

УДК 621.315.592

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ\*, \*\*, С.Н. НЕСМЕЛОВ\*, \*\*, С.М. ДЗЯДУХ\*, \*\*, Г.Ю. СИДОРОВ\*\*\*, В.С. ВАРВИН\*\*\*, С.А. ДВОРЕЦКИЙ\*, \*\*, Н.Н. МИХАЙЛОВ\*\*\*, М.В. ЯКУШЕВ\*\*\*

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО МЛЭ $n(p)$ - $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ С ПАССИВИРУЮЩИМИ СЛОЯМИ $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ И $\text{Al}_2\text{O}_3$

В работе приводятся результаты исследований полной проводимости МДП-структур на основе гетерозепитаксиального МЛЭ  $n(p)$ - $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  с диэлектрическими покрытиями  $\text{SiO}_2$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в диапазоне частот тестового сигнала 10 кГц - 1 МГц при температурах от 8 до 225 К. Определены основные параметры МДП-структур с различными диэлектриками.

**Ключевые слова:** МДП-структура,  $\text{HgCdTe}$ , молекулярно-лучевая эпитаксия, варизонный слой, вольт-фарадная характеристика, пассивация

Узкозонный твердый раствор теллурид кадмия и ртути широко применяется при создании высокочувствительных инфракрасных детекторов [1]. Развитие метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ)  $\text{HgCdTe}$  стимулировало исследования поверхностно-барьерных структур на основе варизонного  $\text{HgCdTe}$  [2-4], в том числе с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием  $\text{CdTe}$  [5]. Рабочие характеристики матриц фотодиодов на основе  $\text{HgCdTe}$  во многом определяются свойствами пассивирующих покрытий [6], что стимулирует развитие методов управления свойствами систем диэлектрик- $\text{HgCdTe}$ .

В настоящее время достаточно подробно исследованы электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе МЛЭ  $\text{HgCdTe}$  с низкотемпературным плазмохимическим двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  [7]. Также перспективным пассивирующим покрытием является  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (сапфир), сформированный низкотемпературным плазменным методом атомарно-слоевого нанесения [8]. Известны исследования МДП-структур на основе объемного  $\text{HgCdTe}$  с диэлектриком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [9], но исследований электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе гетерозепитаксиального МЛЭ  $n(p)$ - $\text{HgCdTe}$  с пассивирующим покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  пока явно недостаточно. Целью данной работы является исследование электрофизических характеристик МДП-структур на основе варизонного МЛЭ  $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  с пассивирующим покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также сравнительный анализ характеристик МДП-структур на основе МЛЭ  $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  с пассивирующими покрытиями  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Исследуемые гетерозепитаксиальные структуры на основе  $\text{HgCdTe}$  были выращены методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из  $\text{GaAs}(013)$ . Состав соединения в рабочем слое для всех образцов был близок к 0.22. При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным составом  $\text{CdTe}$ . Состав  $\text{CdTe}$  в верхнем варизонном слое вблизи границы раздела  $\text{HgCdTe}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  достигал 0.44, а толщина верхнего варизонного слоя была близка к 0.5 мкм. Исследовались МДП-структуры на основе  $p$ - $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (структура №1) и на основе  $n$ - $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (структура №2) с приповерхностными варизонными слоями. По данным холловских измерений интегральная концентрация дырок в эпитаксиальной пленке структуры №1 составляла  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация электронов для структуры №2 –  $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Диэлектрические покрытия и металлические полевые электроды формировались для структур №1 и №2 одновременно в едином технологическом цикле. Химико-механическая обработка поверхности перед нанесением диэлектрика  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не проводилась. При напылении металлических полевых электродов из индия для структур №1 и №2 использовались различные маски, поэтому при помощи оптической микроскопии для каждой МДП-структуры предварительно определялась площадь металлического электрода. Площади полевых электродов для структур №1 и №2 составили 0.261 и 0.182  $\text{мм}^2$ , соответственно. Для сравнения также приводятся характеристики МДП-структур на основе  $p$ - $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{SiO}_2$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  (структура №3) и на основе  $n$ - $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{SiO}_2$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  (структура №4) с варизонными слоями, которые имели близкие параметры. Интегральная концентрация

дырок в эпитаксиальной пленке структуры №3 составляла  $1.0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация электронов для структуры №4 –  $2.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки при измерениях принималось изменение напряжения от отрицательных значения к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

На рис.1 и 2 показаны вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур №1 и №2 с диэлектриком  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , соответственно, измеренные при температуре 77 К на разных частотах при прямой и обратной развертке напряжения. Влияние на измеряемую емкость сопротивления объема эпитаксиальной пленки исключено для обеих структур [4]. Различие емкостей диэлектрика (емкостей МДП-структур в режиме обогащения) связано с различием площадей полевых электродов для структур №1 и №2. На одной частоте ВФХ при 77 К для МДП-структур на основе  $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{Al}_2\text{O}_3$  принимают более высокочастотный вид, чем для МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . На рис.3 и 4 приведены ВФХ МДП-структур №3 и №4 с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ , соответственно, измеренные при температуре 77 К на разных частотах.

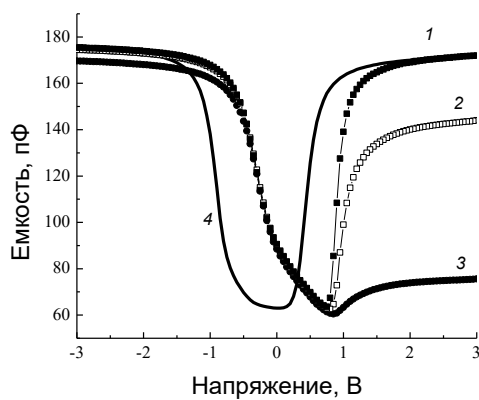


Рис. 1. ВФХ МДП-структуры на основе  $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te} / \text{Al}_2\text{O}_3$  с варизонным слоем (структура №1), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 4) и обратной (кр. 1-3) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 4 – 10; кр. 2 – 200; кр. 3 – 1000

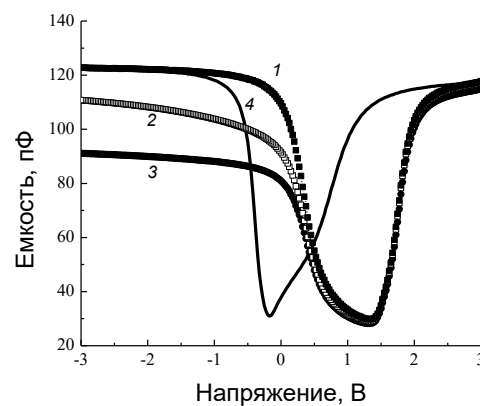


Рис. 2. ВФХ МДП-структуры на основе  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te} / \text{Al}_2\text{O}_3$  с варизонным слоем (структура №2), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 4) и обратной (кр. 1-3) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 4 – 10; кр. 2 – 200; кр. 3 – 1000

Из сравнения рис.1-4 следует, что для структур с диэлектриком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  емкость МДП-структуры в обогащении (120-178 пФ из рис.1, 2) значительно превышает аналогичную величину для двухслойного диэлектрика  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  (которая составляет 37-39 пФ из рис.3, 4), что связано с большей диэлектрической проницаемостью  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и меньшей толщиной слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (70-80 нм) по сравнению с  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  (около 100 нм). Сравнение рис.2 и 4 показывает, что для структуры №4 ВФХ имеют на одной частоте более высокочастотный вид, чем для структуры №2. Интересной особенностью ВФХ МДП-структур с диэлектриком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  являются близкие значения емкости в минимуме низкочастотной ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения (рис.1 и 2), чего не наблюдается для структур с  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  (особенно для  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ , рис.4). При этом, для обеих структур №2 и №4 наклон ВФХ в обеднении более пологий при прямой развертке напряжения, чем при обратной, а в инверсии более пологий наклон при обратной развертке напряжения.

По наклону  $1/C^2(V)$  зависимости в режиме обеднения для всех структур определена средняя концентрация легирующей примеси в приповерхностном слое полупроводника. Затем путем численного решения уравнения Пуассона рассчитывались идеальные ВФХ, находилась емкость плоских зон и в результате сравнения экспериментальных ВФХ с идеальными определялись основные параметры МДП-структур №1-№4, которые приведены в табл. 1. Напряжение плоских зон для МДП-структур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  определялось при прямой развертке напряжения, а для МДП-структур на основе  $p\text{-HgCdTe}$  – при обратной развертке напряжения. Емкость диэлектрика определялась как емкость МДП-структуры в режиме обогащения на низкой частоте (2-20 кГц).

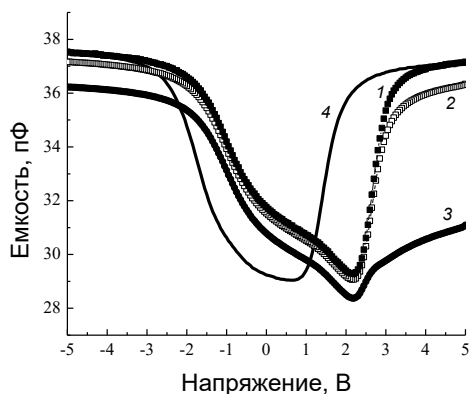


Рис. 3. ВФХ МДП-структуры на основе  $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te} / \text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  с варизонным слоем (структура №3), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 4) и обратной (кр. 1-3) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 4 – 20; кр. 2 – 200; кр. 3 – 1000

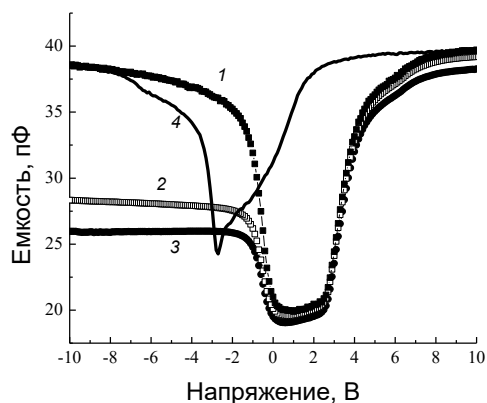


Рис. 4. ВФХ МДП-структуры на основе  $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te} / \text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  с варизонным слоем (структура №4), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 4) и обратной (кр. 1-3) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 4 – 10; кр. 2 – 200; кр. 3 – 1000

Табл. 1

Параметры МДП-структур, определенные из ВФХ при 77 К

№	Емкость диэлектрика, пФ	Напряжение плоских зон, В	Плотность фиксированного заряда, $\text{см}^{-2}$	Плотность подвижного заряда, $\text{см}^{-2}$	Концентрация легирующей примеси по $1/C^2(V)$ в обеднении, $\text{см}^{-3}$
1	175.6	-0.6	$2.22 \cdot 10^{11}$	$1.92 \cdot 10^{11}$	$4.26 \cdot 10^{15}$
2	123.3	1.05	$4.44 \cdot 10^{11}$	$7.32 \cdot 10^{11}$	$1.17 \cdot 10^{15}$
3	37.5	-2.05	$1.56 \cdot 10^{11}$	$4.73 \cdot 10^{10}$	$4.66 \cdot 10^{15}$
4	39.7	1.5	$1.24 \cdot 10^{11}$	$3.39 \cdot 10^{11}$	$6.63 \cdot 10^{14}$

На рис.5 приведены температурные зависимости емкости диэлектрика для структур №1-№4, измеренные в обогащении на частоте 20 кГц при использовании последовательной схемы замещения. Из рисунка видно, что температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  различны. На рис.6 показаны температурные зависимости дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) в сильной инверсии, измеренные для структур №1-№4 на частоте 200 кГц. Из рисунка видно, что для структур №1-№3 значения дифференциального сопротивления ОПЗ близки между собой при температуре 77 К. Дифференциальное сопротивление ОПЗ для структуры №4 значительно больше, что может быть связано с высоким качеством эпитаксиальной пленки.

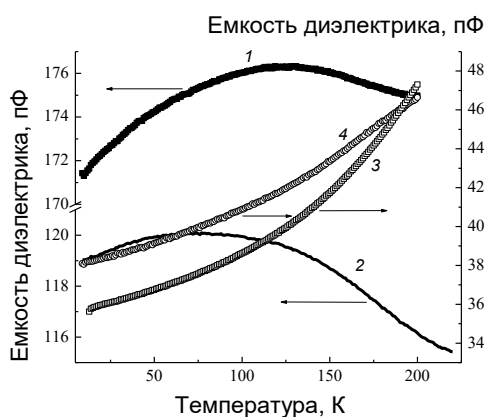


Рис.5. Зависимости емкости диэлектрика от температуры для МДП-структур на основе  $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ , измеренные на частоте 20 кГц, для структур, №: кр. 1 – 1; кр. 2 – 2; кр. 3 – 3; кр. 4 – 4

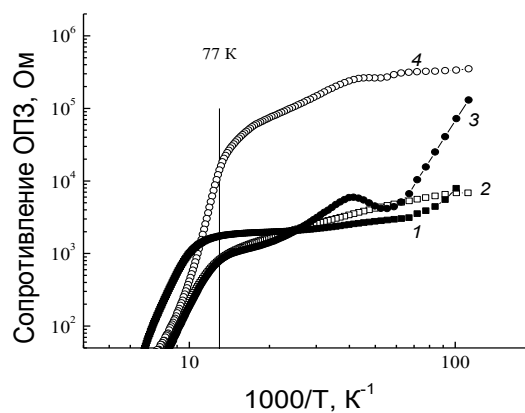


Рис.6. Зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ от обратной температуры в режиме сильной инверсии для МДП-структур на основе  $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ , измеренные на частоте 200 кГц, для структур, №: кр. 1 – 1; кр. 2 – 2; кр. 3 – 3; кр. 4 – 4

Таким образом, измерения ВФХ при 77 К показали, что МДП-структуры с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  обладают достаточно большой емкостью диэлектрика (по сравнению с  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ ), значительной модуляцией емкости на ВФХ, высокой электрической прочностью и малыми значениями напряжений плоских зон. Плотность фиксированного заряда для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  немного превышает плотность фиксированного заряда для системы  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ . Плотность подвижного заряда для структур с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  превышает плотность подвижного заряда для структур с  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  примерно в 2 раза для  $n\text{-HgCdTe}$  и в 3-4 раза для  $p\text{-HgCdTe}$ . Гистерезисные явления в  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  имеют как общие черты, так и отличия. В отличие от МДП-структур с  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  для структур с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  незначительны различия значений емкости в минимуме низкочастотной ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения. Это может означать крайне малую плотность подлежащих дефектов вблизи границы раздела, способных изменять зарядовое состояние при изменении напряжения смещения [10].

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта (№ 8.2.10.2015), в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта *р\_Сибирь\_а* № 13-07-98023. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФП СО РАН Васильеву В.В., Кузьмину Н.В., Парму И.О. за помощь в изготовлении структур.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Rogalski A. Infrared detectors: 2nd. ed. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 876 p.  
 Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Коханенко А.П. и др. // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 2. – С. 35-39.  
 Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Thin Solid Films. – 2012. – V. 522C. – P. 261-266.  
 Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Opto-Electronics Review. – 2014. – V. 22. – No. 4. – P. 236-244.  
 Овсяк В.Н., Курышев Г.Л., Сидоров Ю.Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. □ Новосибирск: Наука, 2001. – 376 с.  
 Singh R., Gupta A.K., Chhabra K.C. // Defence Science Journal. – 2013. – V. 41. – No. 3. – P. 205-239.  
 Васильев В. В., Войцеховский А. В., Дульцев Ф. Н. и др. // Прикладная физика. – 2007. – № 5. – С. 63-66.  
 Fu R., Pattison J. // Optical Engineering. – 2012. – V. 51. – No. 10. – P. 104003-1-104003-4.  
 Войцеховский А.В., Давыдов В.Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. – Томск: Радио и связь, 1990. – 327 с.  
 Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Талипов Н.Х. // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 10. – С. 5-19.  
 \*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г.Томск, Россия  
 \*\*Сибирский физико-технический институт ТГУ, г.Томск, Россия  
 \*\*\*Институт физики полупроводников СО РАН, г.Новосибирск, Россия  
 E-mail: [yav43@mail.tsu.ru](mailto:yav43@mail.tsu.ru)

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;  
 Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;  
 Дзядх Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;  
 Сидоров Георгий Юрьевич, к.ф.-м.н., науч. сотр.;  
 Варавин Василий Семенович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;  
 Дворецкий Сергей Алексеевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;  
 Михайлов Николай Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;  
 Якушев Максим Витальевич, д.ф.-м.н., вед. науч. сотр.

A.V. VOITSEKHOVSKII, S.N. NESMELOV, S.M. DZYADUKH, G.YU. SIDOROV, V.S. VARAVIN, S.A. DVORETSKY,  
 N.N. MIKHAILOV, M.V. YAKUSHEV

#### THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF MIS STRUCTURES BASED ON MBE $N(P)\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{TE}$ WITH THE PASSIVATING LAYERS $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ AND $\text{Al}_2\text{O}_3$

The paper presents the results of studies of admittance of MIS structures based on heteroepitaxial MBE  $n(p)\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  with an insulator coating  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the test signal frequency range 10 kHz - 1 MHz at temperatures ranging from 8 to 225 K. The main parameters of MIS structures with different insulators were determined.

**Keywords:** MIS structure, HgCdTe, molecular beam epitaxy, graded-gap layer, capacitance-voltage characteristic, passivation

## REFERENCES

1. Rogalski A. Infrared detectors: 2nd. ed., New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, 876 p.
2. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Kokhanenko A.P., et al. Photoelectrical characteristics of mis structures on the basis of heteroepitaxial HgCdTe, *Russian Phys. J.*, 2005, vol. 48, no. 2, pp. 143-147.
3. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // *Thin Solid Films.* – 2012. – V. 522C. – P. 261-266.
4. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Influence of composition of the near-surface graded-gap layer on the admittance of metal-insulator-semiconductor structures based on graded-gap MBE n-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te in wide temperature range, *Opto-Electronics Review*, 2014, vol. 22, no. 4, pp. 236-244.
5. Ovsyuk V.N., Kuryshev G.L., Sidorov Yu.G., et al, Matrichnyue fotopriemnyue ustroystva infrakrasnogo diapozona, Novosibirsk: Nauka, 2001, 376 p. (In Russ.)
6. Singh R., Gupta A.K., Chhabra K.C. // *Defence Science Journal.* – 2013. – V. 41. – No. 3. – P. 205-239.
7. Vasil'ev V.V., Voitsekhovskii A.V., Dultsev F.N., et al., Plazmochimicheskoe osagdenie plenok dioxide i nitrida kremniya dlya passivatsii poverchnosti CRT, *Prikladnaya Fizika* 2007, no. 5, pp. 62-67. (In Russ.)
8. Fu R., Pattison J. // *Optical Engineering.* – 2012. – V. 51. – No. 10. – P. 104003-1-104003-4.
9. Voitsekhovskii A.V., Davidov V.N. Fotoelektricheskie MDP-struktury iz uzkozonnyh poluprovodnikov. – Tomsk: Radio i svjaz', 1990. – 327 p.
10. Voitsekhovskii A.B., Grigoiev D.V., Talipov N.Kh. // Ion implantation into heteroepitaxial Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te grown by molecular-beam epitaxy, *Russian Phys. J.*, 2008. vol. 51. no 10. pp. 1001-1015.

\*National Research Tomsk State University, Tomsk. Russia,

\*\*Siberian Physical-Technical Institute TSU, Tomsk. Russia,

\*\*\*Institute Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk. Russia

E-mail: [vav43@mail.tsu.ru](mailto:vav43@mail.tsu.ru)

Voitsekhovskii Alexander Vasilievich, Prof., Dr. Sc., Head of Chair;

Nesmelov Sergey Nikolaievich, Senior Researcher, PhD;

Dzyadukh Stanislav Mikhailovich, Senior Researcher, PhD.;

Sidorov Georgy Yurievich, Researcher, PhD.;

Varavin Vasily Semenovich, Senior Researcher, PhD.;

Dvoretzkii Sergey Alexeevich, PhD., Head of Laboratory;

Mikhailov Nikolay Nikolaevich, Senior Researcher, PhD.;

Yakushev Maxim Vitalievich, Leading Researcher, Dr. Sc..