

УДК 621.315.592
EDN: SIVMPUPACS: 73.40QV, 73.21AS,
85.60GZ, 73.61GA**Характеристики МДП-систем на основе HgCdTe со сверхрешеткой в барьерной области***А. В. Войцеховский, С. М. Дзядух, Д. И. Горн, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Г. Ю. Сидоров, М. В. Якушев*

Представлены результаты исследования структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе n-HgCdTe nВп-структуры со сверхрешеткой в барьерной области. Исследования проводились методом спектроскопии адмиттанса в широком диапазоне температур, который позволяет определять широкий спектр свойств полупроводниковых гетероструктур. Получены зависимости адмиттанса от частоты и напряжения, а также временные зависимости релаксации электрической ёмкости при импульсной подаче напряжения смещения. Определена зависимость концентрации основных носителей заряда от температуры. По температурным зависимостям продольного сопротивления объема эпитаксиальной пленки и концентрации основных носителей заряда получены значения энергий активации. Проведен анализ влияния ИК-подсветки на различные характеристики структуры. Показано, что наличие постоянной ИК-подсветки приводит к изменению уровня ёмкости как в режиме инверсии, так и в режиме обогащения.

Ключевые слова: HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, МДП, барьерная структура, nВп, сверхрешетка, адмиттанс.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-57-63

Введение

Считается, что униполярные барьерные структуры на основе соединений HgCdTe являются перспективными для создания инфракрасных (ИК) фотоприёмных устройств с повышенными характеристиками, работающих при более высоких температурах охлаждения,

чем классические фотодиоды на основе HgCdTe [1].

Однако практической реализации приборов на основе соединений группы A^2B^6 и, в частности, на основе HgCdTe препятствует некоторое число фундаментальных, конструктивных и технологических проблем. Одной из них является проблема наличия энергетиче-

Войцеховский Александр Васильевич¹, гл.н.с., д.ф.-м.н.
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Дзядух Станислав Михайлович¹, н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: bonespirit@mail2000.ru

Горн Дмитрий Игоревич¹, зав. лаб., к.ф.-м.н.
E-mail: gorn.di@gmail.com

Дворецкий Сергей Алексеевич^{1,2}, с.н.с., к.ф.м.н.
E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Михайлов Николай Николаевич^{1,2}, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru

Сидоров Георгий Юрьевич², зам. директора, к.ф.-м.н.
E-mail: george@isp.nsc.ru

Якушев Максим Витальевич², зам. директора, д.ф.-м.н.
E-mail: yakushev@isp.nsc.ru

¹ Томский государственный университет.
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Институт физики полупроводников СО РАН
им. А. В. Ржанова.
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика
Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 31.05.2024

Принята к публикации 23.07.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И.,
Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю.,
Якушев М. В., 2024

ческого барьера для дырок в валентной зоне в структурах nVn на основе материала $HgCdTe$, образующегося за счёт наличия ненулевого разрыва валентной зоны [2, 3].

Перспективным подходом в решении проблемы наличия барьера для неосновных носителей заряда в барьерных фоточувствительных структурах на основе $HgCdTe$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), является применение сверхрешётчатых структур в качестве барьерного слоя ($nB(SL)n$ -структуры). Имеющиеся теоретические работы по данной теме обосновывают возможность создания барьера на основе сверхрешётки, эффективно блокирующего ток электронов и не препятствующего протеканию дырочного тока [4]. Изменение параметров сверхрешётки (составы и толщины слоёв) позволяет управлять положениями краёв энергетических зон в барьере и свести к минимуму величину разрывов энергетических зон на гетерограницах поглощающий слой/барьер/контактный слой [5].

Одной из важных проблем, сдерживающих развитие технологии униполярных барьерных фоточувствительных nVn -структур на основе $HgCdTe$ в целом, является доминирование токов поверхностной утечки, часто наблюдаемое при экспериментальном исследовании их темновых электрофизических характеристик и делающее невозможным прямое измерение объёмной компоненты темнового тока. При этом наряду с исследованиями вольт-амперных характеристик nVn -структур на основе МЛЭ $n-HgCdTe$ со сверхрешёткой в барьерной области [6] более широкие исследования электрофизических свойств могут быть проведены методом спектроскопии адмиттанса, который является хорошо зарекомендовавшим себя методом экспериментального изучения гетероструктур [7–9]. Данный метод позволяет определять широкий спектр свойств полупроводниковых структур – от параметров границы раздела полупроводник / диэлектрическое покрытие до выявления положения энергетических зон различных слоев гетероструктуры со сверхрешёткой. При этом данный метод является нечувствительным к поверхностным токам.

В данной работе представлены результаты исследования структур металл-диэлектрик-

полупроводник (МДП) на основе $n-HgCdTe$ nVn -структуры со сверхрешёткой в барьерной области методом спектроскопии адмиттанса (комплексной проводимости).

Образцы и методики измерения

Для проведения исследований в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск) были изготовлены образцы МДП-структур на основе $nB(SL)n$ -структур $HgCdTe$. В качестве подложки была использована пластина $GaAs$ толщиной 600 мкм с ориентацией (013), на которой для согласования кристаллических решеток были выращены буферные слои $ZnTe$ и $CdTe$ толщинами 0,03 мкм и 5,6 мкм, соответственно. Выращенная пленка $HgCdTe$ преднамеренно не легировалась. После выращивания эпитаксиальной пленки, производилось её травление через специальную маску на глубину, соответствующую положению границы раздела поглощающего и барьерного слоев. В результате на поверхности пленки были сформированы отдельно стоящие nVn -структуры (меза структуры), диаметр которых варьировался от 0,50 мм до 0,02 мм. После травления на всю поверхность наносился диэлектрический слой Al_2O_3 , имеющий функцию пассивирующего покрытия и функционального диэлектрика для полевых электродов из In , которые напылялись на каждой отдельной меза структуре. Далее по периметру экспериментального образца производилось травление диэлектрического слоя для последующего формирования обратного омического контакта из In . На рисунке 1 представлено схематическое представление расположения слоев в изготовленной МДП-структуре.

Исследования проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса гетероструктур. В состав исследовательского комплекса входило: пикоамперметр Keithley 6487, который использовался в качестве источника напряжения и измерителя тока; криогенная система термостатирования; система вакуумирования. Данная установка способна поддерживать длительное время поддерживать стабильную температуру рабочего столика, на котором располагается образец, в диапазоне от 11 К до 475 К с точностью термостатирования не хуже чем 0,2 К.

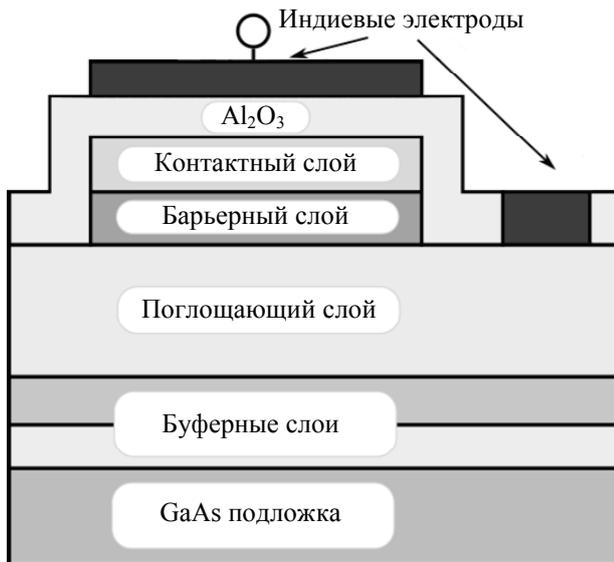


Рис. 1. Схематическое расположение слоев в исследуемой МДП-структуре на основе nB(SL)n-структур HgCdTe

В широком диапазоне температур в условиях экранирования от оптического излучения (темновой режим), а также при воздействии постоянной ИК-подсветки проведены измерения адмиттанса исследуемой структуры. Подсветка проводилась при помощи ИК-светодиода с длиной волны 940 нм, излучение которого в криостат попадало через специальный вакуумный оптический ввод, при этом светодиод всегда находился при комнатной температуре. Питание светодиода производилось стабилизированным током.

Результаты и их обсуждение

На рисунках 2 и 3 приведены зависимости от напряжения электрической ёмкости (вольт-фардная характеристика, ВФХ) и нормированной на циклическую частоту проводимости для структуры диаметром 0,5 мм при температуре 77 К на различных частотах. Видно, что воздействие постоянной подсветки при данной температуре приводит к значительному увеличению ёмкости и дифференциальной проводимости в режиме сильной инверсии, в режиме же обогащения подсветка приводит к их снижению. Определенная по наклону зависимости величины $1/C^2$ от напряжения в режиме обеднения концентрация основных носителей заряда на частоте 1 МГц в диапазоне температур от 12 К до 60 К

изменялась в небольших пределах и составляла величину $\sim 7,5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. При дальнейшем увеличении температуры концентрация носителей претерпевала существенный рост.

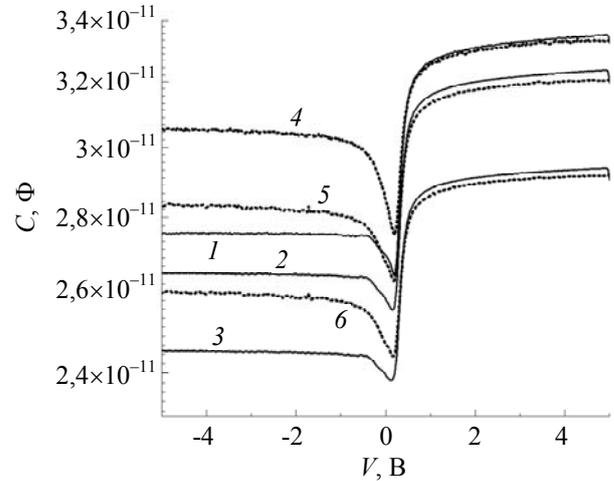


Рис. 2. ВФХ при температуре 77 К в темновом режиме (1, 2, 3) и при освещении ИК-светодиодом (4, 5, 6) при обратной развертке по напряжению на частотах 20 кГц (1, 4), 500 кГц (2, 5) и 1 МГц (3, 6)

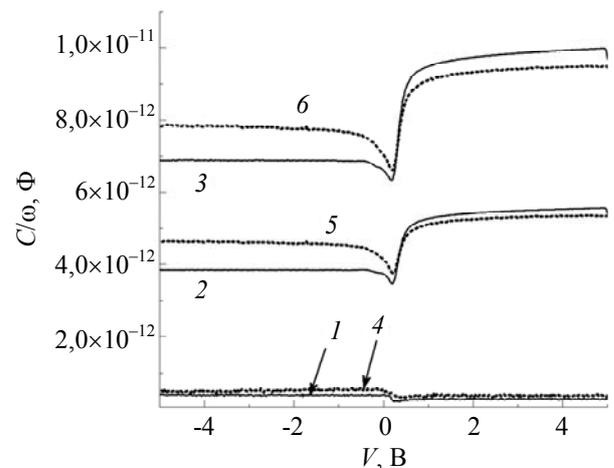


Рис. 3. Зависимость нормированной на циклическую частоту проводимости G/ω от напряжения V при температуре 77 К в темновом режиме (1, 2, 3) и при освещении ИК-светодиодом (4, 5, 6) при обратной развертке по напряжению на частотах 20 кГц (1, 4), 500 кГц (2, 5) и 1 МГц (3, 6)

На рисунке 4 приведены зависимости электрической ёмкости исследуемой структуры от температуры, измеренные в режиме обогащения при последовательной схеме замещения при прямой и обратной развертке напряжения в темновом режиме и при наличии подсветки на частотах 200 кГц и 1 МГц.

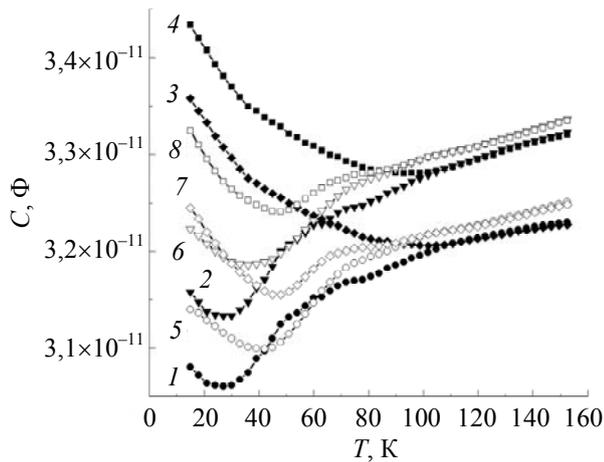


Рис. 4. Зависимости электрической ёмкости C от температуры T , измеренные в режиме обогащения при прямой (1, 2, 5, 6) и обратной (3, 4, 7, 8) развертке напряжения в темновом режиме (1, 2, 3, 4) и при наличии подсветки (5, 6, 7, 8) на частотах 200 кГц (2, 4, 6, 8) и 1 МГц (1, 3, 5, 7)

Из рисунка 4 видно, что различие хода прямой и обратной развертки по уровню ёмкости в режиме обогащения и в темновом режиме, и при наличии постоянной подсветки наблюдается только при достаточно низких температурах. Например, в темновом режиме различие хода прямой и обратной развертки перестает наблюдаться при достижении температуры 110 К, а наличие постоянной подсветки приводит к смещению положения данной точки в область более низких температур. Из рисунка также видно, что при низких температурах наблюдаются различия во влиянии постоянной подсветки на уровень ёмкости в режиме обогащения, измеренный при прямой и обратной развертке напряжения. Если при прямой развертке напряжения смещения при наличии подсветки уровень ёмкости увеличивается, то при обратной развертке наличие постоянной подсветки приводит к снижению ёмкости в режиме обогащения. При высоких температурах в независимости от направления развертки наличие постоянной подсветки приводит к увеличению уровня ёмкости в обогащении.

Поскольку продольное сопротивление объема эпитаксиальной пленки (R_s) для МДП-структур согласно эквивалентной схеме связано с протеканием тока перезарядки ёмкости вдоль поверхности пленки, его температурную зависимость можно использовать для определения энергии активации носителей за-

ряда в этом слое. При высоких температурах за счет малого значения ширины области пространственного заряда (менее 0,2 мкм) в область, формирующую сопротивление объема, включается поглощающий слой, а также барьерный и частично контактный слои. На рисунке 5 приведена температурная зависимость сопротивления объема на частоте 1 МГц при отсутствии освещения в диапазоне температур 282–292 К.

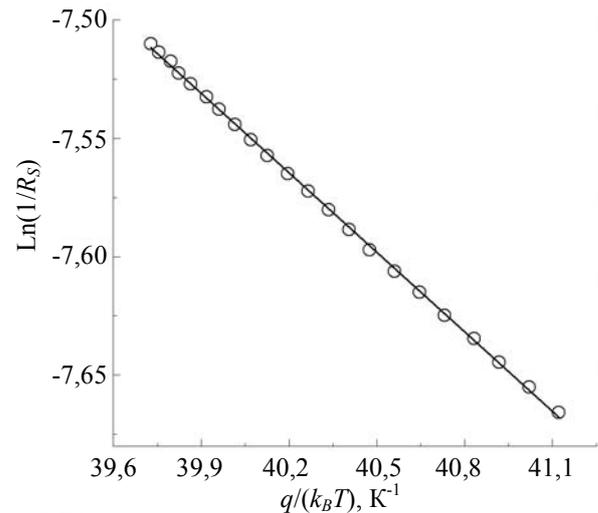


Рис. 5. Температурная зависимость сопротивления R_s на частоте 1 МГц

Видно, что в координатах $\text{Ln}(1/R_s)$ от $q/(k_B T)$ данная зависимость хорошо спрямляется, при этом коэффициент наклона аппроксимирующей прямой дает энергию активации, равную 0,224 эВ. Полученное значение энергии меньше ширины запрещенной зоны при данной температуре для поглощающего и контактного слоев. Вероятно, это свидетельствует о том, что данная энергия связана с процессами генерации-рекомбинации, происходящими в барьерном слое. Энергию активации по измерениям адмиттанса МДП-структур можно также определить по температурной зависимости концентрации основных носителей заряда, определенной из наклона зависимости обратного квадрата удельной ёмкости структуры в режиме обеднения. Энергия активации, определенная данным способом в диапазоне температур 282–292 К принимает значения, близкие к величине энергии, полученной из зависимости продольного сопротивления объема, и составляет примерно 0,250 эВ.

На рисунке 6 приведены зависимости электрической ёмкости от времени в режимах обогащения и сильной инверсии при импульсном характере подачи напряжения смещения из точки 0,0 В в точки +5,0 В и -5,0 В, соответственно. Температура при измерении составляла величину 77 К. Зависимости были получены как в темновом режиме, так и при наличии постоянной подсветки ИК-светодиодом.

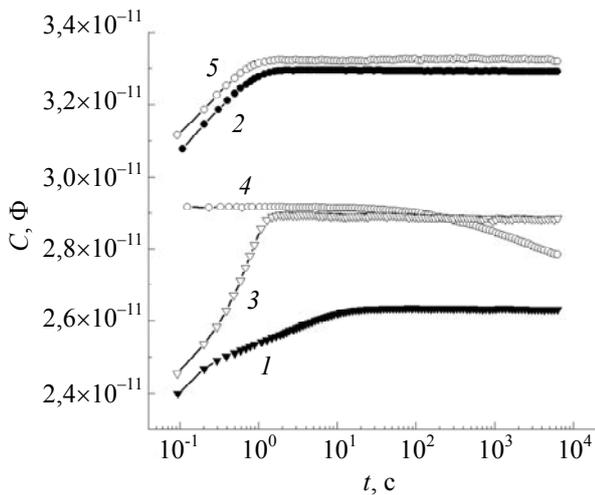


Рис. 6. Зависимости электрической ёмкости от времени в режимах обогащения (2, 4, 5) и сильной инверсии (1, 3) при импульсном характере подачи напряжения смещения при температуре 77 К при наличии (3, 4, 5) и отсутствии (1, 2) подсветки ИК-светодиодом

Из рисунка видно, что при импульсной подаче напряжения постоянный уровень ёмкости как в режиме инверсии, так и в режиме обогащения достигается за довольно продолжительное время. В отсутствие освещения в режиме сильной инверсии этот процесс занимает порядка 20 с, а в режиме обогащения – порядка 1 с. Из рисунка также видно, что наличие постоянной ИК-подсветки в обогащении приводит лишь к изменению уровня ёмкости и не влияет на временные характеристики. В режиме сильной инверсии наличие постоянной ИК-подсветки не только приводит к изменению уровня ёмкости, но и влияет на время установления постоянного уровня ёмкости, которое оставляет величину порядка 1 с. Также отметим, что импульсная подача напряжения смещения -5,0 В приводит к увеличению ёмкости, измеряемой при напряжении 0,0 В, причем наблюдения показывают, что процесс релаксации ёмкости при этом занимает достаточно длительное время.

Наличие продолжительного времени релаксации ёмкости в режиме обогащения возможно объяснить длительными процессами релаксации ёмкости барьерного слоя, и они вероятнее всего никак не связаны с процессами, проходящими на границе раздела Al₂O₃/контактный слой. В режиме сильной инверсии в отсутствие освещения увеличение времени релаксации ёмкости примерно в 10 раз объясняется дополнительным вкладом времени формирования инверсионного слоя за счет диффузионной составляющей тока неосновных носителей, ограниченной барьером. В случае наличия постоянной ИК-подсветки светодиодам с длиной волны 940 нм избыточные неосновные носители заряда приобретают энергию, достаточную для преодоления барьера, и время релаксации ёмкости в режиме сильной инверсии становится почти равным времени релаксации ёмкости в режиме обогащения.

Заключение

В данной работе приведены результаты исследования адмиттанса МДП-системы на основе nVn-структуры со сверхрешёткой в барьерной области в широком диапазоне температур в темновом режиме и при освещении ИК-излучением через подложку. В результате проведенных исследований получены зависимости адмиттанса от частоты и напряжения, а также временные зависимости релаксации электрической ёмкости при импульсной подаче напряжения смещения. Из высокочастотных измерений адмиттанса определена зависимость концентрации основных носителей заряда от температуры, которая в диапазоне температур от 12 К до 60 К изменялась в небольших пределах и составляла величину примерно $7,5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. По температурным зависимостям продольного сопротивления объема эпитаксиальной пленки и концентрации основных носителей заряда получены значения энергий активации. Энергии, полученные разными методами находятся в диапазоне 0,224–0,250 эВ. Проведен анализ влияния ИК-подсветки на различные характеристики структуры. Показано, что наличие постоянной ИК-подсветки приводит к изменению уровня ёмкости как в режиме инверсии, так и в режи-

ме обогащения. Подсветка приводит к уменьшению разности уровней ёмкости в обогащении при прямой и обратной развертке по напряжению, а также уменьшает температуру, при которой разность уровней ёмкости в режиме обогащения при разных направлениях развертки исчезает. Показано, что для данной структуры при температуре 77 К при отсутствии освещения релаксация ёмкости при импульсной подаче смещения занимает длительное время как в режиме сильной инверсии (порядка 10 с), так и в режиме обогащения (порядка 1 с). Наличие постоянной ИК-подсветки приводит к уменьшению времени релаксации ёмкости в режиме сильной инверсии до значения порядка 1 с, в режиме обогащения влияние подсветки на время релаксации ёмкости не обнаружено. Отсюда можно сделать вывод, что время релаксации ёмкости структуры зависит как от процессов, происходящих внутри барьерного слоя, так и по причине того, что барьерный слой препятствует потоку неосновных носителей заряда из квазинейтрального объема структуры.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-62-10021,
<https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Shi Q., Zhang S.-K., Wang J.-L., Chu J.-H. / J. Infrared Millim. Waves. 2022. Vol. 41. № 1. P. 139–150.
2. Burlakov I. D., Kulchitsky N. A., Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Gorn D. I. / Journal of Communications Technology and Electronics. 2021. Vol. 66. № 9. P. 1084–1091.
3. Kopytko M., Wrobel J., Jozwikowska K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N. D., Umanamembreno G. A., Faraone L., Becker C. R. / Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. № 1. P. 158–166.
4. 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.
5. Михайлов Н. Н., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Мещников П. В., Ремесник В. Г., Ужаков И. Н. / Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 76–87.
6. Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2023. № 4. P. 78–86.
7. Zubkov V. I., Yakovlev I. N., Litvinov V. G., Ermachihin A. V., Kucherova O. V., Cherkasova V. N. / Semiconductors. 2014. Vol. 48. P. 917–923.
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. / J. Comm. Technol. Electron. 2019. Vol. 64. P. 289–293.
9. Izhnin I. I., Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. / Applied Nanoscience. 2020. № 12. P. 403–409.

PACS: 73.40QV, 73.21AS, 85.60GZ, 73.61GA

Characteristics of MIS structures based on HgCdTe with a superlattice in the barrier region

A. V. Voitsekhovskii¹, S. M. Dzyadukh¹, D. I. Gorn¹, S. A. Dvoretzky^{1,2}, N. N. Mikhailov^{1,2}, G. Yu. Sidorov² and M. V. Yakushev²

¹ National Research Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

² A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
13 Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received 31.05.2024; accepted 23.07.2024

The article presents the results of a study of metal-insulator-semiconductor (MIS) structures based on an n-HgCdTe nBn structure with a superlattice in the barrier region. The studies

were carried out by admittance spectroscopy in a wide temperature range, which allows to determine a wide range of semiconductor properties. The dependences of the admittance on frequency and voltage, as well as the time dependences of the relaxation of the electrical capacitance upon pulsed application of a bias voltage, were obtained. The dependence of the concentration of the main charge carriers on temperature was determined. Based on the temperature dependences of the longitudinal resistance of the epitaxial film volume and the concentration of the main charge carriers, the values of activation energies were obtained. The influence of IR illumination on various characteristics of the structure was analyzed. It has been shown that the presence of constant IR illumination leads to a change in the capacitance level in both inversion and enrichment modes.

Keywords: HgCdTe, molecular beam epitaxy, MIS, barrier structure, nBn, superlattice, admittance.

REFERENCES

1. Shi Q., Zhang S.-K., Wang J.-L. and Chu J.-H., *J. Infrared Millim. Waves*, **41** (1), 139–150 (2022).
2. Burlakov I. D., Kulchitsky N. A., Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. and Gorn D. I., *J. Comm. Technol. Electron.* **66** (9), 1084–1091 (2021).
3. Kopytko M., Wrobel J., Jozwikowska K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Faraone L. and Becker C. R., *Journal of Electronic Materials* **44** (1), 158–166 (2015).
4. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N. and 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, pp. 135–154.
5. Mikhailov N. N., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Menshchikov R. V., Remesnik V. G. and Uzhakov I. N., *Optichesky zhurnal* **91** (2), 76–87 (2024) [in Russian].
6. Voitsekhovskii A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., *Applied Physics*, № 4, 78–86 (2023) [in Russian].
7. Zubkov V. I., Yakovlev I. N., Litvinov V. G., Ermachihin A. V., Kucherova O. V. and Cherkasova V. N., *Semiconductors* **48**, 917–923 (2014).
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y. and Yakushev M. V., *J. Comm. Technol. Electron.* **64**, 289–293 (2019).
9. Izhnin I. I., Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y. and Yakushev M. V., *Applied Nanoscience*, № 12, 403–409 (2020).