

УДК 546.47/49-121:546.24
EDN: IOXZRUPACS: 81.05.Dz; 81.15.Gh; 73.40.-c;
61.72.sh; 82.80.Rt**Исследование профиля состава и электрофизических параметров
гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$** © А. В. Чилисов^{1*}, А. Н. Моисеев¹, В. С. Евстигнеев¹, М. Н. Дроздов², И. А. Денисов³,
А. А. Трофимов⁴¹ Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых Российской академии наук,
Н. Новгород, 603951 Россия
* E-mail: chil@ihps-nnov.ru² Институт физики микроструктур Российской академии наук, Н. Новгород, 603950 Россия³ АО «Гиредмет», Москва, 111524 Россия⁴ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 РоссияСтатья поступила в редакцию 21.05.2026; после доработки 15.07.2026; принята к публикации 22.10.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11., 1.4.1., 2.2.2.

Исследованы профиль элементного состава и электрофизические параметры гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$. В качестве летучих прекурсоров использовали высокочистые диметилкадмий, диэтилтеллур, диизопропилтеллур и металлическую ртуть. В подобранных условиях получены слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x = 0,26–0,32$ и толщиной 3–8 мкм. Концентрация и подвижность носителей заряда в слоях при температуре 77 К составляла $(5–400) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $150–400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, соответственно. Исследования методом вторично-ионной масс-спектрометрии подтвердили наличие в слоях областей с повышенным содержанием лития. Примесь лития является акцептором в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и может определять его тип проводимости и холловскую концентрацию носителей заряда. Наиболее вероятным источником лития в слоях является подложка $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$.

Ключевые слова: $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, КРТ, МOCVD, подложки $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$, холловские концентрация и подвижность носителей заряда в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, ВИМС, примесь лития, неоднородное распределение примеси.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-84-88

Введение

Эпитаксиальные слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) на различных подложках широко используются в современной ИК-технике для изготовления матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Наилучшие параметры слоев обеспечивают согласованные по параметру решетки подложки CdZnTe (3–5 % мол. ZnTe). Преимущества метода химического осаждения из паров металлорганических соединений (МOCVD) – производительность, технологи-

ческая гибкость, возможность получения сложных многослойных структур высокого качества с умеренной стоимостью – позволяют некоторым зарубежным фирмам использовать этот метод для серийного производства МФПУ на основе КРТ (Leonardo MW Ltd, Vigo System S. A.) [1, 2]. Среди недостатков подложек CdZnTe отмечаются их высокая стоимость, небольшие размеры, хрупкость и невоспроизводимость электрофизических свойств слоев КРТ на них, связанная с диффузией примесей из подложки [3, с. 80, 116].

Целью настоящей работы являлось получение MOCVD-методом на изотипных подложках CdZnTe нелегированных эпитаксиальных слоев КРТ и исследование профиля элементного состава по глубине гетероструктур.

Аппаратура, методика проведения экспериментов, методы исследования слоев

Осаждение слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ производили из паров высокочистых диметилкадмия, диэтилтеллура, диизопропилтеллура и ртути в потоке водорода при общем давлении 0,2 атм. и температуре 350–360 °С, как описано в [4]. Использовали экспериментальные подложки CdZnTe (211)В, изготовленные из монокристаллов АО «Гиредмет» и прошедшие химико-механическую полировку в АО «НПО «Орион». Поверхность подложек CdZnTe перед эпитаксией травили в полирующем растворе Br_2 (0,5 % об.) в CH_3OH , промывали в изопропиловом спирте, затем – в бидистиллированной воде. Использовали метиловый спирт ос. ч. («ХИММЕД») и изопропиловый спирт ос. ч. 11-5 (ЗАО «ЭКОС-1»).

Отжиг подложки для удаления поверхностного окисного слоя проводили при температуре 380 °С в потоке водорода.

Профили элементного состава по толщине структур исследовали методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Регистрацию спектров ВИМС производили на время-пролетном масс-спектрометре вторичных ионов TOF.SIMS-5. Для распыления образцов использовали ионы Cs^+ . Концентрационные профили были получены с использованием импульсного ионного пучка Bi_3^+ с энергией 25 кэВ. В силу отсутствия эталонов концентрация примесей определена в условных единицах. После анализа ВИМС глубина кратеров измерялась на оптическом профилометре TALYSURF CCI-2000.

Подвижность и концентрацию основных носителей заряда в слоях определяли из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау при комнатной температуре и температуре жидкого азота в магнитном поле с индукцией 1 Тл.

Результаты и их обсуждение

В работе были получены слои КРТ с $x = 0,26\text{--}0,32$ и толщинами в диапазоне от 3 до 8 мкм. Исследование холловской концентрации и подвижности основных носителей заряда слоев КРТ при комнатной температуре показало n -тип проводимости с $n = 7 \times 10^{16}\text{--}4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 5 \times 10^3\text{--}150 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. При температуре жидкого азота часть образцов показала p -тип проводимости с повышенной концентрацией дырок $p = (1\text{--}4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 150\text{--}200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, другая часть – p -тип проводимости с $p = (5\text{--}50) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 400\text{--}200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Результаты измерения концентрации носителей заряда в слоях КРТ указывают на возможность присутствия в некоторых из них неконтролируемых примесей.

Был исследован профиль элементного состава по толщине структур с высокой концентрацией носителей заряда $p_{77} \sim 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Показано, что в положительно заряженных ионах (рис. 1) на поверхности образца и в приповерхностной зоне, а также переходной области подложка-слой регистрируется высокая интенсивность вторичных ионов примеси лития, а в отрицательно заряженных ионах (рис. 2) в приграничной к переходу подложка-слой области в заметно меньшем количестве регистрируются примеси галогенов (F, Br, Cl), углерода, водорода, серы и кислорода.

Примесь лития в КРТ является быстродиффундирующим однозарядным акцептором [3, с. 320; 5–8] и скорее всего попадает в КРТ из подложки, хотя в объеме подложки содержание ее ниже предела определения TOF.SIMS-5 (порядка $5 \times 10^{16}\text{--}1 \times 10^{17} \text{ ат}\cdot\text{см}^{-3}$ или $(4\text{--}7) \times 10^{-4} \%$ ат. в данном режиме измерений). Примеси галогенов в КРТ являются однозарядными донорами [3, с. 322; 7, 8] и, видимо, попадают в слои с недостаточно отмытой после химико-механической полировки поверхности CdZnTe, поскольку полирование подложек велось с использованием водного раствора гипохлорита натрия. Примеси углерода, водорода и серы являются остатками полировальной смолы, а присутствие примесей фтора и кислорода – это следствие повышенного фона по этим элементам в камере прибора.

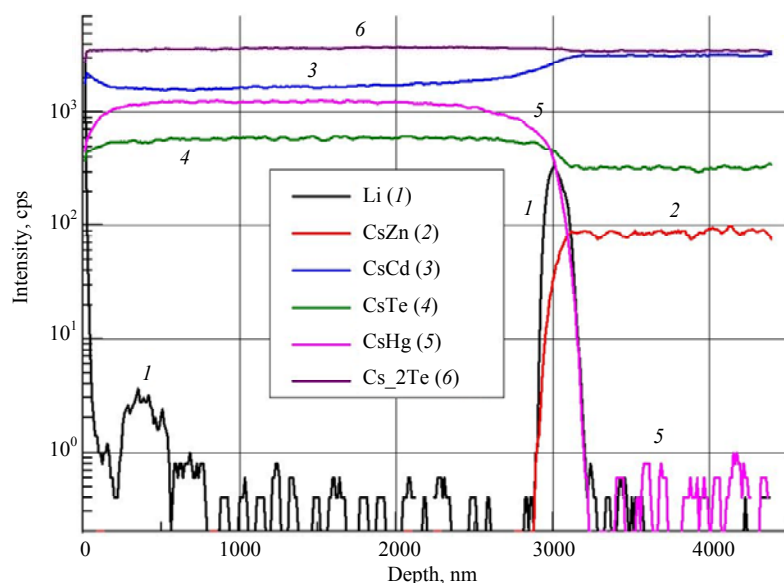


Рис. 1. ВИМС-профиль гетероструктуры $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te/Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ (211)B в положительных ионах

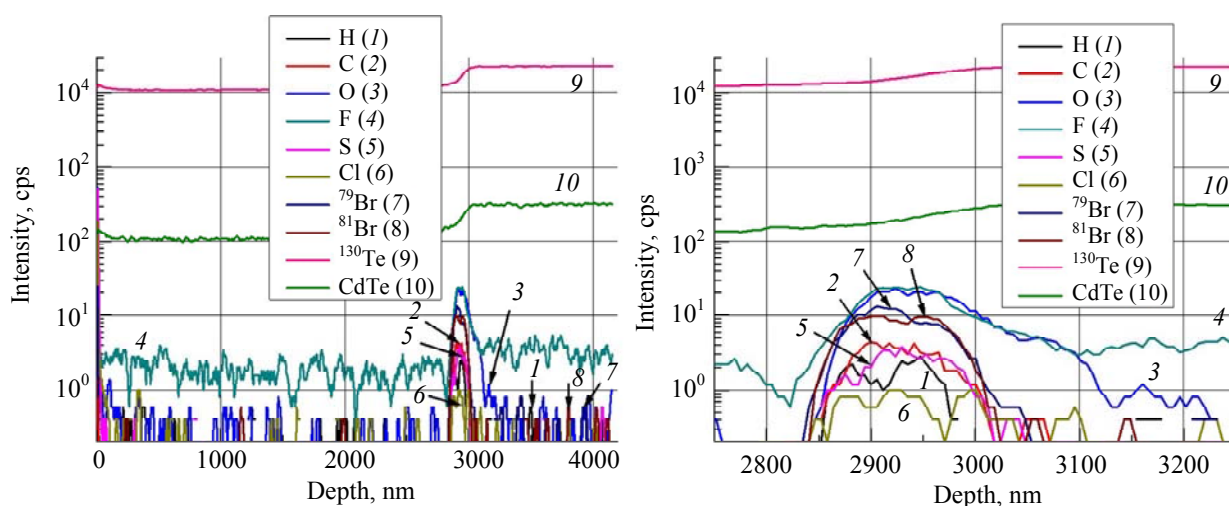


Рис. 2. ВИМС-профиль гетероструктуры $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te/Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ (211)B в отрицательных ионах. На рисунке справа более подробно показана область гетерограницы слой-подложка

Аналогичное поведение примеси лития в слоях КРТ отмечено в работе [9]. Нелегированные слои КРТ толщиной 8–18 мкм осаждали на подложках CdTe жидкофазной эпитаксией, профиль концентрации Li по толщине образцов изучали методом ВИМС. Источником загрязнения слоев КРТ примесью Li являлись подложки CdTe. Обнаружено неоднородное распределение Li в пленках КРТ. На поверхности образцов и границе раздела слой-подложка наблюдались «всплески» концентрации Li (до 10^3 – 10^4 усл. ед.). Отмечено, что примесь лития концентрировалась в областях слоя КРТ, богатых нарушениями структуры (поверхность слоя, граница раздела подложка-слой, включения, нарушения в результате ионной имплантации и т. д.). Авторы предложили уменьшать концентрацию Li в

структурах путем частичного травливания их поверхностного слоя. Холловская концентрация дырок в КРТ ($x = 0,3$) менялась на порядок (с $\sim 2 \times 10^{17}$ до $\sim 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) в зависимости от толщины химически травленного слоя (2–6 мкм), что согласовывалось с результатами ВИМС.

В работе [4] проводилось определение концентрации примесей Li и Cu в использованных подложках CdZnTe методом ICP AES. Из трех проанализированных подложек CdZnTe в двух из них обнаружены примеси Cu и Li на уровне $(1\text{--}2) \times 10^{-4}$ и $(2\text{--}6) \times 10^{-4} \%$ ат. соответственно, распределенных по объему образцов неоднородно. В третьей подложке эти примеси находились ниже предела обнаружения ($< 7 \times 10^{-5} \%$ ат.). Примесь меди в подложках CdZnTe в настоящей работе не обна-

ружена из-за недостаточной чувствительности метода ВИМС (порядка $n \times 10^{16}$ ат.·см⁻³ или $n \times 10^{-4}$ % ат.). Cu и Li являются быстродиффундирующими акцепторами в КРТ и часто лимитируют его электрофизические параметры [9, 10]. Суммарное содержание примесей Cu и Li в некоторых использованных нами подложках CdZnTe на уровне $(3-8) \times 10^{-4}$ % ат. при переходе их в слой КРТ может, в принципе, объяснить *p*-тип проводимости слоев КРТ с концентрацией акцепторов при 77 К на уровне конца 10^{16} – начала 10^{17} см⁻³.

Заключение

Методом ВИМС качественно подтверждено наличие в слоях КРТ областей с повышенным содержанием акцепторного лития, который может определять *p*-тип проводимости и холловскую концентрацию носителей заряда в слоях. Эта примесь распределена неоднородно по слою КРТ. Литий концентрируется прежде всего на границах раздела гетероструктуры (поверхность слоя, интерфейс слой-подложка) и частично может быть компенсирован в области, прилегающей к подложке, примесями доноров – галогенов, источником которых, скорее всего, является недостаточно отмытая поверхность полированных подложек. Наиболее вероятным источником лития в слоях КРТ являются подложки CdZnTe, в некоторых из которых методом ICP-AES эта примесь обнаружена на уровне $(2-6) \times 10^{-4}$ % ат.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР FFSR-2025-0004 при поддержке проекта РНФ 22 12 00298-П. В работе использовалось оборудование ЦКП ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baker I., Hipwood L., Maxey C., Weller H., Thorne P. / SPIE Newsroom. 2012. <https://doi.org/10.1117/2.1201211.004557>.
2. Madejczyk P., Gawron W., Keblowski A., Mlynarczyk K., Stepień D., et al. / J. Electron. Mater. 2020. Vol. 49. № 11. P. 6908–6916.
3. Mercury Cadmium Telluride. Growth, Properties and Applications / Ed. Capper P., Garland J. – John Wiley and Sons, Ltd., 2011.
4. Чилиасов А. В., Моисеев А. Н., Евстигнеев В. С., Костюнин М. В., Денисов И. А., Трофимов А. А. / Неорг. материалы. 2025. Т. 61. № 1–2. С. 26–32.
5. Wijewarnasuriya P. S., Sou I. K., Kim V. J., Mahavadi K. K., et al. / Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51. № 24. P. 2025–2027.
6. Boukerche M., Wijewarnasuriya P. S., Sivananthan S., Sou I. K., Kim V. J., et al. / J. Vac. Sci. Technol. 1988. Vol. A6. № 4. P. 2830–2833.
7. Capper P. / J. Cryst. Growth. 1982. Vol. 57. P. 280–299.
8. Chu J., Sher A. Device Physics of Narrow Gap Semiconductors. Microdevices: Physics and Fabrication Technologies. – New York: Springer, 2010. P. 10–13.
9. Bubulac L. O., Tennant W. E., Riedel R. A., Bajaj J., Edwall D. D. / J. Vac. Sci. Technol. 1983. Vol. 1. № 3. P. 1646–1650.
10. Tower J. P., Tobin S. P., Norton P. W., et al. / J. Electron. Mater. 1996. Vol. 25. № 8. P. 1183–1187.

PACS: 81.05Dz; 81.15Gh; 73.40.-c; 61.72sh; 82.80/Rt

Study of the composition profile and electrophysical parameters of Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te heterostructures

A. V. Chilyasov^{1*}, A. N. Moiseev¹, V. S. Evstigneev¹, M. N. Drozdov², I. A. Denisov³, and A. A. Trofimov⁴

¹ G. G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603951 Russia

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

² Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

³ GIREDMET R&P Association, Moscow, 111524 Russia

⁴ RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 21.05.2026; revised 15.07.2026; accepted 22.10.2026

The results of the study of the composition profile and electrophysical parameters of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ heterostructures are presented. High-purity dimethylcadmium, diethyltellurium, diisopropyltellurium and metallic mercury were used as volatile precursors. $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ layers with $x = 0.26\text{--}0.32$ and a thickness of 3–8 microns under selected growth conditions were obtained. The concentration and mobility of charge carriers in the layers was $p = (5\text{--}400) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $150\text{--}400 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ at 77 K, respectively. SIMS studies confirmed the presence of regions with elevated lithium content in the $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ layer. Lithium impurity acts as an acceptor in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ and can determine the conductivity type and the Hall concentration of charge carriers. The $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ substrate is the most likely source of lithium in the layers.

Keywords: $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, MOCVD, $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ substrates, Hall concentration and mobility of charge carriers in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, SIMS, lithium impurity, non-uniform distribution of impurities.

REFERENCES

1. Baker I., Hipwood L., Maxey C., Weller H., and Thorne P., SPIE Newsroom, 2012. <https://doi.org/10.1117/2.1201211.004557>
2. Madejczyk P., Gawron W., Kęblowski A., Młynarczyk K., Stepień D., et al., J. Electron. Mater. **49** (11), 6908–6916 (2020).
3. Mercury Cadmium Telluride. Growth, Properties and Applications / Ed. Capper P., Garland J. John Wiley and Sons, Ltd, 2011.
4. Chilysov A. V., Moiseev A. N., Evstigneev V. S., Kostunin M. V., Denisov I. A., and Trofimov A. A., Neorganicheskie Materialy **61** (1–2), 26–32 (2025) [in Russian]. <https://doi.org/10.31857/S0002337X25010039>
5. Wijewarnasuriya P. S., Sou I. K., Kim V. J., Mahavadi K. K., et al., Appl. Phys. Lett. **51** (24), 2025–2027 (1987).
6. Boukerche M., Wijewarnasuriya P. S., Sivananthan S., Sou I. K., Kim V. J., et al., J. Vac. Sci. Technol. **A6** (4), 2830–2833 (1988).
7. Capper P., J. Cryst. Growth. **57**, 280–299 (1982).
8. Chu J. and Sher A. Device Physics of Narrow Gap Semiconductors. Microdevices: Physics and Fabrication Technologies. New York: Springer, 2010, pp. 10–13.
9. Bubulac L. O., Tennant W. E., Riedel R. A., Bajaj J., and Edwall D. D., J. Vac. Sci. Technol. **1** (3), 1646–1650 (1983).
10. Tower J. P., Tobin S. P., Norton P. W., et al., J. Electron. Mater. **25** (8), 1183–1187 (1996).

Об авторах

Чилиясов Алексей Викторович, к.х.н., заместитель директора по научной работе, Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых Российской академии наук (603951, Н. Новгород, Россия). E-mail: chil@ihps-nnov.ru SPIN-код: 2387-8150, AuthorID: 571142

Моисеев Александр Николаевич, д.х.н., ведущий научный сотрудник, Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых Российской академии наук (603951, Н. Новгород, Россия). E-mail: moiseev@ihps-nnov.ru SPIN-код: 8769-3619, AuthorID: 43683

Евстигнеев Владимир Сергеевич, к.х.н., научный сотрудник, Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых Российской академии наук (603951, Н. Новгород, Россия). E-mail: evstigneev@ihps-nnov.ru SPIN-код: 6058-0596, AuthorID: 919903

Дроздов Михаил Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики микроструктур Российской академии наук (603950, Н. Новгород, Россия). E-mail: drm@ipmras.ru SPIN-код: 3461-5772, AuthorID: 28296

Денисов Игорь Андреевич, к.т.н., начальник лаборатории АО «Гиредмет» (111524, Москва, Россия). E-mail: iadenisov@rosatom.ru SPIN-код: 7026-1896, AuthorID: 134718

Трофимов Александр Александрович, к.т.н., начальник отдела развития материалов, АО «НПО «Орион» (111538, Москва, Россия). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356