

УДК 548.55  
EDN: IQZAHF

PACS: 81.10.-h

## Получение высококачественных монокристаллов $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Te}$ по методу Давыдова–Маркова для изготовления подложек при эпитаксиальном выращивании $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$

Н. В. Жаворонков, Д. В. Капкин, В. П. Чегнов, А. А. Трофимов, А. Е. Гончаров

*Для получения фоточувствительного материала  $\text{HgCdTe}$  методом молекулярно-лучевой эпитаксии предпочтительно использовать изотипные подложки  $\text{CdZnTe}$ . Одним из методов выращивания таких монокристаллов и подложек является метод Давыдова–Маркова. Кристаллы  $\text{CdZnTe}$ , выращенных этим методом, характеризуются высокой однородностью параметров и практически полностью могут быть использованы для изготовления устройств и подложек. В рамках работы была показана возможность получения таких монокристаллов  $\text{CdZnTe}$  и перспективы развития этого направления.*

*Ключевые слова:* метод Давыдова–Маркова, монокристалл,  $\text{CdZnTe}$ .

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-4-326-333

### Введение

Одним из основных материалов для матричных фотоприемных устройств инфракрасного диапазона является теллурид кадмия–ртути ( $\text{HgCdTe}$ ). Приборы на основе  $\text{HgCdTe}$  обладают высокими характеристиками квантовой эффективности, обнаружительной способности и чувствительности, что обуславли-

вает их применение не только в гражданских сферах, но и прежде всего в современной военной технике [1, 2]. Вследствие этого  $\text{HgCdTe}$  является стратегическим материалом и входит в перечень национальных проектов развития технологического суверенитета [3, 4].

В настоящее время материал  $\text{HgCdTe}$  получают различными эпитаксиальными методами с применением разных подложек [5–12]. Высококачественные слои  $\text{HgCdTe}$ , обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства приборов вне зависимости от применяемого эпитаксиального метода определяются, помимо прочего, плотностью дефектов на поверхности выращенного слоя [13–15], что обусловлено условиями технологического процесса эпитаксиального роста, а также выбором и подготовкой материала подложки. Ростовые структурные дефекты оказывают влияние на характеристики фотодиодов и являются основным источником поверхностной составляющей тока утечки, а также увеличивают шумы [16]. Для полной реализации возможностей  $\text{HgCdTe}$  необходима высококачественная, бездефектная и по возможности атомарно-гладкая поверхность этого материала [17]. Применение

Жаворонков Николай Васильевич<sup>1</sup>, зам. ген. дир. по науке, к.т.н.

Капкин Дмитрий Владимирович<sup>1</sup>, инженер-технолог.

Чегнов Владимир Петрович<sup>1</sup>, в.н.с., к.т.н.

Трофимов Александр Александрович<sup>2</sup>, зам. нач. производства, к.т.н.

E-mail: aa-trofimov@yandex.ru

Гончаров Андрей Евгеньевич<sup>2</sup>, инженер 1-й кат.

<sup>1</sup> АО «Научно-исследовательский институт Материаловедения имени Ю. А. Малинина».

Россия, 124460, Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5/2.

<sup>2</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 1.08.2024

После доработки 22.08.2024

Принята к публикации 27.08.2024

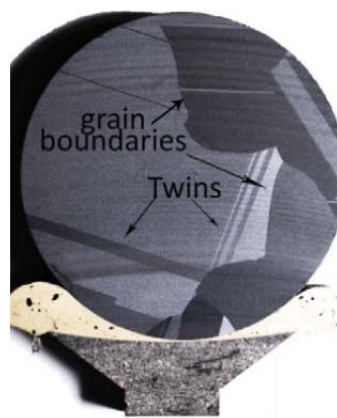
Шифр научной специальности 1.3.11

© Жаворонков Н. В., Капкин Д. В., Чегнов В. П., Трофимов А. А., Гончаров А. Е., 2024

для эпитаксиального выращивания HgCdTe согласованных по параметру кристаллической решетки подложек позволяет снизить плотность дислокаций в слое HgCdTe, обеспечить высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев, а также однородность фотоэлектрических характеристик по площади матрицы (менее 0,5 % дефектных элементов) [18]. Таким изотипным подложечным материалом для HgCdTe является теллурид кадмия-цинка (CdZnTe) с мольной долей ZnTe = 3÷5 % [19], и зарубежные производители лучших матричных фотоприемных устройств инфракрасного диапазона на основе HgCdTe получают этот материал выращиванием преимущественно на подложках CdZnTe. Однако, такие подложки являются дорогостоящими, что обусловлено трудностями в технологии их получения, начиная от выращивания слитков и заканчивая процессами полирования подложки для получения морфологии поверхности, удовлетворяющей требованиям эпитаксиальных методов [20, 21]. Сложности на различных операциях подготовки таких подложек обусловлены в том числе малой твердостью и хрупкостью материала CdZnTe, что повышает вероятность отбраковки пластин вследствие механических повреждений [22, 23] и особенно проявляется при увеличении размера подложек.

Одним из основных методов для выращивания слитков CdZnTe является метод выращивания кристаллов неорганических веществ из расплава по Бриджмену [24–26], который требует поддержания высокой точности условий роста и температурного профиля на протяжении нескольких недель для получения слитков диаметром около 120 мм и массой до 9 кг. Тем не менее слитки CdZnTe, выращенные методом Бриджмена, являются крупноблочными со структурой разориентированных друг относительно друга кристаллитов (блоков) и двойниковых ламелей (рис. 1) [20].

В России опытно-промышленное выращивание крупноблочных слитков CdZnTe методом Бриджмена в настоящее время осуществляется только в АО «Гиредмет» [27–29] из особоочищенных исходных компонентов отечественного производства, получаемых по оригинальной разработанной технологии в ООО «АДВ-Инжиниринг» [30, 31].



*Рис. 1. Характерные дефекты, встречающиеся при выращивании крупноблочных слитков CdZnTe: блочность и двойникование*

Выделение из крупноблочных слитков монокристаллических областей требуемой ориентации и получение из них полированных подложек CdZnTe большого диаметра представляет сложную задачу. Высокая цена на исходные материалы высокой чистоты и трудоемкость в изготовлении при невысоком выходе годной продукции приводят к повышенной стоимости таких подложек, пригодных для проведения процессов эпитаксиального роста. Вследствие этого производители подложек CdZnTe стремятся оптимизировать технологию на различных этапах получения и обработки этого материала, чтобы увеличить выход годной продукции, что ускорит внедрение приборов на основе HgCdTe, выращенного на изотипных подложках CdZnTe.

Актуальность настоящего исследования продиктована необходимостью развития технологий получения слитков и подложек CdZnTe и улучшения их качества.

## Материалы и методы

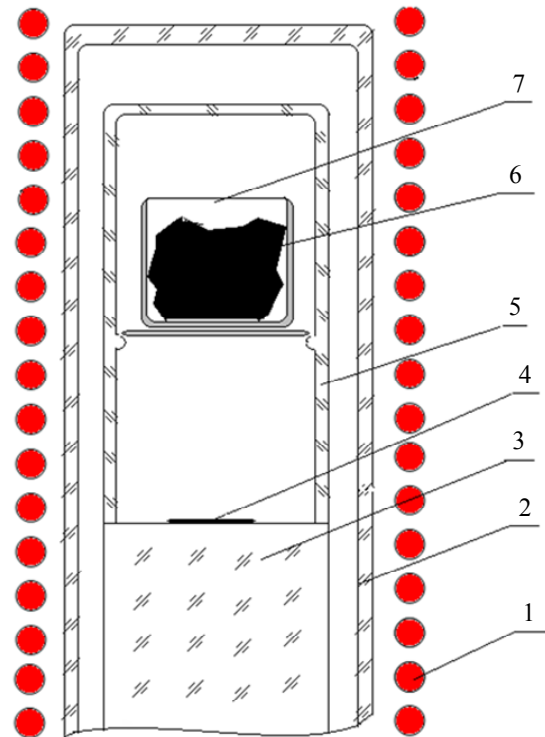
Одним из перспективных методов выращивания объемных кристаллов широкозонных полупроводников класса A2B6 является метод «свободного роста» Давыдова-Маркова [32–34], разработанный в АО «НИИ материаловедения имени Ю. А. Малинина» (г. Зеленоград), в котором кристаллы выращиваются из паровой фазы без контакта со стенками реактора, что предотвращает растрескивание кристалла при охлаждении и образование поликристаллического слитка, а также способствует есте-

ственным разряжению дислокационных напряжений на краях кристалла, в отличие от метода Бриджмена, где растущий кристалл ограничен стенками кварцевой ампулы. Таким методом «свободного роста» возможно выращивать очень чистые и высокосовершенные кристаллы CdZnTe различного диаметра, с различной концентрацией цинка и плотностью дислокаций на уровне  $5 \times 10^3 \text{ см}^{-2}$  [35].

Чтобы параметры подложек CdZnTe отвечали задачам нанесения слоев HgCdTe методом молекулярно-лучевой эпитаксии требуется получить достаточно высокое удельное электрическое сопротивление на минимально возможном уровне компенсации, а также необходимо минимизировать концентрацию структурных дефектов и обеспечить требуемые ориентацию и диаметр подложки. Рост монокристаллов CdZnTe осаждением из паровой фазы методом Давыдова-Маркова позволяет успешно реализовать эти условия, благодаря таким особенностям метода как относительно низкая температура процесса (на 50–100 °С ниже температуры плавления), равновесный характер кристаллизации, дополнительная очистка исходного материала в ходе пересублимации через паровую фазу, а также отсутствие контакта выращиваемого кристалла с материалами технологической оснастки [36].

Технологический процесс «свободного роста» осуществляется в открытой системе в атмосфере гелия (рис. 2). Перенос материала от поликристаллической загрузки (6) к затравке (4) происходит в пределах квазигерметичного объема ростовой камеры (5), находящейся внутри кварцевого реактора (2), при температуре 980–1050 °С. Конструкция ростового оборудования [36] подверглась модификации в части нагревательного элемента, который был заменен на двухзонный (1) вместо четырехзонного. Пьедесталом для размещения затравки выступает сапфировый световод (3). Применением этих оригинальных конструктивных решений обеспечиваются условия эффективного теплоотведения в результате излучения от нижней поверхности кристалла. Таким образом, выращиваемый при градиенте температур монокристалл CdZnTe является

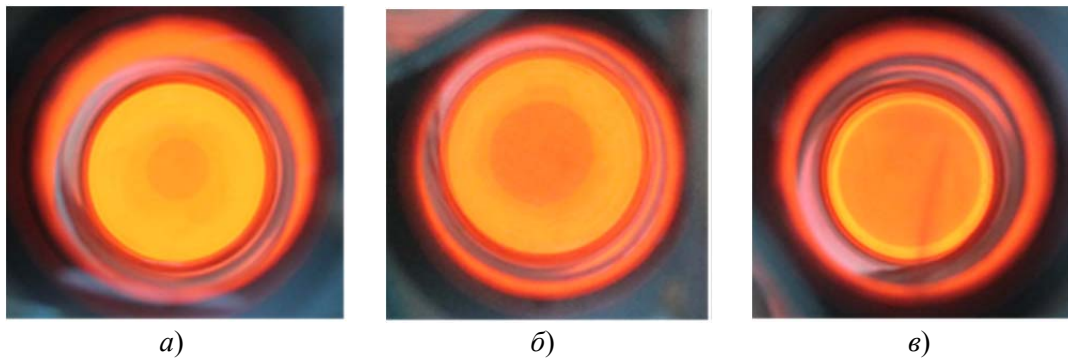
наиболее холодным элементом системы, и материал из паровой фазы не осаждается на стенках ростовой камеры и поверхности пьедестала.



**Рис. 2.** Схематичное изображение роста монокристаллов CdZnTe методом Давыдова-Маркова: 1 – двухзонный нагревательный элемент; 2 – кварцевый реактор; 3 – прозрачный сапфировый световод; 4 – подложка/затравка; 5 – ростовая камера; 6 – источник поликристаллических исходных материалов; 7 – тигель

Температурный профиль нагревателя регулируется в ходе процесса, обеспечивая оптимальность режимов разращивания кристалла до требуемого диаметра, а также его последующего нормального роста. Таким образом сохраняется фазовое равновесие при направленном выращивании материалов с заданной микроструктурой и дисперсностью, что позволяет управлять составом и структурой в процессе роста.

Благодаря прозрачному сапфировому световоду, со стороны торца осуществляется наблюдение за разращиванием затравки (рис. 3). Конечный диаметр кристалла ограничен только размерами ростовой ячейки.



*Рис. 3. Визуальное наблюдение за разрачиванием затравки (в центре): а) – затравка через 10 часов; б) – затравка через 25 часов; в) – затравка через 40 часов*

Равновесный характер процесса обеспечивает высокое кристаллическое совершенство материала с большой областью монокристалличности (более 95 %) с заданной ориентацией поверхности и отсутствием микровключений второй фазы в объеме. На рисунке 4 показан монокристалл CdZnTe, полученный в результате 70 часового процесса. Низкая теплопроводность на основе твердых растворов теллурида кадмия понижает скорость их осаждения по мере удаления поверхности кристаллизации от нижней излучающей поверхности. На выращивание кристаллов высотой около 10 мм требуется до 250 часов. Дальнейшее наращивание нецелесообразно.

С точки зрения производительности, метод Давыдова-Маркова проигрывает традиционным способам выращивания из расплавов. Однако, полученные монокристаллы характеризуются высокой однородностью параметров и могут быть практически полностью использованы для изготовления приборов и в качестве подложечного материала для эпитаксиальных процессов.

Кроме того, в процессе «свободного роста» из паровой фазы осуществляется эффективная очистка материала от примесей. Примеси с высоким давлением паров покидают камеру через неплотности вместе с частью основного материала, а примеси с низким давлением паров накапливаются в тигельном остатке, что подтверждается масс-спектральным анализом образцов монокристаллического материала и тигельного остатка, взятых из одного процесса.

Поскольку в объеме кристаллов, полученных паровым методом, не наблюдаются микровключения теллурической фазы, структурный фактор в настоящее время не рассматривается как лимитирующий. Вместе с тем метод характеризуется хорошей воспроизводимостью результатов при стабилизации основных технологических параметров. Возможность выхода на следующий уровень приборных характеристик связан с повышением чистоты исходных компонентов и снижением уровня неконтролируемого легирования [35].



*а)*



*б)*

*Рис. 4. Монокристалл CdZnTe, выращенный в результате 70 часового процесса: а) – на сапфировом пьедестале; б) – крупным планом*

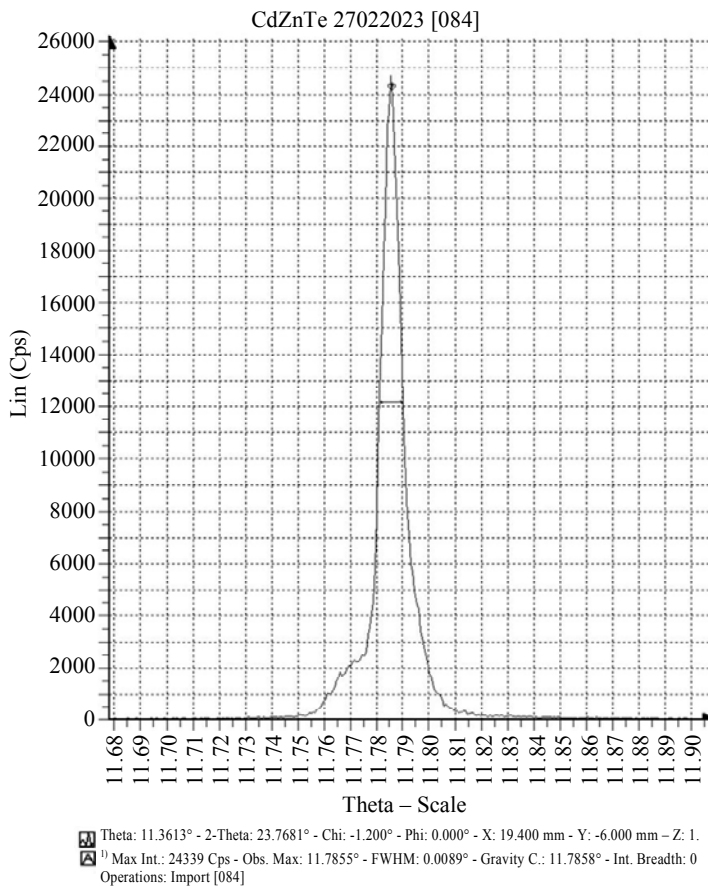


Рис. 5. Экспериментальная кривая (111) качания образца CdZnTe, выращенного методом Давыдова-Маркова

Исследования выращенных в АО «НИИМВ им. Ю. А. Малинина» методом Давыдова-Маркова образцов CdZnTe проводились в АО «НПО «Орион» на рентгеновском дифрактометре высокого разрешения Bruker D8 Discover. Состав твердого раствора по Zn определяется на уровне 3,1–4,0 %. Экспериментальная кривая качания показана на рисунке 5. FWHM составляет  $0,0089^\circ$ .

### Заключение

В результате проводимых работ, направленных на импортозамещение и обеспечение технологической независимости РФ в части стратегического материала твердотельной оптоэлектроники, показано, что выращивание монокристаллов и подложек твердого раствора CdZnTe методом Давыдова-Маркова является перспективным направлением, имеющим прикладной характер, и позволяет при определенном развитии технологии получать подложечный материал для эпитаксиального выращивания HgCdTe, не уступающий по своим характеристикам материалу CdZnTe, получаемому методом Бриджмена.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Кузнецов С. А., Пономаренко В. П. / Материалы XXVI Международ. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва, 2022.
2. Rogalski A. Infrared Detectors. – USA: CRC Press, 2019.
3. Послание Президента РФ Федеральному Собранию. – Москва, 2024.
4. Распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 № 20-р «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года и плана мероприятий по реализации Стратегии».
5. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. / Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 9. С. 1092.
6. Базовкин В. М., Варавин В. С., Васильев В. В., Глухов А. В., Горшков Д. В., Дворецкий С. А., Ковчавцев А. П., Ю.С. Макаров, Д.В. Марин, И.В. Мжельский, Половинкин В. Г., Ремесник В. Г., Сабина И. В., Сидоров Ю. Г., Сидоров Г. Ю., Строганов А. С., Царенко А. В., Якушев М. В., Латышев А. В. / Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 501–506.
7. Mitra P., Barnes S. L., Case F. C., Reine M. B., O'Dette P., Starr R., Hairston A., Kühler K., Weiler M. H., Musicant B. L. / Journal Electron. Mater. 1997. Vol. 26. № 6. P. 482–487.
8. Члясов А. В., Моисеев А. Н., Степанов Б. С., Савлинов К. Е., Котков А. П., Гришинова Н. Д. / Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 209–215.

9. Чилиясов А. В., Моисеев А. Н., Евстигнеев В. С., Костюнин М. В., Трофимов А. А., Денисов И. А. / Материалы XXVII Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва, 2024. С. 345–346.
10. Денисов И. А. Разработка технологии выращивания эпитаксиальных слоев кадмий-ртуть-теллур методом жидкофазной эпитаксии: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: ФГУП «Гиредмет», 2007.
11. Андрусов Ю. Б., Белов А. Г., Коновалов А. А., Смирнова Н. А. / Цветные металлы. 2016. № 12. С. 56–62.
12. Manchanda R., Nokhwal R., Sharma V., Sharma H., Chanchal, Sharma B. L., Sitharaman S. / Crystal. 2016. Vol. 21. № 1. P. 33–35.
13. Reddy M., Peterson J. M., Vang T., Franklin J. A., Visela M. F., Olsson K., Patten E. A., Radford W. A., Bangs J. W., Melkonian L., Smith E. P. G., Lofgreen D. D., Johnson S. M. / Journal of Electronic Materials. 2011. Vol. 40. № 8. P. 1706–1716.
14. Sheng F., Zhou C., Sun S., Yang J. / Journal of Electronic Materials. 2014. Vol. 43. № 5. P. 1397–1402.
15. Billman C. A., Almeida L. A., Smith P., Arias J. M., Chen A., Lee D., Piquette E. C. / Journal of Electronic Materials. 2011. Vol. 40. № 8. P. 1693–1698.
16. Gravrand O., Destefanis G., Bisotto S., Baier N., Rothman J., Mollard L., Brellier D., Rubaldo L., Kerlain A., Destefanis V., Vuillermet M. / Journal of Electronic Materials. 2013. Vol. 42. № 11. P. 3349–3358.
17. Qasim Mohd, Parthiban P., Das Debangshu Narayan. / ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2019. Vol. 8 (11). P. 719–726.
18. Madni I. Characterization of MBE-growth HgCdTe and related II-VI materials for next generation infrared detectors: Thesis Doctor of Philosophy. The University of Western Australia, 2017. P. 122–124.
19. Capper P., Garland J. Mercury cadmium telluride: growth, properties and applications. – UK: Wiley, 2011. P. 54.
20. Buttacavoli A. / Master of Science in Physics. Palermo University of Science. 2021. P. 131.
21. Ergunt Y., Kabukcuoglu M. P., Balbasi O. B., Yasar B., Kalay Y. E., Parlak M., Turan R. / RAP Conference Proceedings. 2019. Vol. 4. P. 167–171.
22. Кульчицкий Н. А., Мельников А. А. / Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6. С. 9.
23. Трофимов А. А., Денисов И. А., Смирнова Н. А., Шабрин А. Д., Гончаров А. Е., Новикова А. А., Можяева М. О., Гладышева К. А., Косякова А. М., Малыгин В. А., Кузнецова С. А., Ильинов Д. В., Суханова А. С. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 3. С. 289–300.
24. Szeles C., Eissler E. / Materials research society symposrjm proceedings. Infrared Applications of Semiconductors II. 1997. Vol. 484. P. 309–318.
25. Sang W., Qian Y., Shi W., Wang L., Yang J., Liu D. / Journal of Crystal Growth. 2000. Vol. 214–215. P. 30–34.
26. Zappettini A., Marchini L., Zha M., Benassi G., Zambelli N., Calestani D., Zanotti L., Gombia E., Mosca R., Zanichelli M., Pavesi M., Auricchio N., Caroli E. / IEEE Transactions on Nuclear Science. 2011. Vol. 58. № 5. P. 2352–2356.
27. Гришечкин М. Б., Денисов И. А., Силина А. А., Смирнова Н. А., Шматов Н. И. / Прикладная физика. 2014. № 5. С. 72–75.
28. Grishechkin M. B., Denisov I. A., Silina A. A., Shmatov N. I. / Non-Ferrous Metals. 2016. № 2. P. 23.
29. Гришечкин М. Б., Денисов И. А., Силина А. А., Шматов Н. И. / Цветные металлы. 2016. № 12. С. 50–55.
30. Абрютин В. Н., Давыдова Е. В., Егоров М. А., Марончук И. И., Санникович Д. Д. / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. № 25(2). С. 164–174.
31. Абрютин В. Н., Марончук И. И., Потолоков Н. А., Санникович Д. Д., Черкашина Н. И. / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. № 25(3). С. 214–226.
32. Марков Е. В., Давыдов А. А. / Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1975. № 11. С. 1755
33. Панасюк Е. И., Клейбанов М. С., Левит А. Д., Якушин В. К. / Краткие сообщения по физике. 1985. № 5. С. 6–9.
34. Жукова М. О., Грачев Я. В., Цыпкин А. Н., Путьлин С. Э., Чегнов В. П., Чегнова О. И., Беспалов В. Г. / Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. № 5. С. 654–656.
35. Melnikov A. A., Sigov A. S., Vorotilov K. A., Davydov A. A., Topalova L. I., Zhavoronkov N. V. / Journal of Crystal Growth. 1999. № 197. P. 666–669.
36. Дворянкин В. Ф., Дворянкина Г. Г., Кудряшов А. А., Петров А. Г., Давыдов А. А., Жаворонков Н. В., Капкин Д. В. / Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 10. С. 140–142.

## High-quality $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Te}$ crystals growth by the Davydov-Markov method for the manufacture of substrates for epitaxial growth of $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$

*N. V. Zhavoronkov*<sup>1</sup>, *D. V. Kapkin*<sup>1</sup>, *V. P. Chegnov*<sup>1</sup>, *A. A. Trofimov*<sup>2</sup> and *A. E. Goncharov*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>NIIMV, JSC

5/2 Georgievskiy prospect, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia

<sup>2</sup> Orion R&P Association, JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 1.08.2024; revised 22.08.2024; accepted 27.08.2024

***To obtain HgCdTe by MBE, it is preferable to use isotype CdZnTe substrates. One of the methods for growing such monocrystals and substrates is the Davydov–Markov method. Such substrates are characterized by high uniformity of parameters and can be almost completely used for the manufacture of devices. As part of the joint work, the possibility of obtaining such CdZnTe monocrystals and the prospects for the development of this direction were shown.***

**Keywords:** Davydov-Markov method, single crystal, CdZnTe.

### REFERENCES

- Burlakov I. D., Boltar K. O., Kuznetsov S. A. and Ponomarenko V. P. Materials of the XXVI International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. Moscow. 2022 [in Russian].
- Rogalski A., Infrared Detectors, USA, CRC Press, 2019.
- Address of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly, Moscow, 2024 [in Russian].
- Order of the Government of the Russian Federation dated January 17, 2020 № 20-r «On approval of the Strategy for the development of the electronics industry of the Russian Federation for the period until 2030 and the action plan for the implementation of the Strategy» [in Russian].
- Sidorov Yu. G., Dvoretzky S. A., Varavin V. S., Mikhailov N. N., Yakushev M. V. and Sabinina I. V., Fizika i tehnika poluprovodnikov **35** (9), 1092 (2001) [in Russian].
- Bazovkin V. M., Varavin V. S., Vasiliev V. V., Glukhov A. V., Gorshkov D. V., Dvoretzky S. A., Kovchavtsev A. P., Makarov Yu. S., Marin D. V., Mzhelsky I. V., Polovinkin V. G., Remesnik V. G., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G., Sidorov G. Yu., Stroganov A. S., Tsarenko A. V., Yakushev M. V. and Latyshev A. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **6** (6), 501–506 (2018) [in Russian].
- Mitra P., Barnes S. L., Case F. C., Reine M. B., Dette P. O., Starr R., Hairston A., Kühler K., Weiler M. H. and Musicant B. L., Journal Electron. Mater. **26** (6), 482–487 (1997).
- Chilyasov A. V., Moiseev A. N., Stepanov B. S., Savlinov K. E., Kotkov A. P. and Grishnova N. D., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **1** (2), 209–215 (2013) [in Russian].
- Chilyasov A. V., Moiseev A. N., Evstigneev V. S., Kostyunin M. V., Trofimov A. A. and Denisov I. A. Materials of the XXVII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices, Moscow, JSC NPO Orion, 2024, pp. 345–346 [in Russian].
- Denisov I. A. Development of technology for growing epitaxial layers of cadmium-mercury-tellurium using liquid-phase epitaxy: Abstract of thesis. Ph.D. tech. sciences, Moscow, JSC “Giredmet”, 2007 [in Russian].
- Andrusov Yu. B., Belov A. G., Kononov A. A. and Smirnova N. A., Tsvetnye metally, № 12, 56–62 (2016) [in Russian].
- Manchanda R., Nokhwal R., Sharma V., Sharma H., Chanchal, Sharma B. L. and Sitharaman S., Crystal **21** (1), 33–35 (2016).
- Reddy M., Peterson J. M., Vang T., Franklin J. A., Visela M. F., Olsson K., Patten E. A., Radford W. A., Bangs J. W., Melkonian L., Smith E. P. G., Lofgreen D. D. and Johnson S. M., Journal of Electronic Materials **40** (8), 1706–1716 (2011).
- Sheng F., Zhou C., Sun S. and Yang J., Journal of Electronic Materials. **43** (5), 1397–1402 (2014).
- Billman C. A., Almeida L. A., Smith P., Arias J. M., Chen A., Lee D. and Piquette E. C., Journal of Electronic Materials **40** (8), 1693–1698 (2011).

16. Gravrand O., Destefanis G., Bisotto S., Baier N., Rothman J., Mollard L., Brellier D., Rubaldo L., Kerlain A., Destefanis V. and Vuillermet M., *Journal of Electronic Materials*. 2013. Vol. 42, No. 11. P. 3349–3358 [in Russian].
17. Qasim Mohd, Parthiban P. and Das Debangshu Narayan, *ECS Journal of Solid State Science and Technology* **8** (11), 719–726 (2019).
18. Madni I. Characterization of MBE-growth HgCdTe and related II-VI materials for next generation infrared detectors: Thesis Doctor of Philosophy. The University of Western Australia, 2017, pp. 122–124.
19. Capper P. and Garland J. Mercury cadmium telluride: growth, properties and applications, UK, Wiley, 2011, pp. 54.
20. Buttacavoli A., Master of Science in Physics. Palermo University of Science, 131 (2021).
21. Ergunt Y., Kabukcuoglu M. P., Balbasi O. B., Yasar B., Kalay Y. E., Parlak M. and Turan R., *RAP Conference Proceedings* **4**, 167–171, (2019).
22. Kulchitsky N. A. and Melnikov A. A., *Nano- i microsistemnaya tehnika*, № 6, 9 (2011) [in Russian].
23. Trofimov A. A., Denisov I. A., Smirnova N. A., Shabrin A. D., Goncharov A. E., Novikova A. A., Mozhaeva M. O., Gladysheva K. A., Kosyakova A. M., Malygin V. A., Kuznetsova S. A., Ilyinov D. V. and Sukhanova A. S., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **10** (3), 289–300 (2022) [in Russian].
24. Szeles C. and Eissler E., *Materials research society symposium proceedings. Infrared Applications of Semiconductors II* **484**, 309–318 (1997).
25. Sang W., Qian Y., Shi W., Wang L., Yang J. and Liu D., *Journal of Crystal Growth*. **214–215**, 30–34 (2000).
26. Zappettini A., Marchini L., Zha M., Benassi G., Zambelli N., Calestani D., Zanotti L., Gombia E., Mosca R., Zanichelli M., Pavesi M., Auricchio N. and Caroli E., *IEEE Transactions on Nuclear Science* **58** (5), 2352–2356 (2011).
27. Grischechkin M. B., Denisov I. A., Silina A. A., Smirnova N. A. and Shmatov N. I., *Applied Physics*, № 5, 72–75 (2014) [in Russian].
28. Grischechkin M. B., Denisov I. A., Silina A. A. and Shmatov N. I., *Non-Ferrous Metals*, № 2, 23 (2016).
29. Grischechkin M. B., Denisov I. A., Silina A. A. and Shmatov N. I., *Tsvetnye metally*, № 12, 50–55 (2016) [in Russian].
30. Abryutin V. N., Davydova E. V., Egorov M. A., Maronchuk I. I. and Sanikovich D. D., *Izvestiya VUZov. Materialy elektronnoi tehniki*, № 25(2), 164–174 (2022) [in Russian].
31. Abryutin V. N., Maronchuk I. I., Potolokov N. A., Sanikovich D. D. and Cherkashina N. I., *Izvestiya VUZov. Materialy elektronnoi tehniki*, № 25(3), 214–226 (2022) [in Russian].
32. Markov E. V. and Davydov A. A., *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Neorganicheskie Materialy*, № 11, 1755 (1975) [in Russian].
33. Panasyuk E. I., Kleybanov M. S., Levit A. D. and Yakushin V. K., *Kratkie soobtscheniya po fizike*, № 5, 6–9 (1985) [in Russian].
34. Zhukova M. O., Grachev Ya. V., Tsyarkin A. N., Putilin S. E., Chegnov V. P., Chegnova O. I. and Besspalov V. G., *Optika i spectroscopiya* **124** (5), 654–656 (2018) [in Russian].
35. Melnikov A. A., Sigov A. S., Vorotilov K. A., Davydov A. A., Topalova L. I. and Zhavoronkov N. V., *Journal of Crystal Growth*, № 197, 666–669 (1999).
36. Dvoryankin V. F., Dvoryankina G. G., Kudryashov A. A., Petrov A. G., Davydov A. A., Zhavoronkov N. V. and Kapkin D. V., *Jurnal technicheskoi fiziki* **82** (10), 140–142 (2012) [in Russian].