

УДК 621.383.45: 621.793.09

PACS: 85.60.Dw

Фоторезисторы из материала $Cd_xHg_{1-x}Te$ (обзор)

А. В. Филатов, Е. В. Сусов, В. В. Карпов, А. В. Гусаров

В обзоре выполнен анализ развития с 70-х годов прошлого века отечественной технологии изготовления высокочувствительных и стабильных фоторезисторов из твёрдых растворов тройной системы $Cd_xHg_{1-x}Te$. Вольтовая чувствительность современных фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур $n-Cd_xHg_{1-x}Te$, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из арсенида галлия и предназначенных на спектральный диапазон 3–5 и 8–12 мкм с размером фоточувствительной площадки 50×50 и 35×35 мкм, причем работающих в неравновесных условиях эксклюзии неосновных носителей заряда, достигает величины $S_{\lambda, \max} \approx 10^7$ В/Вт с удельной обнаружительной способностью более 5×10^{11} см $Гц^{1/2}$ $Вт^{-1}$ при температуре жидкого азота и плоском угле зрения 14° . Высокая вольтовая чувствительность и малая выделяемая мощность (5×10^{-7} Вт) фоторезисторов в конструкции пиксела с радиальным смещением позволяют создавать на их основе фокальные матрицы с количеством пикселей $\approx 10^6$.

Ключевые слова: фоторезистор, гетероэпитаксиальные структуры кадмий-ртуть-теллур, ионное травление, эксклюзия неосновных носителей заряда, фокальные матрицы.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-112-127

Введение

Исполнилось 60 лет с открытия Лоу-соном (W. D. Lawson) в 1959 г. в Англии [1] и в 1960 г. А. Д. Шнейдером в СССР

Филатов Александр Владимирович, вед. инженер, к.т.н.

Сусов Евгений Васильевич, гл. спец., к.т.н.

Карпов Владимир Владимирович, зам. ген. директора по гражданскому приборостроению – начальник ЦКБ, к.ф.-м.н.

Гусаров Анатолий Викторович, вед. инженер. АО «Московский завод «САПФИР».

Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4А, стр. 3А.

E-mail: info@mzsaphir.ru

Статья поступила в редакцию 02 марта 2021 г.

© Филатов А. В., Сусов Е. В., Карпов В. В., Гусаров А. В., 2021

[2] монокристаллов твёрдых растворов тройной системы $Cd_xHg_{1-x}Te$ (или кадмий-ртуть-теллур – КРТ). Множество научных центров за рубежом (США, Англия, Франция, Япония, Италия) развернули тогда работы по синтезу КРТ и фотоприёмникам по заказам военных ведомств этих стран. Фоторезисторы из КРТ уже около полувека успешно используются в различных видах специальной и других видах техники инфракрасного спектра диапазонов 8–12 и 3–5 мкм и прочно заняли нишу в тепловизионной. Развитие тепловидения пошло в направлении создания не требующих сканеров матричных фотоприёмников на основе фотодиодов из материала КРТ.

В фоторезисторах и фотодиодах из материала КРТ с большим ($\approx 80\%$) содержанием теллурида ртути часто проявляется

коварное свойство КРТ, а именно, ослабленная ковалентная связь ртути в кристаллической решётке КРТ. Проблема надёжности фоторезисторов успешно решена несколькими простыми технологическими приёмами. Технология изготовления высокостабильных матричных фотодиодов из $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ сложна, а высококачественные матрицы весьма дороги. Обнаружительная способность охлаждаемых до температуры жидкого азота фотодиодов из КРТ для диапазона спектра более 11 мкм падает вследствие значительного увеличения темнового тока [3]. Для получения высокой обнаружительной способности фотодиодов диапазона спектра более 12 мкм необходимо дальнейшее снижение рабочей температуры. Микрокриогенные системы охлаждения на уровень температур 65 К по эксплуатационным характеристикам существенно уступают таким системам на уровень температур 77–80 К [4]. В то же время фоторезисторы на спектральный диапазон более 12 мкм с температурой охлаждения 77–80 К имеют высокую чувствительность, которая ограничена только фоновым излучением [5]. Однако контактная система и значительное тепловыделение фоторезисторов затрудняют их использование в матричных фотоприёмных устройствах.

Целью данного аналитического обзора является рассмотрение истории развития отечественной технологии изготовления высокостабильных одноэлементных, многоэлементных и матричных фоторезисторов из материала КРТ в непосредственной связи с развитием технологии получения высококачественного материала КРТ.

Материаловедческие проблемы

По мнению специалистов в области технологии полупроводниковых материалов, проблема получения однородных по составу (x) монокристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, пригодных для разработки фотоприёмни-

ков, оказалась уникальной по сложности. Она определяется особыми свойствами КРТ [6, 7]:

- большое расхождение между линиями ликвидуса и солидуса в широком диапазоне составов; малый угол наклона линии солидуса при $x \leq 0,4$; плотностная ликвация в расплаве из-за значительного различия плотности CdTe и HgTe ;

- ослабленная ковалентная связь ртути с теллуром в кристаллической решётке КРТ;

- высокое давление паров ртути (более 20 атм.) при температуре кристаллизации, что сопряжено с опасностью взрыва ампулы с расплавом и отравления персонала.

В СССР первые шаги в разработке технологии получения монокристаллов КРТ $x \approx 0,2$ были сделаны в НИИ-801 в 1961 году по инициативе научного руководителя института Л. Н. Курбатова [6]. Более 10 лет ушло на разработку в СССР и за рубежом технологии выращивания однородных по составу монокристаллов КРТ $x \approx 0,2$ с необходимыми фотоэлектрическими и электрофизическими свойствами. Технология изготовления фоторезисторов разрабатывалась в НИИ-801 (НИИПФ) с 1969 года параллельно с разработкой технологии получения материала КРТ и параллельно с исследованиями свойств однородных по составу монокристаллов. Эти исследования, выполненные в НИИПФ и Ленинградском физико-техническом институте АН СССР, позволили сформулировать требования к монокристаллам КРТ для фоторезисторов. Головной организацией в разработке технологии выращивания монокристаллов КРТ $x \approx 0,2$ по техническому заданию НИИПФ был определён Завод чистых металлов (ЗЧМ) Министерства цветной металлургии СССР [6, 8].

Разработка надёжной конструкции фоторезистора, охлаждаемого до температуры жидкого азота, потребовала решения

ряда материаловедческих и теплофизических задач:

- выбор материала держателя фоточувствительных элементов (ФЧЭ) по коэффициентам теплового расширения и минимальной теплопроводности;
- разработка теплоизолирующих узлов конструкции дюара для ФЧЭ, находящегося при $T \cong 80$ К;
- разработка гермоввода и внутреннего кабеля;
- разработка конструкции и технологии соединения германиевого входного окна, просветленного ZnS, со стеклянным дюаром.

Результаты исследований и разработок

Первые отечественные фоторезисторы из материала КРТ состава $x = 0,2$ для фотоприёмников инфракрасного диапазона спектра $\lambda = 8\text{--}14$ мкм были разработаны в начале семидесятых годов прошлого века. Одноэлементные фоторезисторы ФР-1 и ФР-1А и десятиэлементный фоторезистор ФР-10, разработанные в НИИПФ, были изготовлены из отобранных по составу маленьких ($\approx 3 \times 5$ мм) образцов КРТ, полученных в Государственном институте прикладной оптики (ГИПО) и в НИИПФ [6]. Это были образцы КРТ с дырочной проводимостью, замаскированной электронами, имеющими очень высокую подвижность. Для повышения вольтовой чувствительности снижением явления «пролёта» носителей (*swep-aut*), а также уменьшения шума из-за инъекции носителей заряда использовалась конструкция ФЧЭ с «высокими контактами» [6] в виде колодца высотой 150–200 мкм, разработанная ранее для фоторезисторов из антимонида индия. Пластина КРТ приклеивалась к подложке (лейкосапфир, германий) с помощью химически и криогенно стойкого клея на эпоксидной основе. Выделение фоточувствительной площадки производилось электроискровой резкой, затем

нарушенный слой удалялся из колодца химическим травлением раствором брома в бромистоводородной кислоте. В качестве материала контактов использовался эвтектический сплав индия с низкой температурой плавления. Защитным просветляющим покрытием служила плёнка ZnS. Вольтовая чувствительность таких фоторезисторов с размерами ФЧЭ ($A = 0,15 \times 0,15$ мм) составляла $Su_{\lambda, \max} = (2\text{--}5) \times 10^3$ В Вт⁻¹. Для разработки пятиэлементного фоторезистора ФР-5 [8] из КРТ *n*-типа проводимости впервые в СССР на таком материале использовалась планарная технология выделения ФЧЭ методом фотолитографии. Материал КРТ *n*-типа проводимости, изготовленный на ЗЧМ, отбирался по линейной зависимости напряжения Холла в импульсном магнитном поле (величиной до 6 Тл) [6]. В технологии изготовления таких ФЧЭ были использованы следующие методы:

- нанесение просветляющего покрытия из ZnS на фронтальную поверхность ФЧЭ, защищённую собственным анодным окислом;
- разделение фоточувствительных пикселей химическим травлением;
- электролитическое осаждения индия для создания контактов на обработанную ионами поверхность КРТ.

Вольтовая чувствительность фоторезисторов ФР-5 увеличилась на порядок до $Su_{\lambda, \max} = (2\text{--}5) \times 10^4$ В Вт⁻¹ ($A = 0,3 \times 0,3$ мм). Ослабленная ковалентная связь ртути в решётке КРТ приводила к уходу атомов ртути с поверхности монокристалла ФЧЭ, диффузии вакансий ртути в объём ФЧЭ и к деградации параметров фоторезистора. Деградацией параметров фоторезисторов были также озабочены разработчики за рубежом. Решением проблемы стала защита поверхности ФЧЭ собственным анодным окислом и легирование монокристаллов КРТ индием в процессе синтеза.

Работа на ЗЧМ завершилась разработкой промышленной технологии изготов-

ления легированных индием [6] монокристаллов КРТ ($x \approx 0,2$) n -типа проводимости с временем жизни носителей заряда не менее 1×10^{-6} с и концентрацией электронов в пределах $(2-5) \times 10^{14}$ см $^{-3}$ при температуре жидкого азота. Мощности ЗЧМ обеспечивали производство монокристаллов КРТ по техническим условиям в объёмах, достаточных для серийного выпуска фотоприёмников. В основе технологии лежал метод зонной перекристаллизации из двухфазной смеси с легированием индием в процессе синтеза слитков и последующего двухтемпературного отжига пластин КРТ диаметром ≈ 50 мм в парах ртути. Выращенный кристалл имел блочную структуру. После разделения на блоки получались образцы монокристаллов произвольной формы и размеров. Размер крупных блоков позволял получить пластины КРТ пригодные для изготовления многоэлементных ФЧЭ с $A = 0,05 \times 0,05$ мм (50-элементный фоторезистор ФР-50 и 128-элементный фоторезистор ФР-128 [6, 8]) и использовать ранее разработанную планарную технологию. В технологии изготовления фоторезисторов была использована новая методика получения тонких слоёв 5–10 мкм (из приклеенных к подложке пластин КРТ толщиной 1 мм) с помощью химико-механического полирования в несколько стадий для удаления нарушенного слоя и получения высокой параллельности и плоскостности (отклонение 1–2 мкм на длине 15 мм).

При разработке многоэлементных фоторезисторов (≥ 50 элементов) были опробованы разные контактные системы. Наилучшей оказалась контактная система, разработанная для фоторезистора ФР-5, ставшая составляющей конструкций ФЧЭ в базовой технологии изготовления фоторезисторов в серийном производстве. Схематический чертеж продольного сечения ФЧЭ из КРТ приведен на рис. 1. В образцах фоторезисторов ФР-128 и ФР-50 (разделение пикселей ионным травлением

и обработка травлением ионами областей под контактами) вольтовая чувствительность осталась на уровне $Su_{\lambda, \max} = (1,5-2) \times 10^4$ В Вт $^{-1}$.

На Московском заводе «Сапфир» ведется серийный выпуск фоторезисторов с числом элементов не более 64, нашедших применение в различных видах техники [6].

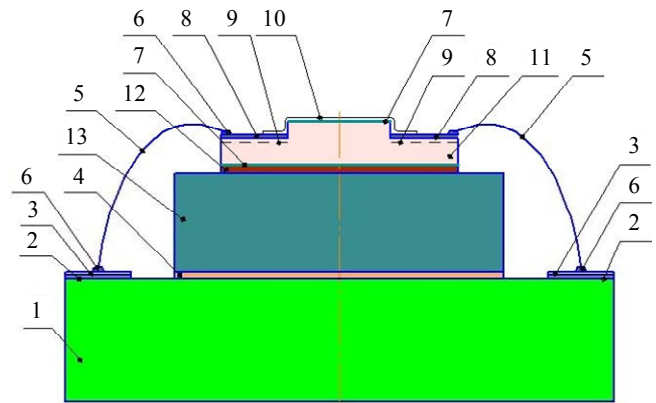


Рис. 1. Схематический чертеж поперечного сечения пикселя ФЧЭ из КРТ: 1 – подложка контактного раstra (лейкосапфир); 2 – подслой контактной дорожки раstra (хром); 3 – контактная дорожка раstra (золото); 4 – клей на эпоксидной основе; 5 – токоподвод (золотая проволока 0,05 мм); 6 – припой на основе индия; 7 – защитный, консервирующий слой (анодный окисел); 8 – контакт ФЧЭ (индий электрохимический); 9 – подслой n^+ -контакта (обработка подконтактной области КРТ пикселя ионами аргона); 10 – трёхслойное просветляющее защитное покрытие ($CdTe$, $ZnSe$, $YtScO_3$); 11 – КРТ; 12 – клей на эпоксидной основе; 13 – подложка ФЧЭ (германий легированный золотом или лейкосапфир).

Введение в конструкцию ФЧЭ и технологию его изготовления шторки, затеняющей удлиненный пиксель до заданных размеров чувствительной площадки, позволило за счёт снижения влияния пролёта носителей и увеличения напряжения смещения в фоторезисторах ФР-128М получить $Su_{\lambda, \max} = (2-5) \times 10^4$ В Вт $^{-1}$ [9, 10], а для фоторезисторов «со спуском контактов» (рис. 2 [8]) и пассивирующим слоем из Al_2O_3 [11, 12] ($A = 0,035 \times 0,035$ мм) реализовать $Su_{\lambda, \max} = (1-2) \times 10^5$ В Вт $^{-1}$.

Следует отметить, что, как и предполагалось в теоретических работах [13, 14], использование в конструкции и технологии изготовления фоточувствительных элементов фоторезисторов шторки, затеняющей часть удлиненного пикселя, а также блокирующих контактов, позволяет не только повысить вольтговую чувствительность, но и достигнуть предельной обнаружительной способности, характерной для фотодиодов (т. е. больше в $\sqrt{2}$ раз) [15].

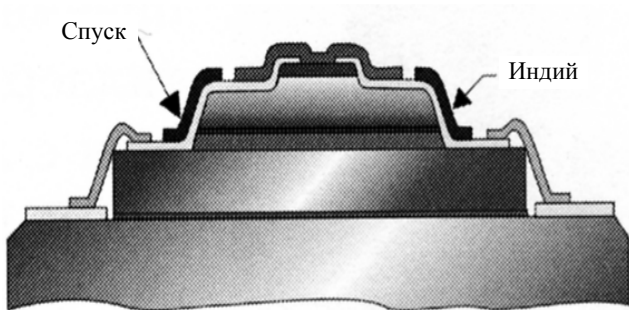


Рис. 2. Контактная система ФЧЭ, изготовленная по «спусковой» технологии.

В кристаллической решетке твердого раствора КРТ энергия связи ртути с теллуrom имеет низкое значение (не более 0,3 эВ) [7, 16], поэтому при изготовлении приборов различные технологические процессы могут приводить к нарушению этой связи, появлению собственных точечных дефектов [18–21] и, как следствие, к нестабильности параметров приборов даже при комнатных температурах из-за высоких значений коэффициентов диффузии собственных точечных дефектов. В таблице приведены результаты исследований сохраняемости фотоэлектрических параметров многоэлементных фоторезисторов, изготовленных по описанным выше технологиям, в газонаполненном исполнении фотоприемника (ФЧЭ находятся в атмосфере осушенного азота) с различным размером фоточувствительной площадки при комнатной и повышенных температур хранения (85 и 100 °С) [22]. Защита поверхностей пикелей ФЧЭ из объемных монокристаллов КРТ ($x \approx 0,21$), легированных индием, позволило обеспечить стабильность параметров фоторезисторов.

Таблица

Средние значения фотоэлектрических параметров многоэлементных фоторезисторов при различных условиях хранения

| $D^* (\lambda_{\max}, 1200, 1)$ 10^{10} $\text{см Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$ | | $Su_{\lambda_{\max}} 10^3 (\text{В Вт}^{-1})$ | | Условия хранения | | Количество и размер площадок, мм×мм | Плоский угол зрения, град |
|---|-------|---|-------|------------------|-------------|-------------------------------------|---------------------------|
| до | после | до | после | Время | Температура | | |
| 4,4 | 5,5 | 20 | 27 | 5 лет | комнатная | 128 0,15×0,08 | ≥ 35 |
| 3,9 | 4,9 | 36 | 34 | 15 лет | | 128 | $\geq 40^*$ |
| 2,9 | 2,8 | 51 | 51 | 7 лет | | 0,05×0,05 | 180 |
| 5,2 | 6,0 | 118 | 105 | 4 года | | 128 0,035×0,035 | ≥ 35 |
| 2,8 | 2,8 | 56 | 79 | 150 час | 100 °С | 128 0,035×0,035 | 180 |
| 3,0 | 3,2 | 26 | 28 | 1000 час | 85 °С | 30 0,035×0,035 | 180 |

* Классический дизайн (рис. 1) исполнения ФЧЭ.

Конструкция ФЧЭ и технология изготовления фоторезисторов с числом элементов ≥ 10 из объёмных монокристаллов КРТ n -типа проводимости в течение многих лет использовались в серийном производстве. Превращение пластины КРТ толщиной 1 мм в тонкий слой 0,005–0,010 мм методом сложного химико-механического полирования было трудоёмким процессом, связанным также с утратой 99 % дорогостоящего материала КРТ. Хрупкость материала не позволяла вырезать более тонкие пластины [6].

Технология изготовления фоторезисторов значительно упростилась, когда на смену объёмных монокристаллов КРТ пришли гетероэпитаксиальные слои. В Институте физики полупроводников Сибирского отделения Российской Академии наук (ИФП СО РАН) была разработана технология получения тонких эпитаксиальных слоёв КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ), которые превосходят по однородности ($\Delta x = 0,003$ мольных долей CdTe) объёмные монокристаллы [6]. На рис. 3 приведено типичное распределение состава по толщине выращиваемой пленки ГЭС КРТ МЛЭ, измеренное *in situ* эллипсометром. Основные результаты исследований и разработки технологии получения материала для фоторезисторов в ИФП СО РАН изложены в работах [23–26].

Переход к материалу КРТ, полученному методом молекулярно-лучевой эпитаксии в виде гетероэпитаксиальных структур на подложке из арсенида галлия и с варизонными слоями переменного состава по обе стороны от рабочего слоя КРТ постоянного состава, повлек изменение конструкции ФЧЭ и потребовал разработки новой технологии изготовления ФЧЭ [23]. На рис. 4 показан схематический чертеж продольного разреза пикселя ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ. Сравнивая рис. 1 и рис. 4 легко заметить, что пиксель ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ имеет только один слой клея. Это снижает тепловое сопротивление структуры, упрощает технологию изготовления и сокращает технологическое время изготовления ФЧЭ. В конструкции отсутствует подложка из германия или сапфира. Арсенид галлия обладает большей теплопроводностью, чем германий, что приводит к уменьшению перепада температуры ФЧЭ при работе системы охлаждения. Варизонные слои пикселя из ГЭС КРТ МЛЭ практически устраняют фронтальную поверхностную рекомбинацию, что дает существенный выигрыш в вольтовой чувствительности. Использование разработанной технологии фоторезисторов на основе ГЭС КРТ МЛЭ в производстве серийных модулей типа «Модуль 32-03» и ФР-204М с размерами ФЧЭ 0,05×0,05 мм и 0,03×0,03 мм позволило повысить вольтовую чувствительность до $Su_{\lambda, \max} \approx 8 \times 10^4$ В Вт⁻¹ и снизить трудоёмкость их изготовления.

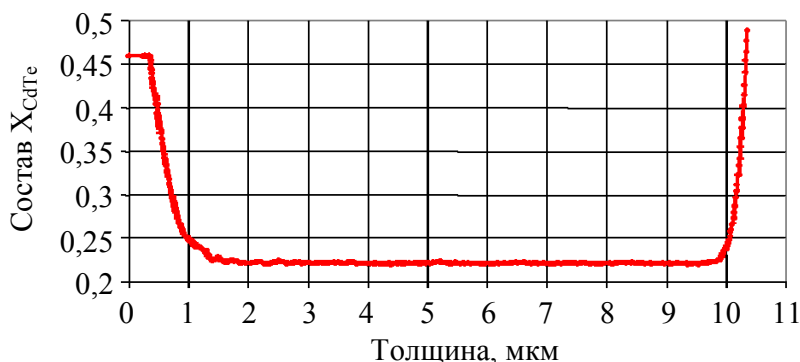


Рис. 3. Типичное распределение состава по толщине выращиваемой структуры ГЭС КРТ МЛЭ, измеренное *in situ* эллипсометром. Точками показаны экспериментально измеренные значения.

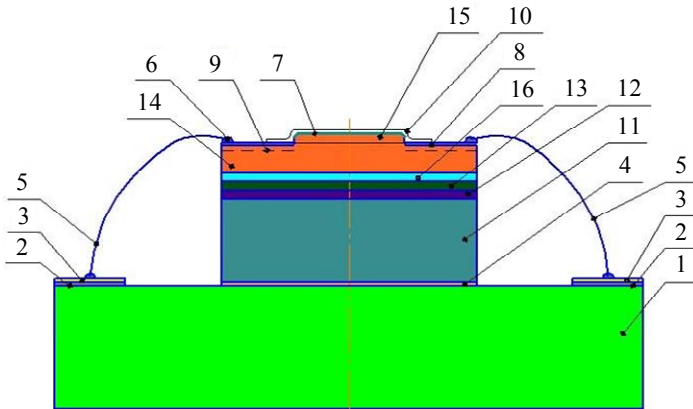


Рис. 4. Схематический чертеж разреза пикселя ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ: 1 – подложка контактного растра (лейкосапфир); 2 – подслой контактной дорожки растра (хром); 3 – контактная дорожка растра (хром–золото); 4 – клей на эпоксидной основе; 5 – токоподвод (золотая проволока 0,05 мм); 6 – припой на основе индия; 7 – защитный анодный окисел; 8 – контакт ФЧЭ (индий электрохимический); 9 – подконтактный слой КРТ n^+ -(обработка КРТ ионами аргона); 10 – просветляющее защитное покрытие; 11 – подложка гетероструктуры КРТ (арсенид галлия); 12 – буферный подслой (теллурид цинка); 13 – буферный слой (теллурид кадмия); 14 – рабочий слой постоянного состава ($Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$); 15 – слой КРТ переменного состава ($Cd_{0,5-0,2}Hg_{0,5-0,8}Te$); 16 – слой КРТ переменного состава ($Cd_{0,2-0,4}Hg_{0,8-0,6}Te$).

Исследованию стабильности фотоэлектрических параметров многоэлементных фоторезисторов для диапазона спектра 8–12 мкм из ГЭС КРТ МЛЭ на подложке из арсенида галлия в течение длительного прогрева при повышенных температурах (65–85 °С) представлены в работах [5, 27, 28]. Фоторезисторы имели обнаружительную способность, ограниченную шумами фонового излучения. Показано, что главной причиной деградации фоточувствительного элемента фоторезистора является диффузия вакансий ртути с фронтальной и боковой поверхности пикселя, которые создаются при разделении пикселей и образовании слоя n^+ под контактами обработкой низкоэнергетическими (≈ 1 кэВ) ионами аргона. Устранение причин возникновения вакансий и создание защитных покрытий поверхностей позволяют обеспечить стабильность фоторезисторов в течение не менее 2500 час при 70 °С.

Изучению воздействия низкоэнергетических ионов (аргона) на свойства твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ посвящено большое количество исследований, обзору которых посвящена работа [29]. Практически бесспорно принято, что при таком воздействии происходит диффузия межузель-

ных атомов ртути в кристалл в условиях сильного пересыщения кристалла ртутью на поверхности, приводящая к образованию n -слоя толщиной более 10 мкм. Причем концентрация электронов в приповерхностной области (толщиной 1–2 мкм) 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.

В нашей работе [30] экспериментально установлены типы дефектов КРТ состава $x \approx 0,21$. Результаты получены изучением прогрева ФЧЭ при 70–117 °С на зависимость вольтовой чувствительности от напряжения смещения. При изготовлении ФЧЭ использовалось травление ионами аргона (≈ 1 кэВ). Концентрация основных носителей заряда $n(x, t)$ в процессе отжига определялась из сопоставления экспериментальных зависимостей вольтовой чувствительности от напряжения смещения с расчетными. Для расчёта распределения концентрации диффундирующих дефектов в процессе прогрева использованы решения уравнения диффузии для тела конечных размеров со связанными границами [31] в случае их равномерного начального распределения

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

и в случае диффузии из тонкого приповерхностного слоя

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

где l – характерный размер в направлении диффузии ($l = 2d$ для эпитаксиальных пластин ГЭС КРТ МЛЭ и $l = a$ для ФЧЭ); $D = D_0 \exp(-E_a/k_B T)$ – коэффициент диффузии электрически активных дефектов; k – число сумм, принятое в расчете 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.

Предполагалось, что изменение концентрации основных носителей заряда во времени описывается уравнением электронейтральности:

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

при одновременной диффузии однократно заряженный донорных комплексов междоузельной ртути с вакансиями ртути ($[\text{Hg}_I V'_{\text{Hg}}]^{\cdot}$ и $[\text{Hg}_I V''_{\text{Hg}}]^{\cdot}$) к боковым поверхностям ФЧЭ.

Показано [30], что уменьшение концентрации основных носителей заряда в объеме ФЧЭ и структурах ГЭС КРТ МЛЭ в процессе отжига определяется диффузией дефектов с энергией активации однократно (0,62 эВ) и двукратно (0,92 эВ) заряженных вакансий ртути. Длительный отжиг ($\approx 5 \times 10^6$ с при 117 °С) ФЧЭ с индиевыми контактами и анодным окислом на фронтальной поверхности приводит к восстановлению исходной концентрации основ-

ных носителей $N_D - N_A = (3-4,5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, полученной при выращивании структур ГЭС КРТ МЛЭ. Это позволило отказаться от охлаждения подложки жидким азотом при ионном травлении КРТ [32] в технологии изготовления ФЧЭ, используемого для снижения уровня дефектов, вносимых ионным травлением.

Исследования и разработка бездефектных химических вместо ионных методов выделения ФЧЭ, а также контактов, образующих в ФЧЭ зону $n-n^+$ для увеличения вольтовой чувствительности и шумов, с целью создания матричных фоторезисторов были начаты в НИИПФ (в дальнейшем ставшим НПО «Орион») и ведутся в АО «МЗ «Сапфир». Разработанное в АО «МЗ «Сапфир» пульверизационное химическое травление позволило осуществить бездефектное разделение малоразмерных пикселей ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ. В наших работах [33, 34] исследовались параметры ФЧЭ на спектральные диапазоны 3–5 и 8–16 мкм, при изготовлении которых КРТ удалялся пульверизационным травлением раствором брома в воде (в качестве газа носителя использовался азот). В качестве контактов к КРТ использовался электролитически осажденный индий. Индий, осажденный на необработанную ионам контактную область ФЧЭ с разделенными химической пульверизацией пикселями, образует $n-n^+$ -переход. В таких ФЧЭ с исходной концентрацией носителей $(2-4) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при подаче напряжения смещения реализуется эксклюзия неосновных носителей заряда. Типичная осциллограмма ВАХ таких ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,212$ с размером фоточувстви-

тельных площадки $0,05 \times 0,05$ мм при температуре жидкого азота и апертуре 180° представлена на рис. 5 [33]. Пример ВАХ для ФЧЭ с размером фоточувствительной площадки $0,5 \times 0,5$ мм из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,301$ при комнатной температуре приведена на рис. 6 [32]. Темновое сопротивление ФЧЭ с размером фоточувствительных площадок $0,05 \times 0,05$ мм при температуре жидкого азота находилось в пределах $1,4\text{--}1,9$ кОм при напряжении $1,0$ В, при температуре жидкого азота ВАХ практически линейны в диапазоне $(-2 \text{--} +2)$ В. Влияние фонового излучения в диапазоне изменения апертуры от 180° до 14° было незначительным. Вид ВАХ (рис. 5 и 6) характерен для двух изотипных $n^+ - n$ -переходов включенных навстречу друг другу. Зависимости концентрации основных носителей заряда от напряжения смещения ФЧЭ ($x = 0,212$), полученные расчетом из ВАХ, при различных фоновых потоках излучения (угловых апертурах 2β) представлены на рис. 7 [33], что может свидетельствовать об эксклюзии неосновных фоновых носителей заряда. В отсутствие фонового излучения ВАХ имели линейный вид, при этом концентрация основных носителей заряда, вычисленная из ВАХ, при условии неизменности дрейфовой подвижности электронов, была существенно меньше концентрации основных носителей заряда, определенной из гальваномангнитных измерений структур ГЭС КРТ МЛЭ в ИФП СО РАН.

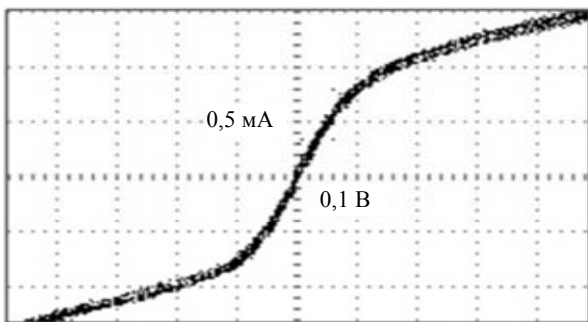


Рис. 5. ВАХ ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,212$ при температуре жидкого азота и апертуре 180° .

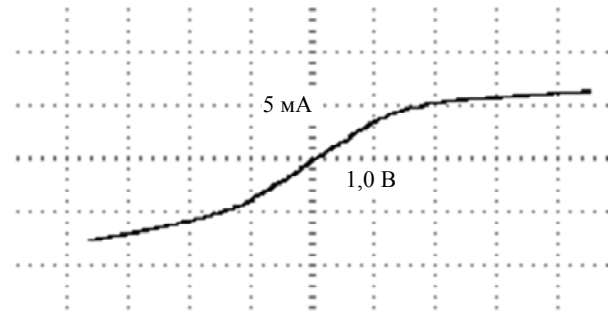


Рис. 6. ВАХ ФЧЭ для состава ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,301$ с размером фоточувствительных площадок $0,5 \times 0,5$ мм при комнатной температуре.

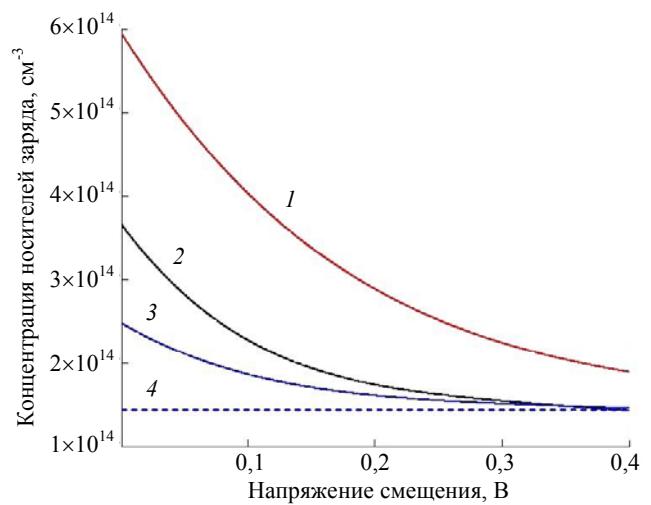


Рис. 7. Зависимость концентрация основных носителей заряда для ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,212$ от напряжения смещения при апертуре 180° – кривая 1; 42° – кривая 2; 14° – кривая 3; без фона – кривая 4.

Первая работа по эффекту эксклюзии в фоторезисторах из КРТ была опубликована в 1985 г. [35]. Эти исследования были развиты для фоторезисторов с изотипными ($n^+ - n$)-слоями (переходами) под контактами [36, 37]. Работа инфракрасных фотодетекторов в неравновесных условиях изучена в работе [38]. Фотоприёмники с обеднением зоны фотопроводимости в магнитном поле исследованы в работе [39]. В работе [40] было показано теоретически, что для фоторезистора с рабочей температурой 180 К и $\lambda_{\max} = 12$ мкм при эксклюзии неосновных носителей заряда достигается *BLIP*-режим (*Background Limited Infrared Photodetector*), если кон-

центрации электрически активных фоновых примесей менее $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что существенно превышает технологические возможности при изготовлении КРТ для фоторезисторов (приблизительно $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

Поток фонового излучения тел при комнатной температуре в спектральном диапазоне 3–5 мкм (интенсивность $\sim 1 \times 10^{16}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) значительно меньше, чем для спектрального диапазона 8–12 мкм ($\sim 1 \times 10^{18}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Поэтому для ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ $x \approx 0,3$ с размером фоточувствительных площадок $0,05 \times 0,05 \text{ мм}$ при температуре жидкого азота в неравновесном режиме эксклюзии неосновные фоновые носители заряда полностью удаляются, что проявляется в отсутствии фоновой зависимости темнового сопротивления. Экспериментальные зависимости эффективного времени жизни носителей заряда и вольтовой чувствительности от напряжения смещения для ФЧЭ при

температуре жидкого азота на спектральный диапазон 8–12 приведены на рис. 8 [33], на спектральный диапазон 3–5 мкм на рис. 9 [34]. Зависимости параметров ФЧЭ от напряжения смещения на спектральный диапазон 3–5 мкм при комнатной температуре приведены на рис. 10 ($\lambda_{\text{max}} = 4,5\text{--}4,6 \text{ мкм}$, кривая 1 на рис. 11). В режиме эксклюзии вольтовая чувствительность ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,187$ при температуре жидкого азота достигает величины более $2,8 \times 10^5 \text{ В Вт}^{-1}$ при смещении $\approx 0,2 \text{ В}$ ($\lambda_{\text{max}} = 16\text{--}17 \text{ мкм}$, кривая 1 на рис. 10). При напряжении смещения 30 мВ и плоском угле зрения 42° с учетом потерь на отражение (принимая $\eta = 0,98$) были получены $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1200, 1) = 3,5 \times 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ и $S_{\lambda_{\text{max}}} = 2,3 \times 10^4 \text{ В Вт}^{-1}$ [31]. Такие параметры ФЧЭ сопоставимы с параметрами серийных фоторезисторов с $\lambda_{\text{max}} = 10\text{--}11 \text{ мкм}$, изготовленных по стандартной технологии [27, 28].

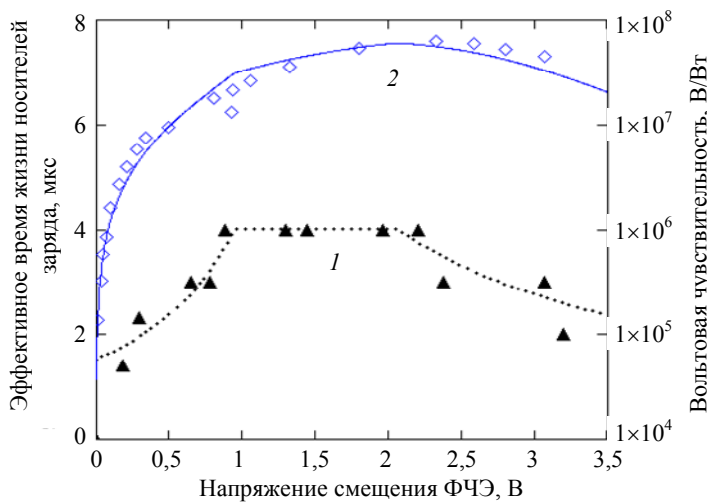


Рис. 8. Зависимость эффективного времени жизни носителей заряда (кривая 1) на длине волны 10,6 мкм и вольтовой чувствительности (кривая 2) от напряжения смещения для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$ и размером площадки $0,05 \times 0,05 \text{ мм}$ при апертуре 14° .

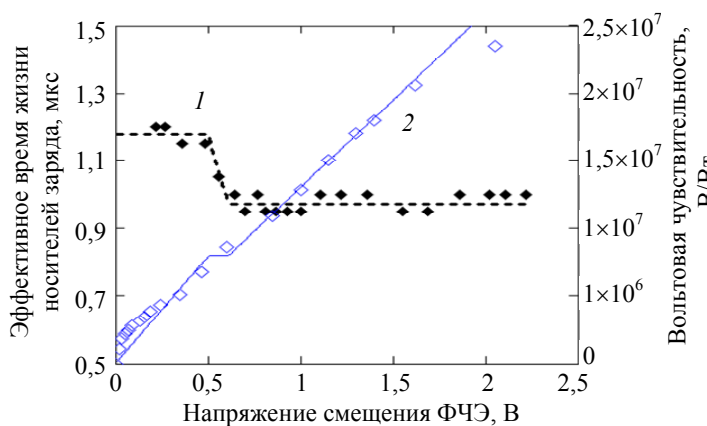


Рис. 9. Зависимость эффективного времени жизни носителей заряда (кривая 1) и вольтовой чувствительности (кривая 2) от напряжения смещения для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,301$ и размером площадки $0,05 \times 0,05 \text{ мм}$ при апертуре 42° .

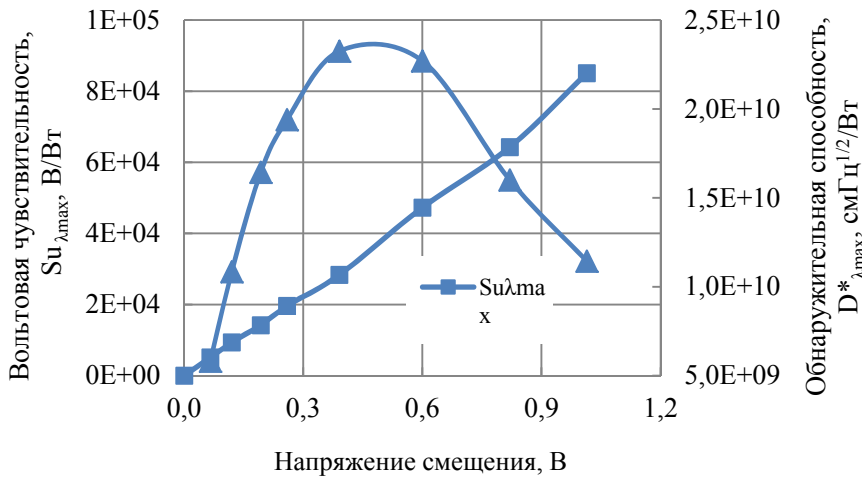


Рис. 10. Зависимости параметров из ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,310$, $A = 0,5 \times 0,5$ мм при комнатной температуре от напряжения смещения.

Во всех исследуемых при температуре жидкого азота ФЧЭ в неравновесном режиме эксклюзии наблюдалось увеличение напряжения смещения, при котором пролет носителей заряда определял насыщение сигнала фототока, что происходит в результате резкого падения амбиполярной подвижности до $\mu_a = 3\text{--}45$ см²/Вс, так как концентрации основных носителей заряда уменьшается до величины близкой к собственной концентрации (порядка 10^{13} см⁻³). Величина амбиполярной подвижности в равновесных условиях соответствует дрейфовой подвижности дырок ($\mu_a \approx \mu_p \approx 500$ см²В⁻¹с⁻¹).

В наших работах [33, 34] показано, что в фоторезисторах из гетероэпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ на спектральный диапазон 3–5, 8–12 и 16–17 мкм, изготовленных выше описанным способом, при подаче напряжения смещения имеет место эксклюзия неосновных носителей заряда. При этом концентрация неравновесных носителей заряда становится ниже концентрации носителей заряда в равновесных условиях, что приводит к значительному увеличению вольтовой чувствительности. На рис. 10 приведены параметры неохлаждаемых ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,310$ диапазона спектра 3–4,5 мкм, изготовленных по технологии с пульверизационным травлением.

Спектральные характеристики чувствительности ФЧЭ, изготовленных из

ГЭС КРТ МЛЭ, составов $x = 0,187$, $x = 0,212$ и $x = 0,31$ представлены на рис. 11. Спектральная характеристика диапазона спектра 3–4,5 мкм получена на неохлаждаемом ФЧЭ. Максимум чувствительности ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,187$ находится на длине волны 17 мкм.

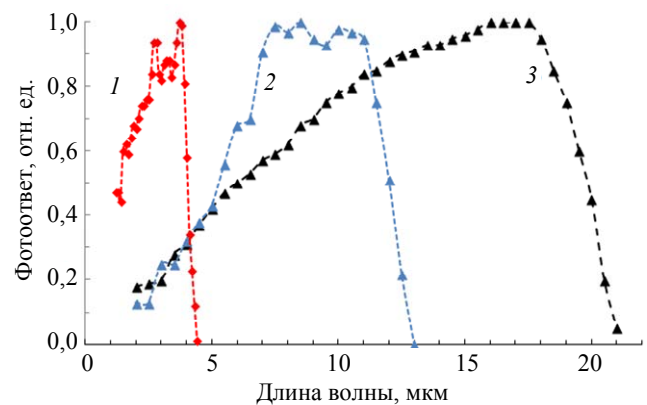


Рис. 11. Спектральные характеристики чувствительности ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ. Кривая 1 – для $x = 0,31$ при комнатной температуре; кривые 2 – для $x = 0,212$ и 3 – для $x = 0,187$ при температуре жидкого азота. В ФЧЭ кривая 2 – излучение поступает через нижний варизонный слой.

Авторами работ [41] разработана конструкция фоторезистора на основе эпитаксиальных слоёв КРТ с блокирующими комбинацией неосновных носителей заряда вертикально расположенными контактами, которая позволила при вольтовой чувствительности не менее 1×10^5 В Вт⁻¹ и фоновом потоке 2×10^{17} фотонов см⁻²с⁻¹ получить

выделяемую мощность одного элемента не более 10 мкВт при обнаружительной способности 6×10^{10} см Гц^{1/2} Вт⁻¹. Выделяемая мощность в матрице из таких фоторезисторов с количеством пикселей 10^6 при подаче напряжения смещения в любой момент времени на 1 % пикселей составит не более 0,1 Вт, что уже сопоставимо с выделяемой мощностью в самом мультиплексоре.

Нами показано, что в ФЧЭ фоторезисторах в неравновесном режиме концентрация электронов в объеме ФЧЭ снижается до величины $\sim 1 \times 10^{13}$ см⁻³, а вольтовая чувствительность достигает величины $Su_{\lambda_{\max}} \approx 10^7$ В Вт⁻¹. Высокая величина вольтовой чувствительности позволяет значительно снизить рабочие токи ФЧЭ и использовать их для создания фокальных матриц фоторезисторов с радиальным смещением. Принципиальная схема конструкции такого ФЧЭ фоторезистора (фрагмента матрицы) приведена на рис. 12. Такое расположение контактов позволяет осуществить радиальное смещение при подаче напряжения [42, 43].

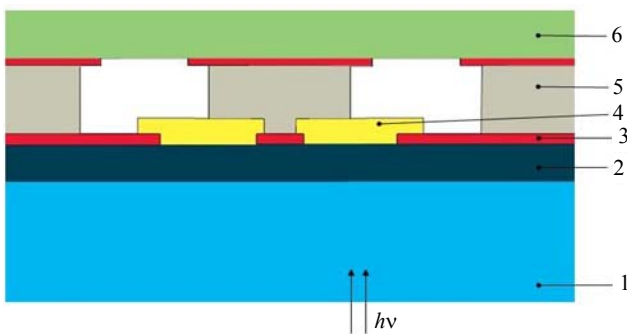


Рис. 12. Принципиальная схема ФЧЭ с радиальным смещением: 1 – подложка эпитаксиальной структуры из арсенида галлия; 2 – рабочий слой КРТ с варизонными слоями, 3 – металлические контакты; 4 – диэлектрик; 5 – индиевые столбики; 6 – контактный растр с разводкой электрических контактов.

В каждом пикселе фоторезистора один электрический контакт находится в центре пикселя, а второй общий для всех пикселей контакт расположен по периметру

всех пикселей и образован металлизацией межпиксельной поверхности ГЭС КРТ МЛЭ. В такой конструкции отсутствует какое-либо разделение на отдельные пиксели химическим или ионным травлением КРТ, поэтому в пикселе сохраняется исходное высокое время жизни носителей заряда ГЭС КРТ МЛЭ. Регистрируемое излучение попадает на чувствительную площадку со стороны подложки роста ГЭС КРТ МЛЭ (например, арсенид галлия или кремний). Рабочее напряжение смещения подается через контактный растр, присоединенный к электрическому контакту каждого пикселя и общему контакту через индиевые столбики по технологии «flip-chip».

При напряжении смещения равном 10 мВ и плоском угле зрения 14° получены следующие параметры ФЧЭ для состава ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,212$: $Su_{\lambda_{\max}}$ не менее $1,5 \times 10^5$ В Вт⁻¹, $D^*(\lambda_{\max}, 1200, 1)$ не менее $1,2 \times 10^{11}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹, выделяемая мощность не более 0,5 мкВт на один элемент. Спектральная характеристика чувствительности приведена на рис. 11 (кривая 3). Полученные фотоэлектрические параметры фоторезисторов с радиальным смещением и возможность стыковки их с мультиплексором по технологии «flip-chip» позволяют создавать на их основе фокальные матрицы с количеством пикселей $\approx 10^6$. Выделяемая мощность в матрице из таких фоторезисторов при подаче напряжения смещения в любой момент времени на 1 % пикселей составит не более 5 мВт. Проблема создания СБИС мультиплексора для фоторезисторов с низким сопротивлением и малыми токами смещения была решена в работе [44].

Зависимость фотоэлектрических параметров ФЧЭ фоторезистора с радиальным смещением без контактного растра с размером чувствительной площадки 35×35 мкм в случае, когда излучение попадает через верхний варизонный слой ГЭС КРТ МЛЭ, приведены на рис. 13, а и б. Для сравнения

здесь же приведены фотоэлектрические параметры ФЧЭ фоторезистора в классическом исполнении при апертуре 42° с размером чувствительной площадки 35×35 мкм, изготовленного с использованием низкоэнергетического ионного травления (кривые 4 на рис. 13, а и б). Как видно из

рис. 13, а и б, в неравновесных условиях работы ФЧЭ получена вольтовая чувствительность ФЧЭ фоторезистора с радиальным смещением более 10^7 В Вт⁻¹ при апертуре 14° с обнаружительной способностью близкой к BLIP-режиму.

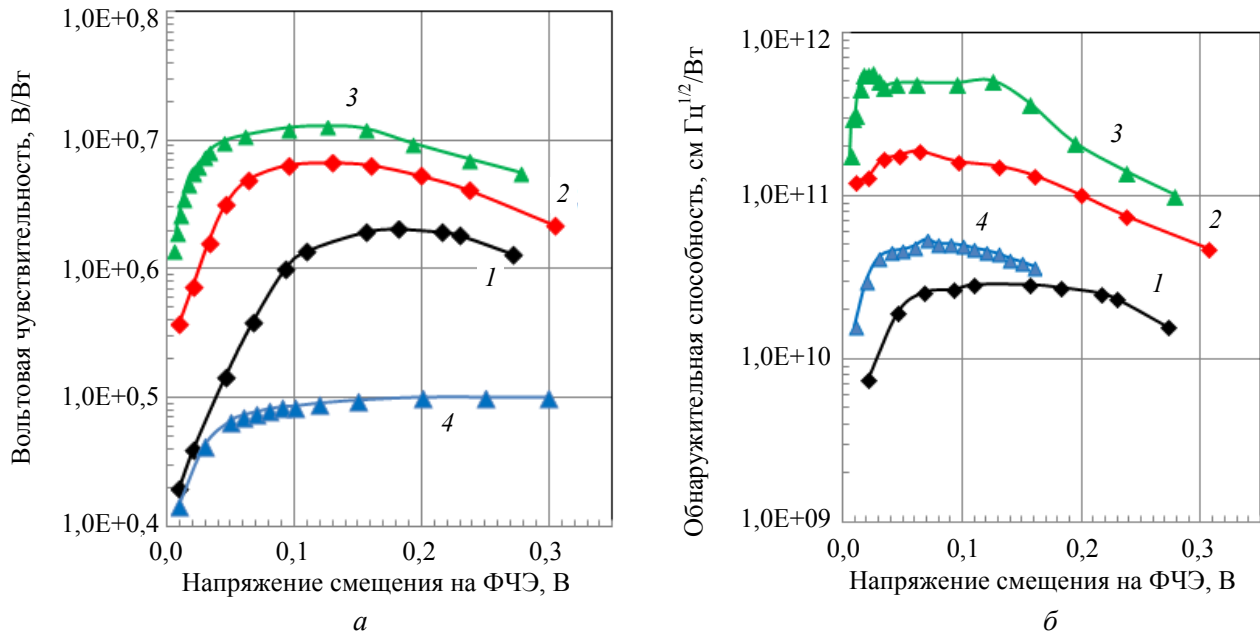


Рис. 13. Зависимости вольтовой чувствительности (а) и обнаружительной способности (б) от напряжения смещения для ФЧЭ ($A = 35 \times 35$ мкм) с радиальным смещением при апертуре 180° – кривая 1, 42° – кривая 2, 14° – кривая 3 и для ФЧЭ в классическом исполнении при апертуре 42° – кривая 4.

Заключение

Развитие технологии изготовления фоторезисторов и разработка технологии изготовления сложных гетероэпитаксиальных структур материала КРТ различных составов в ИФП СО РАН, особенно результаты, полученные в работах авторов в АО «Московский Завод «Сапфир», кратко изложенных в данном обзоре, завершились созданием технологии изготовления ФЧЭ для многоэлементных и матричных фоторезисторов диапазона спектра 8–12 мкм и 3–5 мкм с обнаружительной способностью, ограниченной фоновым излучением. Показано, что в неравновесном режиме эксклюзии, охлаждаемые до 80 К ФЧЭ из материала ГЭС КРТ МЛЭ на спектральный

диапазон чувствительности 16–17 мкм имеют обнаружительную способность не хуже, чем у серийных фоторезисторов диапазона спектра 8–12 мкм. Фоточувствительные элементы, изготовленные по новой технологии из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,310$ в спектральном диапазоне 2,5–4,5 мкм, при комнатной температуре без защитных покрытий также не уступают серийным охлаждаемым до 80 К фоторезисторам. В новой конструкции ФЧЭ фоторезисторов с радиальным смещением для фокальных матриц, в которой имеется центральный электрод каждого пикселя матрицы, а пиксели размером ≤ 30 мкм выделены общим для всех пикселей металлическим контактом, решается проблема стыковки матрицы фоторезисторов с

мультиплексором по известной технологии «flip-chip» через индиевые столбики. В неравновесном режиме эксклюзии приемлемая обнаружительная способность таких пикселей достигается при малых токах смещения и выделяемой мощности ($\approx 0,5 \times 10^{-6}$ Вт). В диапазоне спектра 8–12 мкм в неравновесном режиме эксклюзии получены обнаружительная способность $1,2 \times 10^{11}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹ и вольтовая чувствительность $S_{U_{\lambda_{\max}}} \geq 10^5$ В Вт⁻¹. Увеличение шумов позволит использовать серийные транзисторы в предусилителях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lawson W. D., Nelsen S., Putley E. H., Young A. S. // J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 9. No. 3. P. 325.
2. Шнейдер А. Д., Гаврищак И. В. // ФТТ. 1960. Т. 2. № 9. С. 2079.
3. Rogalski A. // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 2267.
4. www.cobham.com/media/934628/ADV10553pdf
5. Филатов А. В., Сусов Е. В., Кузнецов Н. С., Карпов В. В. // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 9. С. 43.
6. Курбатов Л. Н. // Вопросы оборонной техники. 1998. Сер. 11. Вып. 1(154)–2(155). С. 3.
7. Барышев Н. С. Свойства и применение узкозонных полупроводников. – Казань: Унипресс, 2000.
8. Пономаренко В. П., Филачев А. М. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946–2016). – М.: Физматкнига, 2016.
9. Северцев В. Н., Сусов Е. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Чеканова Г. В. // Автотметрия. 1998. № 4. С. 21.
10. Susov E. V., Sidorov Yu. G., Severtsev V. N., Kotov A. A., Chekanova G. V., Dvoretzky S. A., Varavin V. S., Mikhailov N. N., Diakonov L. I. // Optoelectronics, instrumentation and data processing (Avtometriya). 1996. No. 4. P. 32.
11. Трошкин Ю. С., Филатов А. В., Алексеевичева В. С., Гусаров А. В., Коришунова А. П., Поповян Г. Э., Посевин О. П. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 63.
12. Поповян Г. Э., Трошкин Ю. С., Филатов А. В., Филачев А. М., Хитрова Л. М. Свидетельство на полезную модель RU № 11938 U1. 1999.
13. Smith D. L. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. No. 9. P. 5441.
14. Smith D. L. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. No. 6. P. 1663.
15. Климанов Е. А., Неверов Е. С., Поповян Г. Э., Трошкин Ю. С., Филатов А. В., Балугев В. А. // Прикладная физика. 2002. № 2. С. 76.
16. Wiedemeier H., Trivedi S. B., Whiteside R. C., Polosz W. // J. Electrochem. Soc. 1986. Vol. 133. No. 11. P. 2399.
17. Заитов Ф. А., Исаев Ф. К., Горшков А. В. Дефектообразование и диффузионные процессы в некоторых полупроводниковых твердых растворах. – Баку: Азернешр, 1984.
18. Raccah P. M., Lee U., Silberman J. A., Spicer W. E., Wilson J. A. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42. No. 4. P. 374.
19. Silberman J. A., Morgen P., Lindan I., Spicer W. E., Wilson J. A. // J. Vac. Sci. Technol. 1982. Vol. 21. No. 1. P. 154.
20. Nitz G., Schlicht B., Dornhaus R. // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 34. No. 8. P. 490.
21. Lunn M. A., Dobson P. S. // J. of Crystal Growth. 1985. Vol. 73. P. 379.
22. Пономаренко В. П., Трошкин Ю. С., Филатов А. В. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 71.
23. Sidorov Yu. G., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I., Mikhailov N. N., Sabinina I. V., Yakushev M. V. // J. of Growth of Crystals. 1996. Vol. 20. P. 35.
24. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I., Mikhailov N. N., Sidorov Yu. G. // J. Cryst. Growth. 1996. Vol. 159. P. 1161.
25. Свиташев К. К., Швец В. А., Мардежов А. С., Дворецкий С. А., Сидоров Ю. Г., Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В., Чикичев С. И., Придачин Д. Н. // Автотметрия. 1996. № 4. С. 100.
26. Svitashov K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G., Shvets V. A., Mardezhov A. S., Nis I. E., Varavin V. S., Liberman V. I., Remesnik V. G. // Cryst. Res. Technol. 1994. Vol. 29. No. 7. P. 931.
27. Филатов А. В., Сусов Е. В., Гусаров А. В., Акимова Н. М., Крапухин В. В., Карпов В. В., Шаевич В. И. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 49.
28. Филатов А. В., Сусов Е. В., Акимова Н. М., Карпов В. В., Шаевич В. И. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 2. С. 196.
29. Мынбаев К. Д., Иванов-Омский В. М. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 10. С. 1153.
30. Филатов А. В., Сусов Е. В., Карпов В. В. // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 4. С. 67.
31. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1961.
32. Филатов А. В., Лукиша В. И., Поповян Г. Э., Трошкин Ю. С., Шаронов Ю. П. // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 123.
33. Филатов А. В., Сусов Е. В., Карпов В. В. // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 6. С. 58.

34. Филатов А. В., Сусов Е. В., Гусаров А. В., Карпов В. В. // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 12. С. 103.
35. Ashley T., Elliott C. T. // Electron. Lett. 1985. Vol. 21. P. 451.
36. Ashley T., Elliott C. T., White A. M. // SPIE Proc. 1986. Vol. 588. P. 62.
37. Djurić Z., Jović V., Matić M., Jakšić Z. // Electronics Lett. 1990. Vol. 2. P. 929.
38. Ashley T., Elliott C. T., Harker A. T. // Infrared Phys. 1986. Vol. 26. P. 303.
39. Djurić Z., Piotrowski J. // Opt. Eng. 1992. Vol. 31. P. 1955.
40. Ashley T., Elliot C. T., White A. M. // SPIE Proc. 1985. Vol. 572. P. 123.
41. Siliquini J. F., Faraone L. // Infrared Physics & Technology. 1997. Vol. 38. P. 205.
42. Гусаров А. В., Филатов А. В., Филатов С. А., Сусов Е. В., Карпов В. В., Гиндин П. Д. Патент на полезную модель RU № 181688 U1. Н 01 L 31/042. 2018.
43. Гусаров А. В., Филатов А. В., Сусов Е. В., Карпов В. В., Гиндин П. Д. // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 2. С. 55.
44. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Васильев В. В. / Труды российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2015» (Новосибирск. 2015). С. 157–160.

PACS: 85.60.Dw

Photoresistors made of $Cd_xHg_{1-x}Te$ material (a review)

A. V. Filatov, E. V. Susov, V. V. Karpov, and A. V. Gusarov

JSC “Moskovskij Zavod “SAPPHIR”
4a Dnepropetrovsky passage, Moscow, 117545, Russia
E-mail: info@mzsapphir.ru

Received March 02, 2021

*The review analyzes the development of domestic technology for manufacturing highly sensitive and stable photoresistors from solid solutions of the $Cd_xHg_{1-x}Te$ triple system since the 70s of the last century. The volt sensitivity of modern photoresistors made of heteroepitaxial structures $n-Cd_xHg_{1-x}Te$, obtained by molecular beam epitaxy on a gallium arsenide substrate, in the spectral range of 8–12 microns with a photosensitive pixel size of 50×50 microns, operating under nonequilibrium conditions of the exclusion of minority charge carriers, reaches a value of $Su_{\lambda_{max}} \approx 10^7$ V/W with a specific detection capacity $D^*_{\lambda_{max}}$ (1200.1, 14°) of more than 5×10^{11} cm $Gz^{1/2}W^{-1}$ at liquid nitrogen temperature. The high voltage sensitivity and low power output (5×10^{-7} W) of photoresistors in the design of a with a radial arrangement of contacts allow you to create focal matrices based on them with a number of pixels of $\approx 10^6$.*

Keywords: photoresistor, heteroepitaxial structures of cadmium-mercury-tellurium, ion etching, exclusion of minor charge carriers, focal matrices photodetectors.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-112-127

REFERENCES

1. W. D. Lawson, S. Nelsen, E. H. Putley, and A. S. Young, J. Phys. Chem. Sol. **9**, 325 (1959).
2. A. D. Schneider and I. V. Gawrysiak, Physics and engineering of semiconductors **2** (9), 2079 (1960) [in Russian].
3. A. Rogalski, Rep. Prog. Phys. **68**, 2267 (2005).
4. www.cobham.com/media/934628/ADV10553pdf
5. A. V. Filatov, E. V. Susov, N. S. Kuznetsov, and V. V. Karpov, J. of Optical Technology **83** (9), 543 (2016).

6. L. N. Kurbatov, *Vopr. oboron. technicians. Ser. 11, Is. 1(154)–2(155), 3* (1998).
7. N. S. Baryshev, *Properties and application of narrow-band semiconductors* (Unipress, Kazan, 2000) [in Russian].
8. V. P. Ponomarenko and A. M. Filachev, *Infrared technology and electronic optics. Formation of scientific directions (1946–2016)* (Fizmatkniga, Moscow, 2016) [in Russian].
9. V. N. Severtsev, E. V. Susov, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, and G. V. Chekanova, *Optoelectronics, instrumentation and data processing (Avtometriya)*, No. 4, 21 (1998).
10. E. V. Susov, Yu. G. Sidorov, V. N. Severtsev, A. A. Komov, G. V. Chekanova, S. A. Dvoretzky, V. S. Varavin, N. N. Mikhailov, and L. I. Diakonov, *Optoelectronics, instrumentation and data processing (Avtometriya)*, No. 4, 32 (1996).
11. Yu. S. Troshkin, A. V. Filatov, V. S. Alexeevicheva, A. V. Gusarov, A. P. Korshunova, E. G. Popov, and O. P. Possevin, *Applied Physics*, No. 2, 63 (1999) [in Russian].
12. G. E. Popovyan, Yu. S., Troshkin, A. V. Filatov, A. M. Filachev, and L. M. Khitrova, *RF Certificate for a utility model, RU No. 11938 U1* (1999).
13. D. L. Smith, *J. Appl. Phys.* **54** (9), 5441 (1983).
14. D. L. Smith, *J. Appl. Phys.* **56** (6), 1663 (1984).
15. E. A. Klimanov, E. S. Neverov, G. E. Popovyan, Yu. S. Troshkin, A. V. Filatov, and V. A. Baluev, *Applied Physics*, No. 2, 76 (2002) [in Russian].
16. H. Wiedemeier, S. B. Trivedi, R. C. Whiteside, and W. Polosz, *J. Electrochem. Soc.* **133** (11), 2399 (1986).
17. F. A. Zaitov, F. K. Isaev, and A. V. Gorshkov, *Defect formation and diffusion processes in the some semiconductor solid solutions* (Azerneshr, Baku, 1984) [in Russian].
18. P. M. Raccah, U. Lee, J. A. Silberman, W. E. Spicer, and J. A. Wilson, *Appl. Phys. Lett.* **42** (4), 374 (1983).
19. J. A. Silberman, P. Morgen, I. Lindan, W. E. Spicer, and J. A. Wilson, *J. Vac. Sci. Technol.* **21** (1), 154 (1982).
20. G. Nitz, B. Schlicht, and R. Dornhaus, *Appl. Phys. Lett.* **34** (8), 490 (1979).
21. M. A. Lunn and P. S. Dobson, *J. of Crystal Growth.* **73**, 379 (1985).
22. V. P. Ponomarenko, Yu. S. Troshkin, and A. V. Filatov, *Applied Physics*, No. 5, 71 (2007) [in Russian].
23. Yu. G. Sidorov, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, V. I. Liberman, N. N. Mikhailov, I. V. Sabina, and M. V. Yakushev, *J. of Growth of Crystals* **20**, 35 (1996).
24. V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, V. I. Liberman, N. N. Mikhailov, and Yu. G. Sidorov, *J. Cryst. Growth.* **159**, 1161 (1996).
25. K. K. Svitashv, V. A. Shvets, A. S. Mardezhov, S. A. Dvoretzky, Yu. G. Sidorov, E. V. Spesivtsev, S. V. Rykhlytsky, S. I. Chikichev, and D. N. Pridachin, *Avtometriya*, No. 4, 100 (1996).
26. K. K. Svitashv, S. A. Dvoretzky, Yu. G. Sidorov, V. A. Shvets, A. S. Mardezhov, I. E. Nis, V. S. Varavin, V. I. Liberman, and V. G. Remesnik, *Cryst. Res. Technol.* **29** (7), 931 (1994).
27. A. V. Filatov, E. V. Susov, A. V. Gusarov, N. M. Akimova, V. V. Krapukhin, V. V. Karpov, and V. I. Shaevich, *J. Opt. Technol.* **76**, 773 (2009).
28. A. V. Filatov, E. V. Susov, N. M. Akimova, V. V. Karpov, and V. I. Shaevich, *Progress applied physics* **3** (2), 196 (2015).
29. K. D. Mynbayev and V. M. Ivanov-Omsky, *Physics and engineering of semiconductors* **37** (10), 1153 (2003).
30. A. V. Filatov, E. V. Susov, and V. V. Karpov, *Journal of Optical Technology* **84** (4), 275 (2017).
31. B. I. Boltaks, *Diffusion in semiconductors* (State publ. of phy.-mat. lit, Moscow, 2000) [in Russian].
32. A. V. Filatov, V. I. Luksha, G. E. Popovyan, Yu. S. Troshkin, and Yu. P. Sharonov, *Applied Physics*, No. 6, 123 (2002) [in Russian].
33. A. V. Filatov, E. V. Susov, and V. V. Karpov, *J. of Optical Technology* **85** (6), 359 (2018).
34. A. V. Filatov, E. V. Susov, A. V. Gusarov, and V. V. Karpov, *Journal of optical* **87** (12), 103 (2020).
35. T. Ashley and C. T. Elliott, *Electron. Lett.* **21**, 451 (1985).
36. T. Ashley, C. T. Elliott, and A. M. White, *SPIE Proc.* **588**, 62 (1986).
37. Z. Djurić, V. Jović, M. Matić, and Z. Jakšić, *Electronics Lett.* **2**, 929 (1990).
38. T. Ashley, C. T. Elliott, and A. T. Harker, *Infrared Phys.* **26**, 303 (1986).
39. Z. Djurić and J. Piotrowski, *Opt. Eng.* **31**, 1955 (1992).
40. T. Ashley, C. T. Elliot, and A. M. White, *SPIE Proc.* **572**, 123 (1985).
41. J. F. Siliquini and L. Faraone, *Infrared Physics & Technology* **38**, 205 (1997).
42. A. V. Gusarov, A. V. Filatov, S. A. Filatov, E. V. Susov, V. V. Karpov, and P. D. Gindin, *RF Certificate for a utility model, RU No. 181688 U1 H 01 L 31/042* (2018).
43. A. V. Gusarov, A. V. Filatov, E. V. Susov, V. V. Karpov, and P. D. Gindin, *J. of Optical Technology* **86** (2), 108 (2019).
44. D. V. Borodin, Yu. V. Osipov, and V. V. Vasiliev, in *Proc. Russian Conference on Actual problems of semiconductor photoelectronics "Photonics–2015"* (Novosibirsk, 2015), pp. 157–160.