

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-05-33-42

УДК 551.501.816; 551.510.411

Оптические свойства эпитаксиальных пленок HgCdTe, легированных мышьяком

МАКСИМ СТАНИСЛАВОВИЧ РУЖЕВИЧ¹✉, КАРИМ ДЖАФАРОВИЧ МЫНБАЕВ²,
ДМИТРИЙ ДМИТРИЕВИЧ ФИРСОВ³, ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ КОМКОВ⁴,
ВАСИЛИЙ СЕМЕНОВИЧ ВАРАВИН⁵, ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ РЕМЕСНИК⁶,
МАКСИМ ВИТАЛЬЕВИЧ ЯКУШЕВ⁷

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

^{3, 4}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

^{5, 6, 7}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения

Российской академии наук, Новосибирск, Россия

¹max.ruzhevich@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>

²mynkad@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>

³d.d.firsov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7608-9580>

⁴okomkov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-8999-1175>

⁵varavin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>

⁶remesnik@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>

⁷yakushev@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

Аннотация

Предмет исследования. Эпитаксиальные пленки твердых растворов Hg_{0,7}Cd_{0,3}Te, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии и легированные мышьяком, для получения дырочно-го типа проводимости с целью формирования электронно-дырочных переходов для изготовления фотоприемных структур инфракрасного диапазона. **Цель работы.** Определение видов и характеристик дефектов, формирующихся при легировании мышьяком эпитаксиальных пленок твердых растворов Hg_{0,7}Cd_{0,3}Te, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и установление влияния легирования на разупорядочение твердого раствора. **Методы.** Эллипсометрия, оптическое пропускание, фотолюминесценция, фотоотражение. **Основные результаты.** В отношении объема и поверхности пленок показано высокое исходное качество материала и его дальнейшее улучшение в результате двухстадийного активационного термического отжига. Установлен факт активации мышьяка с формированием мелких акцепторных уровней (глубиной 7–8 мэВ) в результате проведения отжига. Зафиксировано отсутствие побочных дефектов в результате введения мышьяка в исходные пленки и в ходе отжига. **Практическая значимость.** Показана эффективность легирования эпитаксиальных пленок твердых растворов Hg_{0,7}Cd_{0,3}Te мышьяком как акцепторной примесью для создания слоев с дырочной проводимостью при изготовлении фотодиодных структур.

Ключевые слова: теллуриды кадмия-ртути, легирование, фотолюминесценция, фотоотражение

Ссылка для цитирования: Ружевич М.С., Мынбаев К.Д., Фирсов Д.Д., Комков О.С., Варавин В.С., Ремесник В.Г., Якушев М.В. Оптические свойства эпитаксиальных пленок HgCdTe, легированных мышьяком // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 5. С. 33–42. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-33-42>

Коды OCIS: 120.7000, 250.5230, 260.3060

Optical properties of HgCdTe epitaxial films doped with arsenic

MAXIM S. RUZHEVICH¹✉, KARIM D. MYNBAEV², DMITRII D. FIRSOV³, OLEG S. KOMKOV⁴,
VASILII S. VARAVIN⁵, VLADIMIR G. REMESNIK⁶, MAXIM V. YAKUSHEV⁷

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

²Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

^{3, 4}Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

^{5, 6, 7}Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

¹max.ruzhevich@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>

²mynkad@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>

³d.d.firsov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7608-9580>

⁴okomkov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-8999-1175>

⁵varavin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>

⁶remesnik@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>

⁷yakushev@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

Abstract

Subject of study. Epitaxial films of Hg_{0.7}Cd_{0.3}Te solid solutions grown by molecular beam epitaxy and doped with arsenic to obtain hole-type conductivity in order to form *p–n* junctions for the manufacture of photodetecting structures in the infrared range. **Aim of study.** Determination of the types and characteristics of defects formed during arsenic doping of epitaxial films of Hg_{0.7}Cd_{0.3}Te solid solutions grown by molecular beam epitaxy, and establishing the effect of doping on the disorder of the solid solution. **Main results.** With regard to the volume and the surface of the films, the high quality of the as-grown material and its further improvement as a result of two-stage activation thermal annealing are shown. The fact of activation of arsenic with the formation of shallow (7–8 meV) acceptor levels as a result of annealing has been established. The absence of side defects with the introduction of arsenic into the films during the growth and during the annealing was recorded. **Practical significance.** The effectiveness of doping epitaxial films of Hg_{0.7}Cd_{0.3}Te solid solutions with arsenic as an acceptor impurity for creating layers with hole conductivity in the process of manufacturing of photodiode structures has been demonstrated.

Keywords: cadmium-mercury tellurides, doping, photoluminescence, photoreflexion

For citation: Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D., Firsov D.D., Komkov O.S., Varavin V.S., Remesnik V.G., Yakushev M.V. Optical properties of HgCdTe epitaxial films doped with arsenic [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 5. P. 33–42. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-33-42>

OCIS codes: 120.7000, 250.5230, 260.3060

ВВЕДЕНИЕ

Фотоприемники и, в частности, фотодиоды, работающие в средневолновом инфракрасном диапазоне спектра (длины волн $\lambda = 3\text{--}5$ мкм) широко используются в промышленности, системах экологического контроля и иных приложениях. Несмотря на активное развитие конкурирующих технологий, теллуриды кадмия-ртути (Hg_{1-x}Cd_xTe, КРТ) по-прежнему остаются одними из самых востребованных материалов для создания детекторов средневолнового инфракрасного спектрального диапазона, где используется материал с $x \approx 0,3$ [1].

Изменение ширины запрещенной зоны E_g в широких пределах без существенного изменения постоянной кристаллической решетки позволяет при использовании современных методов синтеза, в частности молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), создавать на основе КРТ сложные гетероструктуры.

Для создания материала *p*-типа проводимости при формировании электронно-дырочных переходов в КРТ все чаще используется легирование мышьяком (As). Мышьяк обладает низким коэффициентом диффузии в КРТ, однако демонстрирует амфотерное поведение, будучи

способным, как считается, занимать узлы как в решетке металла (донор As_{Hg}), так и халькогена (акцептор As_{Te}) [2]. Существуют и предположения, основанные в том числе и на данных оптических исследований, о более сложном механизме внедрения мышьяка в КРТ. Они предполагают формирование в КРТ донорной структуры типа халькогенидного стекла As_2Te_3 и акцепторной структуры вида AsHg_8 [3]. В любом случае, p -тип проводимости в легированном мышьяком КРТ (HgCdTe:As) получают путем постростового отжига образцов в насыщенных парах ртути, включающего собственно высокотемпературную ($T \approx 350\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$) активацию и низкотемпературный ($T \approx 200\text{ }^\circ\text{C}$) отжиг для снижения концентрации вакансий V_{Hg} , образовавшихся на первой стадии [2, 3].

Одним из важных преимуществ мышьяка перед другими акцепторными примесями считается низкая энергия активации акцепторного уровня E_{As} , которая по данным холловских измерений в случае КРТ с $x \approx 0,3$ составляет всего около 6 мэВ [4–6]. Близкое значение E_{As} (6,5 мэВ) было получено и по данным температурного сдвига края оптического поглощения [7]. Однако данные других оптических исследований, проведенных, в частности методами фотоотражения (ФО) [8], фотопроводимости (ФП) [9] и фотолюминесценции (ФЛ) [3, 10–13], показывают большой разброс E_{As} . Значения этой энергии составляли от 12,8 мэВ (комплекс AsHg , $x = 0,30$ [10]) до 26,8 мэВ (AsHg_8 , $x = 0,31$ [3]) и 11 мэВ ($x \approx 0,30$) [11, 12], 20,3 мэВ ($x \approx 0,23$) [12] и 25 мэВ ($x \approx 0,22$) [9] для As_{Te} , а также 25 мэВ для комплекса ' $\text{As}_{\text{Hg}}\text{--}V_{\text{Hg}}$ ' ($x = 0,30$) [11, 12]). Часть этих данных обобщена в работах [9, 14]. Большое (не менее 20 мэВ) значение E_{As} лишило бы мышьяк одного из преимуществ перед другим распространенным акцептором в КРТ — вакансией ртути, энергия активации которой составляет, в том числе по данным исследований ФЛ, около 14 мэВ [14]. Кроме того, ряд результатов оптических исследований предполагает формирование при введении в КРТ мышьяка не одного, а целого ряда дефектов, что, разумеется, нежелательно [10–15].

Приведенные данные указывают на то, что даже при наличии общепринятой стратегии легирования КРТ мышьяком особенности технологии и свойств материала в каждом кон-

кретном случае не всегда позволяют получить желаемый результат. Подобные сложности в существенной степени тормозят развитие технологии фотодиодов на основе p - n переходов в КРТ и ведут к появлению альтернативных конфигураций фотоприемных структур, например униполярных барьерных ($n\text{Bn}$) [16]. В настоящей работе сообщается о результатах исследования оптических свойств эпитаксиальных пленок КРТ с $x \approx 0,3$, легированных мышьяком и выращенных методом МЛЭ на подложке из (013)Si с буферными слоями ZnTe и CdTe в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН. Целью работы являются определение видов и характеристик дефектов, формирующихся при легировании мышьяком эпитаксиальных пленок твердых растворов $\text{Hg}_{0,7}\text{Cd}_{0,3}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и установление влияния легирования на разупорядочение твердого раствора.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проведены методами оптической эллипсометрии (ОЭ) *in situ* и оптического пропускания (ОП), ФЛ и ФО *ex situ*. Легирование осуществлялось в процессе роста потоком мышьяка, полученного путем крекинга из источника типа ячейки Кнудсена. Заданный уровень легирования составил $2 \times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ для структуры 1103 и $5 \times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ для структуры 1106. Условия роста были аналогичны таковым, применяемым для роста нелегированных пленок КРТ [17]. Состав пленок и примесный фон в них дополнительно проконтролированы с использованием электронного микроскопа TESCAN MIRA3 с детектором для энергодисперсионного рентгеновского анализа UltiMAX®.

Определенный по данным *in situ* исследований ОЭ, проведенных с использованием лазерного эллипсометра ЛЭФ-777 ($\lambda = 632,8\text{ нм}$) [18], состав был равен $x = 0,29$ при толщине пленок $d \approx 6\text{ мкм}$. С помощью измерений коэффициента Холла и проводимости при $T = 77\text{ К}$ было установлено, что непосредственно после выращивания пленки имели n -тип проводимости; концентрация электронов составила $7 \times 10^{15}\text{ см}^{-3}$ при подвижности $19000\text{ см}^2/(\text{В с})$ для образца 1103 и $5 \times 10^{15}\text{ см}^{-3}$ при подвижности $18000\text{ см}^2/(\text{В с})$ для образца 1106. С целью активации мышьяка проводился

отжиг в насыщенных парах ртути. Первая стадия отжига проходила при $T = 350$ °С в течение 2 ч, вторая — при $T = 220$ °С в течение 22 ч. В результате отжига пленки были переведены в p -тип проводимости с концентрацией дырок 3×10^{16} см $^{-3}$ для структуры 1103 и 9×10^{15} см $^{-3}$ для структуры 1106 при подвижности дырок около 190 см 2 /(В с). Превышение концентрации дырок в отожженных пленках над концентрацией электронов в исходных образцах может быть объяснено электрической компенсацией доноров в исходном материале, типичной для использованной технологии МЛЭ [19]. В целом результаты холловских измерений свидетельствовали о высокой степени электрической активации мышьяка.

Исследования ОП, ФЛ и ФО проводились на установке на базе фурье-спектрометра *Vertex 80* с пошаговым сканированием, описанной в работе [20]. Источником возбуждения ФЛ и модулирующего излучения при исследовании ФО служил диодный лазер с излучением на $\lambda = 809$ нм. Для исключения влияния фонового теплового излучения запись спектров ФЛ и ФО осуществлялась с синхронным усилением сигнала при механической модуляции излучения лазера. Измерения проводились в температурном интервале $T = 11$ –294 К в гелиевом криостате замкнутого цикла *Janis CCS-150*. Сигнал регистрировался охлаждаемым фотovoltaическим детектором на основе КРТ. Для учета влияния атмосферного поглощения при обработке спектров последние делились на спектр излучения глобара, записанный в тех же условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены спектральные характеристики ОП пленок до и после отжига, записанные при $T = 294$ К. Полученные характеристики схожие; состав пленок был определен как $x = 0,29$, что подтвердило данные ОЭ. Спектральные характеристики ОП, представленные на рис. 1, имеют «классический» вид с небольшим размытием края, что объясняется присутствием в подобных пленках слоев переменного состава. Полученные спектральные характеристики ОП исходных (неотожженных) пленок 1103 и 1106 идентичны таковым для пленки того же состава, выращенной в тех же условиях, но не содержащей

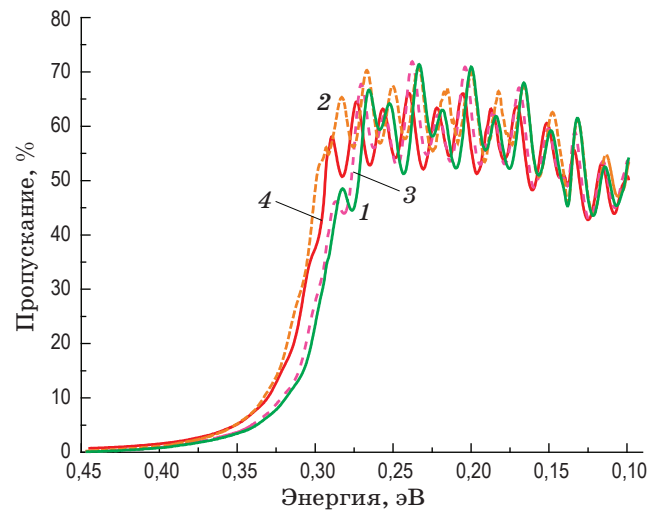


Рис. 1. Спектральные характеристики ОП пленок 1103 (1, 2) и 1106 (3, 4), записанные при 294 К до (1, 3) и после (2, 4) активационного отжига

Fig. 1. Optical transmission spectra of films (1, 2) 1103 and (3, 4) 1106, recorded at $T = 294$ К (1, 3) before and (2, 4) after activation annealing

мышьяка (не показан), и схожи с характеристиками ОП других нелегированных пленок КРТ близких составов, выращенных по данной технологии МЛЭ (см. [21]). Спектральные характеристики ОП отожженных пленок имеют смещение края пропускания в сторону высоких энергий (ВЭ) примерно на 12 мэВ, что типично для прошедшего отжиг КРТ, выращенного по данной технологии [21]. В области низких энергий (НЭ) в спектрах ОП наблюдаются выраженные интерференционные полосы с периодом около 18 мэВ, подтверждающие хорошую планарность пленок.

О некоторых предварительных результатах исследований ФЛ пленок сообщалось в работе [22]. На рис. 2 приведены спектральные характеристики ФЛ исходной и отожженной пленок 1103, записанных при $T = 11$ К и мощности возбуждающего лазера 400 мВт. Спектры ФЛ обеих пленок как до, так и после отжига аппроксимировались двумя основными полосами: после отжига наблюдалось увеличение сигнала ФЛ. Спектр ФЛ пленки 1103 до отжига содержал две полосы с полуширинами около 12 мэВ и расстоянием между максимумами при $T = 11$ К примерно 12 мэВ. После отжига ВЭ-полоса сузилась до 9 мэВ, а НЭ-полоса уширилась до 24 мэВ, расстояние между максимумами уменьшилось до 7 мэВ.

Также в результате отжига произошло типичное для исследуемого материала смещение полос ФЛ в сторону ВЭ, для ВЭ-полосы пленки 1103 при $T = 11$ К оно составило около 19 мэВ. В спектрах ФЛ также присутствует особенность в виде слабо выраженного максимума, отстоящего на расстояние около 40 мэВ от ВЭ-полосы. Она наблюдается и до, и после отжига и можно предположить, что она вызвана не легированием: вероятно, ее причиной явля-

ются оптические переходы на относительно глубокий уровень, связанный с дефектами, типичными для пленок КРТ, выращенных на подложках из Si [14].

На рис. 3 приведены спектральные характеристики ФЛ пленки 1103, полученные при мощности возбуждающего лазера 170 мВт и при различных температурах. И в случае исходной, и отожженной пленок с ростом температуры наблюдается смещение спектрального максимума ФЛ в сторону ВЭ, отражающее увеличение E_g , характерное для КРТ с $x < 0,5$ [23]. Максимум ВЭ-полосы исходной пленки (рис. 3а) при изменении T от 11 до 50 К смещается примерно на 14 мэВ, а сигнал ФЛ ожидаемо слабеет; при этом в случае НЭ-полосы он падает быстрее, чем для ВЭ-полосы. При $T > 50$ К НЭ-полоса исходной пленки не регистрировалась. При изменении T от 11 до 80 К сигнал ФЛ отожженной пленки (рис. 3б) не уменьшается, а возрастает, при этом в случае ВЭ-полосы он растет быстрее, чем для НЭ-полосы. Низкоэнергетическая полоса этой пленки наблюдалась не только при $T < 50$ К, но и при более высоких температурах. Критичным также является различие в температурном поведении положения НЭ-полос в исходной и отожженной пленках, рассмотренное в работе [22]. Если в исходной пленке энергетическое положение этой полосы

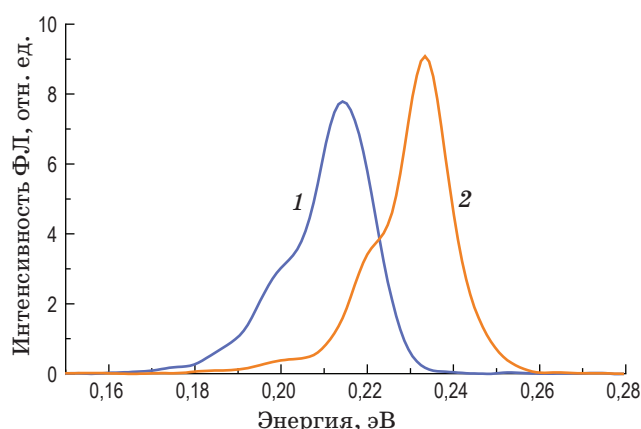


Рис. 2. Спектральные характеристики ФЛ пленки 1103, записанные при 11 К до (1) и после (2) активационного отжига

Fig. 2. Photoluminescence spectra of film 1103 recorded at $T = 11$ К (1) before and (2) after activation annealing

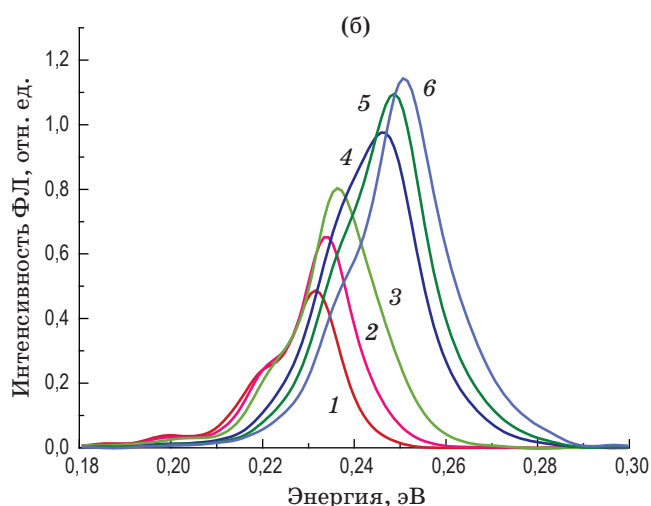
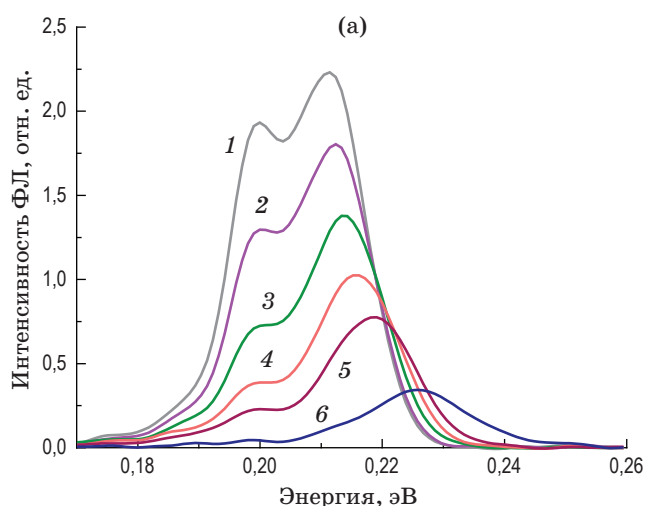


Рис. 3. Спектральные характеристики ФЛ пленки 1103 до (а) и после (б) отжига, записанные при мощности возбуждающего лазера 170 мВт и температурах 11 (1), 15 (2), 20 (3), 25 (4), 30 (5), 50 (6) К — (а) и 20 (1), 30 (2), 40 (3), 60 (4), 70 (5), 80 (6) К — (б)

Fig. 3. Photoluminescence spectra of film 1103 (a) before and (б) after annealing recorded at an exciting laser power 170 mW and temperatures (a) 11 (1), 15 (2), 20 (3), 25 (4), 30 (5), 50 (6) К, and (б) 20 (1), 30 (2), 40 (3), 60 (4), 70 (5), 80 (6) К

не зависело от температуры, и расстояние между ВЭ- и НЭ- полосами с ростом T увеличивается (рис. 3а), то в отожженной пленке НЭ-полоса следует за ВЭ-полосой, сохраняя энергетическую разницу между ними в 7–8 мэВ (рис. 3б). Подобное поведение свидетельствует о различной природе НЭ-полос в образцах до и после активационного отжига.

На рис. 4 приведены спектральные характеристики ФО исходных пленок 1103 и 1106 и отожженной пленки 1103, записанные при $T = 80$ К. Для всех представленных характеристик ФО характерно наличие основного высокоинтенсивного пика, по энергии близкого к ВЭ-полосе ФЛ соответствующей пленки (см. рис. 5). Как и в случае спектральных характеристик ОП и ФЛ, в результате отжига наблюдается смещение спектрального максимума пика ФО, в случае пленки 1103 при $T = 80$ К оно составило около 24 мэВ (рис. 4). Сигнал ФО от отожженной пленки 1103 значительно больше, чем от исходной, что свидетельствует о более выраженной модуляции внутреннего электрического поля генерируемыми лазером носителями заряда. Полуширины пиков ФО

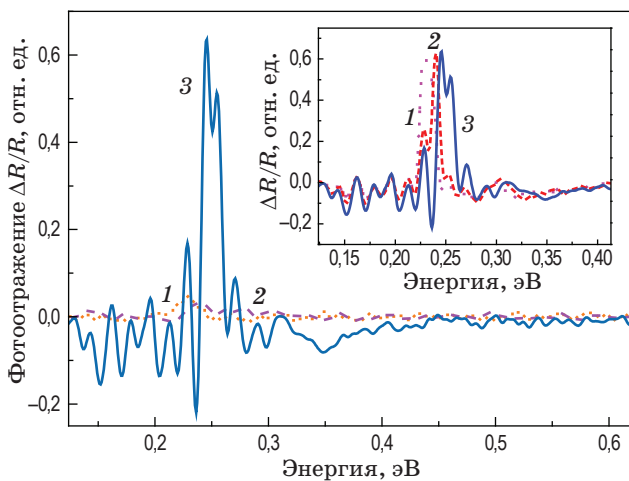


Рис. 4. Спектральные характеристики ФО исходных пленок 1103 (1) и 1106 (2) и отожженной пленки 1103 (3), записанные при 80 К. На вставке приведены спектральные характеристики ФО отожженной пленки 1103, записанные при температурах 11 (1), 40 (2), 80 (3) К

Fig. 4. Photoreflectance spectra of the original (non-annealed) films (1) 1103, (2) 1106 and (3) the annealed film 1103 recorded at $T = 80$ К. The inset shows the photoreflectance spectra of the annealed film 1103 recorded at temperatures (1) 11, (2) 40, (3) 80 К

исходных пленок, записанные при $T = 80$ К, составляют 18–20 и 16 мэВ у отожженной пленки 1103.

На рис. 5 представлены спектральные характеристики ФЛ и ФО отожженной пленки 1106, записанные при $T = 11$ К. Пик ФО близок к максимуму ВЭ-полосы в спектре ФЛ, разница между ними в несколько миллиэлектронвольт объясняется стоксовым сдвигом и типична для сопоставления спектров ФЛ и ФО. Полуширины пика ФО и ВЭ-полосы ФЛ в данном случае оказались близкими и составили около 9 мэВ. Температурное смещение спектрального максимума пика ФО соответствует смещению ВЭ-полосы ФЛ, ход этих пиков изображен на вставке к рис. 5. В обоих случаях при $T < 50$ К основные пики и ФЛ, и ФО лежат существенно ниже по энергии, чем расчетное (согласно данным работы [23]) значение E_g . Спектры ФО исследованных пленок также содержат выраженные осцилляции при энергиях, меньших

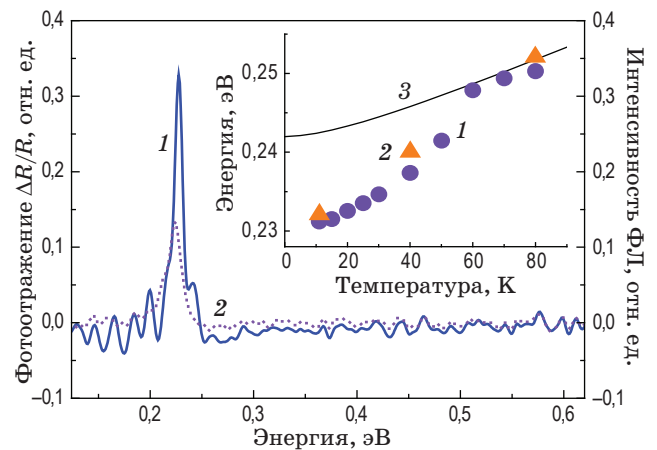


Рис. 5. Спектральные характеристики ФО (1) и ФЛ (2) отожженной пленки 1106, записанные при 11 К. На вставке приведены температурные зависимости энергии высокоэнергетического пика ФЛ (1) и энергии основного пика ФО (2) отожженной пленки 1103, а также расчетные (согласно [23]) зависимости ширины запрещенной зоны КРТ с $x = 0,30$ (3)

Fig. 5. (1) Photoreflectance and (2) photoluminescence spectra of the annealed film 1106 recorded at $T = 11$ К. The inset shows (1) the temperature dependences of the energy of the high-energy photoluminescence peak and (2) the main photoreflectance peak of annealed film 1103 and (curve 3) calculated (according to [23]) dependence of the bandgap for $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ with $x = 0.30$

«оптической» (по данным ФЛ и ФО) E_g , с периодом, аналогичным таковому для интерференционных полос в спектрах ОП.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные результаты исследования ФЛ в целом подтверждают выводы работы [22]. В исходных пленках НЭ-полосы ФЛ, согласно их положению относительно ВЭ-полос, полупрозрачности и поведению с изменением внешних условий были обусловлены донорно-акцепторной рекомбинацией (ДАР). Поведение НЭ-полос в спектрах ФЛ отожженных пленок соответствовало переходам на уровень мелкого акцептора, и их природу можно приписать появлению уровней в запрещенной зоне, сформировавшихся вследствие активации мышьяка. Полученные значения E_{As} в 7–8 мэВ хорошо согласуются с упомянутыми выше данными исследований, проведенных методами эффекта Холла [4–6], ОП [7] и ФЛ [11, 12], включая самые последние данные [24].

Следует отметить, что в отличие от многих спектров ФЛ пленок $HgCdTe:As$, описанных в литературе, спектры ФЛ, полученные в настоящей работе, и до, и после отжига состоят всего из двух основных полос. Как отмечалось в работе [22], существует вероятность, что ДАР в исходных пленках происходит с участием донорных уровней, образовавшихся из-за внедрения мышьяка, а природа НЭ-полосы ФЛ в спектрах отожженных пленок однозначно связана с активацией мышьяка. Таким образом, формирования «побочных» дефектов при легировании КРТ мышьяком в наших исследованиях в явном виде обнаружено не было. Это говорит о том, что методика введения и активации мышьяка в КРТ в методе МЛЭ может быть достаточно эффективной, а ее особенности, описанные в литературе, могут быть связаны со спецификой конкретных технологий. В нашем случае можно лишь обратить внимание на возрастание сигнала ФЛ в случае отожженной пленки 1103 при увеличении T до 80 К (рис. 3б, ср. рис. 3а), противоречащее общепринятым представлениям о температурной зависимости коэффициентов излучательной и безызлучательной рекомбинаций. Одним из возможных объяснений этого явления может быть локализация носителей заряда на ловушках при низкой температуре

с последующей ионизацией ловушек с повышением T . В этом случае можно предположить, что при активации мышьяка в КРТ помимо формирования мелких уровней вероятно и появление глубоких. Эти данные могли бы поставить под сомнение еще одно преимущество легирования мышьяком перед вакансионным легированием — отсутствие глубоких уровней в запрещенной зоне [25]. Однако появление глубоких уровней после отжига может быть следствием термической активации непреднамеренно введенных примесей [14] или диффузии кислорода [24], поэтому обнаруженный эффект требует дополнительного изучения.

При обсуждении спектральных характеристик ФО (рис. 4), в свою очередь, можно обратить внимание на следующее. Во-первых, осциллирующий сигнал при энергиях, меньших энергии основного пика («оптической» E_g) был вероятнее всего вызван фотомодуляцией показателя преломления и связан с интерференцией [20, 26], что подтверждается совпадением периода этого сигнала и периода интерференционных полос в спектре ОП (см. рис. 1). Информации об энергетических уровнях дефектов в запрещенной зоне из этого сигнала извлечено быть не может. В области энергий выше энергии основного пика, в отличие от нелегированных структур КРТ, исследованных в работе [20], в спектрах исследованных пленок $HgCdTe:As$ выраженной осциллирующей структуры, соответствующей осцилляциям Франца–Келдыша, не наблюдалось. Что касается самой «оптической» E_g исследованных пленок, определяемой из спектральных характеристик ФО, то, как следует из рис. 4 и 5, при $T = 80$ К она близка к энергии пика ФЛ и расчетной ширине запрещенной зоны, как это ранее наблюдалось для КРТ, синтезированного различными методами [8, 20, 26, 27]. При более низких температурах пик ФО лежал по энергии существенно ниже расчетной E_g (см. вставку на рис. 5). Таким образом, данные низкотемпературного ФО коррелируют с представленными ранее данными о разупорядочении твердого раствора КРТ, которое было неоднократно зафиксировано методом ФЛ [14]. Разупорядочение приводит к появлению флуктуаций потенциала и потенциальных ям, в которых при низких температурах и локализируются носители (экситоны).

Представленные результаты исследования ФО также подтверждают и снижение степени разупорядочения КРТ в результате отжига. Если мерой «качества» пленок КРТ считать полуширину полос низкотемпературных спектров ФЛ [14] и ФО [20], то в обоих случаях нами наблюдалось уменьшение этой полуширины (с 12 до 9 мэВ в случае ФЛ и с 20 до 16 мэВ в случае ФО). Кроме того, после отжига возрасла амплитуда сигналов и ФЛ, и ФО. Если в отношении ФЛ этот эффект наблюдался уже многократно [14], то подобные данные ФО для исследуемого материала получены впервые. Это важный результат, поскольку методика ФО позволяет, в силу своих особенностей, судить о качестве не только «объема» материала, но и его поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведены исследования оптических свойств пленок твердых растворов HgCdTe ($x \approx 0,3$), выращенных методом МЛЭ

на подложках из Si и легированных мышьяком. Данные ОП, ФЛ и ФО показали высокое исходное качество легированных пленок и его дальнейшее улучшение в результате активационного термического отжига — в отношении не только объема материала, но и поверхности образцов. Анализ спектральных характеристик ФЛ и ФО, полученных, в том числе, при различных температурах и мощностях излучения возбуждающего лазера, позволил однозначно установить факт активации мышьяка (с формированием акцепторных уровней глубиной 7–8 мэВ) в результате проведения двухстадийного активационного отжига. Формирования побочных дефектов в результате введения мышьяка ни в исходных пленках, ни в пленках, прошедших отжиг, не наблюдалось. Полученные результаты однозначно указывают на валидность общепринятой стратегии легирования эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных методом МЛЭ, мышьяком с электрической активацией последнего в качестве акцептора двухстадийным термическим отжигом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kopytko M., Rogalski A. New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes // *Sensors and Actuators: A. Physical*. 2022. V. 339. P. 113511. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
2. Garland J.W., Grein C., Sivananthan S. Arsenic p-doping of HgCdTe grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE): A solved problem? // *J. Electron. Mater.* 2013. V. 42. № 11. P. 3331–3336. <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2739-0>
3. Gemain F., Robin I.C., Brochen S., et al. Arsenic complexes optical signatures in As-doped HgCdTe // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. № 14. P. 124104. <https://doi.org/10.1063/1.4801500>
4. Tsen G.K.O., Sewell R.H., Atanacio A.J., et al. Incorporation and activation of arsenic in MBE-grown HgCdTe // *Semicond. Sci. Technol.* 2008. V. 23. № 1. P. 015014. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/23/1/015014>
5. Zandian M., Chen A.C., Edwall D.D., et al. p-type arsenic doping of Hg_{1-x}Cd_xTe by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 71. № 19. P. 2815–2817. <https://doi.org/10.1063/1.120144>
6. Selamet Y., Grein C.H., Lee T.S., et al. Electrical properties of in situ As doped Hg_{1-x}Cd_xTe epilayers grown by molecular beam epitaxy // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2001. V. 19. № 4. P. 1488–1491. <https://doi.org/10.1116/1.1374628>
7. Wang H., Hong J., Yue F., et al. Optical homogeneity analysis of Hg_{1-x}Cd_xTe epitaxial layers: How to circumvent the influence of impurity absorption bands? // *Infr. Phys. Technol.* 2017. V. 82. P. 1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2017.02.007>
8. Shao J., Chen L., Lü X., et al. Realization of photoreflectance spectroscopy in very-long wave infrared of up to 20 μm // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. № 4. P. 041908. <https://doi.org/10.1063/1.3193546>
9. Ikonnikov A., Rumyantsev V., Sotnichuk M., et al. Photoconductivity spectroscopy of arsenic-related acceptors in HgCdTe // *Semicond. Sci. Technol.* 2023. V. 38. № 8. P. 085003. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/acda58>
10. Robin I.C., Taupin M., Derone R., et al. Photoluminescence studies of arsenic-doped Hg_{1-x}Cd_xTe epilayers // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. № 20. P. 202104. <https://doi.org/10.1063/1.3263146>
11. Yue F., Chu J., Wu J., et al. Modulated photoluminescence of shallow levels in arsenic-doped Hg_{1-x}Cd_xTe ($x \approx 0.3$) grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. № 12. P. 121916. <https://doi.org/10.1063/1.2903499>
12. Yue F.-Y., Chen L., Li Y.-W., et al. Influence of annealing conditions on impurity species in arsenic-doped HgCdTe grown by molecular beam epitaxy // *Chinese Physics B*. 2010. V. 19. № 11. P. 117106. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/19/11/117106>
13. Murawski K., Majkowycz K., Kopytko M., et al. Photoluminescence study of As doped p-type HgCdTe absorber for infrared detectors operating in the range up to 8 μm // *J. Electron. Mater.* 2023. V. 52. № 11. P. 7038–7045. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10516-5>
14. Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D. Photoluminescence in mercury cadmium telluride — a historical retrospective. Part II: 2004–2022 // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2022. V. 4. № 4. P. 17–38. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2022-4-4-17-38>
15. Chen X., Wang M., Zhu L., et al. Mid-infrared modulated photoluminescence mapping to investigate

- in-plane distributions of bandedge transitions in As-doped HgCdTe // *Appl. Phys. Lett.* 2023. V. 123. № 15. P. 151105. <https://doi.org/10.1063/5.0164195>
16. Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И. и др. Состояние исследований в области создания униполярных барьерных структур МЛЭ n-HgCdTe со сверхрешетками в качестве барьера // *Оптический журнал.* 2024. Т. 91. № 2. С. 6–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22>
- Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., et al. State of research in the field of creating unipolar barrier structures of n-HgCdTe MBE with superlattices as a barrier // *J. Opt. Technol.* 2024. V. 91. № 2.
17. Сидоров Г.Ю., Михайлов Н.Н., Варавин В.С. и др. Исследование влияния температуры крекинга мышьяка на эффективность его встраивания в пленки CdHgTe в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии // *Физика и техника полупроводников.* 2008. Т. 42. Вып. 6. С. 668–671.
- Sidorov G.Yu., Mikhailov N.N., Varavin V.S., et al. Effect of the arsenic cracking zone temperature on the efficiency of arsenic incorporation in CdHgTe films in molecular-beam epitaxy // *Semiconductors.* 2008. V. 42. № 6. P. 651–654. <https://doi.org/10.1134/S1063782608060043>
18. Швец В.А., Марин Д.В., Ремесник В.Г. и др. Параметрическая модель спектров оптических постоянных $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и определение состава соединения // *Опт. и спектроск.* 2020. Т. 128. Вып. 12. С. 1815–1820. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.12.50315.349-20>
- Shvets V.A., Marin D.V., Remesnik V.G., et al. Parametric model of the optical constant spectra of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ and determination of the compound composition // *Opt. and Spectrosc.* 2020. V. 128. № 12. P. 1948–1953. <https://doi.org/10.1134/S0030400X20121042>
19. Izhnin I.I., Mynbaev K.D., Voitsekhovsky A.V., et al. Background donor concentration in HgCdTe // *Opto-Electronics Rev.* 2015. V. 23. № 3. P. 200–207. <https://doi.org/10.1515/oere-2015-0029>
20. Комков О.С., Якушев М.В. Фотомодуляционная оптическая спектроскопия варизонных гетероструктур CdHgTe // *Физика и техника полупроводников.* 2023. Т. 57. Вып. 6. С. 426–431. <https://doi.org/10.21883/FTR.2023.06.56469.33k>
- Komkov O.S., Yakushev M.V. Photomodulation optical spectroscopy of CdHgTe graded band gap heterostructures // *Semiconductors.* 2023. V. 57. № 6. P. 414–419.
21. Ружевич М.С., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л. и др. Оптические свойства и разупорядочение плёнок HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // *Оптический журнал.* 2024. Т. 91. № 2. С. 23–33. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-23-33>
- Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., et al. Optical properties and disorder of HgCdTe films grown by molecular beam epitaxy // *J. Opt. Technol.* 2024. V. 91. № 2.
22. Ружевич М.С., Фирсов Д.Д., Комков О.С. и др. Фотолюминесценция эпитаксиальных пленок $Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te$, легированных мышьяком // *Физика и техника полупроводников.* 2023. Т. 57. Вып. 6. С. 491–494. <https://doi.org/10.21883/FTR.2023.06.56479.5375>
- Ruzhevich M.S., Firsov D.D., Komkov O.S., et al. Photoluminescence of arsenic doped epitaxial films of $Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te$ // *Semiconductors.* 2023. V. 57. № 6. P. 484–487.
23. Becker C.R., Latussek V., Pfeuffer-Jeschke A., et al. Band structure and its temperature dependence for type-III HgTe/ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ superlattices and their semimetal constituent // *Phys. Rev. B.* 2000. V. 62. № 15. P. 10353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.10353>
24. Majkowycz K., Murawski K., Kopytko M. New insight into defect energy levels in HgCdTe // *Infr. Phys. Technol.* 2024. V. 137. P. 105126. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105126>
25. Swartz C.H., Tomkins R.P., Giles N.C., et al. Fundamental material studies of undoped, In-doped, and As-doped $Hg_{1-x}Cd_xTe$ // *J. Electron. Mater.* 2004. V. 33. № 6. P. 728–736. <https://doi.org/10.1007/s11664-004-0074-1>
26. Motyka M., Sęk G., Janiak F., et al. Fourier-transformed photoreflectance and fast differential reflectance of HgCdTe layers. The issues of spectral resolution and Fabry-Perot oscillations // *Measurement Sci. and Technol.* 2011. V. 22. № 12. P. 125601. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/12/125601>
27. Shao J., Chen L., Lu W., et al. Backside-illuminated infrared photoluminescence and photoreflectance: Probe of vertical nonuniformity of HgCdTe on GaAs // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. № 12. P. 121915. <https://doi.org/10.1063/1.3373595>

АВТОРЫ

Максим Станиславович Ружевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57427011200; <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>; max.ruzhevich@niuitmo.ru

Карим Джафарович Мынбаев — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 6602141057; <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>; mynkad@mail.ioffe.ru

Дмитрий Дмитриевич Фирсов — кандидат физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 54385164600; <https://orcid.org/0000-0001-7608-9580>; d.d.firsov@gmail.com

Олег Сергеевич Комков — доктор физико-математических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего

AUTHORS

Maxim S. Ruzhevich — PhD Student, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57427011200; <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>; max.ruzhevich@niuitmo.ru

Karim D. Mynbaev — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 6602141057; <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>; mynkad@mail.ioffe.ru

Dmitrii D. Firsov — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022, Russia; Scopus ID: 54385164600; <https://orcid.org/0000-0001-7608-9580>; d.d.firsov@gmail.com

Oleg S. Komkov — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Acting Head of the Department at the Saint-Peters-

кафедрой Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 8862670700; <https://orcid.org/0000-0002-8999-1175>; okomkov@yahoo.com

Василий Семенович Варавин — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 7003347783; <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>; varavin@isp.nsc.ru

Владимир Григорьевич Ремесник — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 6602971779; <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>; remesnik@isp.nsc.ru

Максим Витальевич Якушев — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 35363240800; <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>; yakushev@isp.nsc.ru

burg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022, Russia; Scopus ID: 8862670700; <https://orcid.org/0000-0002-8999-1175>; okomkov@yahoo.com

Vasily S. Varavin — PhD (Physics and Mathematics), Senior Research Scientist, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 7003347783; <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>; varavin@isp.nsc.ru

Vladimir G. Remesnik — PhD (Physics and Mathematics), Senior Research Scientist, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 6602971779; <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>; remesnik@isp.nsc.ru

Maxim V. Yakushev — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 35363240800; <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>; yakushev@isp.nsc.ru

*Статья поступила в редакцию 12.11.2023
Одобрена после рецензирования 24.01.2024
Принята к печати 27.03.2024*

*The article was submitted to the editorial office 12.11.2023
Approved after review 24.01.2024
Accepted for publication 27.03.2024*