

УДК 621.383

Характеристики пассивирующего покрытия CdTe, нанесенного на эпитаксиальный слой HgCdTe

Е. В. Пермикина, А. С. Кашуба

Представлены результаты исследований пассивирующего покрытия из теллурида кадмия, нанесенного на поверхность ГЭС КРТ методом «горячей стенки». Показано, что с увеличением толщины пассивирующего слоя CdTe улучшается его кристаллическая структура. Установлено, что химическая обработка поверхности ЭС КРТ перед пассивацией улучшает электрофизические свойства границы раздела HgCdTe/CdTe. Представлен механизм роста теллурида кадмия на КРТ.

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

Ключевые слова: эпитаксиальные слои, теллурид кадмия, пассивация поверхности, КРТ, генерация второй оптической гармоники, МФПУ.

Введение

Одним из основных материалов для крупноформатных высокочувствительных матричных фотоприемных устройств (МФПУ), работающих в инфракрасном спектральном диапазоне, являются эпитаксиальные структуры, выращенные из узкозонного полупроводникового материала теллурида кадмия-ртути (КРТ) [1—6]. Для уменьшения темпа поверхностной рекомбинации носителей заряда поверхность эпитаксиальных слоев матричных структур КРТ защищают пассивирующим покрытием. Наиболее высокие требования предъявляются к пассивации узкозонного полупроводникового материала (таковым является КРТ для дальнего ИК-диапазона), так как с уменьшением ширины запрещенной зоны возрастает чувствительность поверхности КРТ к внешним воздействиям.

Можно выделить две основные группы критериев оценки пригодности материала для пассивации поверхности матричных структур КРТ. К первой относятся собственные характеристики пассивирующего материала, вторая характеризует поверхностные состояния на границе раздела КРТ—пассивирующее покрытие.

Пригодность материала для пассивации поверхности матричных структур характеризуют следующие свойства: хорошая адгезия; обеспечивающая надежную защиту поверхности от химических и механических воздействий; высокое удельное сопротивление (более 10^{10} Ом·см), способствующее увеличению порога пробивного напряжения матричных фотодиодов; близость периодов кристаллических решеток и коэффициентов теплового расширения пассивирующего покрытия и эпитаксиального слоя, улучшающие термическую и механическую стабильность при работе МФПУ. Пассивирующее покрытие должно обладать высокой радиационной стойкостью, препятствуя деградации узкозонного материала матричных фотоприемников. А для МФПУ, принимающих излучение со стороны контактов, необходим материал, оптически прозрачный в инфракрасной области спектра.

Очень важно, чтобы пассивирующий слой способствовал минимальной плотности фиксированных электронных поверхностных состояний (менее чем $\sim 5 \times 10^{10}$ см⁻²) и уменьшению темпа поверхностной рекомбинации носителей заряда [7, 8]. К тому же пассивация поверхности должна обеспечивать энергетический барьер как для основных, так и для неосновных носителей заряда, находящихся вблизи границы раздела, тем самым уменьшая генерационно-рекомбинационный ток, являющийся одной из причин шумов матричных фотодиодов [6].

Главное требование при пассивации поверхности матричных структур, изготовленных на основе теллурида кадмия-ртути — достижение ми-

Пермикина Елена Вячеславовна, ведущий инженер.
Кашуба Алексей Сергеевич, ведущий инженер-технолог.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел.: 8 (909) 682-15-37, 8 (919) 139-78-57.
E-mail: ORION_KASHUBA@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 октября 2016 г.

© Пермикина Е. В., Кашуба А. С., 2016

нимального изгиба краев энергетических зон на границе раздела КРТ—пассивирующий слой. Состояние плоских зон на границе раздела (в случае совпадения положений уровней Ферми в области, прилегающей к границе раздела и в объеме) способствует минимизации объемного пространственного заряда, и, таким образом, позволяет сократить токи утечек [9, 10] и низкочастотные шумы [11, 12].

Исходя из вышеперечисленных требований, оказалось, что для пассивации поверхности фотодиодных матриц на основе КРТ наиболее подходящим является широкозонный полупроводниковый материал теллурид кадмия (CdTe). [6]. Теллурид кадмия характеризуется химическим сродством с КРТ и близостью к $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ периодов кристаллических решеток ($a = 6,464 \text{ \AA}$ для КРТ состава $x = 0,2$ и $a = 6,481 \text{ \AA}$ для CdTe, т.е. расхождение параметров решеток всего 0,26 %) и коэффициентов термического расширения ($\alpha_{80\text{K}} = 2,15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для КРТ состава $x = 0,2$ и $\alpha_{80\text{K}} = 2,25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для CdTe) [13]; отличается хорошей адгезией и высокой диэлектрической прочностью, оптически прозрачен в инфракрасной спектральной области и устойчив к радиоактивному излучению. При температуре 80 К теллурид кадмия проявляет диэлектрические свойства [8].

Современные методы пассивации позволяют получать пассивирующие слои теллурида кадмия на КРТ с хорошей морфологией поверхности и минимальным изгибом краев энергетических зон на границе раздела $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$. Одним из таких методов является метод «горячей стенки» — вариант вакуумного испарения, подробно описанный в [14].

В работе представлены результаты проведенных нами исследований пассивирующих слоев теллурида кадмия, полученных методом «горячей стенки» на поверхности эпитаксиальных гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (ГЭС КРТ) p -типа проводимости, состава $x = 0,2$, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) на подложках из арсенида галлия ориентации (310) в ИФП СО РАН г. Новосибирск в лаборатории технологии эпитаксии из молекулярных пучков соединений A_2B_6 .

Экспериментальные исследования

В данной работе нанесение пассивирующего слоя теллурида кадмия на поверхность гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС) КРТ осуществлялось методом «горячей стенки» при температуре источника около $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Морфология поверхности пассивирующих слоев теллурида кадмия, а также исходных гетероструктур КРТ исследовалась методами атомно-

силовой (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (SEM). Кристаллическая структура определялась по измерениям зависимости интенсивности сигнала генерации второй оптической гармоники (ГВГ) от направления поляризации излучения накачки и позиции лазерного луча на исследуемых образцах по методике, описанной в [15]. Электрофизические характеристики образцов оценивались путем определения зависимостей коэффициента Холла от величины магнитного поля по методике, предложенной в [17].

Основной проблемой при пассивации поверхности ГЭС КРТ p -типа является возможность появления инверсной проводимости в приповерхностной области эпитаксиального слоя теллурида кадмия-ртути [16], которая обусловлена низким энергетическим порогом образования собственных точечных дефектов вследствие слабой химической связи Hg-Te. Для того чтобы сократить плотность электронных состояний на границе раздела $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ и тем самым устранить возможность появления слоя инверсной проводимости, перед пассивацией поверхности проводится предварительная обработка образцов в растворе для полирующего травления [18].

Результаты исследований и обсуждения

Изображения поверхности образцов, полученные на атомно-силовом микроскопе Integra Maximus, показали, что поверхность исходной структуры ГЭС КРТ МЛЭ и образца КРТ с нанесенным слоем теллурида кадмия отличаются по внешнему виду (см. рис. 1). Для поверхности исходного образца характерен периодический рельеф, обусловленный ступенями роста монокристаллических слоев КРТ, выращенных методом МЛЭ (рис. 1, а). Заметно, что высота нановолн (периодических борозд) на исходной поверхности составляет около трех нанометров (рис. 1, а), а после пассивации — увеличивается до тридцати нанометров (рис. 1, б). По-видимому, увеличение высоты нановолн показывает *поликристаллическую структуру* теллурида кадмия, нанесенного на эпитаксиальный монокристаллический слой $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Пассивирующий слой теллурида кадмия повторяет рельеф поверхности исходного образца, но отличается высотой неоднородностей (рис. 1, б). При этом неоднородности имеют одинаковую ориентацию. Возможно, увеличение высоты одинаково ориентированных неоднородностей свидетельствует о росте поликристаллического слоя, состоящего из одинаково ориентированных *кристаллитов*.

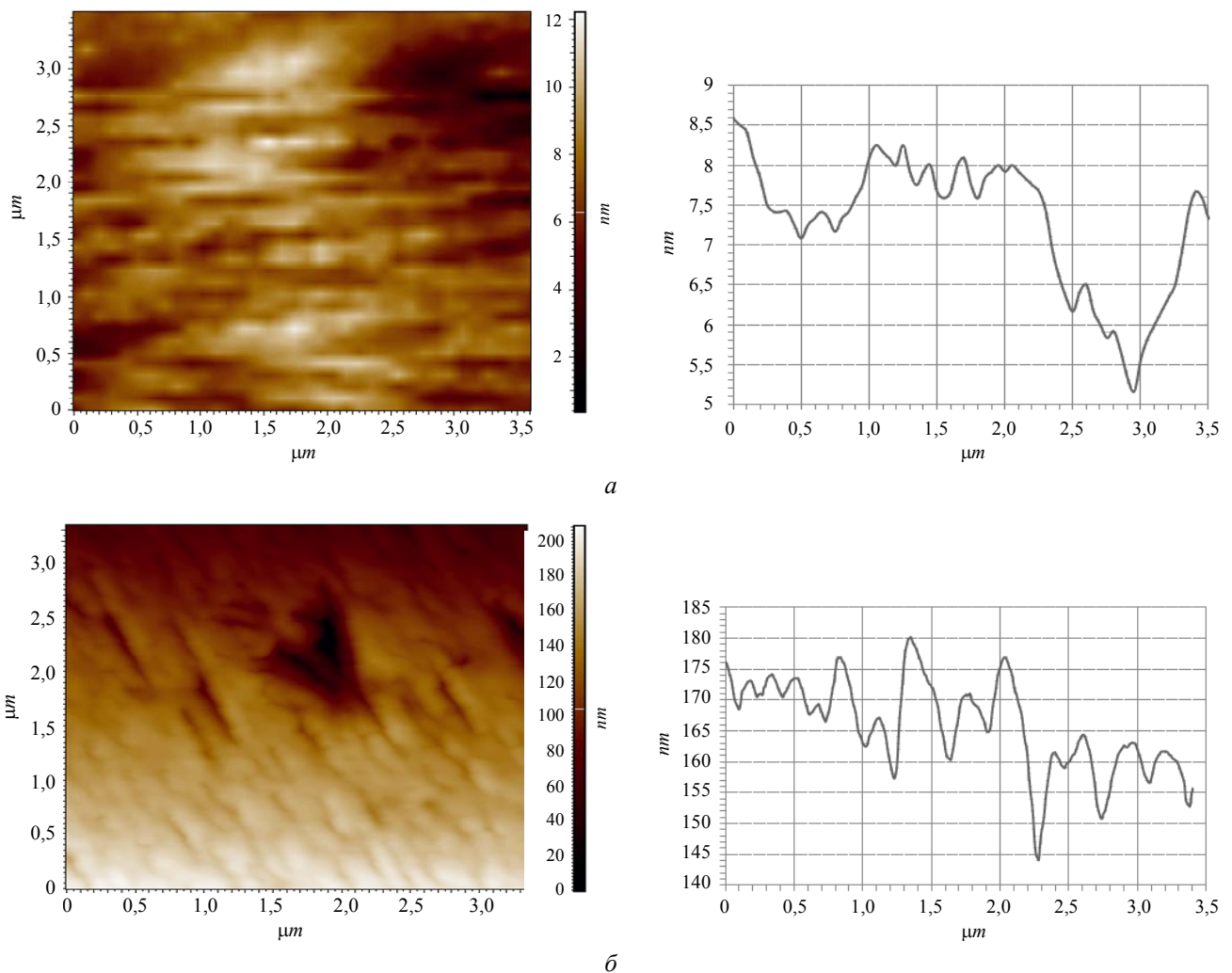


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности (слева) и их профиля (справа): а — исходного образца ГЭС КРТ МЛЭ; б — слоя теллурида кадмия толщиной 0,45 мкм, нанесенного на ГЭС КРТ МЛЭ.

Исследования зависимостей интенсивности сигнала генерации второй оптической гармоники (ГВГ) от угла между направлением поляризации накачки и выделенным кристаллографическим направлением образца подтверждают поликристаллический характер покрытия CdTe. Так, при сравнении ориентационных зависимостей сигнала ГВГ (см. рис. 2), полученных в приповерхностных областях монокристаллического слоя $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ исходного образца ГЭС КРТ и в слое теллурида кадмия, нанесенном на образец ГЭС КРТ (толщина слоя CdTe 0,45 мкм), очевидны существенные различия. В случае, если анализатор располагался параллельно направлению поляризации накачки, зависимость интенсивности сигнала ГВГ для монокристаллических слоев имела четыре максимума, расположенных под углом 90° (рис. 2, а), в то время как для слоя теллурида кадмия наблюдались два симметричных максимума (рис. 2, б). (Форма ориентационных зависимостей строго детерминирована тензором нелинейной восприимчивости $\chi^{(2)}$ для процесса ГВГ [15]).

При расположении анализатора под углом к направлению поляризации накачки в монокристаллических слоях КРТ наблюдалось уменьшение интенсивности сигнала ГВГ, примерно, в два раза (рис. 3, а). В слое теллурида кадмия значение сигнала приближалось к «нулю», т.е. сигнал проявлялся лишь на уровне шума (рис. 3, б). Конфигурация зависимости интенсивности сигнала ГВГ для слоя КРТ, в этом случае, представляла собой два противоположно направленных «лепестка», для слоя теллурида кадмия — характерно хаотическое распределение сигнала.

Все образцы с нанесенным слоем CdTe отличались неоднородностью интенсивности сигнала ГВГ. Возможно, обнаруженная неоднородность интенсивности сигнала объясняется неодинаковым размером поликристаллов в слое CdTe, что приводит к флуктуациям нелинейной восприимчивости и оптического отклика.

В процессе исследований оказалось, что интенсивность сигнала ГВГ возрастает с увеличением толщины слоя CdTe. В случае расположения

анализатора под углом к направлению поляризации накачки, для слоя теллурида кадмия толщиной *один микромметр* наблюдался сигнал интенсивностью до 0,25 отн. ед. Распределение зависимости интенсивности сигнала ГВГ носило упорядочен-

ный характер, а конфигурация выглядела симметричной (рис. 4). Это может быть объяснено тем, что с увеличением толщины кристаллическая структура слоя теллурида кадмия улучшается, т.е. покрытие CdTe становится более плотным.

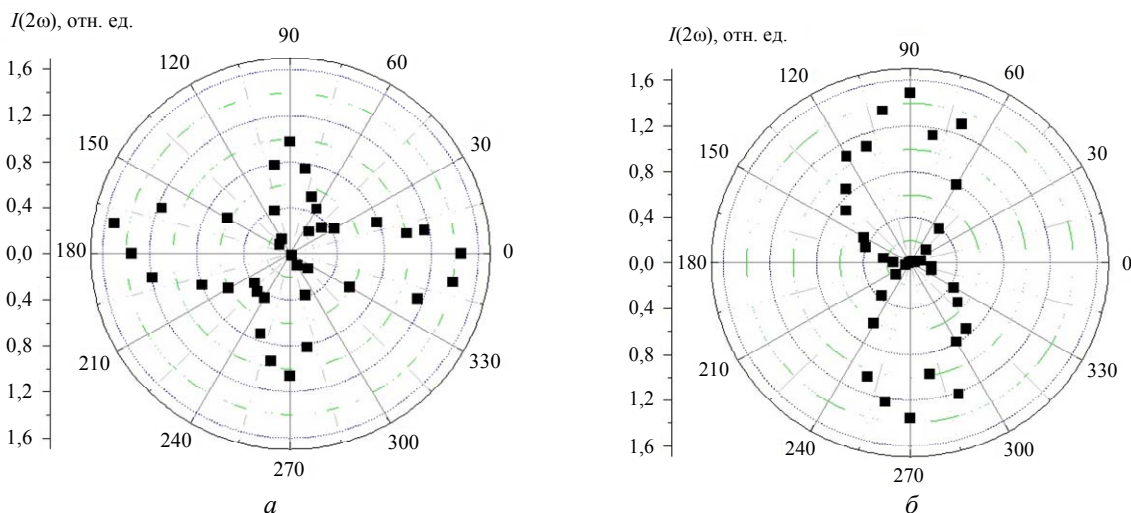


Рис. 2. Ориентационные зависимости интенсивности сигнала ГВГ в случае анализатора, направленного параллельно поляризации накачки: *а* — исходный образец ГЭС КРТ; *б* — образец ГЭС КРТ с нанесенным слоем теллурида кадмия толщиной 0,45 мкм.

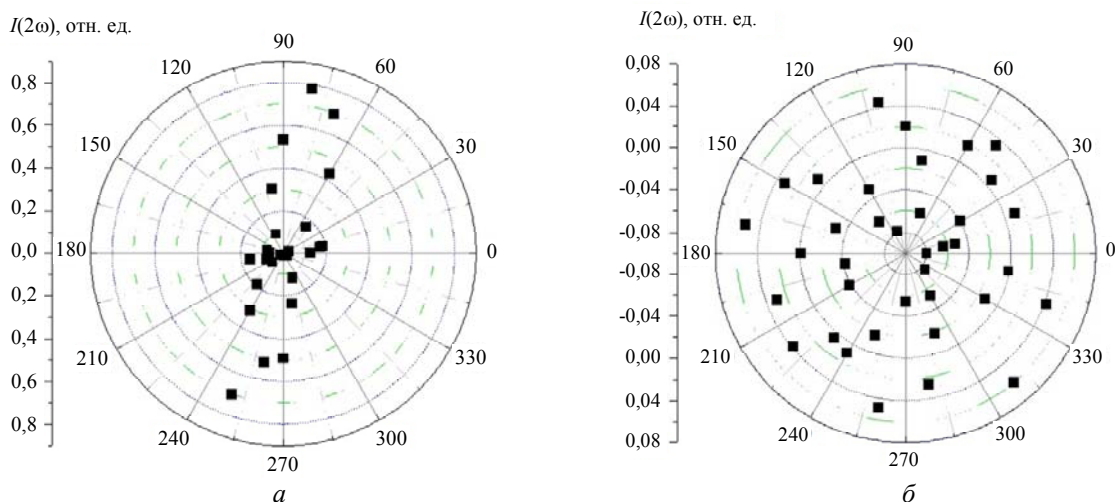


Рис. 3. Ориентационные зависимости интенсивности сигнала ГВГ в случае, если анализатор находится под углом к направлению поляризации накачки: *а* — исходный образец ГЭС КРТ; *б* — образец ГЭС КРТ с нанесенным слоем теллурида кадмия толщиной 0,45 мкм.

Изображения морфологии поверхности, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, подтвердили, что улучшение кристаллической структуры слоя CdTe на эпитаксиальном КРТ зависит от его толщины. На рис. 5 представлены изображения поверхностей слоев CdTe с толщинами 1 мкм и 0,45 мкм. Поверхность слоя CdTe толщиной один микрон выглядит более однородной и гладкой (рис. 5, *а*), чем толщиной 0,45 мкм (рис. 5, *б*). Более тонкий (0,45 мкм) слой CdTe отличается неоднородным шероховатым рельефом с крупными «порами-каналами», как изображено на

рис. 5, *б*. Такой слой не пригоден для выполнения защитных, диэлектрических и других функций, необходимых для пассивирующих покрытий.

По-видимому, наличием «каналов» в покрытии CdTe толщиной 0,45 мкм, нанесенном на слой CdHgTe, можно объяснить довольно низкие значения удельной емкости, измеренные методом C-V метрии на 99 % контактных площадок по всей площади структуры ГЭС КРТ. Это является одной из причин высоких токов утечек по поверхности матричных фотодиодов при пассивации теллуридом кадмия толщиной менее 0,7 мкм.

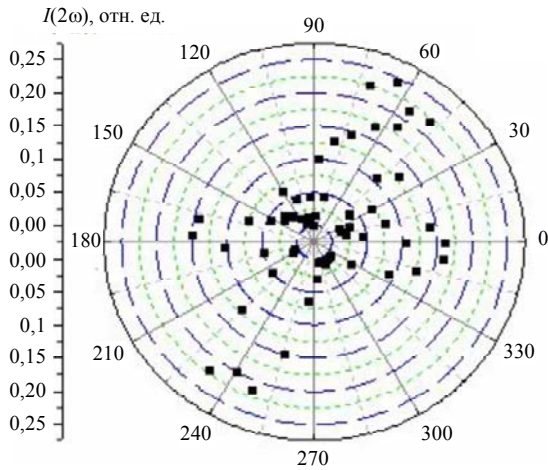
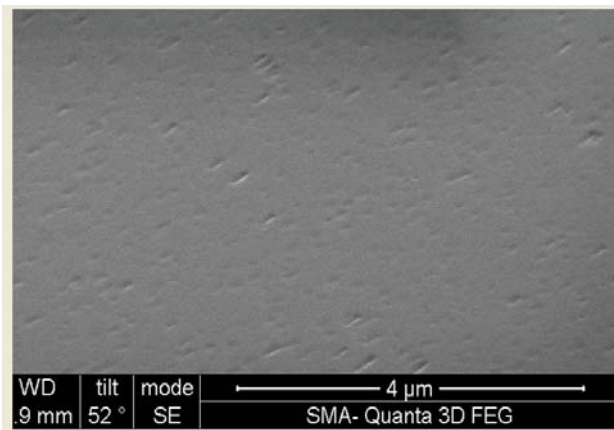


Рис. 4. Ориентационная зависимость интенсивности второй оптической гармоники в слое CdTe толщиной 1 мкм, нанесенного на монокристаллический ГЭС КРТ (анализатор находится под углом к направлению поляризации накачки).



а



б

Рис. 5. SEM-изображения поверхности слоев CdTe на ГЭС КРТ: а — толщина слоя составляет 1 мкм; б — толщина слоя составляет 0,45 мкм.

Другая возможная причина токов утечек — возникновение объемного пространственного заряда на границе раздела $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe$. Исследования электрофизических характеристик [16] образцов ГЭС КРТ показали, что исходные гетероструктуры теллурида кадмия-ртути p -типа проводимости отличаются повышенной концентрацией электронов в приповерхностных областях (таблица). В результате обработки образцов в растворе для полирующего травления [18] концентрация электронов на поверхности ГЭС КРТ пони-

зилась на два порядка и осталась примерно на том же уровне после пассивации теллуридом кадмия, как показано в таблице. Остальные электрофизические характеристики практически не изменились. Сокращение плотности электронов (см. таблицу) в приповерхностной области ГЭС КРТ после полирующего травления перед пассивацией способствовало уменьшению объемного пространственного заряда на границе раздела $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe$ и позволило значительно сократить токи утечек фотодиодов матриц.

Таблица

Сравнительная характеристика электрофизических параметров образца ГЭС КРТ

Электрофизические параметры	ГЭС КРТ		
	исходный образец	после травления	после пассивации
$N_s, \text{см}^{-2}$	$4,04 \cdot 10^{11}$	$7,8 \cdot 10^8$	$7,64 \cdot 10^8$
$p, \text{см}^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{16}$	$6,7 \cdot 10^{16}$	$3,68 \cdot 10^{16}$
$\mu_n, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	31 644	59 564	66 980
$\mu_p, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	331	190	293

Примечание: N_s — концентрация электронов по поверхности образца; p — концентрация дырок; μ_n — подвижность электронов; μ_p — подвижность дырок.

Модель трехмерного роста слоя теллурида кадмия

На основе результатов исследований мы предположили, что рост слоя теллурида кадмия на поверхности ГЭС КРТ можно описать моделью трехмерного роста (модель Volmer–Weber). По этой модели при выращивании теллурида кадмия на поверхности ГЭС КРТ методом «горячая стенка» рост слоя происходит неравномерно. Компоненты паровой фазы Cd и Te₂, образующиеся в реакторе при испарении источника, осаждаются на поверхность ГЭС КРТ, перемещаются и выстраивают «островки» роста. Имея различные коэффициенты поверхностной адсорбции и диффузии, компоненты Cd и Te₂ перемещаются по поверхности КРТ с различными скоростями, закрепляясь в энергетически выгодных местах. Молекулы теллура диссоциируют на атомы и, связываясь с атомами кадмия, образуют одинаково ориентированные *поликристаллы* CdTe. На поверхности КРТ (а затем и на CdTe) появляются «островки», отличающиеся размерами. С увеличением толщины слоя теллурида кадмия площадь «островков» увеличивается, а свободных от них участков поверхности — «каналов» — сокращается. Только лишь после того, как «островки» сольются друг с другом, образуется сплошной слой теллурида кадмия, отвечающий требованиям для пассивирующих покрытий. Прогрев гетероструктуры КРТ потоками осаждаемых компонентов из паровой фазы Cd и Te₂ способствует увеличению скорости перемещения атомов кадмия и молекул теллура по поверхности КРТ, образованию ими связей с другими компонентами в энергетически выгодных местах и, таким образом, достраиванию слоя CdTe. Чем дольше нагревается гетероструктура КРТ, тем лучше структуризация поверхности слоя теллурида кадмия. При росте толстых слоев теллурида кадмия поверхность КРТ испытывает более длительный прогрев. Возможно, это — одна из причин хорошей плотности более толстых слоев CdTe. Неоднородность и «пористость» поверхности тонкого покрытия CdTe (толщиной около 0,45 мкм и менее) модель трехмерного роста объясняет недостроенностью слоя, а именно наличием свободных площадок поверхности между островками теллурида кадмия — «каналами». Поскольку характерный размер нановолн на поверхности исходного ГЭС КРТ *p*-типа проводимости, состава $x = 0,2$, выращенного молекулярно-лучевой эпитаксией, составляет порядка 0,25 мкм, то *плотный* слой CdTe формируется при толщинах, существенно превышающих толщину 0,25 мкм. В связи с этим фотодиодные мат-

рицы, изготовленные из структур КРТ с тонким слоем теллурида кадмия, имеют высокие токи утечек по поверхности и шумы.

Заключение

Проведенные исследования показали, что теллурид кадмия, нанесенный методом «горячей стенки» на монокристаллический слой ГЭС КРТ МЛЭ, представляет собой поликристаллическую пленку, состоящую из одинаково ориентированных кристаллитов. Тонкий слой CdTe (толщиной около 0,45 мкм и менее) отличается неоднородностью из-за наличия свободных площадок между «островками» теллурида кадмия — «каналов». Такой слой не выполняет функций пассивирующего покрытия и является одной из причин высоких токов утечек по поверхности матричных фотодиодов. С ростом толщины слой CdTe становится более плотным, зарастают «каналы», улучшается его кристаллическая структура. При толщинах существенно превышающих 0,25 мкм (примерно, в четыре раза) слой теллурида кадмия выполняет свои защитные и диэлектрические функции.

Поэтому для производства матричных фотоприемных устройств из эпитаксиальных гетероструктур на основе HgCdTe необходимо пассивировать поверхность КРТ широкозонным CdTe толщиной около одного микрона с предварительной обработкой в растворе для полирующего травления, чтобы устранить приповерхностный слой инверсной проводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boltar K. O., Burlakov I. D., Ponomarenko V. P., Filachev A. M. // Proceedings of SPIE 2009. Vol. 4298. P. 72982P.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. — М. Физматкнига, 2011.
3. Болтарь К. О., Бовина Л. А., Бурлаков И. Д. и др. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 32.
4. Boltar K. O., Bovina L. A., Burlakov I. D., et al. // Proceedings of SPIE 2000. Vol. 4340. P. 23.
5. Boltar K. O., Burlakov I. D., Golovin S. V., et al. // Proceedings of SPIE. 2005. Vol. 5957. P. 59570H1.
6. Capper P., Garland J. A. John Wiley and Sons, Ltd., Publication. 2011.
7. Jong-Hwa Choi, Hee Chul Lee // Semiconductor Science and Technology. 2002. Vol. 17. P. 1456.
8. White J. K., Antoszewski J., Ravinder P., et al. // J. Electronic Materials, 2002. Vol. 31. P. 743.
9. Nemirovski Y., Adar R., Kornfeld A., et al. // J. Vac. Sci. Technol. A (USA). Vol. 4. P. 86.
10. Nemirovski Y., Rosenfeld D., Adar R., et al. // J. Vac. Sci. Technol. A (USA). 1989. Vol. 7. P. 528.
11. Nemirovski Y., Rosenfeld D. // J. Vac. Sci. Technol. A (USA). 1990. Vol. 8. P. 1159.
12. Nemirovski Y., Unikovsky A. // J. Vac. Sci. Technol. B (USA). 1992. Vol. 10. P. 1602.

13. Bagot D., Granger R., Rolland S. // J. Pus. Status Solidi B (Germany). 1993. Vol. 177.
14. Головин С. В., Бурлаков И. Д. Патент РФ на изобретение от 13.10.2005 № 2298251.
15. Бурлаков И. Д., Демин А. В., Заботнов С. В., Кашуба А. С. / Тезисы докладов XXI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2010. С. 210.
16. Кашуба А. С., Головин С. В., Болтарь К. О. и др. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 76.
17. Болтарь К. О. // Прикладная физика. 1999. № 6. С. 65.
18. Кашуба А. С., Пермикина Е. В., Головин С. В. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 67.
19. Пермикина Е. В., Кашуба А. С. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 2. С. 64.

Properties of the passivating CdTe film deposited on a HgCdTe epilayer

E. V. Permikina and A. S. Kashuba

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: ORION_KASHUBA@mail.ru

Received October 3, 2016

The results of investigation of the passivating CdTe film deposited by the «hot wall» method on surface of a CdHgTe epilayer are presented. It is shown that surface processing preceded passivation of surface influence on electrophysical characteristics of the HgCdTe/CdTe interface. The perfection of crystalline quality of the passivating CdTe films depend on a thickness of the CdTe film on a CdHgTe surface.

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

Keywords: epitaxial layers, CdTe, surface passivation, HgCdTe, second-harmonic generation, FPA.

REFERENCES

1. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, Proceedings of SPIE **4298**, 72982P (2009).
2. A. M. Filachev I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. K. O. Boltar, L. A. Bovina, I. D. Burlakov, et al., Prikl. Fiz., No. 3, 32 (1999).
4. K. O. Boltar, L. A. Bovina, I. D. Burlakov, et al., Proceedings of SPIE **4340**, 23 (2000).
5. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, S. V. Golovin, et al., Proceedings of SPIE **5957**, 59570H1 (2005).
6. P. Capper and J. A. Garland (John Wiley and Sons, Ltd., Publication. 2011).
7. Jong-Hwa Choi and Hee Chul Lee, Semiconductor Science and Technology **17**, 1456 (2002).
8. J. K. White, J. Antoszewski, P. Ravinder, et al., J. Electronic Materials **31**, 743 (2002).
9. Y. Nemirovski, R. Adar, A. Kornfeld, et al., J. Vac. Sci. Technol. A **4**, 86.
10. Y. Nemirovski, D. Rosenfeld, R. Adar, et al., J. Vac. Sci. Technol. A **7**, 528 (1989).
11. Y. Nemirovski and D. Rosenfeld, J. Vac. Sci. Technol. A **8**, 1159 (1990).
12. Y. Nemirovski and A. Unikovsky, J. Vac. Sci. Technol. B **10**, 1602 (1992).
13. D. Bagot, R. Granger, and S. Rolland, J. Pus. Status Solidi **177**, (1993).
14. S. V. Golovin and I. D. Burlakov, RF Patent No. 2298251, October 13, 2005.
15. I. D. Burlakov, A. V. Demin, S. V. Zobotnov, and A. S. Kashuba, in *Proc. XXI Intern. Conf. Photoelectronics* (Moscow, 2010). P. 210.
16. A. S. Kashuba, S. V. Golovin, K. O. Boltar, et al., Prikl. Fiz., 4, 76 (2014).
17. K. O. Boltar, Prikl. Fiz., 6, 65 (1999)
18. A. S. Kashuba, E. V. Permikina, and S. V. Golovin, Prikl. Fiz., 5, 67 (2014).
19. E. V. Permikina and A. S. Kashuba, Usp. Prikl. Fiz. **3**, 64 (2015).