

## Radiation defects distribution after ion implantation in MCT structures, grown by a MBE

A. V. Voitsekhovskiy, A. P. Kokhanenko, A. G. Korotaev, D. V. Grigor'ev  
Siberian Physiko-Technical Institute, Tomsk, Russia

V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, Yu. G. Sidorov, N. Kh. Talipov  
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

*In this work the investigations of dose dependences of electrically active defects spatial distribution in MCT epilayers after ion implantation are made. The saturation of dose dependence of layering carrier concentration occurs at a dose of an irradiation  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  and reaches value of concentration  $N_{\sim 4} \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , that the same for volume material. However, it is found, that an electron concentration in a distribution maximum less than  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , but for all ion implantation experiment it was more than  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .*

УДК 621.383.52:546.48'49'24

## Матричный фотоприемник формата 128×128 на основе фотодиодов в эпитаксиальном слое КРТ, выращенном методом эпитаксии из металлоорганических соединений

К. О. Болтарь, Н. И. Яковлева, С. В. Головин, В. П. Пономаренко,  
В. И. Стафеев, И. Д. Бурлаков  
Государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"», Москва, Россия

А. Н. Моисеев, А. П. Котков, В. В. Дорофеев  
Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Н.-Новгород, Россия

*Исследованы характеристики матричных фотоприемников (МФП) диапазона 3–5 мкм формата 128×128 элементов, изготовленных на эпитаксиальных слоях соединения кадмий–ртуть–теллур (КРТ), выращенных методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений (МОС) и ртути на подложках GaAs ориентации (100) и (111)В. Измерены гистограммы и диаграммы распределения по МФП тока фотодиодов, фоточувствительности и удельной обнаружительной способности  $D^*$  МФП с граничной длиной волны 5,1 мкм при рабочей температуре 200 К.*

Эпитаксиальные слои КРТ используются для получения матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) МФП как смотрящего, так и многорядного типа. Их выращивают методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1, 2], молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1, 3], методом химического осаждения из паров МОС и ртути [4] и другими.

ЖФЭ — наиболее изученный технологический процесс для роста слоев КРТ и обычно применяется для производства МФП ИК-диа-

пазона 3–5 и 8–12 мкм. Основными недостатками ФЖЭ являются невозможность точного контроля состава  $x$  по глубине эпитаксиального слоя и существенная неравномерность поверхности эпитаксиального слоя, мешающая качественной стыковке индиевыми столбиками МФЧЭ с кремниевой ИС обработки сигнала.

МЛЭ-технологии предполагается использовать для производства следующих поколений матричных ИК-фотоприемников. Она осуществ-

ляется при низких температурах, позволяет получать гетероструктуры и точно контролировать состав сплава и уровень легирования. Недостаток метода МЛЭ — чрезвычайная чувствительность эпитаксиальных слоев к условиям роста, таким как температура подложки и плотность потока компонентов в процессе МЛЭ, дороговизна оборудования.

Газофазная эпитаксия с использованием МОС является относительно недавним и развивающимся методом получения эпитаксиальных слоев КРТ. Преимуществами МОС-эпитаксии КРТ являются:

• малые неровности поверхности на большой площади структуры;

• дешевизна подложек по сравнению с ЖФЭ (GaAs, Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);

• возможность легирования, отжига и создания пассивирующего слоя на поверхности в ходе процесса выращивания слоя КРТ;

• относительная простота и дешевизна оборудования и более высокая скорость роста по сравнению с МЛЭ.

### Процесс выращивания эпитаксиальных слоев КРТ

Процесс выращивания эпитаксиальных слоев КРТ проводился в вертикальном кварцевом реакторе на подложках из GaAs с ориентацией поверхности (100) и (111)В. Для осаждения использовали высокочистые металлоорганические соединения: диэтилтеллур (ДЭТ), диизопропилтеллур (ДиПТ), диметилкадмий (ДМК), диэтилцинк (ДЭЦ) и металлическую ртуть, транспортировавшиеся в реактор потоком водорода, очищенного диффузией через палладиевый фильтр.

Процесс выращивания эпитаксиальных слоев КРТ проводили с использованием следующих стадий:

• отжига подложки в потоке водорода для удаления окисного слоя при температуре 600 °С;

• выращивания буферного слоя из теллурида

кадмия или теллурида кадмия с добавлением теллурида цинка;

• послойного осаждения КРТ, заключающегося в нанесении тонких чередующихся слоев CdTe и HgTe, с последующей гомогенизацией состава, т. е. перемешиванием этой многослойной структуры за счет взаимной диффузии путем отжига в парах ртути при пониженном давлении ~0,2 атм и температуре 350 °С;

• отжига в парах ртути при температуре 320—350 °С для формирования слоев р-типа с заданной концентрацией и подвижностью носителей заряда.

Исследовалось получение буферных слоев трех типов:

• CdTe на GaAs, осаждаемый из паров диэтилтеллура и диметилкадмия;

• CdTe, выращенный на подложке GaAs после нанесения слоя ZnTe;

• слои CdZnTe с мольной долей ZnTe 3—5 %.

Установлено, что для последующего осаждения CdHgTe ориентации (111)В предпочтительнее выращивать буферные слои CdTe из ДЭТ и ДМК непосредственно на подложке из GaAs.

Для выращивания КРТ ориентации (100), предпочтительно использовать буферные слои CdTe с очень тонким промежуточным слоем ZnTe. Введение последнего позволяет однозначно задавать ориентацию слоя, улучшать его морфологию и структурное совершенство.

Получены слои КРТ различного состава с  $x$  от 0,16 до 0,45. Измеренная однородность состава слоя составляет 0,005 на площади 4 см<sup>2</sup>. Полуширина кривой качания РД составляет 2—4 угл. мин.

Электрофизические характеристики эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений и ртути, представлены в таблице.

Структура	Состав, $x$	Толщина слоя $d$ , мкм	$N_A$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	$T_{max}$ , %	$\lambda_{0,5}$ при $T = 77$ К, мкм
МСТ 600-1	0,316	11	$4,0 \cdot 10^{15}$	320	64	4,18
МСТ 602	0,314	12	$6,0 \cdot 10^{15}$	210	50	4,24
МСТ 603	0,268	12	$8,0 \cdot 10^{15}$	360	64	5,98
МСТ 604	0,200	11	$3,0 \cdot 10^{16}$	450	64	15,31

### Изготовление прибора

В НПО "Орион" разработаны и исследованы матричные фотоприемники смотрящего типа форматов 128×128 и 384×288 элементов с использованием ЭС КРТ, выращенных методом ЖФЭ [5–7] и методом МЛЭ [7].

В данной работе исследуются характеристики матричного фотоприемника формата 128×128, изготовленного на основе слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$   $p$ -типа проводимости, выращенных эпитаксией из МОС для спектрального диапазона 3–5 мкм. Для изготовления МФП использован эпитаксиальный слой МСТ 603, выращенный на подложке GaAs (111)В с осаждением слоев CdTe и HgCdTe из ДЭТ и ДиПТ, соответственно. Скорость выращивания слоев составляла 2 мкм/ч.

Топология фоточувствительного элемента матричного фотоприемника представлена на рис. 1. Концентрация дырок при  $T = 77K$  равнялась  $(5-7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , подвижность — до  $600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , толщина активного слоя КРТ составляла 7–8 мкм. Размеры площадок  $p$ - $n$ -перехода —  $18 \times 18 \text{ мкм}$ , размеры индивидуальных столбчатых контактов —  $20 \times 20 \text{ мкм}$ . Кремниевая схема считывания сигналов изготовлена по  $n$ -МОП-технологии. Она осуществляет построчное накопление и считывание сигналов матрицы фотодиодов. Ее конструкция аналогична конструкции, использованной в работах [5–7]. МФП предназначен для изготовления матричного фотоприемного устройства (МФПУ) в корпусе с четырехкаскадным термоэлектрическим охладителем с рабочей температурой 195–205 К.

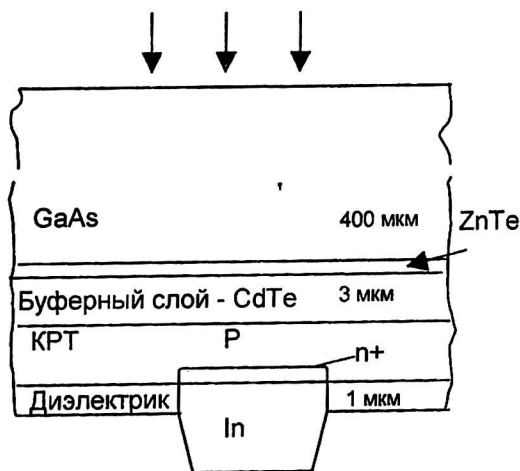


Рис. 1. Топология фотодиодов в МОС-эпитаксиальном слое

### Результаты исследований

Вольтамперная характеристика (ВАХ) тестового элемента МФЧЭ МСТ 603-5 с размерами

$p$ - $n$ -перехода  $20 \times 20 \text{ мкм}^2$  при температуре  $T = 200 \text{ К}$  приведена на рис. 2. Спектральная характеристика тестового элемента МФЧЭ 128×128 элементов при температуре  $T = 195 \text{ К}$  в зависимости от волнового числа  $\nu$  приведена на рис. 3.

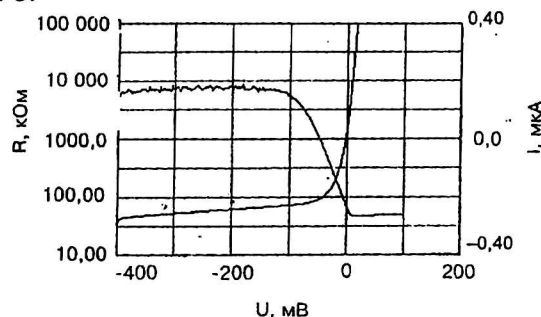


Рис. 2. ВАХ тестового элемента МФЧЭ МСТ 603-5

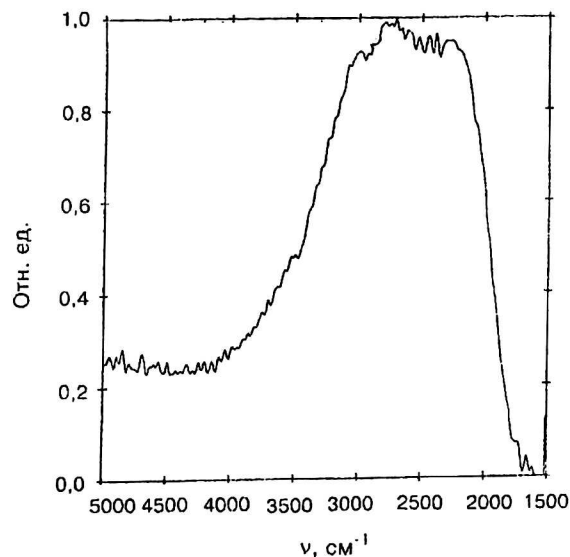


Рис. 3. Спектральная характеристика фоточувствительности МФЧЭ 128×128 элементов

Образец МФПУ формата 128×128 исследовался на стенде контроля основных параметров на базе черного тела, рабочая температура которого составляла  $T = 500 \text{ К}$ . Обнаружительная способность  $D^*$ , являющаяся показателем качества приемника, определяет соотношение его сигнала к шуму. На рис. 4 приведены диаграмма (а) и гистограмма (б) распределения обнаружительной способности  $D^*$  МФП. На диаграмме видны дефекты в виде полос, связанные с дефектами кремниевого МОП-мультиплексора, допустимыми для тестовых образцов.

Среднее значение удельной обнаружительной способности  $D^*$  при  $T = 200 \text{ К}$ , составляет  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ . Среднее квадратическое отклонение удельной обнаружительной способности по элементам МФП составляет 27 %.

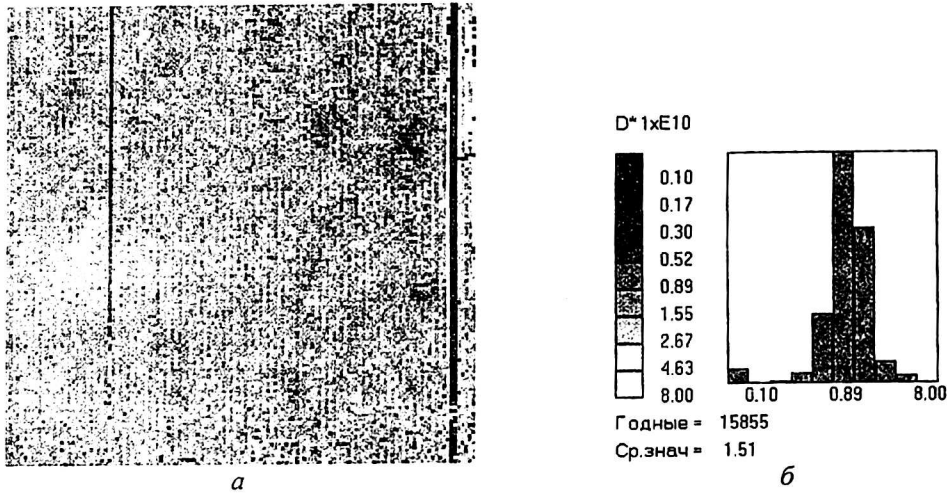


Рис. 4. Диаграмма (а) и гистограмма (б) обнаружительной способности  $D^*$  МФП

На рис. 5 показано тестовое изображение, полученное при температуре МФЧЭ  $T = 200$  К.



Рис. 5. Тестовое ИК-изображение

Результаты исследований образца МФП формата  $128 \times 128$  элементов показывают, что эпитаксиальные слои КРТ, полученные на эпитаксиальных слоях соединения кадмий—ртуть—теллур, выращенных методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений и ртути на подложках GaAs, пригодны для изготовления матричных ИК-фотоприемников смотрящего типа.

#### Литература

1. Zanata J. P., Luchier N., Audebert P., Demars P., Chamonal J. P., Ravetto M., Wolny M., 256x256 HgCdTe MWIR array grown on Ge substrates// Part of SPIE Conference on Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, 1998. V. 3379. P. 586—593.
2. Лакеенков В. М. Узкозонные полупроводники// Цветные металлы. 1991. № 8. 1991. С. 55—57.
3. Васильев В. В., Есаев Д. Г., Захарьяш Т. И., Клименко А. Г., Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Талипов Н. Х., Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А. Матричное фотоприемное устройство  $128 \times 128$  на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs// Автометрия. 1998. № 4. С. 27—33.
4. Bahir G., Garber V., Dust A. Characterization of a New Planar Process for Implementation of p-on-n HgCdTe Heterostructure Infrared Photodiodes// Journal of Electronic Materials, 2001. V. 30. № 6. P. 704—710.
5. Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Климанов Е. А., Патрашин А. И., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Тимофеев А. А. Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм// Оптический журнал. 1996. № 6. С. 74—77.
6. Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Гибин И. С., Малеев В. М. Тепловизор на основе «смотрящей» матрицы из  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$  формата  $128 \times 128$ // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 50—54.
7. Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Головин С. В., Иванов В. Ю., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Акимов В. М., Климанов Е. А., Лакеенков В. М., Сидоров Ю. Г. Матричные фотоприемники формата  $128 \times 128$  и  $384 \times 288$  на основе фотодиодов из  $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Там же, № 3. С. 32—41.

## 128x128 MWIR FPA on the base of epitaxial layer MCT grown by MOCVD

K. O. Boltar, N. I. Yakovleva, S. V. Golovin, V. P. Ponomarenko, V. I. Stafeev, I. D. Bourlakov  
State Scientific Center of Russian Federation "RD&P Center Orion", Moscow, Russia

A. N. Moiseev, A. P. Kotkov, V. V. Dorofeev  
Chemistry Institute of Rare Materials Russian Academy of Science, N.-Novgorod, Russia

*MWIR 128x128 Focal Plane Array (FPA) performance has been investigated. FPA has been fabricated on the base of HgCdTe active layers grown on (111)B GaAs substrate by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD). Histograms and diagrams of photodiodes current, responsivity and detectivity have been plotted for FPA with cutoff value  $5.1 \mu m$  at  $T = 200$  K.*