 °С, а затем в течение 265 часов при 117 °С, получено при $n = 6,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $\tau_v = 4 \times 10^{-6} \text{ с}$.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные зависимости эффективного времени жизни неосновных носителей заряда от напряжения смещения для ФЧЭ из образцов ГЭСКРТМЛЭ и теоретическая зависимость (кривая 1) в соответствии с (2, 3) при $\mu_p = 530 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $S_2 = 3000 \text{ см}^2 / \text{с}$, $\tau_v = 1,5 \times 10^{-6} \text{ с}$. Экспериментальные данные получены для ФЧЭ, изготовленных из: 2 — до прогрева (образец 3 табл.); 3 — после прогрева при 70 °С в течение 444 часов $2\beta = 180^\circ$ (образец 1 табл.); 4, 5 — после прогрева при 117 °С в течение 95 часов и в течение 265 часов $2\beta = 21^\circ$, соответственно (образец 2 табл.). Как видно из рис. 2, для всех использованных образцов ГЭСКРТМЛЭ зависимость эффективного времени фотосигнала от напряжения смещения в условиях пролёта носителей ложится на кривую, которая описывается выражением (3) при $\mu_p = 530 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Прогрев ФЧЭ (рис. 1, 2) приводит к уменьшению концентрации основных носителей заряда, что сопровождается существенным увеличением вольтовой чувствительности, а режим пролёта носителей заряда наступает при более низких напряжениях за счёт увеличения времени жизни неосновных носителей заряда.

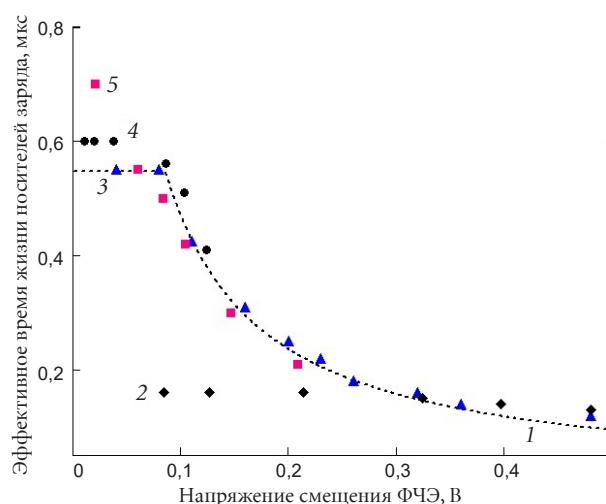


Рис. 2. Экспериментальные данные (2–5) и теоретическая зависимость (1 — пунктирная кривая) эффективного времени жизни неосновных носителей заряда от напряжения смещения для ФЧЭ: 2 — до прогрева; 3 — после прогрева при 70 °С; 4, 5 — после прогрева при 117 °С в течение 95 и 265 часов.

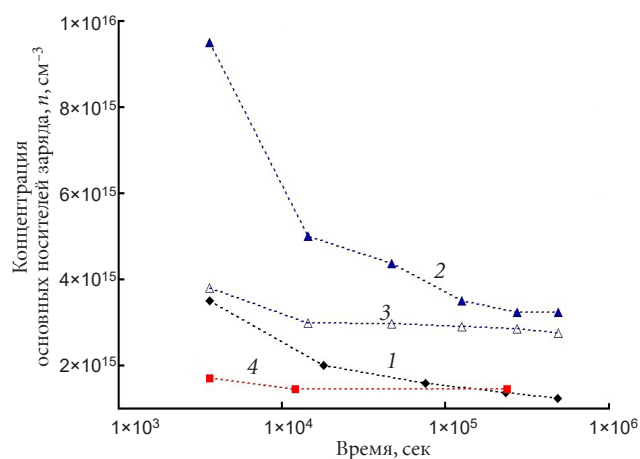


Рис. 3. Изменение концентрации основных носителей заряда от времени прогрева при температуре 70 °С для ФЧЭ, изготовленных из ГЭСКРТМЛЭ: 1 — электронного типа проводимости, 2, 3 — дырочного типа проводимости и 4 — ОМККРТ.

На рис. 3 приведены типичные зависимости концентрации основных носителей заряда от времени прогрева ФЧЭ при температуре 70 °С, изготовленных из ГЭСКРТМЛЭ (1 — электронного типа проводимости,

Основные фотоэлектрические параметры КРТ при 77 К

№ п/п	Материал КРТ	Мольная доля CdTex	Тип проводимости	Концентрация основных носителей заряда, см^{-3}	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В с}$	Время фототовета, мкс
1		0,213–0,214		$4,5 \times 10^{14}$	$1,03 \times 10^5$	4,0
2	ГЭСКРТ МЛЭ	0,210–0,215	электронный	$3,2 \times 10^{14}$	$0,95 \times 10^5$	3,9
3		0,209–0,214	дырочный	$7,3 \times 10^{15}$	$4,6 \times 10^2$	0,01
4	ОМККРТ	0,215–0,219	электронный	$4,4 \times 10^{14}$	$2,3 \times 10^5$	1,5

2, 3 — дырочного типа проводимости) и из ОМККРТ (4). При изготовлении ФЧЭ 3 и 4 (рис. 3) использовалось АТ. На рис. 3 данные, относящиеся к первому измерению параметров ФЧЭ, и начало отсчёта времени воздействия температуры прогрева соответствует времени $3,6 \times 10^3$ с, так как в процессе изготовления ФЧЭ после ИТ до измерения фотоэлектрических параметров использовались технологические операции при температуре 100°C с суммарным воздействием в течение одного часа. Как видно из приведённых на рис. 3 результатов и данных таблицы, для материала КРТ электронного типа проводимости концентрация основных носителей заряда после изготовления ФЧЭ существенно превышает концентрацию в исходном материале КРТ. Материал дырочного типа проводимости при изготовлении ФЧЭ переходит в *n*-тип с концентрацией основных носителей заряда (кривая 2 рис. 3), которая превышает концентрацию, характерную для ФЧЭ, изготовленных из *n*-типа (кривая 1 рис. 3). Применение струйного аэрозольного травления боковых стенок ФЧЭ после ИТ во всех случаях уменьшает концентрацию основных носителей заряда. Прогрев ФЧЭ при 70°C приводит к уменьшению концентрации основных носителей заряда с выходом на постоянную величину для каждого ФЧЭ, причём для ФЧЭ, подвергнутых АТ, это происходит значительно быстрее (кривые 3 и 4, рис. 3). Такое поведение концентрации основных носителей заряда во времени позволяет предположить, что имеет место диффузия электрически активных точечных дефектов с боковых поверхностей ФЧЭ. Принципиальных отличий в поведении концентрации основных носителей заряда ФЧЭ из ГЭСКРТМЛЭ и ОМККРТ замечено не было на этапе прогрева до 5×10^5 с. В работе [2] приведены экспериментальные данные изменения концентрации основных носителей заряда от времени при комнатной температуре после ионного травления поверхности эпитаксиальных пластин ГЭСКРТМЛЭ электронного типа проводимости в том числе легированных индием. Для нелегированного индием образца ГЭСКРТМЛЭ элек-

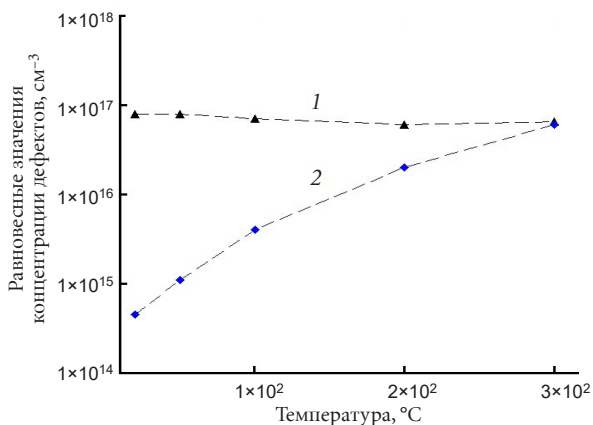


Рис. 4. Равновесные концентрации точечных дефектов в КРТ ($x \approx 0,2$) [7]. 1 — концентрация однократно заряженных вакансий ртути, 2 — концентрация двукратно заряженных вакансий ртути.

тронного типа проводимости ($N_D - N_A = 7,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$) после ИТ концентрация электронов составила величину около $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а после длительной выдержки при комнатной температуре она стабилизируется на уровне $2,4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Сопоставим эти величины с равновесными концентрациями точечных дефектов в КРТ $x \approx 0,2$ (рис. 4), приведённые в работе [7]. Как видно из рис. 4, абсолютные значения концентрации основных носителей заряда после ИТ приблизительно равны сумме равновесных концентрации точечных дефектов и концентрации электрически активных фоновых примесей ($N_D - N_A$), а после выхода на постоянный уровень равны сумме равновесной концентрации двукратно заряженных вакансий ртути и ($N_D - N_A$) при температуре ИТ около 70°C для образца ГЭСКРТМЛЭ в работе [2] и при температуре 25°C для образцов КРТ, используемых в данной работе.

РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПРОЦЕССЕ ОТЖИГА

Воздействие ИТ эквивалентно низкотемпературному отжигу кристаллов в парах ртути, однако при этом происходит не только аннигиляция вакансий ртути с диффундирующей междуузельной ртутью. Под воздействием ИТ образуются однократно заряженные донорные комплексы междуузельной ртути (Hg_I) с вакансиями ртути ($[\text{Hg}_I V'_{\text{Hg}}]^\bullet$ и $[\text{Hg}_I V''_{\text{Hg}}]^\bullet$) в условиях чрезвычайно высокого пересыщения кристалла ртутью на поверхности. Причём для образования $[\text{Hg}_I V'_{\text{Hg}}]^\bullet$ необходимо более сильное пересыщения ртутью, которое создаётся только на небольшом расстоянии от обрабатываемой ИТ поверхности. Возможность образования донорных комплексов междуузельной ртути с акцепторными атомами примеси обсуждалось в работе [8]. Подтверждением образования таких однократно заряженных донорных комплексов является соответствие значений концентрации основных носителей заряда, полученных экспериментально в процессе отжига с расчётными величинами, полученными с использованием известных коэффициентов диффузии электрически активных точечных дефектов. Точечные дефекты в КРТ обладают высокими значениями коэффициентов диффузии [7, 9] ($\text{см}^2/\text{с}$):

$$D(\text{Hg}_I^\bullet) = 3,4 \times 10^4 \exp(-0,20 / k_B T), \quad (5)$$

$$D(V'_{\text{Hg}}) = 0,11 \exp(-0,65 / k_B T), \quad (6)$$

$$D(V''_{\text{Hg}}) = 4,12 \exp(-0,95 / k_B T). \quad (7)$$

Изменение концентрации основных носителей заряда во времени описывается уравнением электронейтральности, которое в рассматриваемом случае имеет вид

$$n(x, t) = [\text{Hg}_I V'_{\text{Hg}}]^\bullet(x, t) + [\text{Hg}_I V''_{\text{Hg}}]^\bullet(x, t) + N_D - N_A, \quad (8)$$

Для расчёта распределения концентрации $N(x, t)$ диффундирующего вещества нами использованы выражения, полученные Болтаксом Б.И. [10] при решении уравнения диффузии для тела конечных размеров со связанными границами в случае равномерного начального распределения

$$N(x, t) = \frac{4}{\pi} N_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)} \exp\left(-\frac{(2k+1)^2}{l^2} \pi^2 Dt\right) \times \sin \frac{(2k+1)\pi x}{l} \quad (9)$$

и в случае диффузии из тонкого приповерхностного слоя

$$N(x, t) = \frac{4h}{l} Q_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)} \exp\left(-\frac{(2k+1)^2}{l^2} \pi^2 Dt\right) \times \sin \frac{(2k+1)\pi x}{l} \quad (10)$$

где l — характерный размер в направлении диффузии ($l = 2d$ для эпитаксиальных пластин ГЭСКРТМЛЭ и $l = a$ для ФЧЭ); $D = D_0 \exp(-E_a/k_B T)$ — коэффициент диффузии электрически активных дефектов (6, 7); k — число сумм, принятое в нашем расчёте, равным 120; N_0 — начальное равномерное распределение концентрации диффундирующего вещества; h — толщина тонкого приповерхностного слоя; Q_0 — концентрация диффундирующего вещества в тонком приповерхностном слое; t — время прогрева; T — температура прогрева.

На рис. 5 приведены экспериментальные результаты изменения концентрации основных носителей заряда от времени при комнатной температуре из работы [2]: 1 — для нелегированного слоя ГЭСКРТМЛЭ с $N_D - N_A = 7,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 2 — для легированного индием $N_{In} = 1,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ слоя ГЭСКРТМЛЭ. Здесь же приведены результаты расчёта изменения концентрации основных носителей заряда от времени (линии) для данных

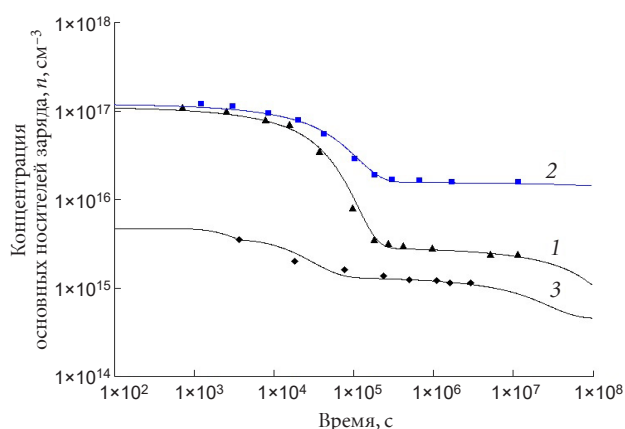


Рис. 5. Зависимость концентрации основных носителей заряда от времени при комнатной температуре для ГЭСКРТМЛЭ [2]. 1 — $N_D - N_A = 7,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 2 — $N_{In} = 1,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 3 — для ФЧЭ фоторезистора из ГЭСКРТМЛЭ при 70°C , $N_D - N_A = 4,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

слоёв при $T = 300 \text{ K}$ в соответствии с выражениями (8, 9) при диффузии донорных комплексов междуузельной ртути с вакансиями ртути к фронтальной поверхности слоёв ГЭСКРТМЛЭ. Наилучшее соответствие экспериментальным данным получено для равномерного начального распределения однократно заряженных донорных комплексов междуузельной ртути с вакансиями ртути с концентрацией $[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^I]^* = (1,05 - 1,08) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^{II}]^* = (2,6 - 2,8) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и коэффициентами диффузии $D([\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^I]^*) = 0,11 \exp(-0,62/k_B T)$ и $D([\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^{II}]^*) = 4,12 \exp(-0,92/k_B T)$. Толщина нелегированного слоя ГЭСКРТМЛЭ составила 6,6 мкм, а толщина легированного индием слоя ГЭСКРТМЛЭ — 8,0 мкм. На рис. 5 также приведены экспериментальные данные и результаты расчёта в соответствии с выражениями (8–10) (кривая 3) изменения концентрации основных носителей заряда для ФЧЭ фоторезистора из ГЭСКРТМЛЭ от времени при температуре прогрева сначала при 100°C в течении одного часа, а затем при 70°C при одновременной диффузии однократно заряженных донорных комплексов междуузельной ртути с вакансиями ртути ($[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^I]^*$ и $[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^{II}]^*$) к боковым поверхностям ФЧЭ. Расчёт изменения $[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^{II}]^*(x, t)$ выполнялся в соответствии с выражением (9), а расчёт изменения $[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^I]^*(x, t)$ в соответствии с выражением (10). В начальный момент времени концентрация $[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^I]^*$ в тонком приповерхностном слое толщиной 1 мкм составила $8,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а концентрация $[\text{Hg}_1 V_{\text{Hg}}^{II}]^*$ в объёме ФЧЭ $9,2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_D - N_A = 4,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (образец 1 табл.). При расчёте использовались те же коэффициентами диффузии, что и для слоёв ГЭСКРТМЛЭ.

Полученные результаты свидетельствуют, что во временном диапазоне 7×10^5 с концентрация основных носителей заряда в слоях ГЭСКРТМЛЭ и ФЧЭ, подвергнутых ИТ, изменяется в процессе отжига по диффузионному механизму с коэффициентом диффузии, близким к коэффициенту диффузии однократно заряженных вакансий ртути. Защита поверхности ФЧЭ анодным оксидом и диэлектриком устраняет изменение концентрации основных носителей заряда с фронтальной поверхности и связано только с боковыми гранями ФЧЭ. С увеличением времени (7×10^5 с и более) концентрация основных носителей заряда в слоях ГЭСКРТМЛЭ и ФЧЭ, подвергнутых ИТ, начинает изменяться по диффузионному механизму с коэффициентом диффузии, близким к коэффициенту диффузии двукратно заряженных вакансий ртути (1 и 3, рис. 5).

Исследование изменения концентрации основных носителей заряда в ФЧЭ за счёт диффузии к боковым поверхностям ФЧЭ однократно заряженных донорных комплексов междуузельной ртути с двукратно заряженными вакансиями ртути было выполнено при температуре отжига 117°C для двух групп фоторезисторов (рис. 6), ФЧЭ которых были изготовлены из ГЭСКРТМЛЭ дырочного типа проводимости (1, рис. 6) и электронного типа проводимости (2, рис. 6). Группа ФЧЭ из ГЭСКРТМЛЭ электронного типа проводимости (образец 2 табл.) прогревалась сначала при 70°C

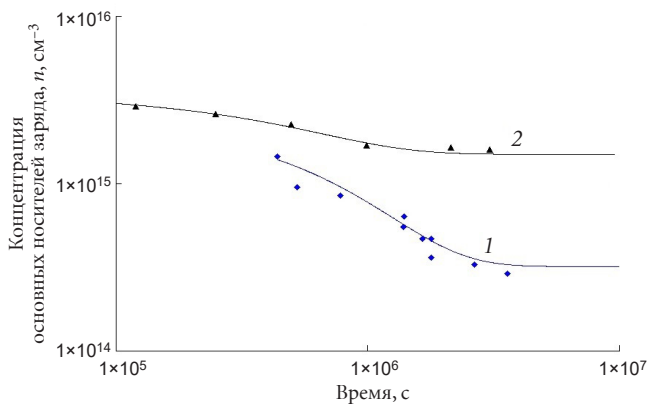


Рис. 6. Изменение концентрации основных носителей заряда в фоторезисторах при температуре отжига 117 °С: 1 — для ФЧЭ из ГЭСКРТМЛЭ электронного типа проводимости, 2 — для ФЧЭ из ГЭСКРТМЛЭ дырочного типа проводимости.

в течение 120 часов. Как видно из рис. 6, прогрев ФЧЭ при 117 °С приводит к снижению концентрации основных носителей заряда в ФЧЭ до величины, которая определяется уровнем электрически активных фоновых примесей (табл.). Расчёты изменения концентрации основных носителей заряда, выполненные в соответствии с выражениями (8, 9), когда $[Hg_1V'_{Hg}]^{\bullet}(x, t) \ll [Hg_1V''_{Hg}]^{\bullet}(x, t)$, приведены на рис. 6 (сплошные линии). Хорошее соответствие экспериментальным результатами получено при $D([Hg_1V''_{Hg}]^{\bullet}) = 4,12 \exp(-0,62/k_B T)$ и $N_D - N_A = 3,2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ для группы ФЧЭ, которые были изготовлены из ГЭСКРТМЛЭ электронного типа проводимости, и при $D([Hg_1V'_{Hg}]^{\bullet}) = 4,12 \exp(-0,92/k_B T)$ и $N_D - N_A = 1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для группы ФЧЭ, которые были изготовлены из ГЭСКРТМЛЭ дырочного типа проводимости.

Отметим, что энергии активации коэффициентов диффузии электрически активных точечных дефектов,

полученные из расчёта изменения концентрации основных носителей заряда в слоях и ФЧЭ из ГЭСКРТМЛЭ электронного типа проводимости, на 0,03 эВ ниже энергии активации в коэффициентах диффузии однократно и двукратно заряженных вакансий ртути (6, 7). Это может быть связано с зависимостью коэффициентов диффузии от концентрации вакансий в исходных образцах, так как данные коэффициенты определены для материала КРТ дырочного типа, тип проводимости которого определяется вакансиями в подрешётке металла, закалёнными при высокой температуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом измерения вольтовой чувствительности фоторезисторов из ГЭСКРТМЛЭ при воздействии повышенных температур исследовано образование и отжиг дефектов, возникающих при ионном травлении. Результаты расчётов изменения концентрации основных носителей заряда во времени хорошо согласуются с экспериментальными данными, если дефектами в ГЭСКРТМЛЭ, образованными при ионном травлении, являются однократно заряженные доноры в виде комплексов вакансий ртути с избыточной междоузельной ртутью. При этом установлено, что концентрация носителей заряда после ионного травления сопоставима с суммарной концентрацией остаточных электрически активных фоновых примесей и однократно заряженных доноров в виде комплексов междоузельной ртутью с вакансиями ртути, концентрация которых определяется равновесными концентрациями точечных дефектов в КРТ.

Авторы выражают признательность сотрудникам ИФП СО РАН Сидорову Ю.Г., Дворецкому С.А. Михайлову Н.Н. и Варавину В.С. за создание и исследования эпитаксиальных структур КРТ для фоторезисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мынбаев К.Д., Иванов-Омский В.И. Модифицирование свойств $Hg_{1-x}Cd_xTe$ низко-энергетичными ионами // ФТП. 2003. Т. 37. В. 10. С. 1153–1178.
2. Поцяк М, Инжин И.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Ю.Г., Варавин В.С., Мынбаев К.Д., Иванов-Омский В.И. Электрические свойства гетероэпитаксиальных слоев $CdHgTe$ n -типа проводимости, модифицированных ионным травлением // ФТП. 2008. Т. 8. В. 12. С. 1144–1146.
3. Varavin V.S., Dvoretzky 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.
4. Catagnus P.S., Baker C.T. Passivation of mercury cadmium telluride semiconductor surfaces by anodic oxidation // US Patent. 1976. № 3977018.
5. Kinch M.A., Borrello S.R., Simmons A. 0.1 eV $HgCdTe$ photoconductive detector performance // Infrared Phis. 1977. V. 17. № 2. P. 127–135.
6. Siliquini J.F., Fynn K.A., Nener B.D., Faraone L., Hartley R.H. Improved device technology for epitaxial $Hg_{1-x}Cd_xTe$ infrared photoconductor arrays // Semicond. Sci. Technol. 1994. V. 9. P. 1515–1522.
7. Горшков А.В. Точечные дефекты и примеси в $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ // Высокочистые вещества. 1989. № 6. С. 207–214.
8. Belas E., Grill R., Franc J., Moravec P., Vorghova R., Hüschl P., Sitter H., Toth A.L. Dynamics of native point defects in H_2 and Ar plasma-etched narrow gap $(HgCd)Te$ // J. Cryst. Growth. 2001. V. 224. P. 52–58.
9. Заитов Ф.А., Исаев Ф.К., Горшков А.В. Дефектообразование и диффузионные процессы в некоторых полупроводниковых твёрдых растворах. Баку: Азерб. гос. изд-во. 1984. С. 89.
10. Болтакс Б.И. Диффузия в полупроводниках. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1961. С. 143.