

УДК621.383.4/5:621.315.59

Матричные фотодиоды коротковолнового ИК-диапазона на основе МОС-эпитаксиальных слоев КРТ

А.М. Филачев, А.В. Никонов, К.О. Болтарь,
А.Н. Моисеев, А.В. Чилиясов, Б.С. Степанов

Исследованы температурные зависимости фотоэлектрических 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 (МОС-эпитаксия). Показано, что высокие характеристики чувствительности фотодиодов КРТ при температурах охлаждения $T = 160–170$ К позволяют применять фотоприемники на основе эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных МОС-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

Исследование температурных зависимостей фотоэлектрических параметров фотодиодов инфракрасного диапазона 1–3 мкм на основе эпитаксиальных гетероструктур КРТ, выращенных методом МОСVD является важной задачей для изготовления матричных фотодиодов коротковолнового ИК-диапазона.

Узкозонный полупроводниковый материал КРТ — твердый раствор теллурида кадмия и теллурида ртути — обладает высокими фотоэлектрическими 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 (МОС-эпитаксия, 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 низкую скорость поверхностной рекомбинации и, в конечном счете, повышает качество создаваемых приборов.

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

Выращивание эпитаксиальных структур 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.

Филачев Анатолий Михайлович, ген. директор¹, профессор².

Никонов Антон Викторович, инженер¹, аспирант².

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Моисеев Александр Николаевич, заместитель директора³.

Чилиясов Алексей Викторович, старший научный сотрудник³.

Степанов Борис Сергеевич, научный сотрудник³.

¹ОАО «НПО «Орион».

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

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

²Московский физико-технический институт (МФТИ).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых

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.

© Филачев А.М., Никонов А.В., Болтарь К.О., Моисеев А.Н., Чилиясов А.В., Степанов Б.С., 2013

Процесс получения гетероэпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ включал в себя стадии предростового отжига подложки, выращивания буферного слоя из CdTe , послойного нанесения $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и его отжига в парах ртути при температуре осаждения для гомогенизации слоя. Особенностью процесса было нанесение пассивирующего защитного покрытия из CdTe толщиной ~ 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 $560\text{--}570$ °С. Осаждение буферного слоя из CdTe толщиной $3\text{--}5$ мкм и нанесение тонких чередующихся слоев CdTe и HgTe проводили при температуре графитового пьедестала $T_{\text{п}} = 355$ °С. Осаждение HgTe вели из паров ртути и диизопропилтеллура (ДиПТ), а CdTe — из паров диметилкадмия (ДМК) и диэтилтеллура (ДЭТ). Использование диизопропилтеллура при получении HgTe позволяет снизить температуру его осаждения ($340\text{--}370$ °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 ($T_{\text{п}} = 355$ °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.

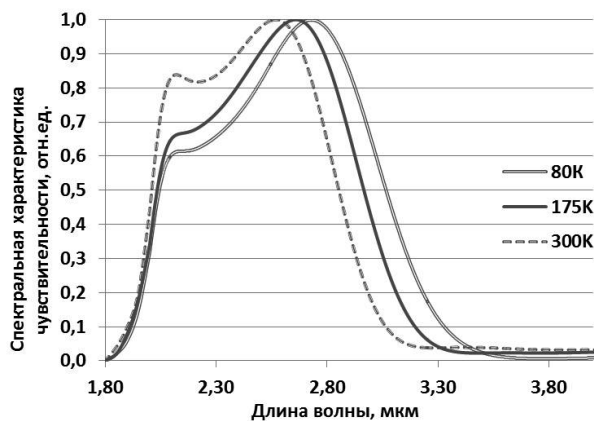


Рис. 1. Спектральные характеристики чувствительности фотодиодов.

По описанной методике получены образцы эпитаксиальных структур $\text{GaAs}(310)/\text{CdTe}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ с x от $0,39$ до $0,44$ и неоднородностью состава Δx по площади подложки, не превышающей $\pm 0,003$. Толщина рабочего слоя $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ составляла $9\text{--}10$ мкм. Образцы после выращивания обладали p -типом проводимости, концентрация и подвижность носителей заряда составляли $p_{77} = (1\text{--}3) \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ и $\mu_{77} = 110\text{--}200$ см $^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Средняя плотность ростовых дефектов («hillocks») на поверхности структур составляла ~ 300 см $^{-2}$.

Матрица

фоточувствительных элементов

Из полученных структур по планарной технологии [3, 5] 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 $80\text{--}300$ 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 ох-

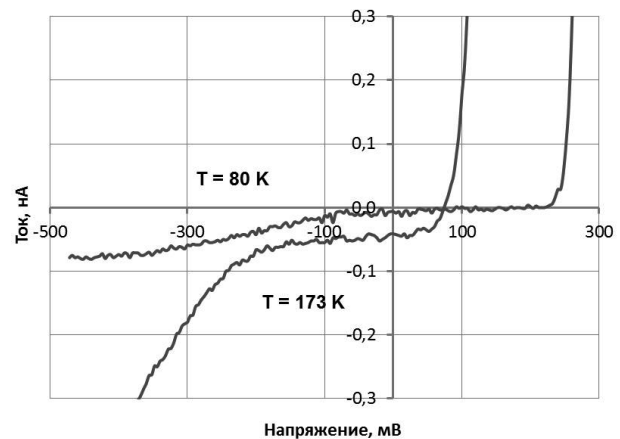


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фотодиодов.

лаждения, применяемыми при более низких рабочих температурах.

Спектральная характеристика чувствительности

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

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.

Вольт-амперная характеристика

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

На основе измеренных зависимостей напряжения холостого хода и величины фонового тока 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 фонового тока фотодиодов исследованного МФЧЭ.

Из данных зависимостей можно сделать вывод, что по величине темновых токов фотодиодов эпитаксиальные структуры КРТ, выращенные мето-

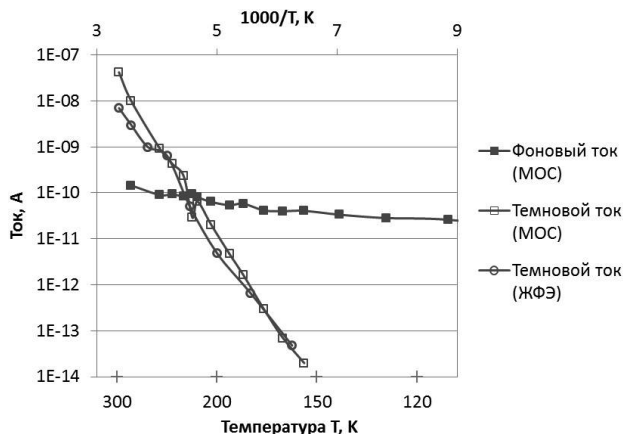


Рис. 3. Темновой и фоновый токи фотодиодов.

дом 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.

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.

Ростовые дефекты

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

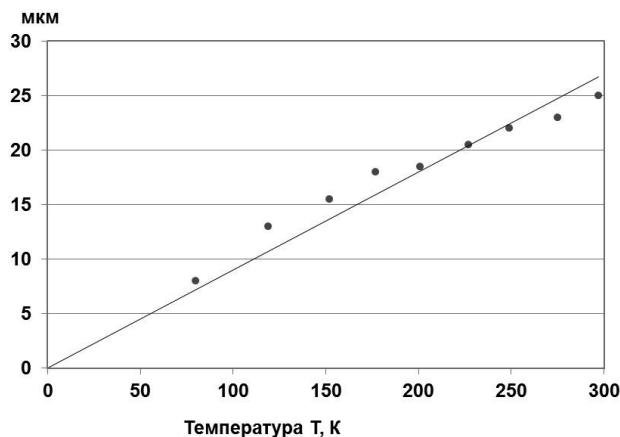


Рис. 4. Длина диффузии неосновных носителей заряда.

структуры для нескольких образцов, выращенных методом осаждения из паров металлоорганических соединений.

Таблица

Имя структуры	Состав x	Граница чувствительности $\lambda_{0,5}$ ($T = 300$ К), мкм	Количество дефектов N_D , см ⁻²
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

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⁻² составляет порядка $N_D = (20 + 2 \cdot 25 + 30)^2 \cdot \text{мкм}^2 \cdot 650 \cdot \text{см}^{-2}$, 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 объ-

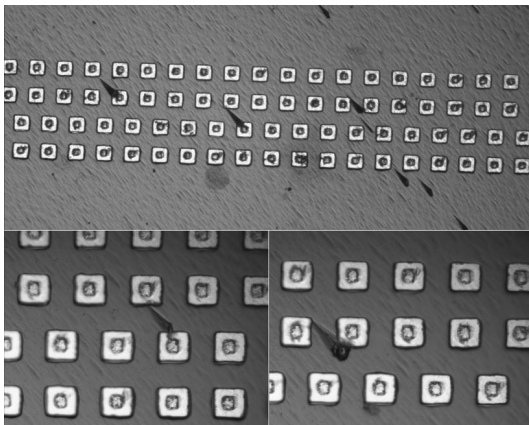


Рис. 5. Фотография поверхности структуры МФЧЭ из КРТ.

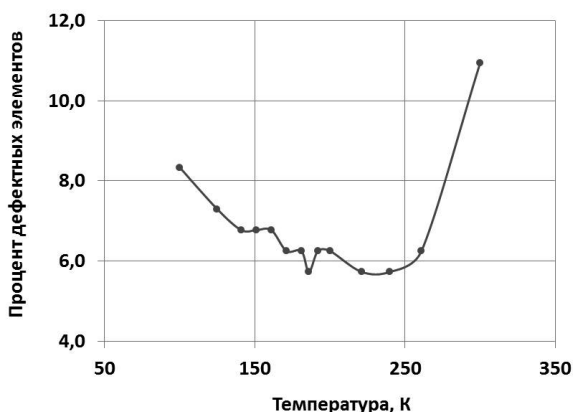


Рис. 6. Процент дефектных элементов фотомодуля.

ясняется уменьшением темнового 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 фотоприемных устройств. Поэтому усилия разработчиков MOCVD-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 MOCVD, и свидетельствует о высоком качестве полученных структур.

В настоящее время усилия разработчиков MOCVD-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. — М.: Физматкнига. 2011.
2. Болтарь К.О., Стафеев В.И., Булаков И.Д. и др. // Физика и техника полупроводников, 2005. Т. 39. № 10. С. 1257
3. Болтарь К.О. и др. // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 95
4. Irvine S.J.C. et al. // Mater.Lett. 1984. V. 2. No. 4B. P. 305
5. Burlakov I.D. et al. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. V. 17. No. 1. P. 52
6. Saginov L. D. et al. // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5126. P. 105

7. Болтарь К.О., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 69

8. Gordon N.T. et al. // J. of Electronic Materials. 2006. V. 35. No. 6. P. 1140

9. Krishnamurthy S. and Casselman T.N. // J. of Electronic Materials. 2000. V. 29. No. 6. P. 828.

SWIR MOCVD HgCdTe photodiodes array

*A.M. Filachev^{1,2}, A.V. Nikonov^{1,2}, K.O. Boltar^{1,2},
A.N. Moiseev³, A.V. Chilyasov³, and B.S. Stepanov³*

¹ Orion R&P Asociation
46/2 Entuziastov highway, 111123, Moscow, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

³G.G.Devyatykh 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, HgCdTe, short-wave infrared, SWIR, higher operating temperature

Bibliography — 9 references

Received September 20, 2013