

УДК 621.383.4/5
EDN: SLQRZVPACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw**Исследование температурных зависимостей вольтамперных характеристик фотодиодов CdHgTe, изготовленных на подложках GaAs, Si и CdZnTe**© Е. А. Маслюков^{1,2*}, К. О. Болтарь^{1,2}¹АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., Долгопрудный, 141701 Россия

* E-mail: masliukov.ea@phystech.edu

Статья поступила в редакцию 2.07.2026; после доработки 21.07.2026; принята к публикации 06.08.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Исследованы температурные зависимости вольтамперных характеристик (ВАХ) фотодиодных структур на основе соединений CdHgTe (КРТ). Установлено влияние материала подложки для эпитаксиального роста на механизмы переноса заряда в полупроводниковых структурах. Показано, что КРТ фотодиоды на подложках Si обладают увеличенным током генерации-рекомбинации, по сравнению с фотодиодами, выращенными на подложках CdZnTe (КЦТ) и GaAs.

Ключевые слова: фотодиодная структура, CdHgTe, КРТ, вольтамперная характеристика (ВАХ), темновой ток.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-7-12

1. Введение

Изготовление матричных фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона спектра с высокой квантовой эффективностью делает необходимым для разработчиков проектирование новых архитектур фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на основе твёрдых растворов теллурида кадмия-ртути [1–4].

Анализ ВАХ является мощным инструментом для понимания механизмов темнового тока, оптимизации конструкции приборов и прогнозирования показателей рабочих характеристик [5, 6]. Важной научно-технической задачей является изучение температурной зависимости ВАХ фотодиодов CdHgTe, поскольку рабочая температура криостатирования определяет соотношение различных механизмов переноса носителей заряда и, в конечном счёте, предельные характеристики ФПУ.

2. Описание образцов и математической модели

Проведено исследование трёх образцов фотодиодных структур КРТ состава $x = 0,39$ с размером областей p – n -переходов 6×6 мкм и шагом 30 мкм. Матрицы фотодиодов изготавливались в гетероструктурах КРТ, полученных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках теллурида кадмия-цинка (CdZnTe, КЦТ), кремния (Si) и арсенида галлия (GaAs) (табл. 1).

Таблица 1

Исследуемые образцы

Номер образца	Подложка	Метод эпитаксии
Образец 1	КТЦ	ЖФЭ
Образец 2	Si	МЛЭ
Образец 3	GaAs	МЛЭ

Измерены температурные зависимости темновых вольтамперных характеристик четырех тестовых фотодиодов из каждого образца, ниже представлены результаты измерений.

Экспериментальные данные аппроксимировались моделью тока фотодиода:

$$I = I_{off} + I_{01} \left[\exp \left(\frac{V - (I - I_{off}) R_s}{V_T} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{V - (I - I_{off}) R_s}{2V_T} \right) - 1 \right] + \frac{V - (I - I_{off}) R_s}{R_{sh}},$$

где R_s – последовательное сопротивление, R_{sh} – шунтирующее сопротивление, I_{off} – токовое смещение, I_{01} – диффузионно-дрейфовый темновой ток насыщения в обратной ветви ВАХ фотодиода, I_{02} – генерационно-рекомбинационный темновой ток насыщения в обратной ветви ВАХ фотодиода, V_T – тепловое напряжение на p – n -переходе, $V_T = \frac{kT}{q}$.

Варьируемые параметры модели: I_{01} , I_{02} , R_s , R_{sh} , I_{off} .

Данная модель позволяет разделить вклад диффузионно-дрейфовой и генерационно-рекомбинационной компонент темнового тока и отделить их от вклада последовательного сопротивления подложки и тока утечки через шунтирующее сопротивление. Отсутствие в модели составляющей туннельного тока обусловлено его малым вкладом в темновой ток фотодиодов КРТ состава $x = 0,39$ в исследуемом диапазоне напряжений от -400 мВ до 200 мВ [7].

3. Результаты

Обработка экспериментальных данных согласно токовой модели фотодиода позволила получить температурные зависимости следующих параметров: диффузионно-дрейфового тока насыщения в обратной ветви ВАХ фотодиода (рис. 1), генерационно-рекомбинационного тока насыщения (рис. 2).

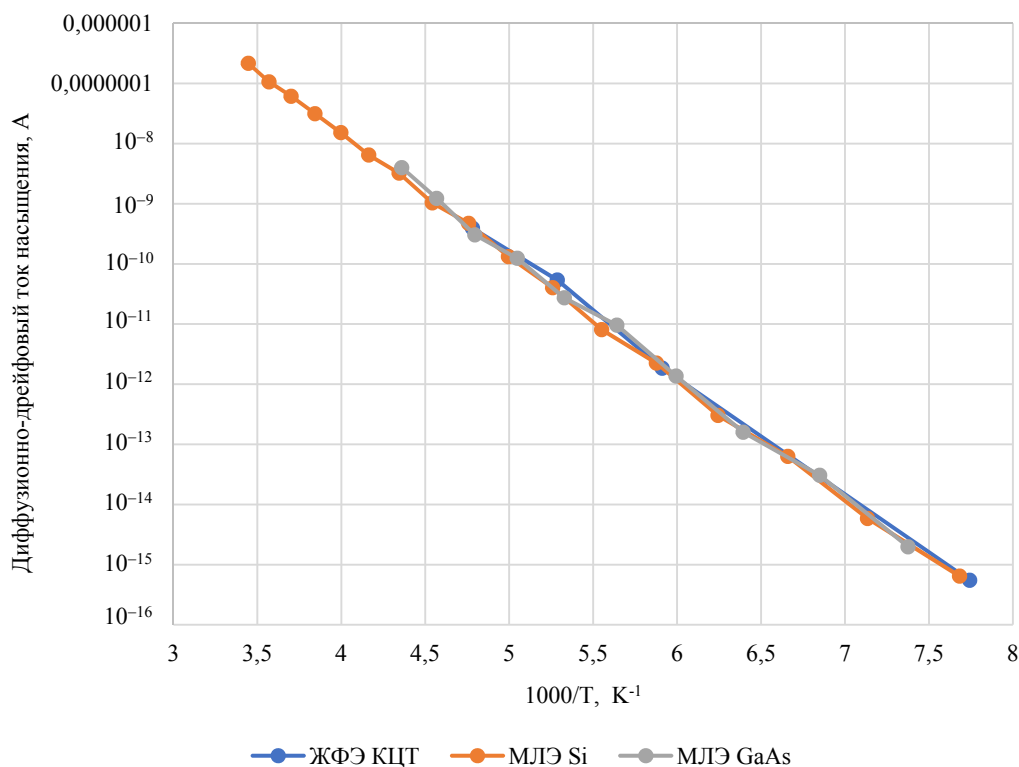


Рис. 1. Температурная зависимость параметра аппроксимации – диффузионно-дрейфового темнового тока насыщения в обратной ветви ВАХ фотодиода (I_{01})

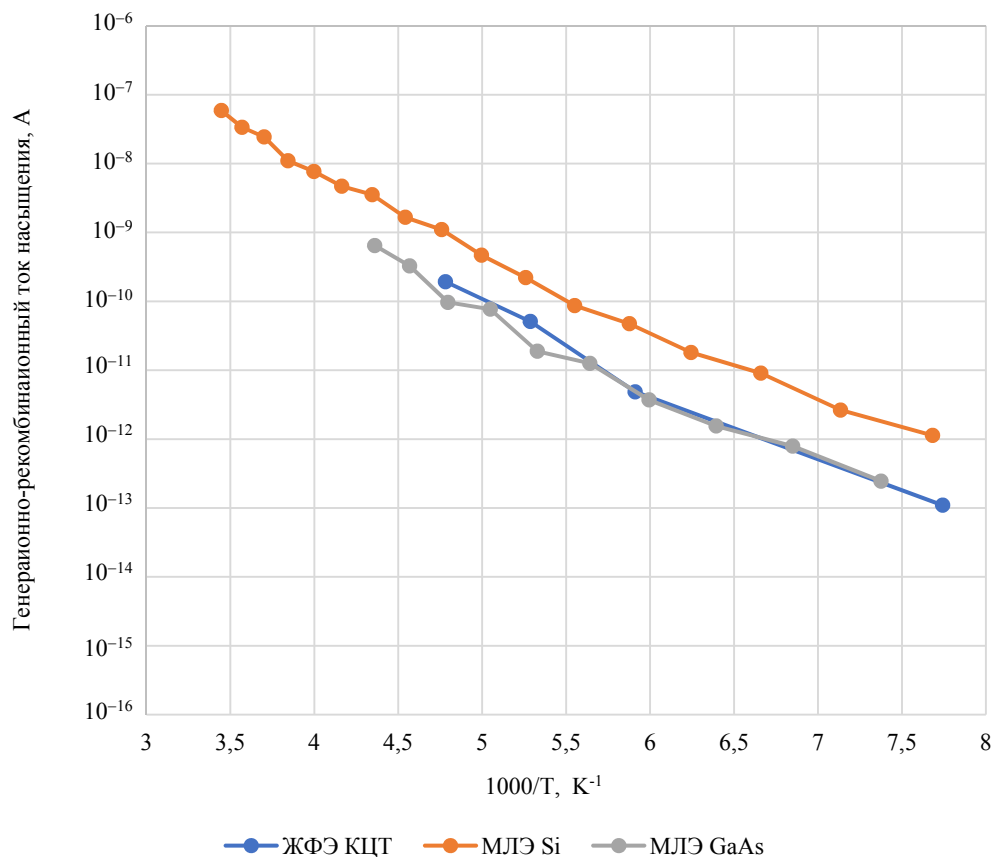


Рис. 2. Температурная зависимость параметра аппроксимации – генерационно-рекомбинационного темного тока насыщения в обратной ветви ВАХ фотодиода (I_{02})

Согласно классической монографии Зи [8] справедливы следующие оценки температурных зависимостей темного тока:

$$I_{01} \sim q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} * \frac{n_i^2}{N_d} \sim T^{3+\frac{\gamma}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (1)$$

где D_p – коэффициент диффузии дырок, τ_p – время жизни дырок, n_i – собственная концентрация носителей заряда, N_d – концентрация доноров в n -области, E_g – ширина запрещенной зоны, γ – постоянная, определяемая температурной зависимостью $\frac{D_p}{\tau_p} \sim T^\gamma$;

$$I_{02} \sim \frac{qn_i W}{\tau_e} \sim n_i \sim T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (2)$$

где W – ширина обедненного слоя, τ_e – эффективное время жизни носителей заряда.

Как видно из рис. 1 для всех трёх образцов диффузионно-дрейфовая компонента тем-

нового тока обладает одинаковой экспоненциальной температурной зависимостью. Такой результат ожидаемо вытекает из формулы (1), поскольку экспоненциальная часть формулы вносит больший вклад, чем степенная, а ширина запрещенной зоны образцов совпадает.

Генерационно-рекомбинационная компонента темного тока для всех образцов также имеет температурную зависимость, близкую к экспоненциальной, однако у образца 2 параметр I_{02} на порядок больше, чем у остальных образцов.

Согласно теории Шокли–Рида–Холла (ШРХ) увеличенный ток генерации-рекомбинации фотодиодов на подложке кремния может быть обусловлен большим количеством глубоких центров генерации-рекомбинации в середине запрещенной зоны из-за худшего структурного совершенства кристаллической решётки гетероструктур КРТ, выращенных на кремниевой подложке с большим рассогласованием постоянных кристаллических решёток. Рассогласование решёток и разница пространственных групп подложки и КРТ приводит к росту плотности дислокаций в эпитаксиаль-

ных слоях, которые служат центрами рекомбинации ШРХ. Характерные параметры кристаллических решеток, используемых в исследовании материалов, представлены в таблице 2.

Полный темновой ток насыщения в обратной ветви ВАХ, за вычетом вклада последовательного и шунтирующего сопротивлений, можно вычислить как сумму указанных выше токовых компонент

$$I_0 = I_{01} + I_{02}.$$

При рассмотрении зависимости I_0 от температуры (рис. 3.) можно заметить, что для рабочей температуры $T = 170$ К ($5,88$ 1/мК) темновой ток образца 2 (ГЭС КРТ на Si) больше на порядок темнового тока образцов 1 (ГЭС КРТ на CdZnTe) и 3 (ГЭС КРТ на GaAs). Для достижения такого же темнового тока, что у фотодиодов на подложках GaAs и CdZnTe, фотодиод на подложке кремния нужно охладить на 23 К ниже по сравнению с образцами фотодиодов 1 и 3.

Таблица 2

Параметры используемых в исследовании материалов

	Постоянная решётки	Тип решётки	Пространственная группа	Плотность дислокаций в КРТ
Si	5,431	алмазоподобная кубическая	Fd-3m	10^6 – 10^7
GaAs	5,653	цинковая обманка	F-43m	10^5 – 10^6
КТЦ	6,46–6,48	цинковая обманка	F-43m	10^4 – 10^5
КРТ	6,461–6,482	цинковая обманка	F-43m	–

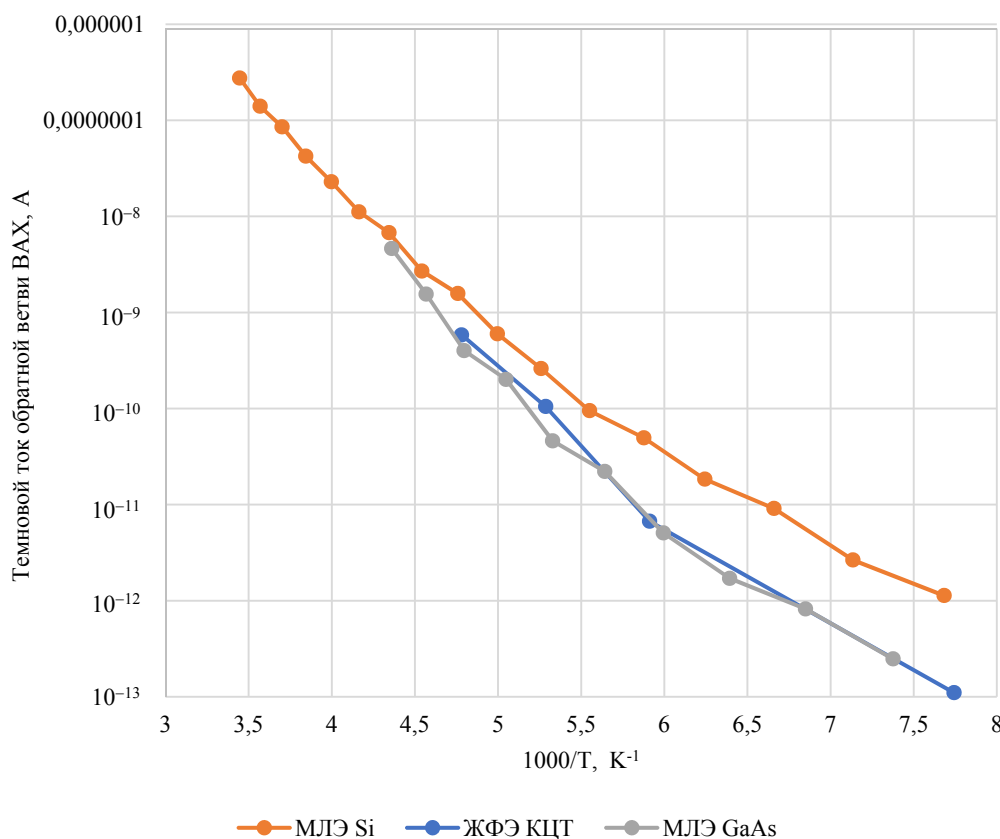


Рис. 3. Зависимость суммарного темнового тока I_0 от температуры для фотодиодных структур, изготовленных в гетероструктурах КРТ, выращенных на подложках Si, CdZnTe, и GaAs

4. Выводы

В диапазоне температур от 130 К до 290 К у фотодиодов КРТ на подложке Si ток насыщения генерации-рекомбинации и темновой ток при рабочем напряжении смещения на порядок выше по сравнению с фотодиодами на подложках GaAs и КЦТ. Таким образом, при рабочем напряжении обратного смещения для достижения того же значения темнового тока, что и у образцов 1 и 3, образец 2 необходимо охладить на 23 К ниже по сравнению с остальными образцами.

Сопоставляя представленные данные с известными параметрами кристаллических решёток исследуемых материалов, можно предположить, что природа различий заключена в наличии различной плотности дислокаций в материале КРТ, выращенного на согласованной по кристаллической структуре подложке CdZnTe и на альтернативных подложках Si и GaAs.

Данный вывод находит свое подтверждение в качественном анализе шунтирующего сопротивления, который показывает боль-

ший ток утечки у фотодиодов КРТ на подложках Si по сравнению с фотодиодами на подложках КЦТ и GaAs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boltar K. O., Burlakov I. D., Soliakov V. N., et al. Multi-row Focal Plane Array: Useful model. RU 122800 U1. 2012.
2. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M. / Rep. Prog. Phys. 2016. Vol. 79. P. 046501, (1–42).
3. Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Rutzinger S., Wendler J. / Infrared Technology and Applications XLII, edited by Bjørn F. Andresen, Gabor F. Fulop, Charles M. Hanson, Paul R. Norton / Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9819. P. 98191Y (1–18).
4. William L. A. Planar Double-Layer Heterojunction HgCdTe Photodiodes And Methods For Fabricating Same. Patent US 5,189,297. 1998.
5. Ferron A., Rothman J., Gravrand O. / Journal of Electronic Materials. 2013. Vol. 42. Iss. 11. P. 3303–3308.
6. Kopytko M., Rogalski A. / Sensors & Actuators: A. Physical. 2022. Vol. 339. P. 113511 (1–8).
7. Филиппов С. Н., Болтарь К. О. / Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 1(5). С. 52–66.
8. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн. / пер. с англ. В. А. Гергеля и др.; под ред. Р. А. Сурица. Кн. 1. – М.: Мир, 1984.

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

Researches of temperature dependencies in volt-ampere characteristics of CdHgTe photodiode grown on GaAs, Si, and CdZnTe substrates

E. A. Masliukov^{1,2*} and K. O. Boltar^{1,2}

¹ RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: masliukov.ea@phystech.edu

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russia

Received 2.07.2026; revised 21.07.2026; accepted 06.08.2026

The temperature dependences of CdHgTe photodiode current-voltage characteristics have been investigated. The influence of the substrate for epitaxy on the charge transfer mechanisms in semiconductor structures has been identified and studied. It has been revealed that CdHgTe photodiodes on Si substrates have an increased generation-recombination current compared to photodiodes grown on CdZnTe and GaAs substrates.

Keywords: photodiode structure, CdHgTe, volt-ampere characteristic (VAX), dark current.

REFERENCES

1. Boltar K. O., Burlakov I. D., Soliakov V. N., et al. Multi-row Focal Plane Array: Useful model. RU 122800 U1. 2012.

2. Rogalski A., Martyniuk P., and Kopytko M., Rep. Prog. Phys. **79**, 046501 (1–42) (2016).
3. Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Rutzinger S., and Wendler J. Infrared Technology and Applications XLII, edited by Bjørn F. Andresen, Gabor F. Fulop, Charles M. Hanson, Paul R. Norton. Proc. of SPIE **9819**, 98191Y (1–18) (2016).
4. William L. A. Planar Double-Layer Heterojunction CdHgTe Photodiodes And Methods For Fabricating Same: Patent US 5,189,297. 1998.
5. Ferron A., Rothman J., and Gravrand O., Journal of Electronic Materials **42** (11), 3303–3308 (2013).
6. Kopytko M. and Rogalski A., Sensors & Actuators: A. Physical **339**, 113511 (1–8) (2022).
7. Filippov S. N. and Boltar K. O., Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology **2** (1(5)), 52–66 (2010).
8. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices: In 2 Books. Translated from English by V. A. Gergel et al.; Edited by R. A. Suris. Book 1. Moscow: Mir, 1984.

Об авторах

Маслюков Евгений Анатольевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9); Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9).

Болтарь Константин Олегович, д.ф.-м.н., директор по прикладным разработкам, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9); Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: boltarko@yandex.ru
SPIN-код: 9249-2720, AuthorID: 171355