

## Фотозлектроника

УДК 621.383.4/5:621.315.59

## Характеристики матриц фотодиодов коротковолнового ИК-диапазона на основе МОСVD-эпитаксиальных слоев КРТ

Ю.С. Каракозов, К.О. Болтарь, А.Н. Моисеев, А.В. Чилиясов, Б.С. Степанов

*Исследованы температурные зависимости фотозлектрических параметров матриц фотодиодов инфракрасного диапазона 1–3 мкм на основе эпитаксиальной структуры КРТ состава  $x = 0,414$ , выращенной методом осаждения из металлоорганических соединений и ртути (МОСVD-эпитаксия). Показано, что высокие характеристики чувствительности фотодиодов КРТ при температурах охлаждения  $T = 160–170$  К позволяют применять фотоприемники на основе эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных МОСVD-эпитаксией, в перспективной оптико-электронной аппаратуре.*

PACS: 07.57.Kp, 42.79.Pw, 42.82.Fv, 85.60.Dw, 85.60.Gz.

*Ключевые слова:* сканирующее фотоприемное устройство, кадмий ртуть теллур, КРТ, МОСVD-эпитаксиальные слои, инфракрасный фотоприемник, спектральная характеристика чувствительности, длина диффузии, ВЗН.

## Введение

Узкозонный полупроводниковый материал КРТ — твердый раствор теллурида кадмия и теллурида ртути — обладает высокими фотозлектрическими характеристиками во всем диапазоне инфракрасного спектра. Для получения эпитаксиальных слоев КРТ применяются различные методы [1]: молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), осаждение из паров металлоорганических соединений и ртути (МОСVD). Особенностью процесса МОСVD является осаждение пассивирующего защитного покрытия из CdTe на поверхности фоточувствительного эпитаксиального слоя  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  непосредственно в процессе его выращивания [2],

которое обеспечивает экстремально низкую скорость поверхностной рекомбинации, что повышает качество создаваемых приборов.

Целью работы является исследование температурных зависимостей фотозлектрических параметров фотодиодов инфракрасного диапазона 1–3 мкм на основе эпитаксиальной структуры КРТ, выращенной МОСVD-методом.

## Эпитаксиальная структура КРТ

Выращивание эпитаксиальных слоев  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  проводилось в ИХВВ РАН (г. Нижний Новгород) из паров элементарной ртути и металлоорганических соединений теллура и кадмия в кварцевом вертикальном реакторе с нагретыми стенками при давлении  $20,0 \pm 1,0$  кПа. Осаждение эпитаксиальных слоев  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  осуществляли IMP-методом [3] путем послойного нанесения тонких чередующихся слоев CdTe и HgTe (суммарной толщиной около 100 нм) с последующим их диффузионным перемешиванием при ростовой температуре. Газом-носителем служил водород, очищенный диффузией через палладиевую мембрану. В качестве подложек использовали «epi-ready» пластины полуизолирующего GaAs ориентации (310) диаметром 2 дюйма.

Процесс получения гетероэпитаксиальных слоев  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  включал в себя стадии предростового отжига подложки, выращивания буферного слоя из CdTe, послойного нанесения  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  и его отжига в парах ртути при температуре осаждения для гомогенизации слоя. Особенностью процесса было нанесение пассивирующего

Каракозов Юрий Сергеевич, инженер НТК<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

Моисеев Александр Николаевич, заместитель директора<sup>3</sup>.

Чилиясов Алексей Викторович, старший научный сотрудник<sup>3</sup>.

Степанов Борис Сергеевич, научный сотрудник<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел. (499) 374–94–00. E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (МФТИ).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

<sup>3</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых

Российской академии наук (ИХВВ РАН),

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49.

Тел.: (831) 462–64–97. E-mail: moiseev@ihps.nnov.ru

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2013 г.

© Каракозов Ю.С., Болтарь К.О., Моисеев А.Н., Чилиясов А.В., Степанов Б.С., 2013

защитного покрытия из CdTe толщиной  $\sim 1$  мкм на эпитаксиальный слой  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  непосредственно после его выращивания.

Предростовой отжиг подложки, предназначенный для удаления тонкого окисного слоя с поверхности GaAs, проводили в потоке высокочистого водорода при атмосферном давлении и температуре 560–570 °С. Осаждение буферного слоя из CdTe толщиной 3–5 мкм и нанесение тонких чередующихся слоев CdTe и HgTe проводили при температуре графитового пьедестала  $T_n = 355$  °С. Осаждение HgTe вели из паров ртути и диизопротеллура (ДиИПТ), а CdTe — из паров диметилкадмия (ДМК) и диэтилтеллура (ДЭТ). Использование диизопротеллура при получении HgTe позволяет снизить температуру его осаждения (340–370 °С) при приемлемой скорости роста. Выбор диэтилтеллура для получения подслоя CdTe (как и буферного слоя) был обусловлен лучшим кристаллическим совершенством и морфологией поверхности получаемых в этом случае слоев.

Состав  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  задавался соотношением толщин чередующихся слоев и определялся временем и скоростью их осаждения. Типичная скорость осаждения подслоя HgTe ( $T_n = 355$  °С) составляла 4,0 мкм/час, подслоя CdTe — 2,5 мкм/час.

Толщина, состав, неоднородность состава эпитаксиального слоя  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  определялись по спектрам ИК-пропускания образцов. Электрофизические параметры — концентрация и подвижность носителей заряда — определялись из измерений эффекта Холла методом Ван-дер-Пау при  $T = 77$  К и  $B = 1$  Тл.

По описанной методике получены образцы эпитаксиальных структур GaAs (310) /CdTe/ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ /CdTe с  $x$  от 0,39 до 0,44 и неоднородностью состава  $\Delta x$  по площади подложки, не превышающей  $\pm 0,003$ . Толщина рабочего слоя  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  составляла 9–10 мкм. Образцы после выращивания обладали  $p$ -типом проводимости, концентрация и подвижность носителей заряда составляли  $p_{77} =$

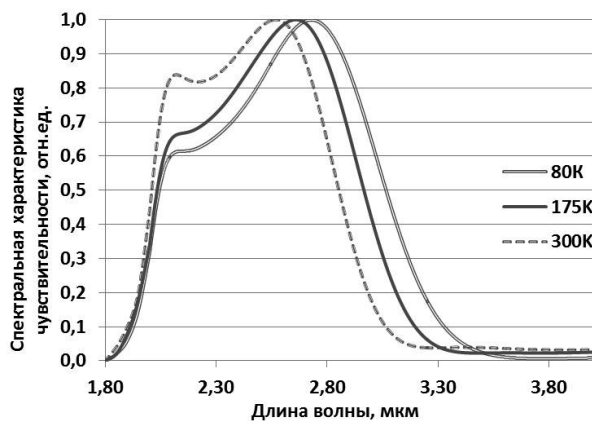


Рис. 1. Спектральные характеристики чувствительности фотодиодов.

$(1-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu_{77} = 110-200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Средняя плотность ростовых дефектов («hillocks») на поверхности структур составляла  $\sim 300 \text{ см}^{-2}$ .

### Фоточувствительный элемент

Из полученных структур по планарной технологии [2, 4] в ОАО «НПО «Орион» изготовлены и исследованы матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) формата 4×48 элементов с шагом между фотодиодами 30 мкм. Каждый фотодиод имеет размер фоточувствительной площадки 25×25 мкм.

МФЧЭ состыкована с большой интегральной схемой (БИС) считывания методом перевернутого кристалла (Flip Chip). БИС считывания выполнена в кремнии по  $n$ -МОП технологии с емкостью накопления 0,5 пФ и входной ячейкой по схеме прямой инжекции фототока [5]. БИС обеспечивает считывание и накопление фототока, предварительную обработку и вывод сигнала каждого фотодиода матрицы с тактовой частотой до 4 МГц.

Характеристики фотомодуля исследованы в широком диапазоне температур 80–300 К. Наибольший интерес в настоящее время представляют фотоприемные устройства, работающие в коротковолновом диапазоне при повышенных температурах (более 160 К). Такие температуры достигаются системами охлаждения на основе радиационных охладителей, тепловых труб, термоэлектрических охладителей, которые обеспечивают существенно больший ресурс работы по сравнению с механическими системами охлаждения, применяемыми при более низких рабочих температурах.

### Спектральная характеристика чувствительности

Исследования спектральной характеристики чувствительности проводились на спектрометре Vertex-70 в диапазоне температур 80–300 К.

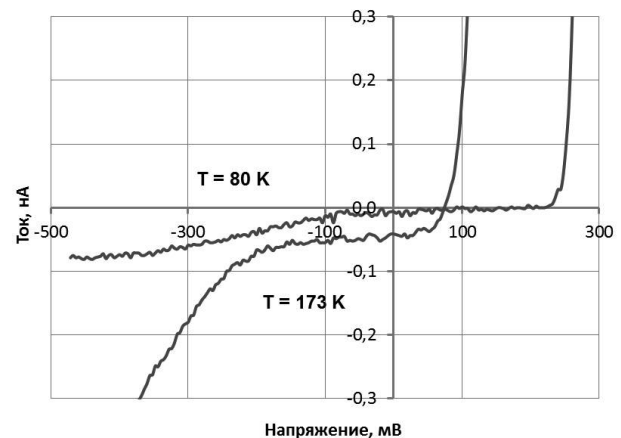


Рис. 2. Вольтамперные характеристики фотодиодов.

На рис. 1 представлены спектральные характеристики фотодиодов для нескольких значений температуры охлаждения. Спектральная характеристика чувствительности перекрывает спектральный диапазон 1,8–3 мкм. Коротковолновая граница спектральной чувствительности 1,8 мкм обусловлена спектральной характеристикой поглощения германиевого окна измерительного криостата.

### Вольтамперная характеристика

На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики фотодиодов при температурах  $T = 80$  К и  $T = 173$  К.

На основе измеренных зависимостей напряжения холостого хода и величины фоновых токов получены значения темнового тока фотодиодов по формуле

$$I_S = \frac{I_{\phi}}{\exp\left(\frac{eU_{xx}}{nkT}\right) - 1}$$

Сравнение температурных зависимостей темновых токов фотодиодов с граничной длиной волны фоточувствительности 3,0 мкм, выращенных методами ЖФЭ (ОАО «Гиредмет») и МOCVD-эпитаксии, показаны на рис. 3. Также на рисунке представлена температурная зависимость фоновых токов фотодиодов исследованного МФЧЭ.

Из данных зависимостей можно сделать вывод, что по величине темновых токов фотодиодов эпитаксиальные структуры КРТ, выращенные методом МOCVD-эпитаксии, не уступают структурам, выращенным методом жидкофазной эпитаксии.

Также видно, что при заданной диафрагме 44° и фоновой обстановке при  $T < 220$  К основной вклад в ток фотодиодов в рабочей точке, а значит, и в шум фотодиодов дает фоновый ток, а не темновой. Это означает, что характеристики фотодиодов определяются фоном, что показывает высокое качество фотодиодных структур.

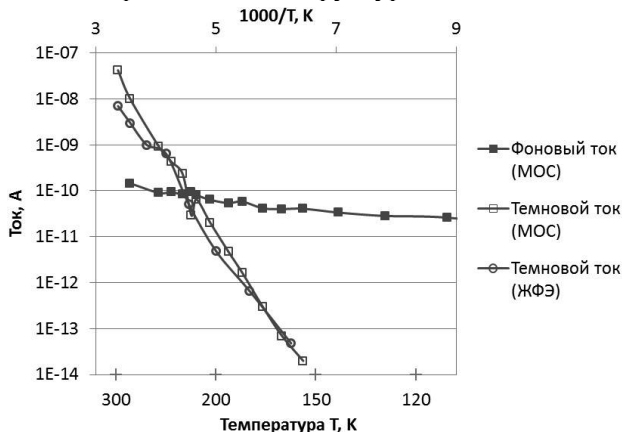


Рис. 3. Темновой и фоновый токи фотодиодов.

### Эффективный размер фоточувствительной площадки

На рис. 4 представлена температурная зависимость длины диффузии неосновных носителей заряда, которая получена пересчетом экспериментально измеренных значений размера фоточувствительной площадки фотодиода с учетом технологического размера  $p-n$ -переходов по ранее разработанному методу [6].

Такой вид зависимости длины диффузии от температуры объясняется уменьшением времени жизни неосновных носителей заряда при понижении температуры в КРТ состава  $x \sim 0,4$  [7, 8]. Достигнутые значения длины диффузии более 25 мкм свидетельствуют о малой величине поверхностной рекомбинации на границах раздела чувствительного слоя с подложкой и пассивирующим слоем CdTe, что является важной отличительной особенностью структур КРТ, выращенных в процессе МOCVD-эпитаксии, и значительно повышает качество создаваемых устройств.

### Дефектные элементы МФЧЭ

Основной причиной, снижающей качество фотоприемных устройств на основе КРТ, выращенного методом МOCVD-эпитаксии, является наличие ростовых дефектов типа «hillocks» на поверхности эпитаксиальной структуры (рис. 5).

В таблице представлены типичные значения плотности ростовых дефектов на поверхности структуры для нескольких образцов, выращенных методом осаждения из паров металлоорганических соединений.

Оценим количество дефектных элементов МФЧЭ, обусловленных наличием структурных дефектов эпитаксиального слоя. Площадь, перекрываемая дефектом типа «hillock», определяется размером  $p-n$ -перехода (20 мкм), длиной диффузии (25 мкм) и размером дефекта (~30 мкм) и при плотности 650 см<sup>-2</sup> составляет поряд-

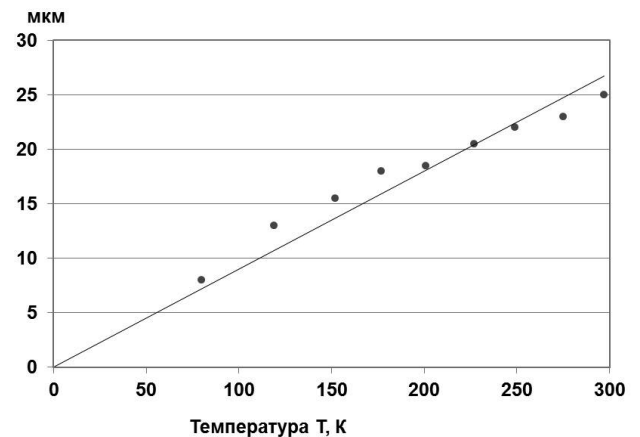


Рис. 4. Длина диффузии неосновных носителей заряда.

Таблица

Имя структуры	Состав $x$	Граница чувствительности $\lambda_{0,5}$ ( $T = 300$ K), мкм	Количество дефектов $N_d$ , см <sup>-2</sup>
mct 046	0,436	2,5	600
mct 048	0,412	2,7	650
mct 051	0,419	2,7	400
mct 069	0,388	2,9	400

ка  $N_d = (20 + 2 \cdot 25 + 30)^2 \cdot \text{мкм}^2 \cdot 650 \cdot \text{см}^{-2}$ , т.е. 6,5% площади структуры КРТ. Это, примерно, соответствует числу дефектных элементов МФЧЭ, измеренному экспериментально в минимуме температурной зависимости числа дефектных элементов (рис. 6).

Увеличение количества дефектных элементов с уменьшением температуры при  $T < 180$  К объясняется уменьшением темного тока, и, вместе с тем, увеличением влияния утечек, обусловленных дефектами. Увеличение числа дефектных элементов с ростом температуры при  $T > 180$  К обусловлено увеличением длины диффузии с ростом температуры.

Таким образом, исследованные структуры имеют большое число ростовых дефектов, значительно снижающих качество фотоприем-

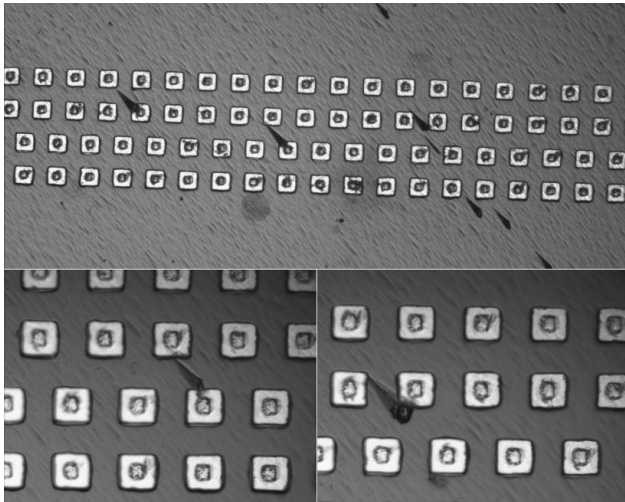


Рис. 5. Фотография поверхности структуры МФЧЭ из КРТ.

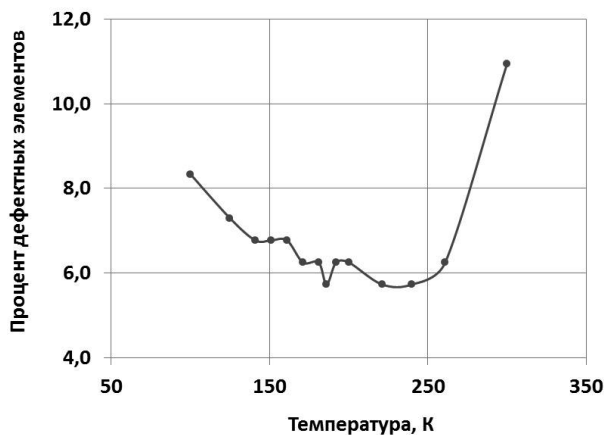


Рис. 6. Процент дефектных элементов фотомодуля.

ных устройств. Поэтому усилия разработчиков МOCVD-эпитаксии должны быть направлены на уменьшение и, в конечной счете, на устранение структурных дефектов типа «hillock», которые приводят к дефектным элементам фотоприемных устройств.

### Заключение

Результаты экспериментальных исследований фотоэлектрических параметров матриц фоточувствительных элементов из КРТ фотодиодов показывают, что эпитаксиальные структуры КРТ спектрального диапазона 1–3 мкм, выращенные методом осаждения из паров металлоорганических соединений и ртути, не уступают структурам, выращенным методом жидкофазной эпитаксии, и могут найти широкое применение в перспективной оптико-электронной аппаратуре.

Достигнутые значения длины диффузии более 25 мкм свидетельствуют о малой величине поверхностной рекомбинации на границах раздела чувствительного слоя с подложкой и пассивирующим слоем CdTe. Это является характерной положительной особенностью структур КРТ, выращенных методом МOCVD, и свидетельствует о высоком качестве полученных структур.

В настоящее время усилия разработчиков МOCVD-эпитаксии направлены на уменьшение поверхностной плотности структурных дефектов типа «hillock», которые приводят к значительному количеству дефектных элементов изготавливаемых фотоприемных устройств.

### Литература

1. Филачев А.М. и др.. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — Москва: Физматкнига, 2011.
2. Болтарь К.О. и др. // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 95
3. Irvine S.J.C. et al.. // Mater.Lett. 1984. V. 2. No. 4B. P. 305
4. Burlakov I.D. et al.. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. V. 17. No. 1. P. 52
5. Saginov L. D. et al.. // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5126. P. 105
6. Болтарь К.О., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 69
7. Gordon N.T. et al.. // J. Electronic Materials. 2006. V. 35. No. 6. P. 1140
8. Krishnamurthy S. and Casselman T.N.. // J. Electronic Materials. 2000. V. 29. No. 6. P. 828

## SWIR MOCVD HgCdTe photodiodes array

*Yu.S. Karakozov<sup>1,2</sup>, K.O. Boltar<sup>1,2</sup>, A.N. Moiseev<sup>3</sup>,  
A.V. Chilyasov<sup>3</sup>, and B.S. Stepanov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ORION R&P Association,  
46/2 Shosse Entusiastov, 111123 Moscow, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology,  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>3</sup>G.G. Devyatikh Federal Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS,  
49 Tropinin str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
E-mail: moiseev@ihps.nnov.ru

***Photoelectrical parameters of SWIR ( $x \sim 0.4$ ) MOCVD HgCdTe photodiodes at temperatures ranging from 77 K up to 300 K are presented. MCT showed high performance characteristics at temperatures above 160 K. Hillocks density and diffusion length influence on MOCVD HgCdTe performance has been analyzed.***

PACS: 07.57.Kp, 42.79.Pw, 42.82.Fv, 85.60.Dw, 85.60.Gz.

*Keywords:* mercury cadmium telluride (MCT), HgCdTe, short-wave infrared, SWIR) higher operating temperature, HOT.

Bibliography — 8 references

*Received September 20, 2013*