

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-3-14

УДК 539.216

Фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе HgCdTe nВn со сверхрешёткой в барьерной области

Александр Васильевич Войцеховский¹, Станислав Михайлович Дзядх²,
Дмитрий Игоревич Горн³✉, Николай Николаевич Михайлов⁴,
Сергей Алексеевич Дворецкий⁵, Георгий Юрьевич Сидоров⁶,
Максим Витальевич Якушев⁷

^{1, 2, 3, 4}Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
^{4, 5, 6, 7}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

¹vav43@mail.tsu.ru <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>

²bonespirit@mail2000.ru <https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>

³gorn.di@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>

⁴mikhailov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

⁵dvor@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

⁶george@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>

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

Аннотация

Предмет исследования. Применение сверхрешёток в качестве барьерных слоёв в униполярных барьерных nВn-структурах на основе n-HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, для целей фотоприёма. **Цель работы.** Целью работы было определение степени влияния оптического воздействия в инфракрасном диапазоне на электрофизические характеристики nВn-структур на основе HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, со сверхрешёткой в барьерной области. **Метод.** Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращивались плёнки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, представляющие собой nВn-структуры со сверхрешёткой из 18 периодов $\text{Hg}_{0,2}\text{Cd}_{0,8}\text{Te}$ (9 нм)/ HgTe (2 нм). Из данных плёнок были изготовлены структуры металл — диэлектрик — полупроводник. Исследования фотоэлектрических свойств проводились методом спектроскопии адмиттанса при отсутствии и наличии подсветки инфракрасным светодиодом с длиной волны 940 нм. **Основные результаты.** Показано, что оптическое воздействие в инфракрасном диапазоне оказывает заметное влияние на электрофизические характеристики nВn-структур на основе HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, со сверхрешёткой в барьерной области. При этом данное влияние не является аналогичным поведению классических структур металл — диэлектрик — полупроводник в условиях оптического воздействия, что указывает на вклад сверхрешётки в формирование фотоэлектрических характеристик исследованных структур. Описанные выше эффекты, по-видимому, связаны с влиянием перестройки энергетических уровней (минизон) в сверхрешётке в барьерной области nВn-структуры. **Практическая значимость.** С учётом того факта, что применение сверхрешёток в барьерных nВn-структурах на основе n-HgCdTe рассматривается как наиболее перспективный способ устранения потенциального барьера для неосновных носителей заряда, результаты данной работы могут составить основу для разработки конструкций фоточувствительных структур для среднего (mid-wave infrared, MWIR) и дальнего (long-wave infrared, LWIR) диапазонов и последующего создания фотоприёмных элементов.

Ключевые слова: барьерная структура, HgCdTe, nBn, сверхрешётка, молекулярно-лучевая эпитаксия, униполярная структура, фотоприёмное устройство, фотоэлектрические свойства, адмиттанс

Благодарность: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

Ссылка для цитирования: Войцеховский А.В., Дзядх С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе HgCdTe nBn со сверхрешёткой в барьерной области // Оптический журнал. 2024. Т. 91 № 10. С. 3–14. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-3-14>

Коды OCIS: 250.5590, 040.4200, 040.3060.

Photoelectric properties of MIS structures based on HgCdTe nBn with a superlattice in the barrier region

ALEXANDER V. VOITSEKHOVSKII¹, STANISLAV M. DZYADUKH², DMITRY I. GORN³✉,
NIKOLAY N. MIKHAILOV⁴, SERGEY A. DVORETSKY⁵, GEORGY YU. SIDOROV⁶, MAXIM V. YAKUSHEV⁷

^{1, 2, 3, 4}National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

^{4, 5, 6, 7}The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

¹vav43@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>

²bonespirit@mail2000.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>

³gorn.di@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>

⁴mikhailov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

⁵dvor@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

⁶george@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>

⁷yakushev@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

Abstract

Subject of study. Application of superlattices as barrier layers in unipolar barrier nBn structures based on n-HgCdTe grown by molecular beam epitaxy. **Aim of study.** To determine the degree of influence of optical radiation in the infrared range on the electrical characteristics of nBn structures based on HgCdTe, grown by molecular beam epitaxy, with a superlattice in the barrier region. **Method.** Epitaxial $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ films, which are nBn structures with a superlattice in the barrier region, were grown using molecular beam epitaxy. The superlattice of 18 periods in the structure under study included barrier layers 9 nm thick ($\text{Hg}_{0.2}\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$) and wells (HgTe) 2 nm thick. From these films, metal-insulator-semiconductor structures were produced, which were individual mesa structures on a single substrate, obtained by etching. Studies of photoelectric properties were carried out on an automated heterostructure admittance spectroscopy setup, consisting of a Janis non-optical closed-cycle helium cryostat with a Lake Shore 335 temperature controller. The study of structure admittance was carried out on an Agilent E4980A setup. The studies were carried out in the absence and presence of infrared light-emitting diode illumination with a wavelength of 940 nm. The sample under study was placed in a vacuum chamber on a cooled table with a hole. **Main results.** The measurement results presented in this work show that, obviously, illumination with an infrared light-emitting diode has a significant effect on the admittance characteristics of the structure under study. The dependences of electrical capacitance and differential conductivity on voltage observed in experiments, both in the dark and under illumination with an infrared light-emitting diode, cannot be directly interpreted by analogy with the analysis of admittance studies of classical metal-insulator-semiconductor structures. In particular, such effects as complex hysteresis when changing the scan direction when measuring dark characteristics, the frequency dependence of the level of dark capacitance in the enrichment mode, as well as the influence of illumination on the value of the capacitance in the enrichment mode have a form that is significantly different from the case of a classical metal-insulator-semiconductor

structure. These effects can be explained by the presence of a superlattice in the barrier layer of the structure, which has its own complex conductivity and affects the complex conductivity of the metal-insulator-semiconductor structure. At the same time, additional research is required to describe in detail the nature of the influence of the superlattice on the electrical properties of barrier structures based on HgCdTe. **Practical significance.** This work is devoted to the first studies of the photoelectric properties of the structure of nBn structures based on HgCdTe, grown by molecular beam epitaxy, with a superlattice in the barrier region. Taking into account the fact that the use of superlattices in barrier nBn structures based on n-HgCdTe is considered as the most promising way to eliminate the potential barrier for minority charge carriers, the results of this work can form the basis for the development of designs for photosensitive structures in mid-wave infrared and long-wave infrared ranges and the subsequent creation of photodetectors elements. Photoelectric measurements are part of the photosensitive structure development process aimed at creating highly sensitive mid-wave infrared and long-wave infrared photonic detectors.

Keywords: barrier structure, HgCdTe, nBn, superlattice, molecular beam epitaxy, unipolar structure, photodetector, photoelectric properties, admittance

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, Project № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>

For citation: Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A., Sidorov G.Yu., Yakushev M.V. Photoelectric properties of MIS structures based on HgCdTe nBn with a superlattice in the barrier region [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 10. P. 3–14. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-3-14>

OCIS codes: 250.5590, 040.4200, 040.3060.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим уникальным свойствам HgCdTe является наиболее перспективным материалом для создания высокочувствительных фотонных детекторов инфракрасного (ИК) излучения, работающих в средней (3–5 мкм, MWIR — middle wavelength infrared) и дальней (8–14 мкм, LWIR — long wavelength infrared) частях спектра ИК излучения [1–3]. При этом современные MWIR и LWIR фотодиоды на основе HgCdTe имеют недостатки, связанные, во-первых, с необходимостью глубокого охлаждения подобных фотоприёмников, а, во-вторых, с применением дефектообразующих операций ионной имплантации и последующего высокотемпературного отжига при их изготовлении [4].

Перспективы создания MWIR и LWIR фотоприёмных устройств с повышенными характеристиками, работающих при более высоких температурах охлаждения, могут быть связаны с развитием технологии униполярных барьерных фоточувствительных структур на основе соединений HgCdTe [5, 6]. С другой стороны, их реализация позволила бы избавиться от технологических операций имплантации и отжига и при помощи метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) изготавливать

необходимые структуры в едином технологическом цикле [7].

Значительный теоретический задел по исследованию nBn-структур на основе HgCdTe как для среднего ИК диапазона, так и для длинноволновой части ИК спектра демонстрирует некоторые их преимущества по сравнению с фотодиодами на основе *p-n*-переходов в HgCdTe. Однако практической реализации таких фотоприёмных устройств препятствует, в частности, проблема наличия энергетического барьера для дырок в валентной зоне в структурах nBn на основе материала n-HgCdTe [8], которая к настоящему моменту не нашла эффективных подходов к своему решению [9, 10]. При этом на отдельных экспериментальных образцах удавалось достичь диффузионного ограничения темнового тока [11].

Альтернативным подходом в решении описанной проблемы является применение сверхрешёточных структур в качестве барьерного слоя nBn-структур на основе МЛЭ HgCdTe (nB(SL)n-структуры). В работе [12] был проведён обзор исследований, посвящённых данной теме, который демонстрирует, что возможность создания барьера на основе сверхрешётки, эффективно блокирующего ток электронов

и не препятствующего протеканию дырочного тока, является теоретически обоснованной.

При этом практическая реализация и экспериментальное исследование таких структур к настоящему моменту удавалась только двум научным группам [13, 14]. Известные экспериментальные работы описывают исключительно исследования темновых характеристик HgCdTe nVn -структур со сверхрешётками.

В данной работе были проведены первые исследования фотоэлектрических свойств nB(SL) nVn -структур на основе HgCdTe .

Целью работы было определение степени влияния оптического воздействия в ИК диапазоне на электрофизические характеристики nVn -структур на основе HgCdTe , выращенных методом МЛЭ, со сверхрешёткой в барьерной области.

Поскольку на текущем этапе развития технологии изготовления образцов nVn -структур на основе HgCdTe в экспериментальных исследованиях часто наблюдается доминирование токов поверхностной утечки, в данной работе исследования проводились для структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) методом спектроскопии адмиттанса (комплексной проводимости) [15, 16]. Данный метод позволяет определять широкий спектр свойств полупроводниковых структур — от параметров границы раздела полупроводник / диэлектрическое покрытие до выявления положения энергетических зон различных слоёв гетероструктуры со сверхрешёткой в качестве барьера nVn -системы. При этом данный метод является нечувствительным к поверхностным токам.

Настоящая работа является логическим продолжением работы [17], в которой методом спектроскопии адмиттанса были исследованы темновые (в отсутствие внешней и фоновой засветки) характеристики структуры МДП, в качестве полупроводника в которой использовалась nVn -структура на основе HgCdTe , выращенных методом МЛЭ, со сверхрешёткой в барьерной области.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментальных исследований в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) методом МЛЭ выращивались эпитаксиальные плёнки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, представляющие собой nVn -структуры со сверхрешёткой в барьер-

ной области. Гетероструктура выращивалась на подложке из $\text{GaAs}(013)$ с буферными слоями ZnTe и CdTe . Общая схема расположения слоёв в гетероструктуре изображена на рис. 1. Из данных плёнок были изготовлены МДП-структуры, представляющие собой отдельные мезаструктуры на единой подложке, полученные травлением в 0,5% раствора Br в HBr (вставка к рис. 1). В рамках данного исследования измерения проводились на мезаструктуре диаметром 250 мкм. В качестве диэлектрического слоя МДП-структур использовался Al_2O_3 , наносимый при температуре 120 °С путём плазменного атомно-слоевого осаждения. Полевой электрод и базовый контакт к полупроводнику были изготовлены из In , температура напыления которого не превышала 100 °С.

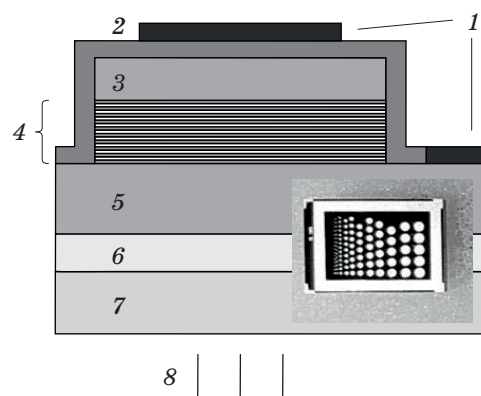


Рис. 1. Поперечное сечение отдельной мезаструктуры исследуемого образца, демонстрирующее взаимное расположение слоёв и направление падения излучения ИК светодиода при экспериментальных исследованиях. 1 — контакты In , 2 — Al_2O_3 , 3 — контактный слой, 4 — барьерный слой (сверхрешётка), 5 — поглощающий слой, 6 — буферные слои CdTe и ZnTe , 7 — GaAs подложка, 8 — излучение ИК светодиода. На вставке — фотография экспериментального образца, на поверхности которого расположена серия полевых электродов мезаструктур различного диаметра

Fig. 1. Cross section of an individual mesastructure of the sample under study, demonstrating the relative position of the layers and the direction of incidence of the infrared LED radiation during experimental studies. 1 — In contacts, 2 — Al_2O_3 , 3 — contact layer, 4 — barrier layer (superlattice), 5 — absorbing layer, 6 — CdTe and ZnTe buffer layers, 7 — GaAs substrate, 8 — IR LED radiation. The inset shows a photograph of an experimental sample, on the surface of which there is a series of mesastructures of various diameters

Параметры слоёв изготовленной структуры
Parameters of layers of the fabricated structure

Слой	Состав, мол. дол.	Толщина	Концентрация легирующей примеси In, см ⁻³
Контактный слой	0,32	1,6 мкм	2×10^{15}
Барьерный слой — сверхрешётка	Hg _{0,2} Cd _{0,8} Te/HgTe 18 периодов	8 нм/2 нм	—
Поглощающий слой	0,33	5,47 мкм	2×10^{15}

Сверхрешётка из 18 периодов в исследуемой структуре включала в себя барьерные слои толщиной 9 нм (Hg_{0,2}Cd_{0,8}Te) и ямы (HgTe) толщиной 2 нм. В процессе выращивания производилось легирование In контактного и поглощающего слоёв с концентрацией, близкой к 2×10^{15} см⁻³. Область сверхрешётки не подвергалась легированию. Непосредственно после выращивания плёнок проводилось измерения концентрации ($3,5 \times 10^{15}$ см⁻³), подвижности ($1,9 \times 10^4$ см²/В с) и времени жизни носителей заряда (1 мкс) при температуре 77 К. Параметры слоёв изготовленной структуры приведены в таблице.

Исследования проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса гетероструктур, состоящей из неоптического гелиевого криостата замкнутого цикла Janis с контроллером температуры Lake Shore 335, что позволило стабилизировать температуру исследуемого образца не хуже $\pm 0,1$ К в диапазоне 11–330 К. Непосредственно исследование адмиттанса структур производилось на установке Agilent E4980A, которая позволяет проводить измерения ёмкости и дифференциальной проводимости в диапазоне частот до 2 МГц. За прямое направление развёртки напряжения смещения при измерениях принималось изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление развёртки — от положительных к отрицательным.

Исследования проводились при отсутствии и наличии подсветки ИК светодиодом с длиной волны 940 нм. Исследуемый образец помещался в вакуумную камеру на охлаждаемый столик с отверстием. Излучение от ИК светодиода, проходя через фокусирующую систему, попадало на образец со стороны подложки через отверстие в охлаждаемом столике (рис. 1). В процессе измерения ток, протека-

ющий через светодиод, стабилизировался лабораторным источником питания и составлял величину 18 мА.

Излучение с длиной волны 940 нм, с одной стороны, практически беспрепятственно проходит сквозь подложку, с другой — полностью поглощается в поглощающем слое, находясь в области его активного межзонного поглощения. Фотогенерированные носители заряда за счёт диффузии проходят через слой со сверхрешёткой и в контактном слое, в зависимости от режима работы относительно поданного на индиевый полевой электрод напряжения смещения, попадают либо в область пространственного заряда (ОПЗ), либо в обогащённый слой, где участвуют в формировании адмиттанса структуры. Поскольку в режиме обогащения ОПЗ в приграничной с диэлектриком

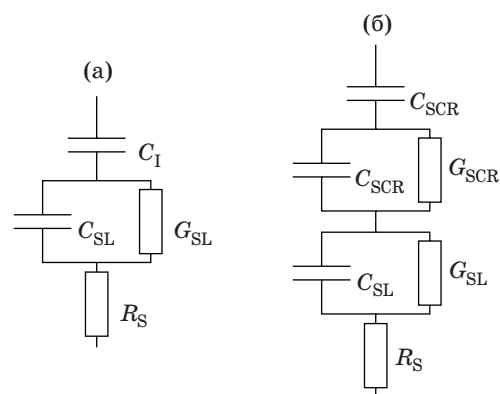


Рис. 2. Эквивалентная схема МДП-структуры на основе nBn со сверхрешёткой в барьерной области в режиме обогащения (а), а также общая эквивалентная схема структуры в режиме обеднения и инверсии (б)

Fig. 2. Equivalent circuit of an nBn-based MIS structure with a superlattice in the barrier region in the enrichment mode (a), as well as a general equivalent circuit of the structure in the depletion and inversion modes (b)

области отсутствует, то в данном режиме проще проводить анализ вклада сверхрешётки в общий адмиттанс структуры. На рис. 2а приведена эквивалентная схема МДП-структуры на основе nВп со сверхрешёткой в барьерной области в режиме обогащения. На схеме представлены следующие элементы: C_I — ёмкость диэлектрика, C_{SL} — ёмкость барьерного (В) слоя со сверхрешёткой, G_{SL} — проводимость слоя со сверхрешёткой; R_S — продольное сопротивление объёма эпитаксиальной плёнки. При построении данной схемы сделано предположение об отсутствии сквозного тока утечки через диэлектрик, а сопротивление R_S учитывает путь тока носителей заряда вдоль эпитаксиальной плёнки поглощающего слоя до омического контакта. На рис. 2б представлена общая эквивалентная схема структуры в режиме обеднения и инверсии. Здесь C_{SCR} — ёмкость ОПЗ, G_{SCR} — проводимость ОПЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках данной работы были проведены исследования ёмкости и дифференциальной проводимости МДП-структуры на основе nВп со сверхрешёткой в барьерной области в темновом режиме и при воздействии освещения.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости ёмкости и дифференциальной проводимости исследованной МДП-структуры при прямой развёртке напряжения в темновом режиме и при освещении ИК излучением через подложку, измеренные при температуре 77 К в диапазоне напряжений от -5 В до $+5$ В на частотах 10 кГц, 200 кГц и 1 МГц. Из представленных рисунков видно, что влияние подсветки на вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и зависимости дифференциальной проводимости от напряжения структуры имеют сложный характер, а уровень ёмкости и дифференциальной проводимости в режиме обогащения и сильной инверсии неоднозначно зависят от частоты тестового сигнала.

Стоит отметить, что особенностью данных структур, по сравнению с классическими МДП-структурами, является наличие гистерезиса необычного вида, который заключается в том, что в зависимости от направления развёртки существенно изменяется общий уровень ёмкости структуры во всём иссле-

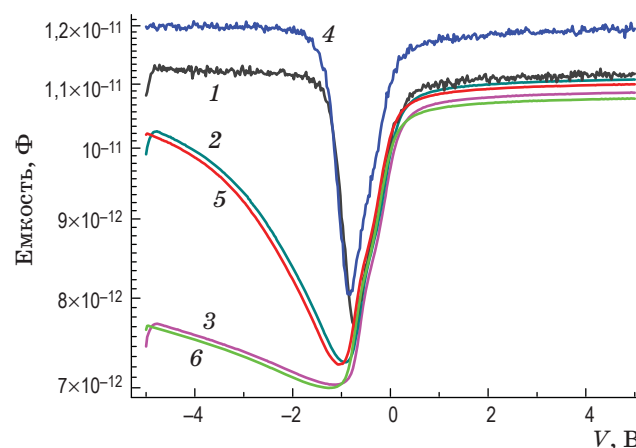


Рис. 3. Зависимости ёмкости исследованной МДП-структуры от напряжения V в темновом режиме (1, 2, 3) и при освещении ИК излучением (4, 5, 6), измеренные при температуре 77 К при прямой развёртке напряжения на частотах 10 кГц (1, 4), 200 кГц (2, 5) и 1 МГц (3, 6)

Fig. 3. Dependence of the capacitance of the studied MIS structure on voltage V in the dark mode (1, 2, 3) and under illumination with IR radiation (4, 5, 6), measured at a temperature of 77 K with a direct voltage sweep at frequencies of 10 kHz (1, 4), 200 kHz (2, 5) and 1 MHz (3, 6)

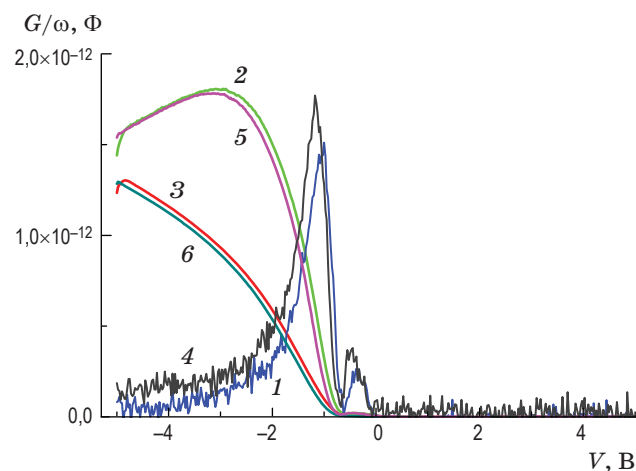


Рис. 4. Зависимости нормированной дифференциальной проводимости исследованной МДП-структуры от напряжения V в темновом режиме (1, 2, 3) и при освещении ИК излучением (4, 5, 6), измеренные при температуре 77 К при прямой развёртке напряжения на частотах 10 кГц (1, 4), 200 кГц (2, 5) и 1 МГц (3, 6)

Fig. 4. Dependences of the normalized differential conductivity of the studied MIS structure on voltage V in the dark mode (1, 2, 3) and under illumination with IR radiation (4, 5, 6), measured at a temperature of 77 K with a direct voltage sweep at frequencies of 10 kHz (1, 4), 200 kHz (2, 5) and 1 MHz (3, 6)

дованном диапазоне частот. Данный эффект усиливается с понижением температуры. Сравнение зависимостей ёмкости и дифференциальной проводимости от напряжения, полученных при разных направлениях развёртки напряжения, показывает, что наличие постоянной подсветки приводит к «выравниванию» уровней, как ёмкости, так и проводимости, полученных при прямом и обратном направлении развёртки напряжения смещения в исследованном интервале частот. То есть измеряемые ёмкость и проводимость структуры при освещении принимают близкие значения, в отличие от значений, полученных в темновом режиме, когда уровень ёмкости и проводимости при обратной развёртке существенно ниже, чем при прямой.

Само изменение уровня ёмкости и проводимости при воздействии подсветки ведёт себя сложным образом. Например, при 12 К общие уровни проводимости и ёмкости при подсветке снижаются относительно значений, полученных при прямой развёртке в темновом режиме (рис. 5 и 6). Однако при повышении температуры общие уровни ёмкости и проводимости при подсветке постепенно начинают превышать значения, полученные в темновом режиме в независимости от направления

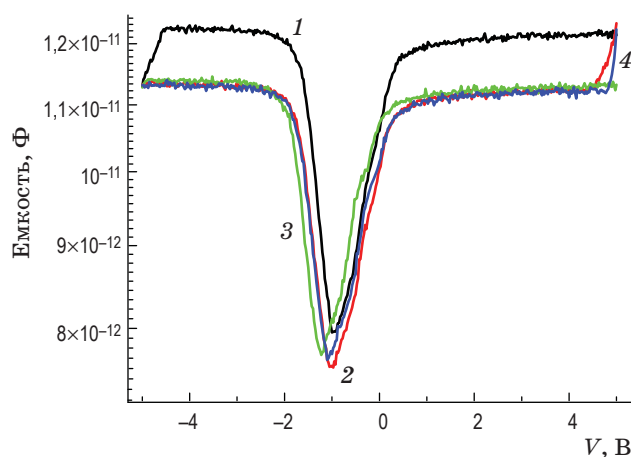


Рис. 5. ВФХ структуры, измеренные при прямом (1, 3) и обратном (2, 4) направлении развёртки напряжения V на частоте 10 кГц при температуре 12 К в темновом режиме (1, 2) и при подсветке ИК светодиода (3, 4)

Fig. 5. CV characteristics of the structure measured with the forward (1, 3) and reverse (2, 4) direction of voltage sweep V at a frequency of 10 kHz at a temperature of 12 K in dark mode (1, 2) and under illumination with an IR LED (3, 4)

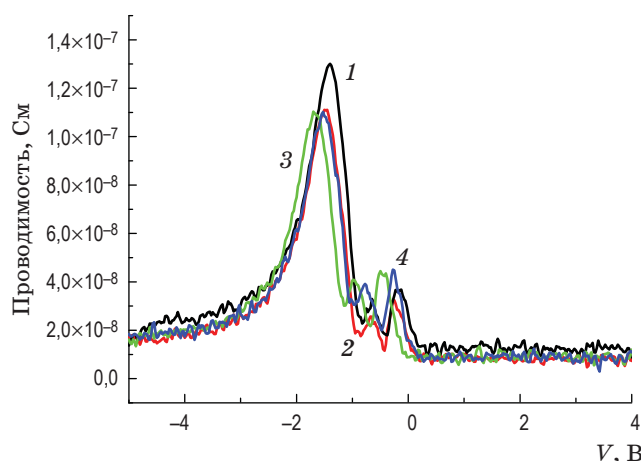


Рис. 6. Зависимость дифференциальной проводимости структуры от напряжения V , измеренные при прямом (1, 3) и обратном (2, 4) направлении развёртки напряжения при температуре 12 К в темновом режиме (1, 2) и при подсветке ИК светодиода (3, 4)

Fig. 6. Dependence of the differential conductivity of the structure on the voltage V , measured in the forward (1, 3) and reverse (2, 4) direction of the voltage sweep at a temperature of 12 K in the dark mode (1, 2) and under illumination with an IR LED (3, 4)

развёртки напряжения. Отметим, что два пика проводимости, проявляющихся при температуре 12 К в режиме обеднения (рис. 6) связаны с наличием на границе раздела диэлектрик-полупроводник большой плотности поверхностных состояний, что также проявляется и в виде перегибов ВФХ, которые усиливаются при освещении.

Описанное поведение ёмкости и дифференциальной проводимости при изменении направления развёртки напряжения в темновом режиме и при наличии освещения нехарактерно ни для классических МДП-структур с однородным полупроводником, ни для МДП-структур с полупроводником, имеющим неоднородности в виде барьеров в приграничной области с диэлектриком, то есть попадающие в ОПЗ [18].

Стоит отметить, что в отсутствие приграничного с диэлектриком варизонного слоя плотность медленных состояний на границе раздела относительно невысока. Поэтому определение концентрации основных носителей заряда можно проводить по ВФХ, измеренным как при прямой, так и при обратной

развёртке напряжения смещения. Для удобства при определении концентрации была выбрана прямая развёртка. По зависимости от отношения единицы на квадрат удельной ёмкости МДП-структуры от напряжения в режиме обеднения на частоте 200 кГц в широком температурном интервале была определена концентрация легирующей примеси в приграничной с диэлектрическим покрытием слое полупроводника, приведённая на рис. 7. Из рисунка видно, что в диапазоне температур от 11 К до почти 200 К концентрация основных носителей заряда слабо зависит от температуры и находится в диапазоне от $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В области более высоких температур происходит резкий рост концентрации основных носителей заряда, связанный с межзонной генерацией. По наклону зависимости концентрации от обратной температуры в диапазоне от 263 до 288 К была определена энергия активации носителей заряда, которая составила величину 306 мэВ (вставка на рис. 7). При этом ширина запрещённой зоны, определённая по эмпирической формуле [2] для того же самого диапазона температур, находится в диапазоне от 311 до 316 мэВ, что достаточно близко к значению, полученному

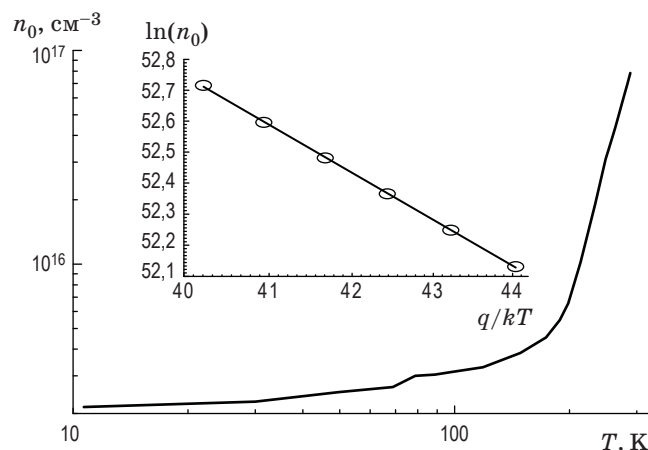


Рис. 7. Зависимость концентрации основных носителей заряда n_0 от температуры T , определённая по участку ВФХ в обеднении на частоте 200 кГц. На вставке — зависимости концентрации n_0 от обратной температуры

Fig. 7. Dependence of the concentration of the main carriers n_0 on temperature T , determined from the depletion portion of the current-voltage characteristic at a frequency of 200 kHz. The inset shows the dependence of the concentration n_0 on the reverse temperature

из температурной зависимости концентрации. Максимальная ширина ОПЗ для однородного полупроводника [19] для концентрации $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при температуре 10 К составляет величину 0,48 мкм, что недостаточно для непосредственного включения в ОПЗ барьерной области со сверхрешёткой. Всё взаимодействие с данной барьерной областью происходит посредством диффузии носителей заряда из квазинейтрального объёма полупроводниковой плёнки. Однако поведение ёмкости МДП-структуры в обогащении при прямой и обратной развёртке напряжения смещения, а именно, измерение величины уровня ёмкости при смене направления развёртки невозможно объяснить никакими «поверхностными явлениями» и процессами, происходящими в ОПЗ полупроводника. Данное влияние на измеряемые характеристики производит барьерный слой со сверхрешёткой, ёмкость которого на эквивалентной схеме последовательна ёмкости диэлектрика и по порядку величины сравнима с его ёмкостью.

На рис. 8 приведены температурные зависимости ёмкости и дифференциальной проводимости на частоте 200 кГц в режиме обогащения при напряжении смещения 4,0 В, построенные из ВФХ, измеренных при прямой

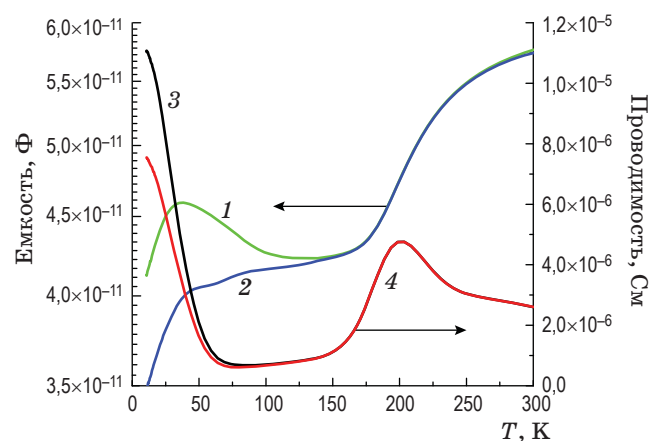


Рис. 8. Температурная зависимость ёмкости (1, 2) и дифференциальной проводимости (3, 4) МДП-структуры в режиме обогащения на частоте 200 кГц и напряжении 4 В при прямой (1, 3) и обратной (2, 4) развёртке напряжения смещения

Fig. 8. Temperature dependence of the capacitance (1, 2) and differential conductivity (3, 4) of the MIS structure in the enrichment mode at a frequency of 200 kHz and a voltage of 4 V with forward (1, 3) and reverse (2, 4) sweep of the bias voltage

и обратной развёртке напряжения в диапазоне от $-5,0$ В до $+5,0$ В. Отступ по напряжению от границы диапазона напряжений сделан, чтобы отсечь переходные процессы, проходящие при смене направления развёртки. Видно, что существенная разница в ёмкости и дифференциальной проводимости измеренных при прямой и обратной развёртке напряжениях наблюдается при низких температурах и практически сходится на нет при температурах выше 150 К, однако полностью данный эффект не исчезает даже при более высоких температурах. Существенное увеличение общего уровня ёмкости при воздействии постоянной подсветки происходит и при более высоких температурах и фиксируется даже при 300 К. Отсюда можно сделать вывод, что при анализе измерений адмиттанса в эквивалентной схеме нельзя пренебречь элементами, связанными с ёмкостью и проводимостью сверхрешётки во всём исследованном диапазоне температур.

На температурной зависимости проводимости в режиме обогащения обнаруживаются максимумы, которые можно интерпретировать как проявление процесса активации носителей заряда с энергетического уровня (рис. 9). Точное определение значения энергии

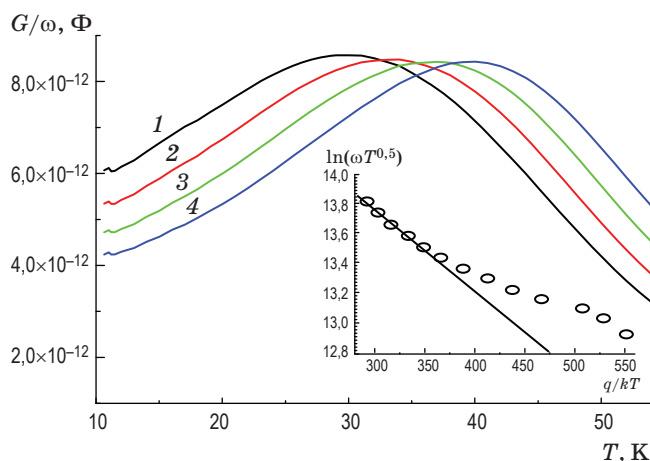


Рис. 9. Зависимость приведённой проводимости от температуры T , измеренная в режиме обогащения на частотах 550 кГц (1), 670 кГц (2), 820 кГц (3) и 1 МГц (4). На вставке — график Аррениуса, построенный по положениям максимумов проводимости

Fig. 9. Dependence of normalized conductivity on temperature T , measured in enrichment mode at frequencies of 550 kHz (1), 670 kHz (2), 820 kHz (3) and 1 MHz (4). The inset shows an Arrhenius plot based on the positions of conductivity maxima

данного уровня усложняется вкладом в измеряемую дифференциальную проводимость МДП-структуры ёмкости диэлектрика и продольного сопротивления объёма эпитаксиальной плёнки. Приблизительную оценку значения энергии активации можно получить, пренебрегая их вкладом в измеряемую проводимость. В таком случае график Аррениуса, построенный по положению максимумов проводимости МДП-структуры на температурной зависимости в режиме обогащения, ведёт себя подобно графику для квантовой ямы (вставка на рис. 9). В своей низкотемпературной части он существенно отклоняется от линейной зависимости, что указывает на процессы, аналогичные туннелированию носителей заряда из квантовой ямы [20]. Наклон высокотемпературной части даёт энергию активации носителей заряда из ямы $5,4$ мэВ.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемая картина поведения ВФХ и зависимости дифференциальной проводимости от напряжения, как темновых, так и при освещении ИК светодиодом, не поддаётся прямой интерпретации по аналогии с анализом адмиттансных исследований классических МДП-структур, включающих гетероструктуры различной конфигурации на основе однородного HgCdTe . В частности, наблюдаемый сложный гистерезис при смене направления развёртки при измерении темновых характеристик, частотная зависимость уровня темновой ёмкости в обогащении, а также влияние подсветки на значение ёмкости в режиме обогащения позволяют сделать несколько выводов о возможных свойствах исследованной структуры.

Частотная зависимость уровня темновой ёмкости в режиме обогащения, а также влияние подсветки на значение ёмкости в режиме обогащения могут говорить о наличии некоего нового элемента в гетероструктуре, обладающего комплексной проводимостью. Логично предположить, что в качестве этого элемента выступает барьерный слой в виде сверхрешётки. Ранее нами уже исследовался адмиттанс МДП-структуры на основе $p\text{-HgCdTe}$ с одиночной квантовой ямой из HgTe толщиной $5,6$ нм [21]. Было экспериментально показано, что для подобной МДП-структуры наличие

квантовой ямы приводит к появлению пиков на ВФХ и на зависимости дифференциальной проводимости от напряжения в режиме сильной инверсии. В [21] предполагалось, что ёмкость, связанная с зарядом, находящимся на уровнях размерного квантования в яме, вносит вклад в общую ёмкость структуры. Однако в случае сверхрешётки мы не наблюдаем экстремумов на измеренных характеристиках, что, вероятно, связано с тем, что состояния в сверхрешётке не изолированы, а формируют минизоны, по которым может осуществляться вертикальный перенос носителей заряда.

Оценка коэффициента поглощения в поглощающем слое, со стороны которого на структуру падает излучение ИК светодиода, даёт величину $(4,30–4,65) \times 10^4 \text{ см}^{-1}$, что позволяет оценить расстояние, на которое излучение проникает в структуру — порядка 0,2 мкм при толщине поглощающего слоя 5,47 мкм. При этом диффузионная длина неравновесных носителей заряда в материале составляет величину около 15 мкм для дырок и 150 мкм для электронов, что достаточно для того, чтобы избыточные носители заряда успевали за время, определяемое временем жизни, диффундировать к контактно-му слою, где сконцентрировано электрическое поле МДП-структуры (область ОПЗ).

Интерпретация полученных результатов методом эквивалентных схем затруднена в связи с усложнением эквивалентной схемы МДП-структуры, содержащей барьерный слой со сверхрешёткой, наличием в ней дополнительных элементов, что не позволяет по одним лишь измерениям адмиттанса однозначно определять значение ёмкости диэлектрика и продольного сопротивления объёма эпитаксиальной плёнки, а требует для этой цели дополнительных предположений о видах зависимости или непосредственно о величинах ёмкости и дифференциальной проводимости барьерного слоя со сверхрешёткой, полученных из других источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемые в экспериментах зависимости электрической ёмкости и дифференциальной проводимости от напряжения, как темновых, так и при освещении ИК светодиодом, не поддаются прямой интерпретации по аналогии с анализом адмиттансных исследований классических МДП-структур. В частности, такие эффекты, как сложный гистерезис при смене направления развёртки при измерении темновых характеристик, частотная зависимость уровня темновой ёмкости в обогащении, а также влияние подсветки на значение ёмкости в режиме обогащения имеют вид, существенно отличающийся от случая классической МДП-структуры. Данные эффекты могут быть объяснены наличием сверхрешётки в барьерном слое структуры, обладающей собственной комплексной проводимостью и влияющей на комплексную проводимость МДП-структуры. При этом для детального описания характера влияния сверхрешётки на электрофизические свойства барьерных структур на основе HgCdTe требуются дополнительные исследования.

Таким образом, показано, что оптическое воздействие в ИК диапазоне оказывает заметное влияние на электрофизические характеристики nBn-структур на основе HgCdTe, выращенных методом МЛЭ, со сверхрешёткой в барьерной области. При этом данное влияние не может быть описано аналогично поведению классических МДП-структур в условиях оптического воздействия, что указывает на вклад сверхрешётки в формирование фотоэлектрических характеристик исследованных структур. Описанные выше эффекты наблюдались авторами во множестве независимых друг от друга измерений и, по-видимому, связаны с влиянием перезарядки энергетических уровней (минизон) в сверхрешётке в барьерной области nBn-структуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chu J., Sher A. Device physics of narrow gap semiconductors. New York: Springer, 2010. 506 p.
2. Rogalski A. Infrared and terahertz detectors. 3 ed. Milton Park: Taylor & Francis, 2019. 1066 p. <https://doi.org/10.1201/b21951>
3. Kinch M.A. The future of infrared; III-Vs or HgCdTe? // J. Electron. Mater. 2015. V. 44. № 9. P. 2969–2976. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3717-5>
4. Gu R., Antoszewski J., Lei W., Madni I., Umana-Membreno G., Faraone L. MBE growth of HgCdTe on GaSb substrates for application in next generation infrared detectors // J. Cryst. Growth. 2017. V. 468. P. 216. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.12.034>
5. Maimon S., Wicks G.W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 151109. <https://doi.org/10.1063/1.2360235>

6. Shi Q., Zhang S.-K., Wang J.-L., Chu J.-H. Progress on nBn infrared detectors // *Infrared Millim. Waves*. 2022. V. 41. № 1. P. 139–150. <https://doi.org/10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.010>
7. Михайлов Н.Н., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Меншиков Р.В., Ремесник В.Г., Ужаков И.Н. Рост и характеристика nBn-структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91. № 2. С. 76–87. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-76-87>
Mikhailov N.N., Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Menshchikov R.V., Vladimir G. Remesnik V.G., Uzhakov I.N. Growth and characterization of nBn structures based on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ for photodetectors in the 3–5 μm spectral range // *Journal of Optical Technology*. 2024. V. 91. № 2. P. 105–111. <https://doi.org/10.1364/JOT.91.000105>
8. Itsuno A. M. Bandgap-engineered mercury cadmium telluride infrared detector structures for reduced cooling requirements // *Doctoral dissertation*. University of Michigan, 2012. 197 p.
9. Burlakov I.D., Kulchitsky N.A., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I. Unipolar semiconductor barrier structures for infrared photodetector arrays. Review // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2021. V. 66. № 9. P. 1084–1091. <https://doi.org/10.1134/S1064226921090035>
10. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y. Ch. 6. II-VI Semiconductor-based unipolar barrier structures for infrared photodetector arrays in handbook of II-VI semiconductor-based sensors and radiation detectors. Cham: Springer, 2023. P. 135–154. <https://doi.org/10.1134/S1064226921090035>
11. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Yu., Yakushev M.V. Diffusion-limited dark currents in mid-wave infrared HgCdTe-based nBn structures with Al_2O_3 passivation // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. V. 53. 055107 (6pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab5487>
12. Войцеховский А.В., Дзядх С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Униполярные барьерные структуры на основе n-HgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера. Обзор // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91. № 2. С. 6–22. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22>
Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A., Sidorov G.Yu., Yakushev M.V. Unipolar barrier structures based on n-HgCdTe with superlattices as a barrier. Review // *Journal of Optical Technology*. 2024. V. 91. № 2. P. 67–76. <https://doi.org/10.1364/JOT.91.000067>
13. Benyahia D., Martyniuk P., Kopytko M., Antoszewski J., Gawron W., Madejczyk P., Rutkowski J., Gu R., Faraone L. nBn HgCdTe infrared detector with HgTe(HgCdTe)/CdTe SLs barrier // *Opt. Quant. Electron.* 2016. V. 48. P. 215. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0439-8>
14. Izhnin I.I., Kurbanov K.R., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Unipolar superlattice structures based on MBE HgCdTe for infrared detection // *Applied Nanoscience*. 2020. № 10. P. 4571–4576. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01297-y>
15. Zubkov V.I., Yakovlev I.N., Litvinov V.G., Ermachin A.V., Kucherova O.V., Cherkasova V.N. Analysis of the electrostatic interaction of charges in multiple InGaAs/GaAs quantum wells by admittance-spectroscopy methods // *Semiconductors*. 2014. V. 48. P. 917–923. <https://doi.org/10.1134/S1063782614070227>
16. Izhnin I.I., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Admittance of barrier structures based on MBE HgCdTe // *Applied Nanoscience*. 2020. № 12. P. 403–409. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01636-z>
17. Войцеховский А.В., Дзядх С.М., Горн Д.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Определение электрофизических свойств МДП на основе nB(SL)n-структуры из HgCdTe в широком температурном диапазоне // *Прикладная физика*. 2023. № 5. С. 75–83. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-5-75-83>
Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Yu., Yakushev M.V. Determination of the electrical properties of MIS based on the nB(SL)n-structure of HgCdTe in a wide temperature range [in Russian] // *Applied Physics*. 2023. № 5. P. 75–83.
18. Дзядх С.М., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н. Особенности поведения дифференциальной емкости МДП-структуры при наличии слоев CdTe в варизонном слое полупроводниковой пленки HgCdTe // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56. № 9/2. С. 95–97.
Dzyadukh S.M., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N. Features of the behavior of the differential capacitance MIS structure in the presence of layers of CdTe in variband semiconductor film of HgCdTe // *Russian Physics Journal*. 2013. V. 56. № 9/2. С. 95–97.
19. Sze S.M. *Physics of semiconductor devices*: 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Ltd., 1981. 868 p.
20. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. Санкт-Петербург: Элмор, 2007. 220 с.
Zubkov V.I. *Diagnostics of semiconductor nanoheterostructures using admittance spectroscopy methods*. Saint Petersburg: Elmor, 2007. 220 p.
21. Izhnin I.I., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Voitsekhovskii A.V., Gorn D.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N. Admittance investigation of MIS structures with HgTe-based single quantum wells // *Nanoscale Research Letters*. 2016. V. 11:53. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1276-1>

АВТОРЫ

Александр Васильевич Войцеховский — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор Томского государственного университета, 634050, Томск, Россия; Scopus ID: 7003912639, <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>, vav43@mail.tsu.ru

AUTHORS

Alexander V. Voitsekhovskii — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Scopus ID: 7003912639, <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>, vav43@mail.tsu.ru

Станислав Михайлович Дзядух — канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; Scopus ID: 15730695900, <https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>, bonespirt@mail2000.ru

Дмитрий Игоревич Горн — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; Scopus ID: 36080464800, <https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>, gorn.di@gmail.com

Николай Николаевич Михайлов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 7006462618, <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>, mikhailov@isp.nsc.ru

Сергей Алексеевич Дворецкий — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6701661877, <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>, dvor@isp.nsc.ru

Георгий Юрьевич Сидоров — канд. физ.-мат. наук, заместитель директора, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 17435706500, <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>, george@isp.nsc.ru

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

Stanislav M. Dzyadukh — PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Scopus ID: 15730695900, <https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>, bonespirt@mail2000.ru

Dmitry I. Gorn — PhD in Physics and Mathematics, Head of Laboratory, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Scopus ID: 36080464800, <https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>, gorn.di@gmail.com

Nikolay N. Mikhaylov — Phd in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Senior Researcher, Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 7006462618, <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>, mikhailov@isp.nsc.ru

Sergey A. Dvoretzky — Phd in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Leading Researcher, Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6701661877, <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>, dvor@isp.nsc.ru

Georgy Yu. Sidorov — PhD in Physics and Mathematics, Deputy Head, Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 17435706500, <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>, george@isp.nsc.ru

Maxim V. Yakushev — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Deputy Head, Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 35363240800, <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>, yakushev@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 24.11.2023
Одобрена после рецензирования 09.04.2024
Принята к печати 30.08.2024

The article was submitted to the editorial office 24.11.2023
Approved after review 09.04.2024
Accepted for publication 30.08.2024