

УДК 546.47/49-121:546.24

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕТЕРОСТРУКТУР CdHgTe/CdZnTe, ВЫРАЩЕННЫХ МОСВД-МЕТОДОМ

© 2025 г. А. В. Чилясов¹, *, А. Н. Моисеев¹, В. С. Евстигнеев¹,
М. В. Костюнин¹, И. А. Денисов², А. А. Трофимов³

¹Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятых Российской академии наук,
ул. Тропинина, 49, Нижний Новгород, 603137 Россия

²Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности
(АО “Гиредмет”), ул. Электродная, 2, Москва, 111524 Россия

³АО “НПО “Орион”, ул. Косинская, 9, Москва, 111538 Россия

*e-mail: chil@ihps-nnov.ru

Поступила в редакцию 07.10.2024 г.

После доработки 19.11.2024 г.

Принята к публикации 19.11.2024 г.

Исследовано влияние режимов подготовки подложек $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}(211)\text{B}$ и условий осаждения методом MOCVD слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на морфологию поверхности, кристаллическое совершенство и электрофизические свойства гетероструктур. Показано, что морфология, ростовые дефекты поверхности и кристаллическое совершенство слоев в значительной степени зависят от качества подготовки подложек, а электрофизические параметры слоев КРТ — от чистоты монокристаллов, из которых изготовлены подложки. Путем отбора подложек получены слои КРТ ($x \sim 0.3$) с концентрацией и подвижностью основных носителей заряда $p_{77\text{K}} = (5-30) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_{77\text{K}} = 200-400 \text{ см}^2/(\text{В с})$ соответственно.

Ключевые слова: структуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}(211)\text{B}$, MOCVD, морфология поверхности, кристаллическое совершенство, электрофизические параметры

DOI: 10.31857/S0002337X25010039, **EDN:** KELYSK

ВВЕДЕНИЕ

Современные охлаждаемые многоэлементные фотоприемные устройства (ФПУ) на ближний, средний и дальний ИК-диапазон изготавливают из эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ), получаемых различными методами [1–3]. Лучшее кристаллическое совершенство и электрофизические параметры слоев КРТ обеспечивают изотипные подложки CdZnTe (3–5 мол.% ZnTe). На подложках из этого материала благодаря высокому соответствии параметров решеток (расхождение менее 0.1%) удается выращивать слои КРТ с плотностью дислокаций $\sim(5-10) \times 10^4 \text{ см}^{-2}$. Низкая плотность дислокаций в слоях КРТ позволяет уменьшить темновые токи и токи утечки чувствительных элементов ФПУ, повысить рабочие температуры ФПУ, выход годных пикселей. Преимущества метода химического осаждения из паров металлоганических соединений (MOCVD) — производительность, технологическая гибкость, возможность получения сложных

многослойных структур высокого качества с умеренной стоимостью — позволяют некоторым зарубежным фирмам использовать этот метод для серийного производства ФПУ (Leonardo MW Ltd., Vigo System S.A.) [4, 5].

Использование подложек CdZnTe для получения эпитаксиальных слоев КРТ MOCVD-методом исследовалось в ряде работ [6–11]. При этом были показаны преимущества кристаллической ориентации (211)B — отсутствие крупных пирамидальных дефектов, характерных для ориентации (100), и дефектов упаковки, т.н. двойников, характерных для направления кристаллографического роста [111] [1, с. 115]. Отмечаются такие недостатки подложек CdZnTe, как высокая стоимость, небольшие размеры, хрупкость и невоспроизводимость электрофизических свойств слоев КРТ на них, связанная с диффузией примесей из подложки [1, с. 80; 116]. В настоящее время за рубежом получают структуры КРТ/CdZnTe в основном методами жидкок-

фазной (ЖФЭ) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [12, 13]. Несмотря на ряд публикаций в отечественной литературе [14, 15], в России систематического исследования свойств эпитаксиальных слоев КРТ, полученных на подложках CdZnTe MOCVD-методом, не проводилось.

Целью настоящей работы являлось получение MOCVD-методом на изотипных подложках CdZnTe(211)B нелегированных эпитаксиальных слоев КРТ, исследование влияния режимов подготовки подложек и условий осаждения на морфологию поверхности, определение кристаллического совершенства и электрофизических свойств слоев.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для осаждения эпитаксиальных слоев использовали высокочистые металлорганические соединения (МОС): диметилкадмий (ДМК), диизопропилтитур (ДИПТ), диэтилтитур (ДЭТ) производства ООО “ЭЛМОС” (г. Зеленоград) с содержанием основного компонента не менее 99.999%, ртуть марки Р 10-6 и водород, очищенный диффузией через Pd-фильтр. Выращивание эпитаксиальных слоев проводили на монокристаллических подложках $Cd_{1-y}Zn_yTe$ (211)B $\pm 0.5^\circ$ ($y = 0.04 \pm 0.005$) размером 20–50 мм, полученных в АО “Гиредмет” методом Бриджмена из особо чистых исходных компонентов и подвергнутых двустороннему химико-механическому полированию в АО НПО “Орион”. Шероховатость рабочей стороны подложек R_a составляла 1–1.5 нм на длине 20–40 мкм.

Поверхность подложек CdZnTe перед эпитаксией травили в полирующим растворе Br₂ (0.5 об.%) + CH₃OH, промывали в изопропиловом спирте, затем в бидистиллированной воде. Использовали метиловый спирт “ос. ч.” (“ХИММЕД”) и изопропиловый спирт “ос. ч.” 11-5 (ЗАО “ЭКОС-1”).

Выращивание гетероструктур CdHgTe/CdZnTe MOCVD-IMP-методом проводили в потоке водорода при общем давлении 20 кПа в вертикальном кварцевом реакторе, схема которого представлена в [16]. Парциальное расчетное давление ртути в зоне осаждения составляло 2 кПа. Первой стадией процесса роста являлось осаждение тонкого (около 0.1 мкм) буферного слоя CdTe из ДМК и ДЭТ. Росту буферного слоя предшествовал отжиг подложки при температуре 360–400°C в потоке водорода для удаления поверхностного оксидного слоя.

Дальнейший процесс получения эпитаксиального слоя КРТ MOCVD-IMP-методом заключался в послойном нанесении тонких чере-

дующихся подслоев CdTe и HgTe (суммарной толщиной 0.1–0.2 мкм) с последующим их перемешиванием при ростовой температуре за счет самодиффузии компонентов. Осаждение подслоев CdTe вели из паров ДМК и ДЭТ, а подслоев HgTe — из паров ртути и ДИПТ при температуре графитового пьедестала 350–360°C. Состав КРТ (x) варьировали отношением толщин слоев CdTe и HgTe и задавали временем их осаждения. Толщина эпитаксиального слоя КРТ определялась количеством задаваемых пар слоев CdTe и HgTe. В работе были получены слои КРТ с $x = 0.26–0.32$ и толщинами в диапазоне от 4 до 8 мкм.

Завершающим этапом получения гетероструктуры был ее отжиг в парах ртути при температуре роста для полной гомогенизации КРТ.

Толщину эпитаксиального слоя КРТ и состав (x) определяли из спектров ИК-пропускания, полученных на спектрометре Nicolet 6700 (Thermo Fisher Scientific Inc). Морфологию поверхности слоев КРТ исследовали при помощи оптического микроскопа Carl Zeiss Axioplan 2.

Электрофизические параметры слоев КРТ, а именно, концентрацию и подвижность носителей заряда определяли из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау (с относительной погрешностью 35 и 25% соответственно) в магнитном поле напряженностью от 0.1 до 1.0 Тл.

Кристаллическое совершенство эпитаксиальных слоев КРТ в работе оценивали на двухкристальном рентгеновском дифрактометре ДРОН-4М по величине полуширины кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость роста и морфология поверхности. Скорость осаждения подслоев CdTe в условиях экспериментов составляла 1.5–2.5 мкм/ч, подслоев HgTe — 4–5 мкм/ч и в интервале 350–360°C слабо зависела от температуры пьедестала. Повышение температуры зоны предраспада МОС с 280 до 300°C увеличивало скорость осаждения CdTe на 10–15%, в то время как скорость осаждения HgTe — на 30–40%.

Важным этапом эпитаксиального роста является предварительная подготовка поверхности подложки, которая определяет кристаллическое совершенство, морфологию поверхности и плотность ростовых дефектов эпитаксиальных слоев. Мы использовали экспериментальные подложки CdZnTe, подвергнутые химико-механической полировке водной суспензией на основе Al₂O₃ (средний размер частиц ~50 нм) и гипохлорита

натрия. Финишную отмывку поверхности осуществляли в кипящем диметилформамиде, затем в смеси толуол + изопропиловый спирт (1 : 1) при 115°C с последующей сушкой в потоке азота.

После полировки поверхность подложек была зеркально гладкая без заметных дефектов. Однако при осаждении эпитаксиального слоя КРТ на такую подложку на поверхности слоя пропадали отчетливые царапины. Поэтому нами была введена дополнительная стадия обработки подложек при комнатной температуре в полирующем растворе брома в метаноле (0.5 об.%) с промывкой в изопропиловом спирте и бидистиллированной воде. Опытным путем были установлены оптимальные времена травления и промывки. Перед осаждением слоя КРТ подложка проходила стадию отжига в потоке водорода. Было установлено, что оптимальная температура отжига (с точки зрения морфологии поверхности) составляет 380°C. Поверхность эпитаксиального слоя КРТ(211)В, осажденного на такую подложку, была зеркальной и содержала дефекты, прежде всего зависящие от качества самой подложки.

На рис. 1 показаны фото поверхности (увеличение одинаково) эпитаксиального слоя КРТ, осажденного на необработанной (рис. 1а) и дополнительно химически обработанной (рис. 1б) в бром-метанольном растворе подложке. Химическая обработка поверхности подложки CdZnTe практически убирает царапины на поверхности растущего слоя КРТ. Скорость осаждения слоев КРТ на обработанной подложке выше на ~30%, чем на необработанной. Далее приводятся фото поверхности КРТ, выращенного только на обработанной подложке.

Типичная картина поверхности слоя КРТ показана на рис. 2а. На ней присутствуют крупные ростовые дефекты (темные точки) размером 20–60 мкм с поверхностной плотностью 600–700 см⁻² и дефекты меньшего размера (<1 мкм) с плотностью 10³–10⁴ см⁻². Дефект из первой группы с большим увеличением показан на рис. 2б. Его природу не исследовали, возможно, это частица, севшая на поверхность из газовой фазы. В лучших слоях КРТ поверхностная плотность крупных дефектов составляла 150–200 см⁻².

Пример распределения более мелких дефектов на поверхности КРТ приведен на рис. 3а. Они распределены по площади достаточно равномерно. Их природа также требует исследования, возможно, это прорастающие из подложки преципитаты теллура, являющиеся характерными дефектами для CdZnTe [1, с. 78–82].

На поверхности некоторых слоев КРТ четко пропадают двойниковые границы (рис. 3), хотя на подложках CdZnTe они практически незаметны.

Морфология КРТ, полученного на обработанной А-стороне подложки CdZnTe, имеет более развитую поверхность (зеркально-матовую) и увеличенное число ростовых дефектов (рис. 4) по сравнению со стороной В. Скорость осаждения подслоя CdTe на стороне В на ~30% выше, чем на стороне А, в то время как скорость роста подслоя HgTe — всего на ~10%. В работе [6] также отмечено ухудшение морфологии слоев КРТ на А-стороне по сравнению с В-стороной подложек CdZnTe.

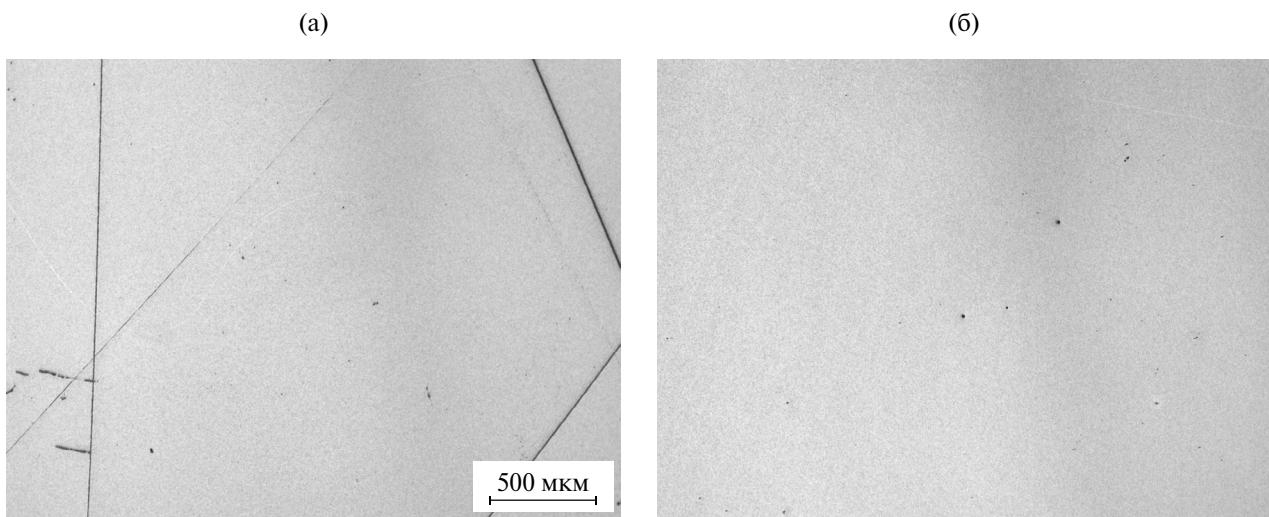


Рис. 1. Микрофотографии поверхности эпитаксиального слоя КРТ, осажденного на необработанной подложке CdZnTe(211)В (а), на обработанной в бром-метанольном растворе (0.5 об. %) (б).

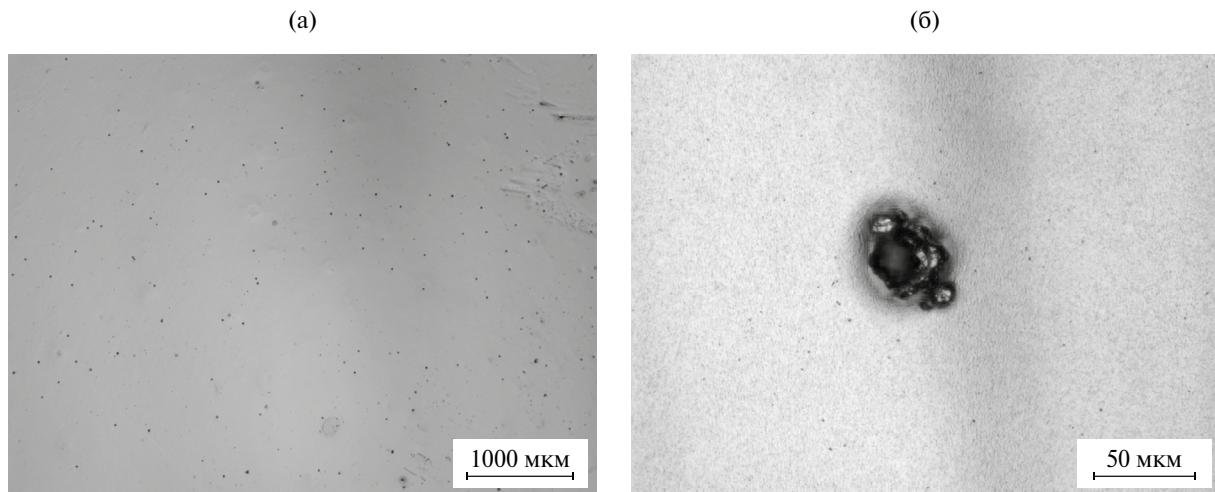


Рис. 2. Типичная морфология поверхности слоя КРТ, осажденного на обработанной в бром-метанольном растворе подложке CdZnTe(211)В (темные точки — дефекты разного размера) (а); увеличенное изображение крупного дефекта (~50 мкм) на этой поверхности (б).

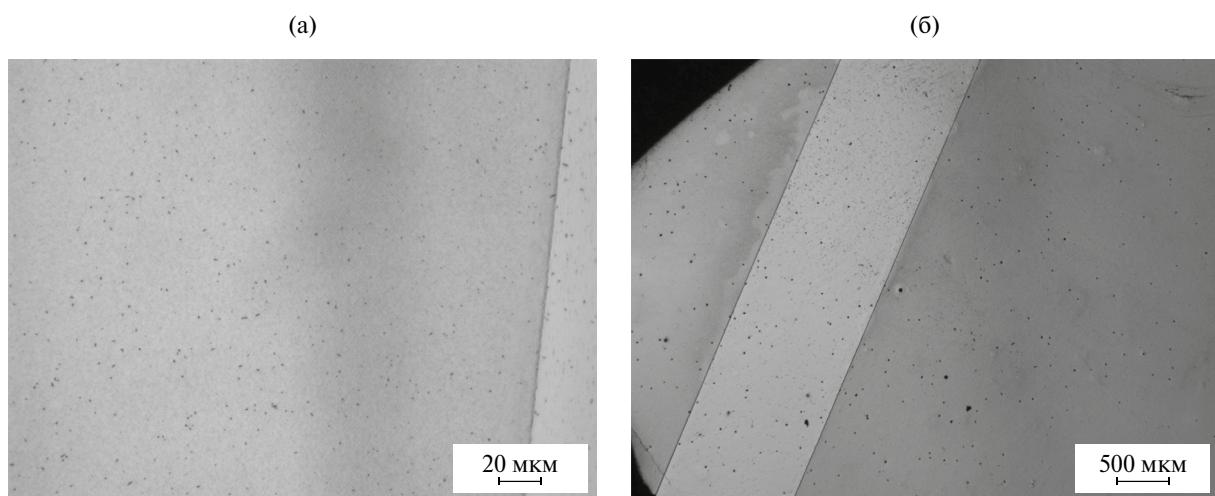


Рис. 3. Микрофотографии поверхности слоев КРТ на обработанных подложках CdZnTe(211)В с дефектами разного размера и двойниковыми границами.

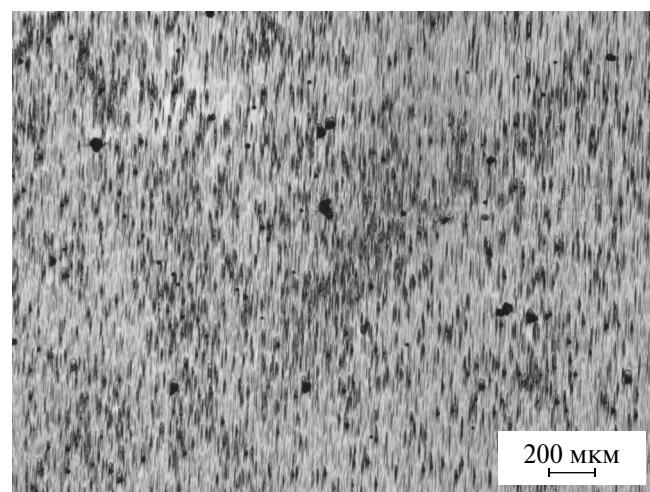


Рис. 4. Микрофотография поверхности слоя КРТ, осажденного на обработанной подложке CdZnTe(211)А.

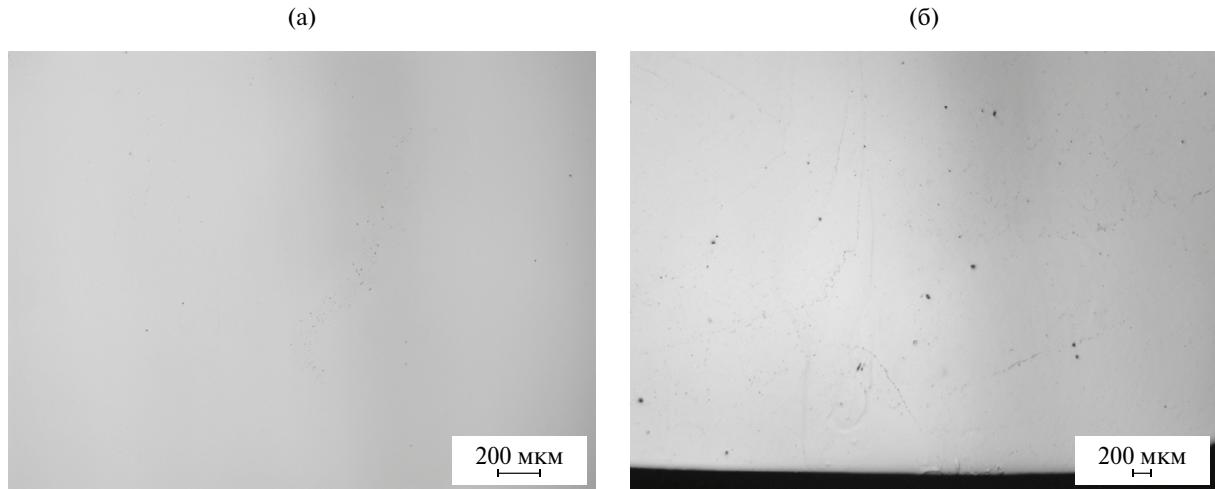


Рис. 5. Микрофотографии поверхности “необработанной” подложки CdZnTe(211)В (а) и обработанной в бром-метамольном растворе (б).

На рис. 5 показана поверхность необработанной (а) и обработанной (б) подложки CdZnTe. Из сравнения предыдущих и приведенных на рис. 5 фото следует, что морфология выращенных на подложках CdZnTe слоях КРТ в значительной степени зависит от качества полировки и, видимо, качества исходных монокристаллов CdZnTe.

Кристаллическое совершенство и электрофизические параметры. Величина FWHM КРТ(211) В на отражении 422 обычно составляла 60–90° и в лучшем образце равнялась 53° (толщина слоя ~4 мкм), что близко к средней FWHM используемых подложек (30–40°). Величина FWHM подло-

жек CdZnTe (211)В зависела от качества использованного для ее изготовления монокристалла и менялась от 20 до 50°, особенно в случае наличия в ней двойников.

Исследование холловских концентрации и подвижности основных носителей заряда слоев КРТ при комнатной температуре показывает *n*-тип проводимости с $n = 7 \times 10^{16}$ – $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 5 \times 10^3$ – $150 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. При температуре жидкого азота часть образцов показала *p*-тип проводимости с $p = (1$ – $4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 150$ – $200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, другая часть — *p*-тип проводимости с $p = (5$ – $50) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 200$ – $400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (см. табл.1).

Таблица 1. Электрофизические параметры гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$ (211)В

Образец	T, K	I, mA	ρ , Ом·см	μ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	n, p , см^{-3}
mct-395 $x = 0.271$ $d = 5.3 \text{ мкм}$	295	0.32	0.08	$\mu_{1.0} = 140$ $\mu_{0.1} = 196$	$n_{1.0} = 3.7 \times 10^{17}$ $n_{0.1} = 2.7 \times 10^{17}$
	77	0.32	0.08	$\mu_{1.0} = 212$ $\mu_{0.1} = 199$	$p_{1.0} = 3.6 \times 10^{17}$ $p_{0.1} = 3.9 \times 10^{17}$
mct-419 $x = 0.272$ $d = 4.8 \text{ мкм}$	295	0.32	0.08	$\mu_{1.0} = 2094$ $\mu_{0.1} = 2378$	$n_{1.0} = 5.8 \times 10^{16}$ $n_{0.1} = 5.1 \times 10^{16}$
	77	2.0	0.05	$\mu_{1.0} = 126$ $\mu_{0.1} = 126$	$p_{1.0} = 1.3 \times 10^{17}$ $p_{0.1} = 1.3 \times 10^{17}$
mct-424 $x = 0.289$ $d = 3.5 \text{ мкм}$	295	0.1	0.13	$\mu_{1.0} = 1575$ $\mu_{0.1} = 1735$	$n_{1.0} = 3.0 \times 10^{16}$ $n_{0.1} = 2.7 \times 10^{16}$
	77	0.2	0.94	$\mu_{1.0} = 285$ $\mu_{0.1} = 140$	$p_{1.0} = 2.3 \times 10^{16}$ $p_{0.1} = 4.8 \times 10^{16}$
mct-425 $x = 0.300$ $d = 4.0 \text{ мкм}$	295	0.1	0.16	$\mu_{1.0} = 5131$ $\mu_{0.1} = 5462$	$n_{1.0} = 7.4 \times 10^{15}$ $n_{0.1} = 7.0 \times 10^{15}$
	77	0.05	3.20	$\mu_{1.0} = 316$ $\mu_{0.1} = 414$	$p_{1.0} = 6.2 \times 10^{15}$ $p_{0.1} = 4.8 \times 10^{15}$

Результаты измерения концентрации носителей заряда в слоях КРТ указывают на возможность присутствия в них неконтролируемых примесей. Был проведен обзорный безэталонный анализ слоев КРТ на масс-спектрометре с лазерным источником ионов. Содержание примерно 60 примесей (включая F, Cl, Br) составляло $<1 \times 10^{-4}$ ат.% каждой. Был обнаружен Zn на уровне 4×10^{-2} ат.% (видимо, диффузия из подложки) и Se на уровне 3×10^{-4} ат.%. Примеси Cu, Fe и Li этим методом анализа не определялись. К сожалению, эти результаты не объясняют присутствие акцепторов в некоторых слоях КРТ на уровне $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что соответствует 10^{-3} – 10^{-4} ат.%.

Были проконтролированы примеси в подложках CdZnTe. Для определения примесей Cu, Fe, Li был использован ICP-AES-метод, давший количественные результаты. Из трех проанализированных подложек CdZnTe в двух обнаружены примеси Cu, Fe и Li на уровне $(1\text{--}2) \times 10^{-4}$, $(9\text{--}15) \times 10^{-5}$ и $(2\text{--}6) \times 10^{-4}$ ат.% соответственно. Кроме этого, подложки содержали Se на уровне 7×10^{-3} ат.%. В третьей подложке эти примеси находились ниже предела обнаружения. Примеси Cu и Li являются быстродиффундирующими акцепторами в КРТ и часто лимитируют его электрофизические параметры [17, 18]. Суммарное содержание примесей Cu и Li в некоторых подложках CdZnTe на уровне $\sim 5 \times 10^{-4}$ ат.% при переходе их в слой КРТ может, в принципе, объяснить *p*-тип некоторых слоев КРТ с концентрацией акцепторов при 77 К на уровне $(8\text{--}9) \times 10^{16}$ – $(1\text{--}3) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Заметное влияние качества подложек CdZnTe на дефекты поверхности и примесный состав слоев КРТ, выращиваемых методом МЛЭ, отмечено также в [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод химического осаждения из паров ртути и металлоганических соединений (MOCVD) выращивания КРТ на подложках CdZnTe(211) позволяет получать зеркально гладкие слои. Морфология, ростовые дефекты поверхности и кристаллическое совершенство слоев в значительной степени зависят от качества подготовки подложек.

Электрофизические параметры слоев КРТ определяются чистотой монокристаллов, из которых изготавливают подложки. Путем соответствующего отбора подложек удается получать гетероструктуры нелегированных слоев KPT($x\sim 0.3$)/CdZnTe(211) В с концентрацией и подвижностью основных носителей $p_{77\text{K}} = 5 \times 10^{15}$ – $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_{77\text{K}} = 200$ – $400 \text{ см}^2/(\text{В с})$.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят сотрудников ИХВВ РАН А. М. Потапова и И. И. Евдокимова за выполнение анализа структур КРТ и подложек CdZnTe.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mercury cadmium telluride. Growth, properties and applications / Eds. Capper P., Garland J. N.Y.: Wiley, 2011. 564 p.
- Lei W., Antoszewski J., Faraone L.* Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2. P. 041303-1–041303-34.
- Dvoretsky S.A., Vasiliev V.V., Sidorov G.Y., Gorshkov D.V.* HgCdTe device technology // Handbook of II-VI semiconductor-based sensors and radiation detectors / Ed. Korotcenkov G. V. 1. Materials and Technology. Ch. 15. Berlin: Springer, 2023. P. 423–463.
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-19531-0>
- Baker I., Hipwood L., Maxey C., Weller H., Thorne P.* High-performance, low-cost IR detector technology // SPIE Newsroom. 2012.
<https://doi.org/10.1117/2.1201211.004557>
- Madejczyk P., Gawron W., Kebłowski A., Mlynarczyk K., Stepien D. et al.* Higher operating temperature IR detectors on the MOCVD grown HgCdTe heterostructures // J. Electron. Mater. 2020. V. 49. № 11. P. 6908–6916.
- Bevan M.J., Doyle N.J., Temofonte T.A.* Organometallic vapor-phase epitaxy of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ on {211}-oriented substrates // J. Appl. Phys. 1992. V. 71(1). P. 204–210.
- Mitra P., Tyan Y.L., Case F.C. et al.* Improved arsenic doping in metalorganic chemical vapor deposition of HgCdTe and *in situ* growth of high performance long wavelength infrared photodiodes // J. Electron. Mater. 1996. V. 25. № 8. P. 1328–1335.
- Mitra P., Barnes S.L., Case F.C. et al.* MOCVD of bandgap-engineered HgCdTe p-n-N-P dual-band infrared detector arrays // J. Electron. Mater. 1997. V. 26. № 6. P. 482–487.
- Mitra P., Case F.C., Reine M.B. et al.* MOVPE growth of HgCdTe for high performance 3–5 μm photodiodes operating at 100–180 K // J. Electron. Mater. 1999. V. 28. № 6. P. 589–595.
- Mitra P., Case F.C., Reine M.B.* Progress in MOVPE of HgCdTe for advanced infrared detectors // J. Electron. Mater. 1998. V. 27. № 6. P. 510–520.
- Mitra P., Case F.C., Glass H.L. et al.* HgCdTe growth on (522) oriented CdZnTe by metalorganic vapor

- phase epitaxy // J. Electron. Mater. 2001. V. 30. № 6. P. 779–784.
12. Yuan W., Zhang C., Liang H., Wang X., Shangguan M. et al. Investigating the influence of CdZnTe and HgCdTe material quality on detector image performance // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2021. V. 32. P. 13177–13186.
 13. Qin G., Kong J.C., Yang J., Ren Y., Li Y.H. et al. HgCdTe films grown by MBE on CZT(211)B substrates // J. Electron. Mater. 2023. V. 52. P. 2441–2448.
 14. Котков А.П., Гришинова Н.Д., Мусеев А.Н. и др. Получение двухслойных эпитаксиальных структур на основе твердого раствора системы Cd–Hg–Te комбинацией методов ЖФЭ и MOCVD // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 12. С. 1446–1452.
 15. Котков А.П., Гришинова Н.Д., Мусеев А.Н. и др. Выращивание эпитаксиальных слоев КРТ методом химического осаждения из паров металлоганических соединений и ртути на подложках CdZnTe // Высокочистые вещества и материа-лы. Получение, анализ, применение // Тез. докл. XIII конф. Н. Новгород: Николаев Ю.А., 2007. С. 240–241.
 16. Чилясов А.В., Мусеев А.Н., Степанов Б.С. и др. Выращивание эпитаксиальных слоев Cd_xHg_{1-x}Te на подложках GaAs большого диаметра химическим осаждением из паров МОС и ртути // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 209–215.
 17. Tower J.P., Tobin S.P., Norton P.W. et al. Trace copper measurements and electrical effects in LPE HgCdTe // J. Electron. Mater. 1996. V. 25. № 8. P. 1183–1187.
 18. Bubulac L.O., Tennant W.E., Riedel R.A. et al. Some aspects of Li behavior in ion implanted HgCdTe // J. Vac. Sci. Technol. 1983. V. A1. P. 1646–1650.
 19. Benson J.D., Bubulac L.O., Jacobs R.N., Wang A., Arias J.M. et al. Defects and the formation of impurity ‘hot spots’ in HgCdTe/CdZnTe // J. Electron. Mater. 2019. V. 48. № 10. P. 6194–6202.