Физическая электроника

Научная статья
УДК 538.971:621.315.592
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19208

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Ar^+ И Cd^+ НА СОСТАВ И ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕЛЛУРИДА ЦИНКА

Ж. Б. Хужаниёзов [1] ✉, Б. Е. Умирзаков [1], Д. А. Ташмухамедова [1], В. В. Лобода [2], А. А. Абдувайитов [1]

[1] Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан;

[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ KhujaniyozovJB@mail.ru

Аннотация. Влияние ионной имплантации Ar^+ и Cd^+, а также последующего термического отжига было изучено на монокристаллическом образце ZnTe(111) с применением комплекса методов спектроскопии: ультрафиолетовой фотоэлектронной, поглощения света в УФ-. ИК-, видимой областях и Оже-электронной. Результаты исследований показали, что бомбардировка поверхности ионами Ar^+ и Cd^+ с энергией E_0 = 1 кэВ до достижения дозы насыщения $D_{sat} = (6-8)\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ приводит к разрушению кристаллической структуры ионно-имплантированных слоев и, как следствие, к металлизации поверхности. В частности, после имплантации ионами Cd^+ и последующего отжига при температуре T = 850 K наблюдается формирование гомогенной сплошной пленки $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ толщиной 30 – 35 Å, что свидетельствует о перераспределении компонентов и образовании нового фазового состояния на поверхности ZnTe. Результаты исследования тонких пленок $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ демонстрируют наличие двух отчетливо выраженных максимумов в спектрах валентных электронов, соответствующих энергиям связи −1,4 эВ и −5,2 эВ.

Ключевые слова: гетероструктура, фотоэлектронная спектроскопия, имплантация, молекулярно-лучевая эпитаксия, доза насыщения, тонкая пленка, теллурид цинка

Для цитирования: Хужаниёзов Ж. Б., Умирзаков Б. Е., Ташмухамедова Д. А., Лобода В. В., Абдувайитов А. А. Влияние имплантации ионов Ar^+ и Cd^+ на состав и электронную структуру монокристаллического теллурида цинка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 2. С. 84–97. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19208

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Хужаниёзов Ж. Б., Умирзаков Б. Е., Ташмухамедова Д. А., Лобода В. В., Абдувайитов А. А., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Original article
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19208

THE INFLUENCE OF Ar^+ AND Cd^+ ION IMPLANTATION ON THE COMPOSITION AND ELECTRONIC STRUCTURE OF MONOCRYSTALLINE ZINC TELLURIDE

J. B. Khujaniyozov [1]✉, B. E. Umirzakov [1], D. A. Tashmukhamedova [1], V. V. Loboda [2], A. A. Abduvayitov [1]

[1] Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov, Tashkent, Republic of Uzbekistan;

[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ KhujaniyozovJB@mail.ru

Abstract. The effect of Ar^+ and Cd^+ ion implantation and subsequent thermal annealing has been studied on a single-crystal ZnTe (111) using a whole range of spectroscopy methods: ultraviolet photoelectron one (UPS), light absorption one, and Auger electron one (AES). The results showed that bombardment of the surface with Ar^+ and Cd^+ ions with an energy of $E_0 = 1$ keV until a saturation dose of $D_{sat} = (6-8)\cdot10^{16}$ cm^{-2} was reached resulted in the destruction of the crystal structure of the ion-implanted layers and, as a consequence, in surface metallization. In particular, after implantation with Cd^+ ions and subsequent annealing at $T = 850$ K, the formation of a homogeneous continuous $Zn_{0.5}Cd_{0.5}Te$ film 30–35 Å thick was observed, which indicated the redistribution of components and the formation of a new phase state on the ZnTe surface. The results of the study of $Zn_{0.5}Cd_{0.5}Te$ thin films demonstrate the presence of two clearly defined maxima in the valence electron spectra corresponding to binding energies of −1.4 eV and −5.2 eV.

Keywords: heterostructure, photoelectron spectroscopy, implantation, molecular beam epitaxy, saturation dose, thin film, zinc telluride

For citation: Khujaniyozov J. B., Umirzakov B. E., Tashmukhamedova D. A., Loboda V. V., Abduvayitov A. A., The influence of Ar^+ and Cd^+ ion implantation on the composition and electronic structure of monocrystalline zinc telluride, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and. 19 (2) (2026) 84–97. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19208

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/ Mathematics licenses/by-nc/4.0/)

Введение

Полупроводники $A^{II}B^{VI}$, такие как теллуриды кадмия и цинка (CdTe, ZnTe), долгое время служили модельными объектами для фундаментальных исследований, однако их практическое применение оставалось сравнительно ограниченным, сводясь преимущественно к использованию в рентгеновских детекторах и люминофорах. Несмотря на такое недоразумение, эти соединения отличаются высоким структурным совершенством и обладают уникальными оптическими характеристиками.

В последние годы соединения $A^{II}B^{VI}$ привлекают все большее внимание как перспективные материалы для солнечной энергетики [1 – 5]. Благодаря высокому квантовому выходу в зеленой области спектра, они представляются весьма многообещающими для эффективного преобразования солнечной энергии в электрическую.

Одним из факторов, сдерживающих широкое применение гетероструктур на основе CdTe и ZnTe, выступает значительное несоответствие параметров их кристаллических решеток. Возникающие при этом механические напряжения на границах раздела могут приводить к деградации и разрушению структур. Несовпадение решеток также вносит неопределенности в точность определения величины разрыва зон, что, в частности, проявляется в существенном разбросе (до ±10% от средней ширины запрещенной зоны) в опубликованных данных о разрыве зон в валентной зоне гетероструктур CdTe/ZnTe [6 – 9].

© Khujaniyozov J. B., Umirzakov B. Y., Tashmukhamedova D. A., Loboda V. V., Abduvayitov A. A., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Результаты исследований гетероструктур, сформированных на основе бинарных полупроводников [10 – 18], в частности системы CdTe/ZnTe при идентичной номинальной толщине узкозонного слоя, демонстрируют существенное расхождение в энергетическом положении и форме полосы излучения. Это обстоятельство указывает на ярко выраженную зависимость реальной структуры тонкого слоя от специфических технологических условий его формирования. Для системы CdTe/ZnTe указанный аспект приобретает особую значимость в контексте разработки квантовых точек CdTe, легированных прецизионно контролируемым количеством магнитных ионов Mn^{2+} [19].

В гетероэпитаксиальных структурах ключевую роль играют напряжения, возникающие в процессе роста, и их последующая релаксация. Эти процессы оказывают определяющее влияние на кристаллическое совершенство структуры, которое, в свою очередь, влияет непосредственно на электронные характеристики материала и, как следствие, на параметры изготавливаемых инфракрасных детекторов [20 – 28]. Для прецизионной оценки остаточных деформаций, возникающих в объеме материала, используется широкий спектр оптических методов [24] и рентгеновской дифракции [25, 26], позволяющих получать ценную информацию о механическом состоянии структуры.

В работе [28] представлено экспериментальное исследование слабых деформаций в приповерхностных областях аморфных слоев хрома Cr и теллурида ртути-кадмия HgCdTe с использованием инновационного нуль-метода. В результате исследования получены количественные данные, демонстрирующие зависимость амплитуды сигнала второй гармоники от величины приложенных напряжений. Кроме того, проведены прецизионные измерения остаточных напряжений в поверхностном слое многослойной структуры HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, что позволило установить параметры ее напряженного состояния.

В последние годы метод низкоэнергетической ионной имплантации зарекомендовал себя как эффективный инструмент для целенаправленного изменения состава, структуры и свойств материалов разнообразной природы [29 – 37], открывая новые перспективы в материаловедении и инженерии поверхности.

В настоящей работе представлено исследование модификации поверхности монокристаллических пленок теллурида цинка ZnTe посредством имплантации ионов аргона Ar^+ и кадмия Cd^+, сопряженной с термическим воздействием.

Цель настоящего исследования – детальное изучение механизмов, приводящих к изменениям элементного состава и характеристик электронной структуры пленок теллурида цинка в результате комплексной обработки.

Методика эксперимента

Исследование образцов пленок проводилось с использованием сверхвысоковакуумной установки (рис. 1), состоящей из двух функционально разделенных отсеков.



Рис. 1. Экспериментальная установка

В первом блоке осуществлялись процедуры отжига, термического окисления и ионной бомбардировки; эти процедуры подготавливали материалы к дальнейшему анализу.

Второй блок служил для детального анализа состава, плотности состояний валентных электронов, зонно-энергетической структуры, а также эмиссионных и оптических характеристик образцов.

В качестве объектов исследования были использованы тщательно отполированные и подвергнутые химическому травлению монокристаллические образцы ZnTe(111) и эпитаксиальные пленки ZnTe/Si(111) *n*-типа, полученные методом магнетронного напыления.

Эксперименты проводились в условиях высокого вакуума (достигал значения 10^{-7} Па), с применением целого комплекса спектроскопических методов: Оже-электронной (ОЭС), ультрафиолетовой

фотоэлектронной (УФЭС) спектроскопии, оптической спектроскопии поглощения электромагнитного излучения УФ-, ИК- и видимого диапазонов, а также спектроскопии упруго-отраженных электронов (СУОЭ).

Профили распределения атомов по глубине определяли методом ОЭС в сечетании с прецезионным послойными травлением поверхности ионами Ar^+ с энергией E_0, варьируемой в пределах от 2 до 3 кэВ. Перед процедурой ионной имплантации образцы ZnTe подвергались дегазации путем прогрева до температуры $T = 900$ K в течение трех часов. Этот процесс сочетался с травлением поверхности ионами Ar^+ при давлении 10^{-7} Па для удаления поверхностных загрязнений.

После завершения очистки, Оже-пики, соответствующие углероду C, сере S и кислороду O, полностью исчезали, что свидетельствовало о высокой степени чистоты поверхности. При этом концентрации атомов цинка Zn и теллура Te стабилизировались в диапазоне ~ 49 – 50 ат.%, что указывало на восстановление стехиометрии материала.

Имплантация ионов кадмия Cd^+ осуществлялась при энергии $E_0 = 1 – 3$ кэВ с использованием дозы $D = 8 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$; это значение соответствовало дозе насыщения, при которой дальнейшее повышение дозы не приводило к существенным изменениям свойств материала. Ионы Cd^+ генерировались путем электронной бомбардировки, которая обеспечивала высокую точность контроля параметров ионного пучка.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Рис. 2 демонстрирует изменение поверхностной концентрации цинка в соединении ZnTe под воздействием бомбардировки ионами аргона Ar^+ с энергией $E_0 = 1$ кэВ при комнатной температуре.

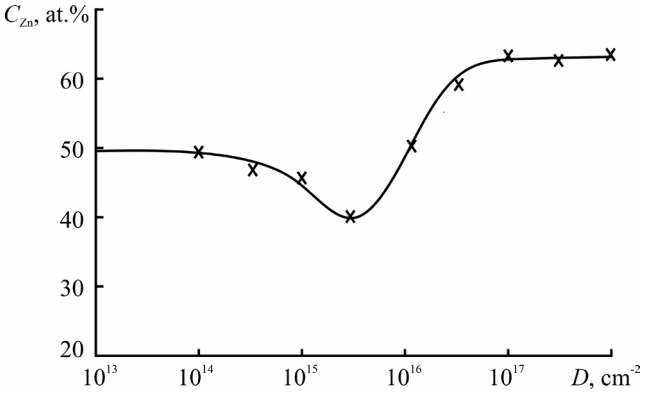


Рис. 2. Зависимость поверхностной концентрации цинка в пленке ZnTe/Si(111) от дозы облучения после ее бомбардировки ионами Ar^+ с энергией $E_0 = 1$ кэВ (температура комнатная)

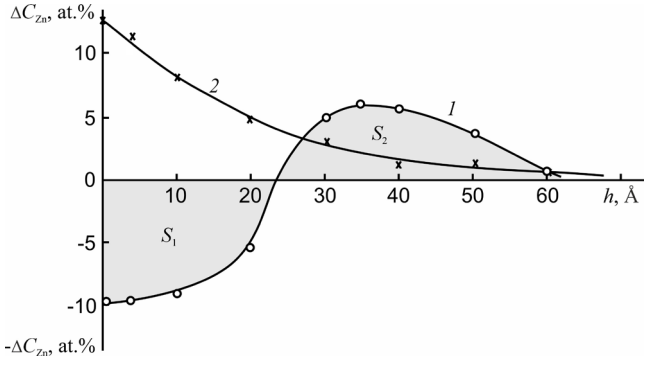


Рис. 3. Зависимости величины ΔC_{Zn} от глубины пленки ZnTe/Si(111), бомбардированной ионами Ar^+ с энергией $E_0 = 1$ кэВ и дозами облучения D, см$^{-2}$: $5 \cdot 10^{15}$ (кривая *1*) и $6 \cdot 10^{16}$ (кривая *2*)

Видно, что вплоть до дозы облучения $D = 2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ поверхностная концентрация цинка C_{Zn} остается практически неизменной, свидетельствуя о стабильности поверхности материала в начальной стадии ионного воздействия. Затем, в диапазоне доз от $2 \cdot 10^{14}$ до $5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$, наблюдается снижение концентрации цинка на 7 – 8 ат.%. Последующее повышение дозы ионов приводит к росту концентрации C_{Zn}, достигающей 65 – 66 ат.% при $D = (4 – 6) \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$. После этого дальнейшее наращивание дозы облучения приводит к стабилизации концентрации цинка, которая далее практически не претерпевает изменений.

С целью детального анализа модификации поверхностной концентрации атомов цинка и теллура в процессе бомбардировки ионами аргона, была исследована зависимость от глубины пленки h отклонения концентрации цинка ΔC_{Zn} от стехиометрического состава при двух различных значениях дозы облучения: $5 \cdot 10^{15}$ и $6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ (рис. 3).

Из данных рис. 3 следует, что при дозе $D = 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ наблюдается снижение концентрации цинка до 8 – 10 ат.% в самых поверхностных слоях, которое остается практически неизменным до глубины $h = 5 – 6$ Å. В интервале значений $h = 10 – 40$ Å отмечается увеличение ΔC_{Zn} примерно до 6 ат.%. При дальнейшем

увеличении глубины, величина ΔC_{Zn} монотонно снижается, стремясь к нулю при h = 60 – 65 Å, что свидетельствует о восстановлении стехиометрического состава, характерного для теллурида цинка. Убывание концентрации цинка в интервале значений h = 0 – 20 Å, вероятно, обусловлено диффузией атомов Zn вглубь мишени или (с меньшей вероятностью) диффузией атомов Te к поверхности (если принять во внимание существенную разницу в массах атомов Te и Zn). Можно видеть, что площади S_1 и S_2 под кривой *1* различаются незначительно, что позволяет предположить отсутствие заметного испарения атомов Zn (а также Te). При более высоких дозах бомбардировки ионами ($D \geq 6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, см. кривую *2* на рис. 3) значение ΔC_{Zn} в приповерхностных слоях пленки возрастает до 10 – 12 ат.%, затем монотонно снижается с ростом величины h. На глубине 50 – 60 Å значение ΔC_{Zn} составляет около 1 – 2 ат.%, а при $h \geq 60$ Å оно практически не изменяется.

По всей вероятности, при высоких дозах ионной бомбардировки, наряду с диффузией атомов теллура к поверхности, происходит их десорбция из поверхностных слоев, что приводит к «металлизации» поверхностных слоев пленки ZnTe. При этом ее поверхностные слои полностью разупорядочиваются.

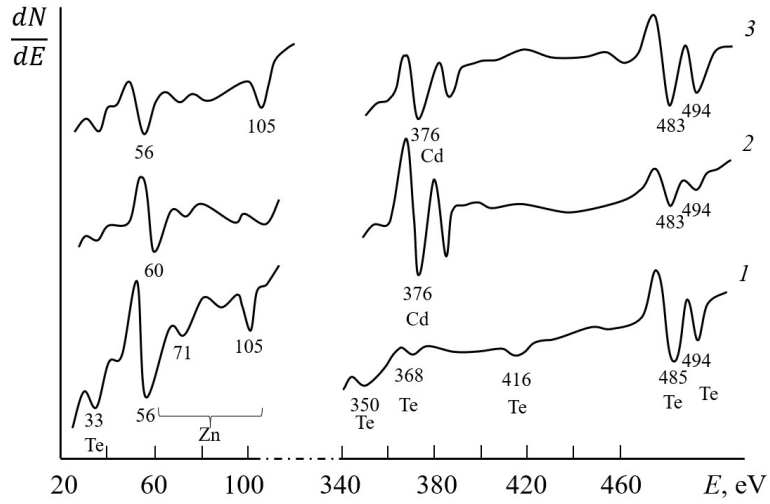


Рис. 4. Оже-спектры образцов на разных этапах исследования:
исходный образец ZnTe(111) (кривая *1*); подвергнутый имплантации ионами Cd^+ (E_0 = 1 кэВ, $D_s = 8 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$) (2); после ионной имплантации и 40-мин. отжига при температуре T = 850 K (*3*). Числа отражают позиции пиков (эВ)

На рис. 4 представлены Оже-спектры образцов ZnTe, подвергшегося имплантации ионами Cd^+ с энергией E_0 = 1 кэВ и дозой $D_s = 8 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, зарегистрированные до и после отжига при температуре T = 850 K в течение 40 мин. Известно, что анализ изменения положения и формы низкоэнергетических пиков, обусловленных участием электронов валентной зоны, позволяет получать информацию об образовании новых соединений.

Концентрацию атомов C_x в приповерхностных слоях можно оценить на основе информации об интенсивности высокоэнергетических пиков, по следующей формуле [38]:

$$C_x = \frac{I_x / S_x}{\sum_{i=1} \frac{I_i}{S_i}},$$

где I_i, I_x – интенсивности Оже-пиков; S_i, S_x – коэффициенты Оже-чувствительности.

Для определения концентрации атомов элементов использовались Оже-пики с значениями энергии

Zn: E = 994 эВ; Te: E = 483 эВ; Cd: E = 376 эВ.

В Оже-спектре неимплантированной пленки ZnTe отчетливо прослеживаются характерные Оже-пики цинка Zn и теллура Te. Количественный анализ спектров показал, что поверхностная концентрация цинка составляет приблизительно 49 ат.%, а теллура – около 51 ат.%. Процесс имплантации ионов Cd^+ приводит к разложению соединения ZnTe с одновременным внедрением атомов Cd в решетку ZnTe. После ионной имплантации в Оже-спектре наблюдаются выраженные пики цинка и кадмия, в то время как интенсивность пиков теллура значительно снижается, вплоть до полного исчезновения малоинтенсивных пиков, что свидетельствует о преимущественной десорбции атомов теллура с поверхности образца. При этом наблюдается смещение основного низкоэнергетического пика (56 эВ), характерного для ZnTe, на 4 эВ в область более высоких энергий. Это обусловлено тем, что имплантация ионов Cd^+ индуцирует разложение исходного образца ZnTe и резкое снижение концентрации теллура; в результате энергия пика приближается к значению, свойственному чистому цинку. Анализ, проведенный с учетом высокоэнергетических пиков полного Оже-спектра, выявил, что концентрации атомов кадмия, цинка и теллура на поверхности составляют значения приблизительно 48, 40 и 12 ат.%, соответственно.

После отжига при температуре 850 K в течение 40 мин, положение пика 60 эВ вновь смещается в сторону более низких энергий. Концентрации атомов кадмия и цинка снижаются до 23 – 25 ат.%, а теллура возрастает до 50 – 52 ат.%, что указывает на формирование монокристаллической пленки с приблизительным составом $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ (см. кривую *3* на рис. 4).

Исследование электронной структуры поверхностных слоев, включая плотность состояний электронов и параметры энергетических зон, было выполнено с применением методов ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и спектроскопии поглощения света [39].

На рис. 5 представлены спектры фотоэлектронов, полученные при энергии фотонов $h\nu = 10{,}8$ эВ для образца ZnTe, имплантированного ионами Cd^+ с энергией $E_0 = 1$ кэВ и дозой $D = 8 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, до и после термической обработки при температуре $T = 850$ K.

В спектре чистого ZnTe отчетливо прослеживаются два выраженных пика при энергиях связи приблизительно –1,4 и –5,2 эВ, а также характерная особенность при $E_{SS} = -0{,}5$ эВ, предположительно связанная с существованием поверхностных состояний. Подробные сведения о возможных механизмах формирования данных пиков представлены в табл. 1.

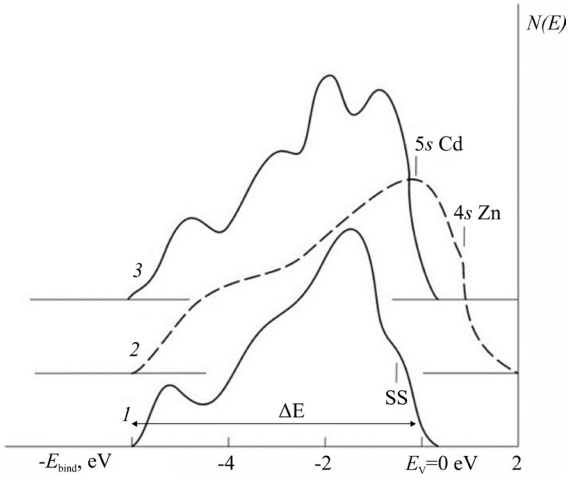


Рис. 5. Результаты регистрации УФЭС на разных этапах исследования:
исходный образец ZnTe(111) (кривая *1*); подвергнутый имплантации ионами Cd^+ ($E_0 = 1$ кэВ, $D_s = 8 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$) (*2*); после ионной имплантации и 40-мин. отжига при температуре $T = 850$ K (*3*); SS (Surface state) – поверхностное состояние

Анализ данных в табл. 1 показывает, что спектральные пики чистого теллурида цинка обусловлены возбуждением электронов из гибридизированных состояний 4*s* Zn + 5*p* Te и 5*s*-состояний Te. Ионная имплантация приводит к смещению начала спектра в область более высоких энергий, достигая значения около 1,8 эВ. Кроме того, отмечается увеличение ширины спектра (ΔE), исчезновение основных пиков, характерных для ZnTe (111), и появление новых пиков, которые, по всей видимости, связаны с образованием включений Zn, Cd и их соединений (см. табл. 1). При этом положение энергетических уровней потолка валентной зоны E_v и уровня Ферми E_F полностью совпадают, что указывает на металлический характер ионно-легированных слоев. В спектре пленки $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$, полученной в результате термической обработки ионно-имплантированного теллурида цинка при температуре $T = 850$ K, выявляется характерная спектральная особенность,

Таблица 1

Этапы УФЭС-исследований образцов, подвергнутых бомбардировке ионами Cd^+ и отжигу, а также трактовка результатов

Этап	Образец	Результат УФЭС	
		E_{bind}, эВ	Механизм формирования пика
1. Исходный	ZnTe (111)	–0,5	Поверхностное состояние (SS)
		–1,4	4*s* Zn + 5*p* Te
		–5,2	5*s* Te
2. Имплантация E_0 = 1 кэВ, $D_s = 8\cdot10^{16}$ см$^{-2}$	ZnTe	+0,2	5*s* Cd
		+0,8	4*s* Zn
		–3,8	5*s* Te
3. Отжиг при температуре T = 850 K	$Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$/ZnTe	–0,3	Поверхностное состояние (SS)
		–0,8	4*s* Zn + 5*p* Te
		–1,8	5*s* Cd + 5*p* Te
		–2,8	4*s* Zn + 5*p* Te
		–4,6	5*s* Te

сопровождаемая появлением четырех отчетливых пиков. Детальная интерпретация этих пиков также представлена в табл. 1. Важно отметить, что положение энергетического уровня E_v претерпевает сдвиг в сторону меньших энергий приблизительно на 2 эВ.

Ширина запрещенной зоны исследованных образцов оценивалась посредством анализа оптических спектров поглощения (пропускания).

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента пропускания света T_{ph} от энергии фотонов $h\nu$ для чистого ZnTe(111) и пленки $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$/ZnTe(111), полученной постимплантационным отжигом при T = 850 K. Анализ рис. 6 показывает, что коэффициент прохождения света в чистом образце ZnTe остается практически неизменным до значения энергии фотонов около 2,1 эВ, что свидетельствует об отсутствии заметного поглощения света в этой области спектра. В диапазоне энергий $h\nu$ = 2,1 – 2,3 эВ наблюдается резкое падение коэффициента пропускания до нулевого значения, обусловленное интенсивным поглощением света. Экстраполяция указанного отрезка кривой к оси $h\nu$ позволяет приближенно оценить ширину запрещенной зоны E_g. Аналогичным образом было найдено значение E_g для пленки $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$, которое составило примерно 1,75 эВ. Следует отметить, что во втором случае резкое снижение величины T_{ph} начинается уже при значении около 1,7 эВ, однако полное поглощение света достигается лишь при ~2,2 эВ. По-видимому, ультратонкие пленки (менее 40 Å) обладают некоторой остаточной прозрачностью даже при значениях $h\nu > E_g$, пропуская свет с малой интенсивностью.

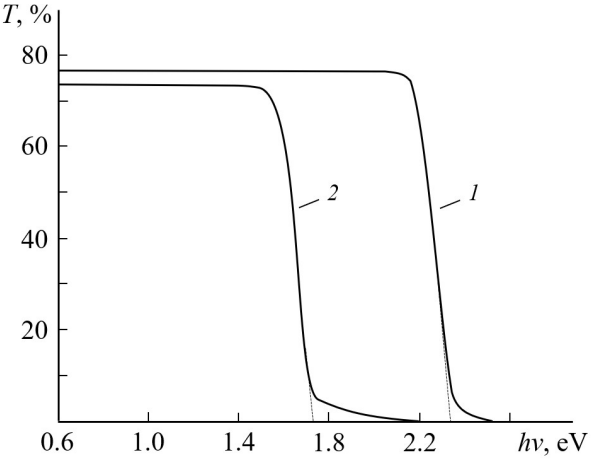


Рис. 6. Зависимости коэффициента пропускания света от энергии фотонов для исходного образца ZnTe (кривая *1*) и финального $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$/ZnTe(111) (кривая *2*). Толщина пленок 30 – 35 Å, температура комнатная

В табл. 2 представлены зонно-энергетические и оптические параметры, полученные на основе анализа спектров фотоэлектронов и поглощения света для исходного и финального образцов (ZnTe и $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$/ZnTe, соответственно).

Таблица 2

Зонно-энергетические и оптические параметры пленок, полученные из УФЭС и оптических спектров пропускания

Объект исследования	Зонно-энергетические параметры, эВ			Оптические параметры при $h\nu$ = 1,2 эВ		
	E_v	E_g	χ	R	T_{ph}	K
ZnTe	5,30	2,35	2,95	22	78	0
$Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$	5,35	1,75	3,60	26	74	

Обозначения: E_v – энергия уровня потолка валентной зоны, E_g – ширина запрещенной зоны; χ – энергия сродства к электрону; R, T_{ph}, K – коэффициенты отражения, пропускания и поглощения света, соответственно; $h\nu$ – энергия фотона.

Значение энергии E_v определялась как разность между энергией фотона и шириной спектра фотоэлектронов:

$$E_v = h\nu - \Delta E.$$

Оптические параметры образцов установлены при энергии фотонов $h\nu$ = 1,2 эВ. Анализ данных в табл. 2 показал существенные различия в зонно-энергетических и оптических параметрах пленки $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ и подложки ZnTe. В частности, ширина запрещенной зоны для трехкомпонентной пленки составляет приблизительно 1,75 эВ, тогда как для подложки этот параметр равен 2,35 эВ. Последующие исследования продемонстрировали, что при повышении температуры отжига до 900 K значение x в системе $Zn_{1-x}Cd_x$ достигало 0,6, а при температуре 950 K – увеличивалось до 0,8. При дальнейшем повышении температуры в диапазоне 1000 – 1050 K происходило полное испарение атомов кадмия из пленки. Варьирование энергии бомбардировки ионами Cd^+ в пределах от 1 до 10 кэВ даст возможность контролируемо изменять значения толщины пленки $Zn_{1-x}Cd_xTe$ от 30 – 35 Å до 900 – 1000 Å, что открывает заманчивые перспективы для точной настройки свойств материала.

Заключение

В настоящей работе впервые детально исследовано воздействие бомбардировки поверхности пленки теллурида цинка ZnTe низкоэнергетическими ионами аргона Ar^+ и кадмия Cd^+ на изменение элементного состава и электронную структуру приповерхностных слоев объекта.

Обнаружено, что облучение ионами Ar^+ в низкодозовом диапазоне ($D \le 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$) приводит к обогащению поверхности ZnTe атомами теллура, в то время как при увеличении дозы ($D \ge 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$) наблюдается преобладание атомов цинка, а имплантация ионов Cd^+ вызывает аккумуляцию атомов цинка и кадмия на поверхности ZnTe.

Путем имплантации ионов Cd^+ в монокристаллический ZnTe с последующим контролируемым отжигом при температуре 850 K, сформированы тонкие пленки твердого раствора $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ с равномерной толщиной в пределах значений 30 – 35 Å.

Методами фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопии оптического пропускания изучены распределение плотности состояний валентных электронов, параметры энергетических зон и оптические характеристики полученных тонких пленок $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$. Установлено, что на спектрах валентных электронов $Zn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ имеется два максимума плотностных состояний при энергиях связи –1,4 и –5,2 эВ. Эти максимумы отражают особенности распределения электронной плотности в валентной зоне исследуемого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Iniewski K.** CdTe and CdZnTe materials: Material properties and applications. Cham, Switzerland: Springer, 2024. 259 p.

2. **Suthar D., Chuhadiya S., Sharma R., Himanshu, Dhaka M. S.** An overview on the role of ZnTe as an efficient interface in CdTe thin film solar cells: A review // Materials Advances. 2022. Vol. 3. No. 22. Pp. 8081–8107.

3. **Zhao Y., Jia Z., Lin Q.** Optoelectronic properties and charge carrier dynamics of polycrystalline ZnTe thin films // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2025. Vol. 16. No. 24. Pp. 5979–5985.

4. **Yilmaz S., Başol B. M., Olğar M. A., Bayazıt T., Küçükömeroğlu T., Bacaksız E.** Comparative analysis of chloride-treated ZnTe films in photodetector devices // Materials Science in Semiconductor Processing. 2025. Vol. 198. 1 November. P. 109733.

5. **Zhang L., Liu C., Yang Q., Cui L., Zeng Y.** Growth and characterization of highly nitrogen doped ZnTe films on GaAs (001) by molecular beam epitaxy // Materials Science in Semiconductor Processing. 2015. Vol. 29. January. Pp. 351–356.

6. **Эргашов Е. С., Ташмухамедова Д. А., Джурабекова Ф. Г., Умирзаков Б. Е.** Влияние микронеоднородностей поверхности на состав и электронные свойства пленок CdTe/Mo(111) // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 2. Ст. 157.

7. **Bagaev V. S., Zaytsev V. V., Kalinin V. V., Oktyabrskii S. R., Plotnikov A. F.** Excitonic luminescence of CdTe and $Cd_{0.87}Zn_{0.13}Te$ submonolayers in ZnTe films grown by molecular beam epitaxy // Solid State Communications. 1993. Vol. 88. No. 10. Pp. 777–780.

8. **Karczewski G., Maćkowski S., Kutrowski M., Wojtowicz T., Kossut J.** Photoluminescence study of CdTe/ZnTe self-assembled quantum dots // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 74. No. 20. Pp. 3011–3013.

9. **Moger S. N., Mahesha M. G.** Investigation on ZnTe/$Cd_xZn_{1-x}Te$ heterostructure for photodetector applications // Sensors and Actuators A: Physical. 2020. Vol. 315. 1 November. P. 112294.

10. **Hernández C. V.** Introduction to Raman spectroscopy and its applications. Cham, Switzerland: Springer, 2025. 244 p.

11. **Kapitonov A. M., Woggon U., Kayser D., Hommel D., Itoh T.** Luminescence of epitaxial submonolayer CdSe nanostructures in ZnSe // Journal of Luminescence. 2005. Vol. 112. No. 1–4. Pp. 177–180.

12. **Kim J. S., Kim H. M., Park H. L., Choi J. C.** Growth and optical characterization of single quantum well structure of submonolayer ZnS/ZnTe // Solid State Communications. 2006. Vol. 137. No. 3. Pp. 115–119.

13. **Umirzakov B. E., Tashmukhamedova D. A., Boltaev E. U., Dzhurakhalov A. A.** Obtaining of epitaxial films of metal silicides by ion implantation and molecular beam epitaxy // Materials Science and Engineering: B – Solid State Materials for Advanced Technology. 2003. Vol. 101. No. 1–3. Pp. 124–127.

14. **Kryshtab T., Andraca J. A., Borkovska L. V., Korsunska N. O., Venger Ye. F., Sadofyev Yu. G.** Effect of CdTe monolayer insertion on CdZnTe/ZnTe quantum well characteristics // Microelectronics Journal. 2008. Vol. 39. No. 3–4. Pp. 418–422.

15. **Fan J., Ouyang L., Liu X., Ding D., Furdyna J. K., Smith D. J., Zhang Y. H.** Growth and material properties of ZnTe on GaAs, InP, InAs and GaSb (001) substrates for electronic and optoelectronic device applications // Journal of Crystal Growth. 2011. Vol. 323. No. 1. Pp. 127–131.

16. **Умирзаков Б. Е., Донаев С. Б.** Создание ионной бомбардировкой упорядоченных зародышей для получения наноразмерных структур Si на поверхности пленок CaF_2 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 7. С. 70–73.

17. **Agekyan V., Chukeev M., Karczewski G., Serov A., Filosofov N., Reznitski A.** Exciton spectra and energy transfer in CdTe/ZnTe double quantum wells grown by atomic-layer epitaxy // Semiconductors. 2019. Vol. 53. No. 16. Pp. 2060–2063.

18. **Абдуваитов А. А., Болтаев Х. Х., Умирзаков Б. Е., Ташмухамедова Д. А., Абдурахманов Г.** Изучение изменения состава поверхности CdTe при имплантации ионов O^{2+} и последующего отжига // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2024. Т. 88. № 11. С. 1830–1834.

19. **Sawicki K., Malinowski F. K., Galkowski K., Jakubczyk T., Kossacki P., Pacuski W., Suffczinski J.** *Single-color*, *in situ* photolithography marking of individual CdTe/ZnTe quantum dots containing a single Mn^{2+} ion // Applied Physics Letters. 2015. Vol. 106. No. 1. P. 012101.

20. **Samin A. J., Petrosky J. C.** An analysis of point defects in ZnTe using density functional theory calculations // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 921. 15 November. P. 166017.

21. **Рыжков М. С., Козлов Д. А., Худайбердиев Д. А., Квон З. Д., Михайлов Н. Н.** Интерференционный транспорт в двумерном топологическом изоляторе в CdHgTe квантовой яме // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 117. № 1–2 (1). С. 50–54.

22. **Щербаков И. П., Дунаев А. А., Еронько С. Б., Чмель А. Е.** Спектроскопическое исследование примесных и собственных нарушений строения кристаллитов в керамике ZnTe при механической обработке // Письма в ЖТФ. Т. 47. № 4. С. 26–28.

23. **Тарасов А. С., Михайлов Н. Н., Дворецкий С. А., Менщиков Р. В., Ужаков И. Н., Кожухов А. С., Федосенко Е. В., Терещенко О. Е.** Получение атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей эпитаксиальных пленок CdTe для последующей эпитаксии // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55. № 9. С. 748–753.

24. **Martinez A. M., Giudici P., Trigubo A. B., D'Elia R., Heredia E., Ramelli R., Gonzalez R., Aza F., Gilabert U.** Crystalline quality, composition homogeneity, tellurium precipitates/inclusions concentration, optical transmission, and energy band gap of Bridgman grown single-crystalline $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \le x \le 0.1$) // Materials. 2021. Vol. 14. No. 15. P. 4207.

25. **Дворецкий С. А., Ступак М. Ф., Михайлов Н. Н., Макаров С. Н., Елесин А. Г., Верхогляд А. Г.** Исследование кристаллического состояния слоев молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs методом генерации второй гармоники // Физика и техника полупроводников. 2022. Т. 56. № 8. С. 780–787.

26. **Ступак М. Ф., Михайлов Н. Н., Дворецкий С. А., Якушев М. В., Икусов Д. Г., Макаров С. Н., Елесин А. Г., Верхогляд А. Г.** Возможности характеризации кристаллических параметров структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ на подложке из GaAs методом генерации на отражение второй гармоники зондирующего излучения // Физика твердого тала. 2020. Т. 62. № 2. С. 252–259.

27. **Ушаков В. В., Клевков Ю. В.** Микрофотолюминесценция нелегированного монокристаллического теллурида цинка, полученного неравновесными парофазными методами // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 9. С. 1029–1033.

28. **Ступак М. Ф., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Макаров С. Н., Елесин А. Г.** Измерение локальных напряжений в поверхностных слоях многослойных структур нуль-методом с использованием фазового синхронизма // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. № 1. С. 32–35.

29. **Chemam R., Bouabellou A., Grob J. J., Muller D., Schmerber G.** ZnTe nanoparticles formed by ion implantation in a SiO_2 layer on silicon // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2004. Vol. 216. February. Pp. 116–120.

30. **Umirzakov B. E., Tashmukhamedova D. A., Ruzibaeva M. K., Djurabekova F. G., Danaev S. B.** Investigation of change of the composition and structure of the CaF_2/Si films surface at the low-energy bombardment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2014. Vol. 326. 1 May. Pp. 322–325.

31. **Исаханов З. А., Мухтаров З. Э., Умирзаков Б. Е., Рузибаева М. К.** Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии // Журнал технической физики. 2011. Т. 8. № 4. С. 117–120.

32. **Hassan A. M., Diab F., Kotp E. F., Al-Kashef G., Shaaban E. R., Metawa A. E.** Implantation of Cu onto ZnTe thin film using plasma focus device for optoelectronic applications // Optical Materials. 2021. Vol. 117. July. P. 111182.

33. **Abduvayitov A. A., Tashmukhamedova D. A., Umirzakov B. E., Khujaniyozov J. B., Bekpulatov I. R., Loboda V. V.** Effect of argon ion bombardment on the composition, electronic structure and physical properties of cadmium fluoride // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2024. Vol. 17. No. 3. Pp. 87–96.

34. **Ташмухамедова Д. А.** Исследование состава и электронной структуры границы раздела $CoSi_2$/Si // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2006. Т. 70. № 8. С. 1228–1230.

35. **Mahmood W., Awan S.U., Din A.U., et al.** Pronounced impact of *p*-type carriers and reduction of bandgap in semiconducting ZnTe thin films by Cu doping for intermediate buffer layer in heterojunction solar cells // Materials. 2019. Vol. 12. No. 8. P. 1359.

36. **Донаев С. Б., Ташатов А. К., Умирзаков Б. Е.** Влияние бомбардировки ионами Ar^+ на состав и структуру поверхности нанопленок $CoSi_2$/Si(111) // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 4. С. 95–98.

37. **Абдувайитов А. А., Болтаев Х. Х., Розиков Г. А.** Изучение состава неконтролируемых примесей и профиля их распределения на границе раздела Ni–CdS // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 10. С. 48–51.

38. **Ghosh K., Ghorai G., Sahoo P. K.** Cathodoluminescence and structural properties of ZnTe nanocrystals synthesized from Te/ZnO thin films // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 960. 15 October. P. 170655.

39. **Davis L. E., MacDonald N. C., Palmberg P. W., Riach G. E., Weber R. E.** Handbook of Auger electron spectroscopy. Second edition. Minnesota (USA): Physical Electronics Industry Inc., 1976. 252 p.

40. **Болтаев Х. Х., Ташмухамедова Д. А., Умирзаков Б. Е.** Состав и электронные свойства наноразмерных фаз и нанопленок силицидов металлов, созданных методом ионной имплантации в сочетании с отжигом // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 4. С. 24–29.

REFERENCES

1. **Iniewski K.,** CdTe and CdZnTe materials: Material properties and applications, Springer, Cham, Switzerland, 2024.

2. **Suthar D., Chuhadiya S., Sharma R., et al.,** An overview on the role of ZnTe as an efficient interface in CdTe thin film solar cells: A review, Mater. Adv. 3 (22) (2022) 8081–8107.

3. **Zhao Y., Jia Z., Lin Q.,** Optoelectronic properties and charge carrier dynamics of polycrystalline ZnTe thin films, J. Phys. Chem. Lett. 16 (24) (2025) 5979–5985.

4. **Yilmaz S., Başol B. M., Olğar M. A., et al.,** Comparative analysis of chloride-treated ZnTe films in photodetector devices, Mat. Sci. Semicond. Process. 198 (1 Nov) (2025) 109733.

5. **Zhang L., Liu C., Yang Q., et al.,** Growth and characterization of highly Nitrogen doped ZnTe films on GaAs (001) by molecular beam epitaxy, Mat. Sci. Semicond. Process. 29 (Jan) (2015) 351–356.

6. **Ergashov Y. S., Tashmukhamedova D. A., Djurabekova F. G., Umirzakov B. E.,** Effect of surface microroughness on the composition and electronic properties of CdTe/Mo(111) films, Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. 80 (2) (2016) 138.

7. **Bagaev V. S., Zaytsev V. V., Kalinin V. V., et al.,** Excitonic luminescence of CdTe and $Cd_{0.87}Zn_{0.13}Te$ submonolayers in ZnTe films grown by molecular beam epitaxy, Solid State Commun. 88 (10) (1993) 777–780.

8. **Karczewski G., Maćkowski S., Kutrowski M., et al.,** Photoluminescence study of CdTe/ZnTe self-assembled quantum dots, Appl. Phys. Lett. 74 (20) (1999) 3011–3013.

9. **Moger S. N., Mahesha M. G.,** Investigation on ZnTe/$Cd_xZn_{1-x}Te$ heterostructure for photodetector applications, Sens. Actuat. A-Phys. 315 (1 Nov) (2020) 112294.

10. **Hernández C. V.,** Introduction to Raman spectroscopy and its applications, Springer Cham, Switzerland, 2025.

11. **Kapitonov A. M., Woggon U., Kayser D., et al.,** Luminescence of epitaxial sub-monolayer CdSe nanostructures in ZnSe, J. Lumin. 112 (1–4) (2005) 177–180.

12. **Kim J. S., Kim H. M., Park H. L., Choi J. C.,** Growth and optical characterization of single quantum well structure of submonolayer ZnS/ZnTe, Solid State Commun. 137 (3) (2006) 115–119.

13. **Umirzakov B. E., Tashmukhamedova D. A., Boltaev E. U., Dzhurakhalov A. A.,** Obtaining of epitaxial films of metal silicides by ion implantation and molecular beam epitaxy, Mater. Sci. Eng. B. 101 (1–3) (2003) 124–127.

14. **Kryshtab T., Andraca J. A., Borkovska L. V., et al.,** Effect of CdTe monolayer insertion on CdZnTe/ZnTe quantum well characteristics, Microelectron. J. 39 (3–4) (2008) 418–422.

15. **Fan J., Ouyang L., Liu X., et al,** Growth and material properties of ZnTe on GaAs, InP, InAs and GaSb (001) substrates for electronic and optoelectronic device applications. J. Cryst. Growth. 323 (1) (2011) 127–131.

16. **Umirzakov B. E., Donaev S. B.,** On the creation of ordered nuclei by ion bombardment for obtaining nanoscale Si structures on the surface of CaF_2 films, J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 11 (4) (2017) 746–748.

17. **Agekyan V., Chukeev M., Karczewski G., et al.,** Exciton spectra and energy transfer in CdTe/ZnTe double quantum wells grown by atomic-layer epitaxy, Semiconductors. 53 (16) (2019) 2060–2063.

18. **Abduvayitov A. A., Boltaev Kh. Kh., Umirzakov B. E., et al.,** Analyzing the change in the composition of a CdTe surface upon implanting ions O^{2+} and subsequent annealing. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 88 (11) (2024) 1850–1854.

19. **Sawicki K., Malinowski F. K., Galkowski K., et al.,** *Single-color, in situ* photolithography marking of individual CdTe/ZnTe quantum dots containing a single Mn^{2+} ion, Appl. Phys. Lett. 106 (1) (2015) 012101.

20. **Samin A. J., Petrosky J. C.,** An analysis of point defects in ZnTe using density functional theory calculations, J. Alloys Compnd. 921 (15 Nov) (2022) 166017.

21. **Ryzhkov M. S., Kozlov D. A., Khudaiberdiev D. A., et al.,** Interference transport in a two-dimensional topological insulator in a CdHgTe quantum well, JETP Letters. 117 (1) (2023) 44–47.

22. **Shcherbakov I. P., Dunaev A. A., Eron'ko S. B., Chmel' A. E.,** Spectroscopic investigation of impurity and intrinsic distortions of the crystallite structure in ZnTe ceramics during mechanical treatment, Tech. Phys. Lett. 47 (2) (2021) 181–183.

23. **Tarasov A. S., Mikhailov N. N., Dvoretsky S. A., et al.,** Preparation of atomically clean and structurally ordered surfaces of epitaxial CdTe films for subsequent epitaxy, Semiconductors. 55 (1) (2021) S62–S66.

24. **Martinez A. M., Giudici P., Trigubo A. B., et al.,** Crystalline quality, composition homogeneity, tellurium precipitates/inclusions concentration, optical transmission, and energy band gap of Bridgman grown single-crystalline $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \le x \le 0.1$), Materials. 14 (15) (2021) 4207.

25. **Dvoretsky S. A., Stupak M. F., Mikhailov N. N., et al.,** Study of the crystalline state of MBE (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs heterostructure layers by the second harmonic generation method, Semiconductors. 56 (8) (2022) 562–569.

26. **Stupak M. F., Mikhailov N. N., Dvoretskii S. A., et al.,** Possibilities of characterizing the crystal parameters of $Cd_xHg_{1-x}Te$ structures on GaAs substrates by the method of generation of the probe-radiation second harmonic in reflection geometry, Physics of the Solid State. 62 (2) (2020) 252–259.

27. **Ushakov V. V., Klevkov Yu. V.,** Microphotoluminescence of undoped single-crystal zinc telluride produced by nonequilibrium vapor-phase growth techniques, Semiconductors. 39 (9) (2005) 993–997.

28. **Stupak M. F., Dvoretsky S. A., Mikhailov N. N., et al.,** Measurement of local stresses in the surface layers of multilayer structures by the null method using phase matching, Tech. Phys. Lett. 50 (1) (2024) 32–35.

29. **Chemam R., Bouabellou A., Grob J. J., et al.,** ZnTe formed by ion implantation in a SiO_2 layer on silicon, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 216 (Febr) (2004) 116–120.

30. **Umirzakov B. E., Tashmukhamedova D. A., Ruzibaeva M. K., et al.,** Investigation of change of the composition and structure of the CaF_2/Si films surface at the low-energy bombardment, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 326 (1 May) (2014) 322–325.

31. **Isakhanov Z. A., Mukhtarov Z. E., Umirzakov B. E., Ruzibaeva M. K.,** Optimum ion implantation and annealing conditions for stimulating secondary negative ion emission, Tech. Phys. 56 (4) (2011) 546–549.

32. **Hassan A. M., Diab F., Kotp E. F., et al.,** Implantation of Cu onto ZnTe thin film using plasma focus device for optoelectronic applications, Opt. Mater. 117 (Jul) (2021) 111182.

33. **Abduvayitov A. A., Tashmukhamedova D. A., Umirzakov B. E., et al.,** Effect of argon ion bombardment on the composition, electronic structure and physical properties of cadmium fluoride, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (3) (2024) 87–96.

34. **Tashmukhamedova D. A.,** Study of composition and electronic structure of $CoSi_2$/Si interface, Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. 70 (8) (2006) 1409–1411.

35. **Mahmood W., Awan S. U., Din A. U., et al.,** Pronounced impact of *p*-type carriers and reduction of bandgap in semiconducting ZnTe thin films by Cu doping for intermediate buffer layer in heterojunction solar cells, Materials. 12 (8) (2019) 1359.

36. **Donaev S. B., Tashatov A. K., Umirzakov B. E.,** Effect of Ar^+-ion bombardment on the composition and structure of the surface of CoSi2/Si(111) nanofilms, J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 9 (2) (2015) 406–409.

37. **Abduvayitov A. A., Boltaev Kh. Kh., Rozikov G. A.,** Study of the composition of uncontrolled impurities and the profiles of their distribution at the Ni–CdS interface, J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 16 (5) (2022) 860–863.

38. **Ghosh K., Ghorai G., Sahoo P. K.,** Cathodoluminescence and structural properties of ZnTe nanocrystals synthesized from Te/ZnO thin films, J. Alloys Compnd. 960 (15 Oct) (2023) 170655.

39. **Davis L. E., MacDonald N. C., Palmberg P. W., et al.,** Handbook of Auger electron spectroscopy, 2-nd ed., Physical Electronics Industry Inc., Minnesota (USA), 1976.

40. **Boltaev Kh. Kh., Tashmukhamedova D. A., Umirzakov B. E.,** Structure and electronic properties of nanoscale phases and nanofilms of metal silicides produced by ion implantation in combination with annealing, J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 8 (2) (2014) 326–331.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ХУЖАНИЁЗОВ Жуманазар Бобокулович – *кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан.*
2100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2
KhujaniyozovJB@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6067-8196

УМИРЗАКОВ Балтоходжа Ерматович – *доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан.*
2100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2
be.umirzakov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9815-2111

ТАШМУХАМЕДОВА Дилноза Артикбаевна – *доктор физико- математических наук, профессор кафедры технологий производства электронных аппаратов Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан.*
2100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2
ftmet@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5813-7518

ЛОБОДА Вера Владимировна – *кандидат физико-математических наук, директор Высшей школы электроники и микросистемной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.*
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vera_loboda@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3103-7060

АБДУВАЙИТОВ Акбаржон Абдумаджитович – *доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан.*
2100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2
akbarjon.abduvayitov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5732-6103

THE AUTHORS

KHUJANIYOZOV Jumanazar B.
Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov
2 Universitet St., Almazar, Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan
KhujaniyozovJB@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6067-8196

UMIRZAKOV Baltokhodja E.
Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov
2 Universitet St., Almazar, Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan
be.umirzakov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9815-2111

TASHMUKHAMEDOVA Dilnoza A.
Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov
2 Universitet St., Almazar, Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan
ftmet@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5813-7518

LOBODA Vera V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
vera_loboda@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3103-7060

ABDUVAYITOV Akbarjon A.
Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov
2 Universitet St., Almazar, Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan
akbarjon.abduvayitov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5732-6103

Статья поступила в редакцию 14.01.2026. Одобрена после рецензирования 12.02.2026. Принята 13.02.2026.
Received 14.01.2026. Approved after reviewing 12.02.2026. Accepted 13.02.2026.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026