

УДК 621.315.592

PACS: 73.40Qv, 73.21As,
85.60Gz, 73.61Ga.**Емкостные свойства МДП-систем на основе nVn -структуры из МЛЭ HgCdTe***А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух, С. А. Дворецкий,
Н. Н. Михайлов, Г. Ю. Сидоров, М. В. Якушев*

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-систем на основе nVn -структуры из HgCdTe, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs (013), впервые исследованы при разных частотах и температурах. При помощи емкостных измерений найдена концентрация электронов в приповерхностном слое пленки, которая хорошо соответствует концентрации легирующей примеси индия. Показано, что ВФХ МДП-систем имеют высокочастотный вид в широком диапазоне условий измерения, а произведение дифференциального сопротивления области пространственного заряда на площадь электрода в режиме сильной инверсии достигает значения $40 \text{ кОм} \times \text{см}^2$. Обнаружен эффект уменьшения емкости МДП-системы в режиме обогащения после освещения излучением с длиной волны $0,91 \text{ мкм}$, который можно объяснить изменением энергетической диаграммы резкого гетероперехода при изменении зарядового состояния дефектов под действием освещения.

Ключевые слова: HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, nVn -структура, МДП-система, варизонный слой, вольт-фарадная характеристика, концентрация легирующей примеси.

Введение

Фундаментальные свойства полупроводникового твердого раствора теллурида кадмия и ртути ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, HgCdTe) обеспечивают его широкое применение при создании высокочувствительных инфракрасных детекторов [1, 2]. На основе этого перспективного материала могут быть созданы фотоприемные устройства третьего поколения [3].

Важной задачей является повышение рабочей температуры детекторов на основе HgCdTe, поскольку её решение может привести к уменьше-

нию стоимости и габаритов, а также к расширению области применения фоточувствительных устройств на основе HgCdTe за счет снижения затрат на криогенные (или термоэлектрические) системы охлаждения. Недавно предложено использовать для детектирования фоточувствительную nVn -структуру [4], которая включает широкозонный барьер V (аналог области пространственного заряда в классическом фотодиоде), а также слои n -типа, расположенные с двух сторон барьерного слоя. Поглощение излучения происходит в n -слое, причем при подаче отрицательного напряжения на структуру для электронов (основных носителей заряда) существует потенциальный барьер за счет широкозонного слоя. В результате эффективно подавляются темновые токи основных носителей заряда (а также генерация-рекомбинация Шокли-Рида в V -слое) и снижаются барьеры для фототока неосновных носителей заряда [5, 6]. Эффективное подавление темновых токов предоставляет возможность достаточно высокотемпературного действия детекторов на основе nVn -структур.

Помимо теоретических работ, в последние годы стали появляться экспериментальные работы по разработке nVn -детекторов на основе, например, InAsSb/InSb [7], MOCVD и МЛЭ HgCdTe [8, 9]. При исследованиях электрических свойств nVn -структур обычно измеряются вольтамперные и вольт-фарадные характеристики [10, 11]. Дополнительную информацию о свойствах приповерх-

Войцеховский Александр Васильевич¹, зав. кафедрой.

Несмелов Сергей Николаевич¹, с.н.с.

Дзядух Станислав Михайлович¹, с.н.с.

Дворецкий Сергей Алексеевич^{1,2}, зав. отделом.

Михайлов Николай Николаевич², с.н.с.

Сидоров Георгий Юрьевич², зав. лабораторией.

Якушев Максим Витальевич², зав. лабораторией.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

Тел. (3822) 41-27-72. E-mail: vav43@mail.tsu.ru

² Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 29 мая 2018 г.

© Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., 2018

ностного слоя nVn -структуры могут дать исследования емкостных свойств МДП-систем [11], при этом диэлектрик может наноситься сверху структуры.

Целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей емкостных характеристик МДП-систем на основе nVn -структуры из $HgCdTe$, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые nVn -структуры на основе $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$ были выращены методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из GaAs (013). Скорость роста составляла 1,5 мкм/час. Распределение содержания CdTe (состава x), а также концентрации легирующей примеси индия по толщине пленки приведено на рис. 1. Распределение состава измерялось при помощи автоматического эллипсометра в процессе эпитаксиального роста. Согласно интегральным холловским измерениям nVn -структур при температуре 77 К, концентрация электронов составляет $6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а подвижность электронов $22000 \text{ см}^2/(\text{В} \times \text{с})$.

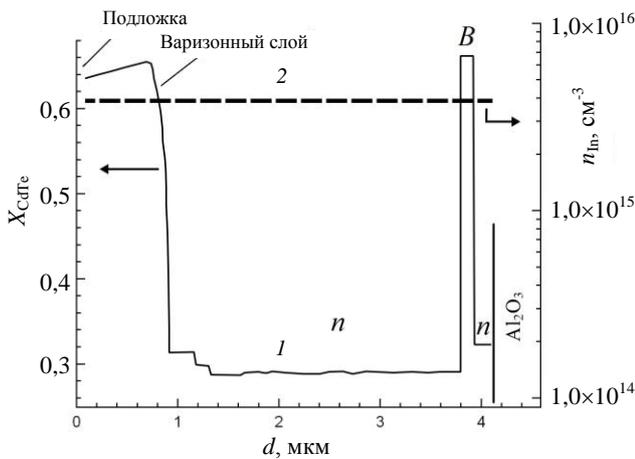


Рис. 1. Распределение содержания $CdTe_x$ (кр. 1) и концентрации донорной примеси индия n_{In} (кр. 2) от координаты d для nVn -структуры на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$, выращенного методом МЛЭ.

Сверху контактного слоя с составом $x = 0,325$ при помощи метода плазменного атомно-слоевого нанесения формировался диэлектрический слой Al_2O_3 . Поверх диэлектрика напылялись индиевые полевые электроды, причем различные электроды матрицы соответствовали разным МДП-системам (разным точкам). При помощи специальной микроскопической методики для каждой МДП-системы определялась площадь полевого электрода. Измерения характеристик проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического

криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки при измерениях принимается изменение напряжения от отрицательных значения к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 показаны экспериментальные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-системы на основе nVn -структуры, измеренные при температуре 8 К при прямой и обратной развертках напряжения для разных диапазонов изменения напряжения. Из рис. 2 видно, что ВФХ имеют высокочастотный вид уже при частоте 2 кГц. Гистерезис не очень велик, причем его величина возрастает при увеличении диапазона изменения напряжения. Концентрации электронов в приповерхностном слое полупроводника, рассчитанные по значению емкости в сильной инверсии, при температуре 8 и 70 К составили $3,90 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $3,81 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Подобные концентрации близки к концентрации донорной примеси индия (рис. 1), но несколько меньше холловского значения концентрации. Переход ВФХ к низкочастотному виду на частоте 1 кГц наблюдается только при высоких температурах (см. рис. 3).

На рис. 4 приведены ВФХ МДП-системы на основе nVn -структуры, измеренные на частоте 2 кГц при прямой развертке напряжения при разных температурах. Из рис. 4 видно, что на частоте 2 кГц низкочастотный вид наблюдается только при температурах, превышающих 230 К. Следует отметить, что обычно ВФХ МДП-систем на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,30-0,34$) принимают высокочастотный вид при больших частотах [12]. Для исследованной системы произведение дифференциального сопротивления области пространственного заряда на площадь электрода достигает значения 40 кОм см^2 , которое является большим для обычных МДП-систем на основе $HgCdTe$ такого состава [13].

Для исследованных МДП-систем обнаружен неожиданный эффект воздействия постоянной подсветки с длиной волны $\lambda = 0,91 \text{ мкм}$ (рис. 5). При освещении емкость в обогащении не изменяется, но возрастает емкость в сильной инверсии, что теоретически объясняется, например, в [14]. При освещении уменьшается время формирования инверсионного слоя за счет появления дополнительного источника генерации неосновных носителей заряда, а именно, фотогенерации, что проявляется в более низкочастотном виде ВФХ на

заданной частоте. После действия освещения при измерении ВФХ в течение нескольких часов емкость в обогащении оказывается значительно меньше, чем до действия подсветки (см. рис. 5). Значение емкости в режиме сильной инверсии по-

сле воздействия подсветки практически не изменяется. Это связано с тем, что ВФХ при температурах, не превышающих 125–150 К, имеет высокочастотный вид относительно времени формирования инверсионного слоя.

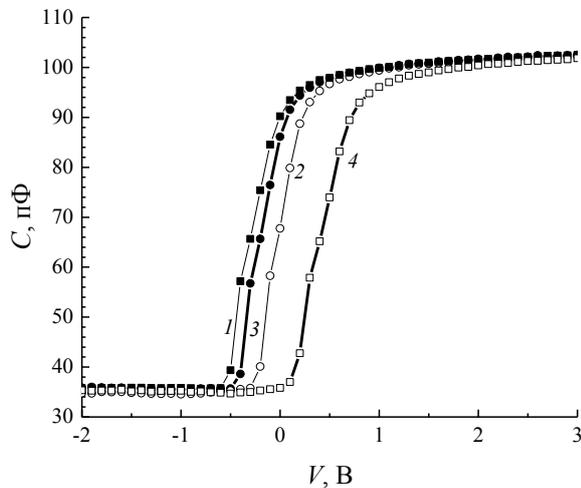


Рис. 2. Зависимости емкости C от напряжения V для МДП-системы на основе pVn -структуры из $n\text{-HgCdTe}$, измеренные при температуре 8 К на частоте 2 кГц при прямой (кр. 1, 3) и обратной (кр. 2, 4) развертке напряжения при изменении напряжения в диапазонах (-5-5 В) (кр. 1, 2) и (-10-10 В) (кр. 3, 4).

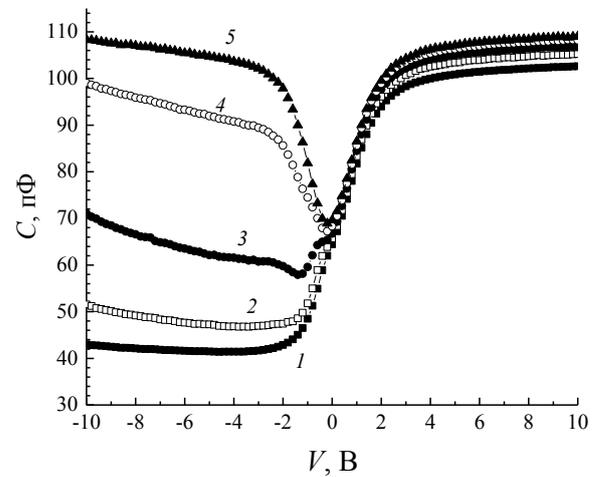


Рис. 3. Зависимости емкости C от напряжения V МДП-системы на основе pVn -структуры из $n\text{-HgCdTe}$, измеренные при температуре 190 К при прямой развертке напряжения на частотах, кГц: 20 (кр. 1), 10 (кр. 2), 5 (кр. 3), 2 (кр. 4), 1 (кр. 5).

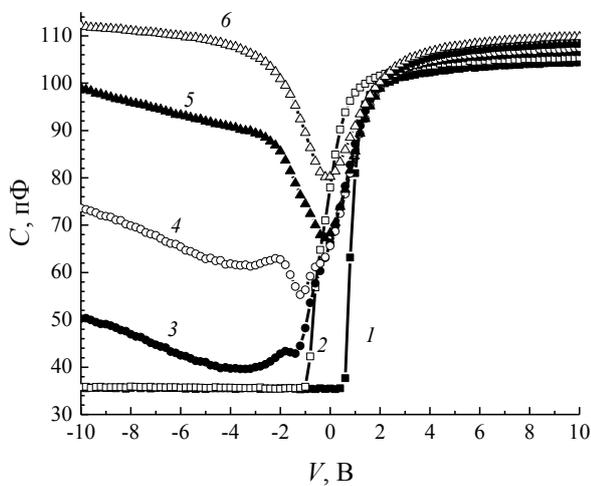


Рис. 4. Зависимости емкости C от напряжения V для МДП-системы на основе pVn -структуры из $n\text{-HgCdTe}$, измеренные на частоте 2 кГц при прямой развертке напряжения при разных температурах, К: 10 (кр. 1), 70 (кр. 2), 150 (кр. 3), 170 (кр. 4), 190 (кр. 5), 230 (кр. 6).

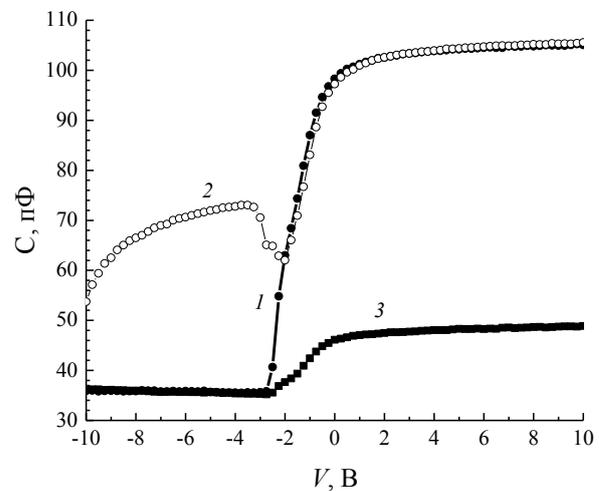


Рис. 5. Зависимости емкости C от напряжения V для МДП-системы на основе pVn -структуры из $n\text{-HgCdTe}$, измеренные при температуре 77 К на частоте 2 кГц при прямой развертке напряжения в различных режимах: до освещения (кр. 1), при освещении (кр. 2), после освещения (кр. 3).

На рис. 6 приведены температурные зависимости емкости МДП-системы в различных режимах (обогащения и сильной инверсии). Емкость в режиме обогащения восстанавливает свое значение в результате нагрева примерно до 150 К. После освещения изменяется характер температурной зависимости емкости в режиме обогащения

(кр. 1 и 3 на рис. 6), а в режиме сильной инверсии изменения зависимости емкости от температуры практически отсутствуют (кр. 2 и 4 на рис. 6). Слабая температурная зависимость емкости в режиме обогащения до воздействия подсветки связана с зависимостью диэлектрической проницаемости пленки Al_2O_3 от температуры. Увеличение

значения емкости в режиме сильной инверсии в диапазоне температур 150–200 К связано с переходом ВФХ при нагреве к низкочастотному виду относительно времени формирования инверсионного слоя.

На рис. 7 приведены температурные зависимости последовательного сопротивления эпитаксиальной пленки, рассчитанные из измерений адмиттанса в режиме обогащения на частоте

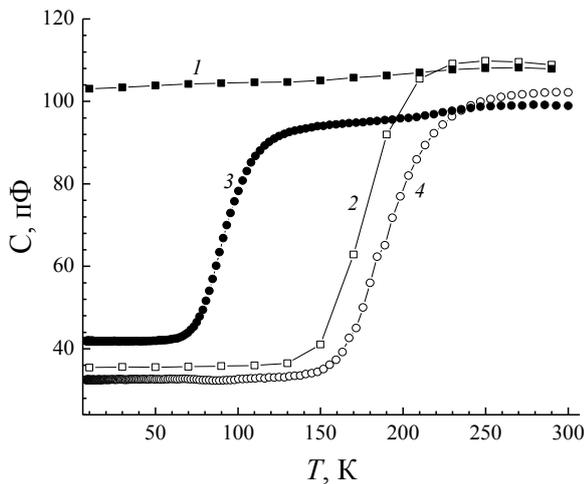


Рис. 6. Зависимости емкости C от температуры T для МДП-системы в обогащении (кр. 1, 3) и в сильной инверсии (кр. 2, 4), измеренные на частоте 2 кГц при прямой развертке напряжения до освещения (точка 1, кр. 1, 2), после освещения (точка 2, кр. 3, 4).

Наблюдаемый эффект можно объяснить изменением энергетической диаграммы гетероперехода из-за изменения при освещении зарядового состояния дефектов, расположенных вблизи Vn -гетерограницы. Область вблизи гетероперехода может быть обогащена дефектами. Например, в работе [15] показано, что для изотипного $n\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x/n\text{-Si}$ гетероперехода зонная структура кристалла в окрестностях гетерограницы формируется зарядом на дефектах решетки. Также установлено, что изменение состава в варизонном слое $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ приводит к увеличению концентрации собственных дефектов донорного типа [16]. После действия подсветки дефекты изменяют свое зарядовое состояние, что приводит к увеличению потенциального барьера для электронов, которое ограничивает обмен основными носителями между слоем обогащения и квазинейтральным объемом, что проявляется в снижении емкости в режиме обогащения. В сильной инверсии емкость МДП-системы не уменьшается, поскольку потенциальный барьер для неосновных носителей заряда на гетерогранице мал (или отсутствует). При нагреве зарядовое состояние дефектов становится равновесным (также как и по истечении нескольких часов при температуре 77 К) и восстанавлива-

100 кГц. Из рис. 7 видно, что после освещения происходит значительное уменьшение сопротивления объема при низких температурах (9–100 К). Возможной причиной уменьшения после воздействия подсветки последовательного сопротивления объема эпитаксиальной пленки при низких температурах является изменение энергетической диаграммы, которое приводит к увеличению энергии активации легирующей примеси индия.

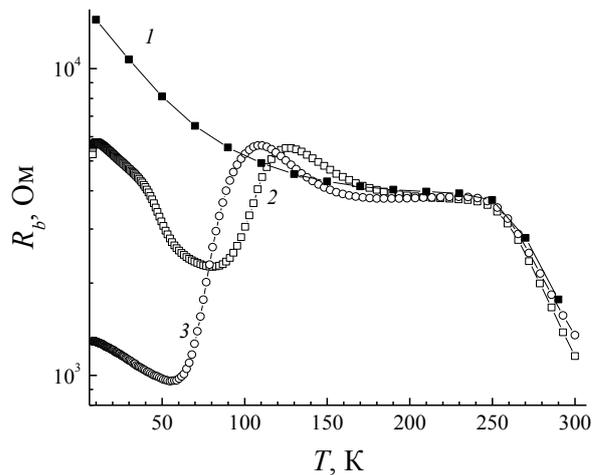


Рис. 7. Зависимости последовательного сопротивления объема эпитаксиальной пленки R_b от температуры T для МДП-системы на основе nVn -структуры из $n\text{-HgCdTe}$, измеренные на частоте 100 кГц до освещения (точка 3, кр. 1), после освещения (точки 1, 2, кр. 2, 3).

ется исходная ВФХ. Ранее при исследованиях адмиттанса (в темновом режиме) МДП-систем на основе $n\text{-HgCdTe}$ с тремя потенциальными барьерами в приповерхностной области наблюдались меньшие значения емкости в режиме обогащения по сравнению со значениями низкочастотной емкости в режиме сильной инверсии [17].

Заключение

В работе в широком диапазоне температур и частот исследованы вольт-фарадные характеристики МДП-систем на основе nVn -структуры из HgCdTe , выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs (013). Концентрация электронов в приповерхностном слое HgCdTe , определенная из емкостных измерений, близка к концентрации донорной примеси индия. МДП-системы имеют ВФХ высокочастотного вида в широком диапазоне условий измерения, а также большое дифференциальное сопротивление области пространственного заряда в сильной инверсии. Обнаружено, что емкость МДП-системы в режиме обогащения уменьшается после воздействия постоянной подсветки. Выявлены условия восстановления емкости в обогаще-

нии. Результаты можно объяснить фотоиндуцированным изменением зарядового состояния дефектов, расположенных вблизи резкого гетероперехода.

Исследование выполнено при финансовой
поддержке РФФИ и Администрации
Томской области в рамках научного проекта
№ 16-42-700759.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Infrared detectors: 2nd. ed. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
2. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
3. Kinch M. A. // J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 2969.
4. Maimon S., Wicks G. W. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. No. 15. P. 151109.
5. Akhavan N. D., Jolley G., Umama-Membreno G. A., Antoszewski J., Faraone L. // IEEE Trans. Electron Dev. 2015. Vol. 62. No. 3. P. 722.
6. Войцеховский А. В., Горн Д. И. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 83.
7. Evirgen A., Abautret J., Perez J. P., Cordat A., Nedelcu A., Christol P. // Electron. Lett. 2014. Vol. 50. No. 20. P. 1472.

8. Kopytko M., Kębłowski A., Gawron W., Madejczyk P., Kowalewski A., Józwiowski K. // Opto-Electron. Rev. 2013. Vol. 21. No. 4. P. 402.
9. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. No. 16. P. 161102.
10. Klipstein P., Klin O., Grossman S., Snapi N., Yaakovovitz B., Brumer M., Lukomsky I., Aronov D., Yassen M., Yofis B., Glozman A., Fishman T., Berkowicz E., Magen O., Shtrichman I., Weiss E. // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7608. P. 76081V.
11. Rhiger D. R., Smith E. P., Kolasa B. P., Kim J. K., Klem J. F., Hawkins S. D. // J. Electron. Mater. 2016. Vol. 45. No. 9. P. 4646.
12. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядук С. М., Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Кузьмин В. Д., Ремесник В. Г. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 5. С. 62.
13. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Sidorov G. Y. // Infrared Phys. Technol. 2017. Vol. 87. P. 129.
14. Grosvalet J., Jund C. // IEEE Trans. Electron Dev. 1967. Vol. 14. No. 11. P. 777.
15. Орлов Л. К., Хорват Ж. Й., Потапов А. В., Орлов М. Л., Ивин С. В., Вдовин В. И., Штейнман Э. А., Фомин В. М. // ФТТ. 2004. Т. 46. № 11. С. 2069.
16. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Electron. Mater. 2018. Vol. 47. P. 2694.
17. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov Y. G. // Russ. Phys. J. 2011. Vol. 54. No. 3. P. 263.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Capacitive properties of MIS systems based on the HgCdTe nBn structure

A. V. Voitsekhovskii¹, S. N. Nesmelov¹, S. M. Dzyadukh¹, S. A. Dvoretzky^{1,2},
N. N. Mikhailov², G. Yu. Sidorov², and M. V. Yakushev²

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

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS
13 Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Received May 29, 2018

In a wide range of temperatures and frequencies, the capacitance-voltage characteristics of MIS systems based on the HgCdTe nBn structure grown by molecular beam epitaxy on GaAs (013) substrates are for the first time studied. The electron concentration in the near-surface semiconductor layer is determined from capacitive measurements. It is shown that the capacitance-voltage characteristics have a high-frequency behavior in a wide range of conditions, a large differential resistance of the space charge region in strong inversion mode. It is found that the capacitance of the MIS system in the accumulation mode is significantly reduced after exposure to constant illumination. Conditions for recovering the capacitance in accumulation mode are revealed. The results can be explained by the photoinduced change in the charge state of the defects located near the abrupt heterojunction.

Keywords: HgCdTe, molecular beam epitaxy, nBn structure, MIS system, graded-gap layer, capacitance-voltage characteristic, dopant concentration.

REFERENCES

1. A. Rogalski *Infrared Detectors: 2nd. ed.* (CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011).
2. P. Capper and J. Garland *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications* (John Wiley & Sons, Chichester, 2011).
3. M. A. Kinch, *J. Electron. Mater.* **44**, 2969 (2015).
4. S. Maimon, G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109 (2006).
5. N. D. Akhavan, G. Jolley, G. A. Umana-Membreno, et al., *IEEE Trans. Electron Dev.* **62**, 722 (2015).
6. A. V. Voitsekhovskii, D. I. Gorn, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 83 (2016).
7. A. Evirgen, J. Abautret, J. P. Perez, et al., *Electron. Lett.* **50**, 1472 (2014).
8. M. Kopytko, A. Kębłowski, W. Gawron W., et al., *Opto-Electron. Rev.* **21**, 402, (2013).
9. A. M. Itsuno, J. D. Phillips, S. Velicu, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 161102 (2012).
10. P. Klipstein, O. Klin, S. Grossman, et al., *Proc. SPIE* **7608**, 76081V (2010).
11. D. R. Rhiger, E. P. Smith, B. P. Kolasa B.P., et al., *J. Electron. Mater.* **45**, 4646 (2016).
12. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russ. Phys. J.* **57**, 633 (2014).
13. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Infrared Phys. Technol.* **87**, 129 (2017).
14. J. Grosvalet, C. Jund, *IEEE Trans. Electron Dev.* **14**, 777 (1967).
15. L. K. Orlov, Z. J. Horvath, A. V. Potapov, et al., *Phys. Sol. State* **46**, 2139 (2004).
16. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh S. M., *J. Electron. Mater.* **47**, 2694 (2018).
17. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh S. M., et al., *Russ. Phys. J.* **54**, 263 (2011).