

УДК 621.315.5

## Исследование влияния дефектов в эпитаксиальных слоях $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на фотоэлектрические параметры матричных фотоприемных устройств

Е. В. Пермикина, А. С. Кашуба, И.А. Никифоров

*Представлены результаты исследования корреляции дефектов в эпитаксиальных слоях теллурида кадмия-ртути и фотоэлектрических характеристик матричных фотоприемных устройств, изготавливаемых на основе гетероэпитаксиальных структур КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).*

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

*Ключевые слова:* МФПУ, МФПУ, МФЧЭ, ГЭС КРТ, вольт-амперная характеристика, ВАХ, V-дефекты, электронная микроскопия.

### Введение

В начале XXI века началась разработка третьего поколения матричных фотоприемных устройств (МФПУ), работающих в инфракрасной спектральной области, на основе гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия-ртути (КРТ). В настоящее время продолжается промышленное освоение усовершенствованных фокально-плоских крупноформатных инфракрасных фотодиодных матриц (с числом  $1000 \times 8$  элементов — для сканируемых по длине линеек и  $2000 \times 2000$  элементов — для больших смотрящих матриц) МФПУ.

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор КРТ занимает главное место в области материалов для производства современных МФПУ. В связи с тем, что запрещенная зона в КРТ изменяется непрерывно с изменением состава, данный материал используется для фотоприемников различных спектральных диапазонов инфракрасной области [1]. Несмотря на основные преимущества твердого раствора теллурида кадмия-ртути как наиболее чувствительного и эффективного полупроводникового материала для матричных фотоприемников, слабая энергия связи  $\text{Hg-Te}$  и высокая энергия диссоциации молекул  $\text{Te}_2$  приводят к образованию ростовых и структурных дефектов в процессе эпитаксиального выращивания слоев КРТ. Дефекты и структурные несовершенства эпитаксиальных слоев способствуют образова-

нию в запрещенной зоне полупроводникового материала дискретных энергетических уровней — «ловушек», существенно ухудшающих однородность распределения «темнового» тока и токов утечек фотодиодов матричных фотоприемных устройств. В связи с этим проблема дефектности материала стала основной при изготовлении крупноформатных фотодиодных матриц, в особенности, с малым шагом элементов (около 15 мкм).

Целью данной работы является выявление корреляции электрических дефектов МФПУ с ростовыми дефектами гетероэпитаксиальных слоев КРТ.

### Методы исследования

Для выявления корреляции электрических дефектов МФПУ с ростовыми дефектами гетероэпитаксиальных слоев КРТ нами проведены измерения фотоэлектрических параметров и вольт-амперных характеристик (ВАХ) матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Фотоэлектрические параметры и вольт-амперные характеристики МФЧЭ измерялись на специализированных стендах, разработанных в ОАО «НПО «Орион». Измерения токов утечек, напряжений сигнала и шума проводились по всей площади МФЧЭ, затем рассчитывались обнаружительная способность и вольт-амперная чувствительность. При помощи компьютерной обработки получали диаграммы распределения фотоэлектрических параметров по площади каждой исследуемой матрицы МФЧЭ. Диаграммы распределения фотоэлектрических параметров сопоставлялись с оптическими и электронно-микроскопическими изображениями поверхности матрицы, как с нанесенными столбчатыми контактами, так и после селективного травления.

Пермикина Елена Вячеславовна, ведущий инженер.  
Кашуба Алексей Сергеевич, и.о. начальника участка.  
Никифоров Игорь Андреевич, техник.  
ОАО «НПО «Орион».  
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2013 г.

© Пермикина Е.В., Кашуба А.С., Никифоров И.А., 2013

Эпитаксиальные слои гетероструктур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (ГЭС КРТ), применяемые для изготовления МФЧЭ, исследовались методами атомно-силовой, оптической и электронно-ионной микроскопии высокого разрешения. Детальные изображения дефектов эпитаксиальных слоев ГЭС КРТ были получены при помощи электронно-ионного микроскопа Quanta 3D FEG ( $\times 200000$ ), атомно-силового микроскопа Integra Maximus и дифференциального интерференционно-контрастного микроскопа с призмой Номарского. Раствор для селективного травления поверхности ГЭС КРТ приготавливался на основе хромового ангидрида и соляной кислоты.

### Матричные фотоприемные устройства на основе ГЭС КРТ

В данной работе рассматриваются МФПУ для длинноволновой инфракрасной спектральной области 10–12 мкм, которые изготавливаются в ОАО «НПО «Орион» на основе МФЧЭ, изготавливаемых из гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия–ртути  $p$ -типа проводимости, выращенных методом МЛЭ на оптически прозрачных подложках из GaAs ориентации (310) в Институте физики полупроводников СО РАН. Толщина эпитаксиальных слоев гетероструктур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  составляет около 8 мкм при составе  $x = 0,22 \pm 0,002$ . Для уменьшения рассогласования параметров кристаллических решеток GaAs и  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  на подложках гетероструктур выращивают тонкий напряженный слой теллурида

цинка толщиной 0,5 мкм, затем буферный слой из теллурида кадмия толщиной около 7 мкм и нижний варизонный слой толщиной 2,5 мкм. Для уменьшения рекомбинации на поверхность узкозонного рабочего слоя гетероструктур наносится верхний варизонный слой с увеличением состава  $x$  до 0,34 толщиной 0,35–0,4 мкм.

МФЧЭ представляют собой многоэлементные фотодиодные структуры, объединенные общей базой. Благодаря тому, что фотодиодные матрицы принимают оптическое излучение с обратной стороны, возможна стыковка матричных фоточувствительных элементов с малолумиными кремниевыми мультиплексорами с помощью индиевых столбиков. При изготовлении МФЧЭ на эпитаксиальный слой КРТ  $p$ -типа проводимости наносилось пассивирующее покрытие — теллурид кадмия CdTe. В CdTe протравливались окна размерами 15 мкм и шагом 28 мкм, в которых создавались  $n$ -области в КРТ  $p$ -типа проводимости. Для контактирования каждого  $p$ – $n$ -перехода с каналом кремниевого мультиплексора формировался индиевый столбик высотой около 10 мкм и размерами по основанию 25x25 мкм.

Вольт-амперная характеристика матричного фоточувствительного элемента в случае отсутствия ростовых и структурных дефектов в области  $p$ – $n$ -перехода представлена на рис. 1.

При умеренных напряжениях обратного смещения ( $V \approx -200$  мВ) «темновой» ток МФЧЭ достигает насыщения. При больших величинах напряжения обратного смещения возрастают туннельные составляющие «темнового» тока, которые непосредственно связаны с наклоном зон. Таким образом, основными составляющими «темнового» тока матричного фоточувствительного элемента (МФЧЭ) при отсутствии ростовых и структурных дефектов в области  $p$ – $n$ -перехода являются: генерационно–рекомбинационный ток и ток туннелирования через ловушки [3]. Чем меньше величина «темнового» тока и выше фототок, тем эффективнее функционирует МФПУ.

### Результаты и обсуждение

Исследуемые матричные фотоприемные устройства длинноволнового спектрального диапазона функционируют в фотодиодном режиме при малых напряжениях смещения и температурах 77–80 К. При изготовлении МФПУ на определенных этапах проводится контроль вольт-амперных характеристик МФЧЭ и фотоэлектрических параметров МФПУ. Перед стыковкой с кремниевым мультиплексором поверхность МФЧЭ фотографируется. В случае получения диаграмм фотоэлектрических параметров с высо-

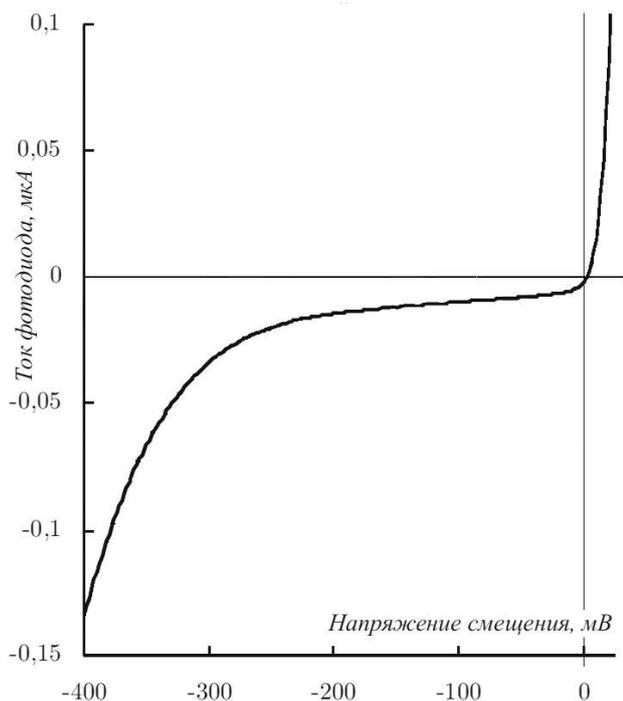


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика бездефектного матричного фоточувствительного элемента на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0,2$ )

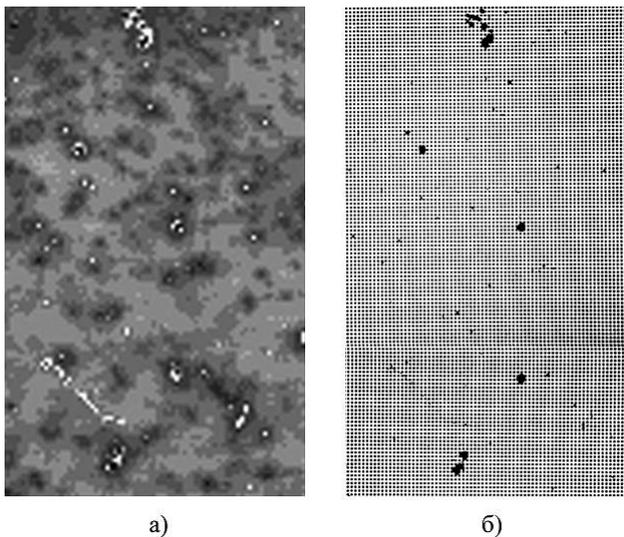


Рис. 2. Фрагменты изображений: а) диаграмма распределения токов утечки МФЧЭ (яркие пятна — высокие токи);

б) внешний вид поверхности МФЧЭ (темные пятна — ростовые дефекты с участками непротравленного индия)

кой плотностью дефектов в фокальной плоскости, матрицы фоточувствительных элементов «отстыковывали» от мультиплексоров, их поверхность обрабатывали в полирующем и селективном травителях, а затем исследовали оптическими и электронно-микроскопическими методами.

В процессе исследования оказалось, что неоднородные картины на диаграммах распределения фотоэлектрических характеристик по площади МФЧЭ, а именно, обширные локальные области с высокими токами утечек, малым сигналом и низкой обнаружительной способностью (см. рис. 2, а) полностью коррелируют с расположением крупных ростовых дефектов по поверхности матрицы фоточувствительных элементов (рис. 2, б). Яркие пятна на диаграмме (рис. 2, а) соответствуют наиболее высоким значениям токов утечек.

Для эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных методом МЛЭ, характерными являются ростовые V-дефекты. Наиболее крупные конгломераты V-дефектов могут достигать размеров 70 и более микрометров (рис. 3, а) и поэтому становятся основной причиной обширных локальных областей фотоэлектрических дефектов.

В ходе проведения технологических операций по формированию индиевых столбчатых контактов к области  $p-n$ -перехода V-дефекты препятствуют удалению индия между контактами и становится причиной соединения соседних фоточувствительных элементов (рис. 3, в). Поликристаллическая структура V-дефектов, оказавшихся на месте матричных фотодиодов, способствует возникновению токов шунтирующей утечки. Вольт-амперная характеристика фоточувствительного элемента с высоким током шунтирующей утечки приведена на рисунке 4, в. В работах [5–7] показано, что каждый ростовой V-дефект представляет собой поликристаллическое образование размерами от 5 до 30 мкм по поверхности. Высота V-дефекта на исходной структуре составляет около 1,5 мкм и уменьшается до 400 нм после проведения технологического процесса полирующего травления. Глубина залегания наиболее крупных V-дефектов в слоях ГЭС КРТ может достигать до 10 мкм (рис. 3, б). Грани поликристаллов — это свободные поверхности (рис. 4, а).

Любая поверхность является структурным дефектом, так как у поверхностных атомов частично оборваны связи, т.е. их валентность не насыщена. Поэтому в запрещенной зоне полупроводникового материала КРТ возникают дискретные уровни энергий с плотностью поверхностных состояний (близкой к числу атомов на единице поверхности) порядка  $10^{14}$ – $10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Взаимодействие между поверхностными уровнями может привести к размытию их в поверхностную зону, состоящую из близко расположенных уровней энергии, соот-

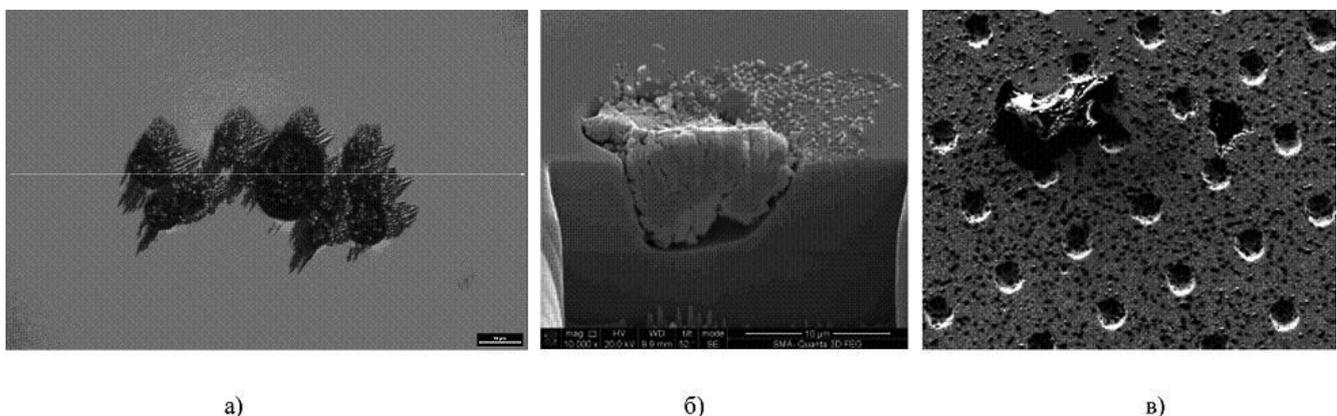


Рис. 3. Фрагменты изображений: а) изображение V-дефектов на исходной поверхности ГЭС КРТ, полученные на дифференциальном интерференционно-контрастном микроскопе; б) электронно-микроскопическое изображение поперечного разреза V-дефекта в глубину ГЭС КРТ, полученного травлением ионами галлия в глубину структуры; в) индий и V-дефект в области фоточувствительных элементов

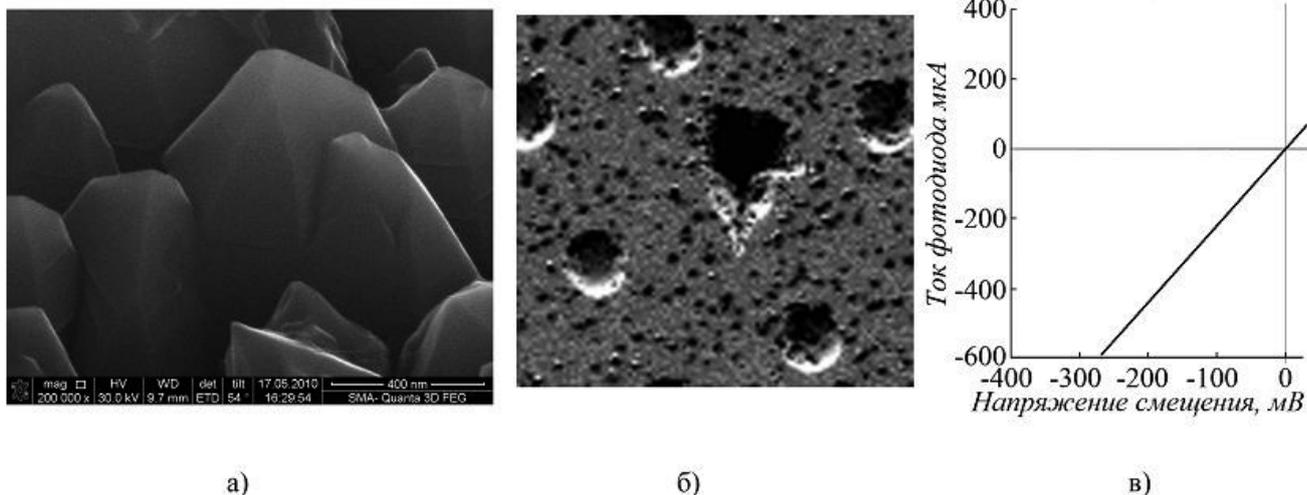


Рис. 4. Фрагменты изображений и результаты измерений: а) электронно-микроскопическое изображение центральной области V-дефекта; б) V-дефект на месте фоточувствительного элемента после селективного травления; в) вольт-амперная характеристика фоточувствительного элемента с V-дефектом.

ветствующих различным возможным компонентам квазипульса электрона  $p_y$  и  $p_z$ , параллельным поверхности [2]. Если поверхностная зона заполнена электронами лишь частично, то вдоль поверхности возможна электропроводность металлического типа [2]. Это приводит к образованию каналов с низким сопротивлением и высокими токами.

В работе [8] показано, что рост центральной области V-дефекта в эпитаксиальных слоях ГЭС КРТ происходит в направлении (111) под углом к плоскости (310). Следовательно, приложение напряжения обратного смещения к МФЧЭ по нормали относительно плоскости (310) вызывает проводимость как через границы поликристаллов в направлении (310), так и по их граням в направлении (111) (рис. 5).

Так как поверхностная проводимость поликристаллических областей чрезвычайно высока, то возникают резистивные области с низким ди-

намическим сопротивлением и высокими токами шунтирующей утечки.

При сопоставлении диаграмм распределения токов утечек и фотографий соответствующих участков МФЧЭ наблюдается смещение картин распределения токов утечек в определенном направлении относительно места расположения V-дефектов. По-видимому, это можно объяснить высокими значениями составляющей токов утечек по граням поликристаллов в направлении (111), растущих под углом к поверхности (310), а также наличием нарушенных слоев кристаллической структуры, прилегающих к V-дефекту. Нарушенные слои структуры представляют собой двойниковые образования, располагающиеся в определенном направлении относительно ростового V-дефекта (рис. 6, а) и способствуют увеличению размеров дефектных элементов на диаграммах фотоэлектрических параметров (рис. 2, а).

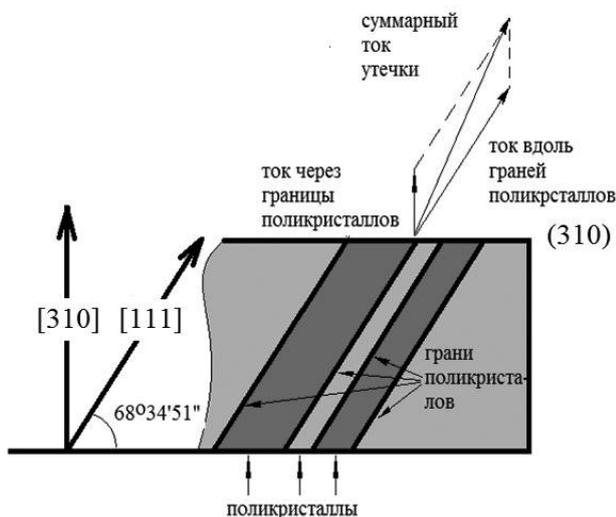


Рис. 5. Направление тока шунтирующей утечки в поликристаллической области V-дефекта

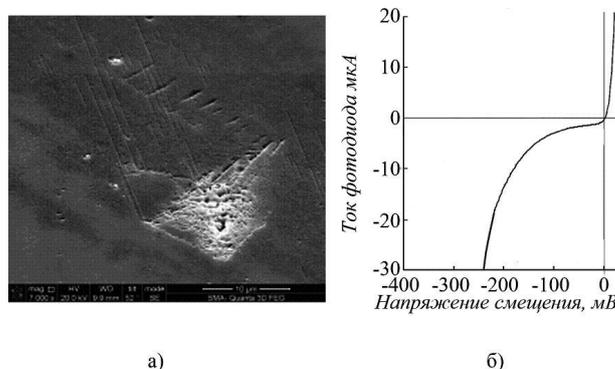


Рис. 6. Фрагменты изображений и результаты измерений: а) электронно-микроскопическое изображение V-дефекта с прилегающими к нему нарушенными слоями, выявленными на этапе пассивации поверхности ГЭС КРТ;

б) вольт-амперная характеристика МФЧЭ при наличии структурных дефектов в области р-п-перехода

Границы двойников могут оказывать влияние на фотоэлектрические и оптические свойства материала из-за диффузии к ним примесных атомов.

При исследовании МФЧЭ методами оптической микроскопии при ультрафиолетовом облучении и рентгеновского микроанализа оказалось, что в дефектных областях присутствуют элементы углерода, хлора, хрома, натрия, которые находились в составе растворов для технологических процессов травления и химической обработки. Примесные компоненты хорошо адсорбируются нарушенными дефектными областями и плохо удаляются при обработке МФЧЭ деионизованной водой. Элементы примесей в процессе изготовления МФЧЭ диффундируют к границам двойников. Так как теллурид кадмия-ртути имеет кристаллическую структуры сфалерита, в которой отсутствует центр симметрии, то возможно два типа двойников: вращения и отражения [9, 10]. В обоих случаях двойникование идет по плоскости (111), но в двойниках вращения в направлении [111], перпендикулярном плоскости двойникования, полярность остается той же самой. В этом случае двойниковая граница (111) когерентная, т.е. одна атомная плоскость, ориентированная в определенном кристаллографическом направлении, не прерываясь, переходит в другую атомную плоскость. В двойниках отражения происходит изменение полярности в направлении перпендикулярном двойниковой границе. В этом случае плоскость (111) содержит двойной слой одноименных атомов, который является областью нарушения кристаллической решетки и стоком точечных дефектов. Нарушения кристаллической структуры материала КРТ и скопления точечных дефектов в областях  $p-n$ -переходов становятся причиной возрастания токов утечек и шумов МФЧЭ в около дефектных областях. (На рисунке 6, б приведена вольт-амперная характеристика МФЧЭ при наличии структурных дефектов.)

Структурные и ростовые дефекты эпитаксиального материала, включая атомы примесей, скопления дислокаций, границы поликристаллов и свободные поверхности, порождают в запрещенной зоне полупроводникового материала КРТ дискретные уровни, отщепившиеся от энергетических зон вследствие возмущения, вносимого нарушениями периодичности чередования атомов решетки и появлением ненасыщенных валентностей.

Механизм образования дискретных уровней — «ловушек» носителей заряда — аналогичен для любых нарушений периодичности потенциала кристаллической решетки. Зарядовые состояния структурных дефектов, искажение дефектами регулярного распределения электрических зарядов кристаллической решетки в области  $p-n$ -перехода влияют на проводимость. Порождая центры «прилипания» и рассеивания носителей заряда, структурные дефекты способствуют возрастанию уровня шума.

### Заключение

Основные результаты работы можно свести к следующим положениям.

- 1) Диаграммы распределения токов утечки фоточувствительных диодов коррелируют с ростовыми дефектами эпитаксиального слоя МФЧЭ.
- 2) Возникновение токов утечки МФЧЭ связано с поликристаллическим характером ростовых V-дефектов.
- 3) Наличие V-дефектов затрудняет проведение технологических процессов травления и фотолитографии при изготовлении МФЧЭ.

### Литература

1. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride. Growth, Properties and Applications. — A John Wiley and Sons, Ltd., Publication. 2011
2. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
3. Филиппов С.Н., Болтарь К.О. // Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 1 (5). С. 54.
4. Болтарь К.О., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2004. № 3. С. 82.
5. Пермикина Е.В., Кашуба А. С., Арбенина В. В. // Неорганические материалы. 2012. Т. 48. № 7. С. 1.
6. Permikina E. V., Kashuba A. S., and Arbenina V. V. // Inorganic Materials. 2012. V. 48. No. 7. P. 665.
7. Пермикина Е. В., Кашуба А. С., Ляликов А. В. и др. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 81.
8. Sabinina I.V., Gutakovskiy A.K., Sidorov Yu.G, et al. // Journal of Crystal Growth. 2005. V. 274. P. 339.
9. Логинов Ю.Ю., Браун П.Д., Дьюроуз. Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках  $A^2B^6$ . — М: Логос, 2003.
10. Багаев В.С., Клевков Ю.В., Зайцев В.В., и др. // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 5. С. 774.

## Investigation of influence of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ epitaxial layers defects on photoelectric parameters of arrays photodetectors

*E.V. Permikina, A.S. Kashuba, and I.A. Nikiphorov*

Orion Research-and-Production Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*The correlation of investigation results of epitaxial layers MCT defects and photoelectric characteristics of arrays photodetectors fabricated of  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  multilayered structures has been presented.*

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

*Keywords:* photodetector, photosensitive diodes array, MCT heteroepitaxial structure, volt-ampere characteristic, photoelectric properties.

Bibliography — 10 references

*Received January 20, 2013*