

07.2;13.1

## Влияние имплантации ионов $As^+$ и последующего отжига на электрические свойства приповерхностных слоев варизонных пленок $n-Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$

© А.В. Войцеховский<sup>1</sup>, С.Н. Несмелов<sup>1,¶</sup>, С.М. Дзядух<sup>1</sup>, В.С. Варавин<sup>2</sup>, С.А. Дворецкий<sup>1,2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>1,2</sup>, Г.Ю. Сидоров<sup>1,2</sup>, М.В. Якушев<sup>2</sup>, Д.В. Марин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

¶ E-mail: nesm69@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 октября 2020 г.

В окончательной редакции 7 ноября 2020 г.

Принято к публикации 9 ноября 2020 г.

Пленки  $n-Hg_{0.775}Cd_{0.225}Te$  с приповерхностными широкозонными слоями выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из Si (013). Для измерений адмиттанса структуры металл–диэлектрик–полупроводник изготовлены на основе исходной пленки HgCdTe, пленки после имплантации, а также пленки после имплантации и отжига. При помощи методик, учитывающих наличие варизонных слоев и медленных состояний, определены основные параметры приповерхностных слоев пленок HgCdTe после технологических процедур, применяемых при создании фотодиодов.

**Ключевые слова:**  $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$ , молекулярно-лучевая эпитаксия, ионная имплантация, МДП-структура, адмиттанс.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.04.50643.18605

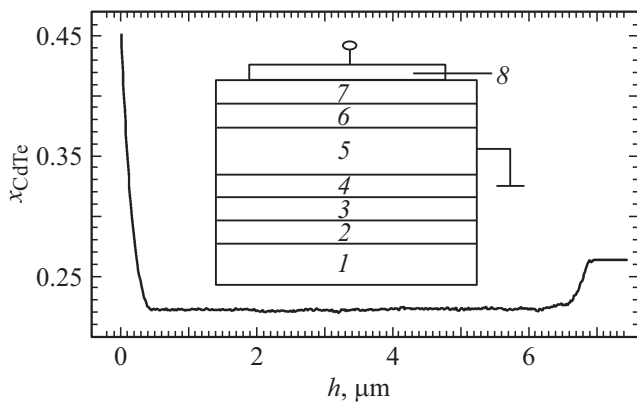
Твердый полупроводниковый раствор теллурида кадмия и ртути ( $Hg_{1-x}Cd_xTe$ , HgCdTe) активно используется при разработках высокочувствительных инфракрасных детекторов [1]. Для детектирования в длинноволновом окне прозрачности атмосферы (8–12  $\mu m$ , LWIR) изготавливаются матрицы  $p$  на  $n$  фотодиодов на основе  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $x = 0.21-0.23$ ) [2], в которых электронно-дырочный переход обычно формируется путем имплантации ионов  $As^+$  и последующего активационного отжига. Свойства пленок HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), на различных этапах формирования  $p-n$ -переходов исследовались, например, при помощи холловских и оптических измерений [3], вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС), электронной микроскопии [4]. Использование при таких исследованиях структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) осложняется наличием приповерхностных варизонных слоев [3] в пленках МЛЭ HgCdTe, что не позволяет применять в неизменном виде классические МДП-методики [5]. Другой особенностью МДП-структур на основе варизонного МЛЭ HgCdTe с диэлектриками  $SiO_2/Si_3N_4$  и  $Al_2O_3$  является значительный гистерезис вольт-фарадных характеристик (ВФХ), связанный с перезарядкой медленных состояний [6,7]. Цель настоящей работы — исследование влияния имплантации ионов  $As^+$  и последующего активационного отжига на свойства приповерхностного слоя варизонных пленок МЛЭ HgCdTe с использованием измерений адмиттанса тестовых МДП-структур с диэлектриком  $Al_2O_3$ .

Пленки  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  для исследований выращивались методом МЛЭ на подложках из Si (013). С обеих

сторон рабочего слоя из  $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$  формировались варизонные слои с повышенным содержанием CdTe. Распределение состава по толщине пленки контролировалось *in situ* при помощи эллипсометрии (рис. 1). При выращивании в пленки HgCdTe вводилась донорная примесь индия. Выращенная пластина была разделена на три части, одна из которых не подвергалась никаким технологическим процедурам (образец А), во вторую часть имплантировались ионы  $As^+$  с энергией ионов 200 keV и флюенсом  $10^{14} cm^{-2}$  (образец В), для третьей части после имплантации проводился двухстадийный отжиг (образец С). Первая стадия отжига, которая необходима для активации внедренной примеси As и аннигиляции радиационных дефектов, осуществлялась в насыщенных парах ртути в течение 2 h при температуре 360°C. Вторая стадия, целью которой являлся отжиг возникших на первой стадии вакансий ртути и восстановление свойств базовой области, проводилась при 220°C на протяжении 24 h.

На основе трех частей пленки HgCdTe создавались тестовые МДП-структуры с диэлектриком  $Al_2O_3$ , нанесенным при помощи плазменного атомно-слоевого осаждения [8]. Схема расположения слоев в изготовленных МДП-структурах показана на вставке к рис. 1, где введены следующие обозначения: 1 — подложка Si, 2 — буферный слой из ZnTe, 3 — буферный слой из CdTe, 4 — нижний варизонный слой, 5 — рабочий слой  $Hg_{0.775}Cd_{0.225}Te$ , 6 — нижний варизонный слой, 7 — диэлектрический слой  $Al_2O_3$ , 8 — индиевый полевой электрод.

Измерения адмиттанса МДП-структур проводились при помощи автоматизированной установки на основе



**Рис. 1.** Распределение состава по толщине пленки HgCdTe. На вставке — схема расположения слоев в МДП-структуре. Пояснение в тексте.

измерителя иммитанса Agilent E4980A и неоптического криостата Janis. За прямое направление развертки напряжения принимается изменение напряжения смещения от отрицательных значений в сторону положительных, а за обратное — от положительных значений к отрицательным.

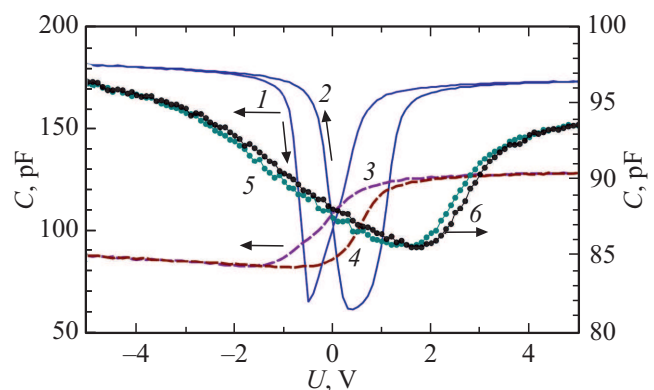
ВФХ МДП-структур *A*, *B* и *C*, измеренные при температуре 77 K на частоте 1 kHz, показаны на рис. 2. Видно, что ВФХ для структуры *A* имеют низкочастотный вид, а для структуры *B* — высокочастотный вид, что связано с уменьшением после имплантации скорости генерации дырок в области пространственного заряда (ОПЗ). Вид ВФХ образца *C* типичен для МДП-структуры с полупроводником *p*-типа, что связано с активацией имплантированной примеси мышьяка после отжига. Гистерезис ВФХ для структуры *C* невелик, что вызвано влиянием отжига на плотность медленных состояний.

Значения концентрации легирующей примеси в приповерхностных слоях пленок HgCdTe ( $N_d$  — для структур *A* и *B*,  $N_a$  — для структуры *C*) определены по значению емкости в минимуме ВФХ [9] с учетом того, что ВФХ МДП-структур на основе HgCdTe с варизонными слоями в широком диапазоне условий являются высокочастотными относительно времени перезарядки поверхностных состояний. Расчет идеальных ВФХ проводился путем численного решения уравнения Пуассона с учетом реального распределения состава в приповерхностном слое [10]. Расчетная низкочастотная ВФХ для МДП-структуры *A* показана на рис. 3, *a*. Значения сопротивления объема эпитаксиальных пленок ( $R_{bulk}$ ) и дифференциального сопротивления ОПЗ в режиме сильной инверсии ( $R_{SCR}$ ) найдены из измерений адмиттанса в режимах обогащения и сильной инверсии [11]. Плотность медленных состояний ( $N_{ss}$ ) определялась по сдвигу напряжения плоских зон при прямой и обратной развертках напряжения. Установлено, что после имплантации концентрация донорных центров значительно возрастает (см. таблицу) из-за подлегирующего действия междоузельной ртути. Значение  $R_{SCR}$  после

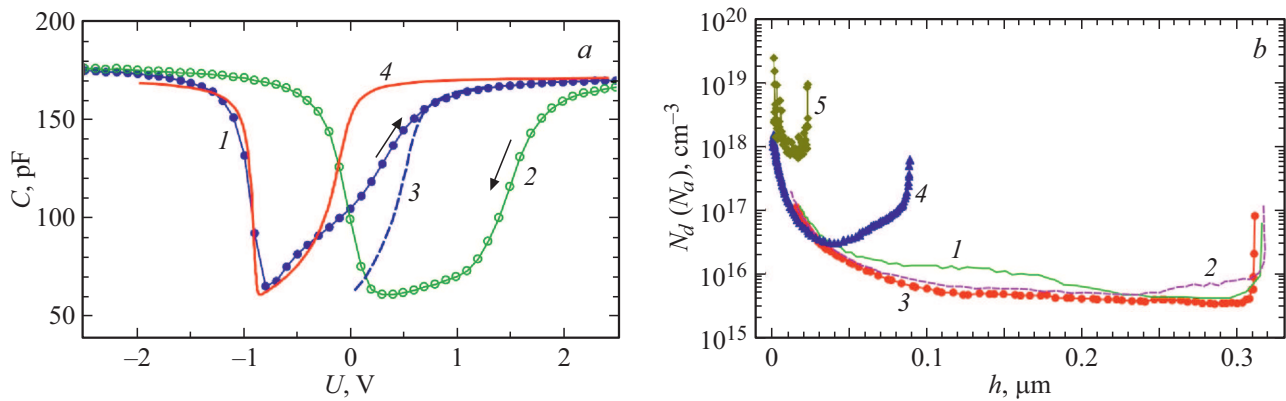
имплантации значительно увеличилось, что может быть связано с низкой концентрацией дефектов в приповерхностном слое. После активационного отжига определена высокая концентрация акцепторных центров ( $\sim 1.9 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) в приповерхностном слое, а значения  $R_{SCR}$  стали очень малыми, что связано с высокой скоростью генерации в ОПЗ. В работе [12] описаны результаты исследований свойств варизонных пленок  $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  после ионной имплантации  $\text{As}^+$  с аналогичными режимами, полученные с использованием методов Холла, ВИМС и оптического отражения. Средняя концентрация имплантированных ионов мышьяка в приповерхностном слое толщиной 350 nm, определенная при помощи ВИМС, составила около  $2.7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , что с учетом значения концентрации акцепторных центров ( $\sim 1.9 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), найденного из МДП-измерений, свидетельствует о высокой степени активации мышьяка (70%).

Для построения концентрационных профилей в приповерхностном слое согласно методике [13] нельзя использовать ВФХ, измеренные традиционным способом (при постоянной скорости изменения смещения). Наклоны таких ВФХ в обеднении при прямой и обратной развертке напряжения различны из-за перезарядки медленных состояний (рис. 3, *a*), что приводит к различиям концентрационных профилей (кривые 1 и 2 на рис. 3, *b*). Поэтому для исключения влияния гистерезиса использована методика со сложной формой развертки напряжения [14,15]. Значения концентраций легирующих центров, найденные из рис. 3, *b*, хорошо согласуются со значениями  $N_d$  ( $N_a$ ), определенными выше по минимуму ВФХ.

Таким образом, изучено влияние ионной имплантации  $\text{As}^+$  и активационного отжига на электрические свойства приповерхностных слоев варизонных пленок МЛЭ HgCdTe. Показано, что используемые МДП-методики должны учитывать наличие приповерхностных варизонных слоев и медленных поверхностных состояний. После имплантации мышьяка концентрация донорных центров возрастает при удалении от границы раздела на глубину до 90 nm и достигает значения  $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .



**Рис. 2.** ВФХ МДП-структур *A* (1, 2), *B* (3, 4) и *C* (5, 6), измеренные при прямой (1, 3, 5) и обратной (2, 4, 6) развертке напряжения.



**Рис. 3.** *a* — ВФХ МДП-структуры *A*, измеренные при 77 К на частоте 20 кГц традиционным способом при прямой (1) и обратной (2) развертке напряжения, при сложной форме развертки напряжения (3); идеальная низкочастотная ВФХ (4). *b* — координатные зависимости концентрации легирующих центров в образцах *A* (1–3), *B* (4), *C* (5). Кривые 1 и 2 построены на основе ВФХ, показанных кривыми 1 и 2 на части *a*, кривые 3–5 — на основе измерений при сложной форме развертки.

Параметры МДП-структур, найденные на основе измерений адмиттанса при 77 К

Образец	$N_{ss}, \text{cm}^{-2}$	$N_d (N_a), \text{cm}^{-3}$	$R_{SCR}, \text{k}\Omega$	$R_{bulk}, \Omega$
A	$4.7 \cdot 10^{11}$	$3.9 \cdot 10^{15}$	4.0	264
B	$3.6 \cdot 10^{11}$	$1.0 \cdot 10^{17}$	164.1	186
C	$8.9 \cdot 10^{10}$	$1.87 \cdot 10^{18}$	< 0.1	340

Скорость генерации дырок в ОПЗ снижается после имплантации, что свидетельствует о низкой концентрации дефектов в приповерхностном слое. После отжига изменяется тип проводимости в приповерхностном слое МЛЭ HgCdTe при концентрации акцепторных центров  $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , а скорость генерации в ОПЗ значительно уменьшается.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0721-2020-0038).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A. Rogalski, *Infrared and terahertz detectors* (Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019).
- [2] N. Baier, C. Cervera, O. Gravrand, L. Mollard, C. Lobre, G. Destefanis, G. Bourgeois, J.P. Zanatta, O. Boulade, V. Moreau, *J. Electron. Mater.*, **44** (9), 3144 (2015). DOI: 10.1007/s11664-015-3851-0
- [3] I.I. Izhnin, A.V. Voitsekhovskiy, A.G. Korotaev, O.I. Fitsych, O.Y. Bonchuk, H.V. Savitskiy, K.D. Mynbaev, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzkiy, N.N. Mikhailov, M.V. Yakushev, R. Jakiela, *Infrared Phys. Technol.*, **81**, 52 (2017). DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.006
- [4] C. Shi, C. Lin, Y. Wei, L. Chen, M. Zhu, *Appl. Opt.*, **55** (34), D101 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.00D101
- [5] E.H. Nicollian, J.R. Brews, *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. (Wiley-Interscience, N.Y., 1982).
- [6] V.N. Ovsyuk, A.V. Yartsev, *Proc. SPIE*, **6636**, 663617 (2007). DOI: 10.1117/12.742637
- [7] A.P. Kovchavtsev, G.Y. Sidorov, A.E. Nastovjak, A.V. Tsarenko, I.V. Sabinina, V.V. Vasilyev, *J. Appl. Phys.*, **121** (12), 125304 (2017). DOI: 10.1063/1.4978967
- [8] Д.В. Горшков, Г.Ю. Сидоров, И.В. Сабинаина, Ю.Г. Сидоров, Д.В. Марин, М.В. Якушев, *Письма в ЖТФ*, **46** (15), 14 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.15.49741.18347
- [9] A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh, *J. Phys. Chem. Solids*, **102**, 42 (2017). DOI: 10.1016/j.jpcs.2016.10.015
- [10] А.В. Войцеховский, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух, *Прикладная физика*, № 3, 15 (2018).
- [11] A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh, *Opto-Electron. Rev.*, **22** (4), 236 (2014). DOI: 10.2478/s11772-014-0198-7
- [12] A.G. Korotaev, I.I. Izhnin, K.D. Mynbaev, A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh, O.I. Fitsych, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzkiy, N.N. Mikhailov, M.V. Yakushev, O.Yu. Bonchuk, H.V. Savitskiy, Z. Swiatek, J. Morgiel, *Surf. Coat. Technol.*, **393**, 125721 (2020). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125721
- [13] W. van Gelder, E.H. Nicollian, *J. Electrochem. Soc.*, **118** (1), 138 (1971). DOI: 10.1149/1.2407927
- [14] T. Nakagawa, H. Fujisada, *Appl. Phys. Lett.*, **31** (5), 348 (1977). DOI: 10.1063/1.89695
- [15] A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzkiy, N.N. Mikhailov, M.V. Yakushev, G.Y. Sidorov, *Vacuum*, **158**, 136 (2018). DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.09.054