

УДК 621.315.592

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

Исследование характеристик структур МДП на основе МЛЭ n -HgCdTe в конфигурации NBvN методом спектроскопии адмиттанса

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

Проведено исследование структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе n -HgCdTe (КРТ), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), в конфигурации NBvN, предназначенных для разработки на их основе инфракрасных (ИК) детекторов с пониженными темновыми токами для MWIR и LWIR спектральных областей. Методом спектроскопии комплексной проводимости исследовано 7 типов МДП-структур. Показано, что измерения частотных зависимостей адмиттанса МДП-приборов позволяют точно определить дифференциальное сопротивление барьерной структуры. Установлено, что для одной из исследованных структур дифференциальное сопротивление определяется объемной компонентой темнового тока, а компонента поверхностной утечки не оказывает существенного влияния на измеряемый адмиттанс. Показано, что в случае решения проблемы пассивации меза-структур возможно изготовление эффективных MWIR и LWIR n Bn, NBvN-детекторов на основе МЛЭ HgCdTe с высокими пороговыми параметрами.

Ключевые слова: МДП-структура, адмиттанс, КРТ, HgCdTe, МЛЭ, барьерная структура, n Bn, NBvN.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-40-45

Введение

Совершенствование технологии изготовления фотодетекторов на основе барьерных структур из HgCdTe, требует углубленного изучения процессов в различных слоях униполярной барьерной системы, что предполагает использование различных экспериментальных методов. При исследованиях свойств полупроводниковых структур весьма инфор-

мативен метод спектроскопии комплексной проводимости (адмиттанса).

В настоящее время для целей создания эффективных фотоприёмных устройств MWIR ($\lambda = 3\text{--}5$ мкм) и LWIR ($\lambda = 8\text{--}14$ мкм) областей инфракрасного диапазона с пониженными темновыми токами всё чаще рассматриваются различные архитектуры барьерных детекторов [1–5] на основе материала МЛЭ HgCdTe n -типа проводимости (в част-

Войцеховский Александр Васильевич¹, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.

E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Дзядух Станислав Михайлович¹, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: bonespirit@mail2000.ru

Горн Дмитрий Игоревич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: gorn_dim@sibmail.com

Дворецкий Сергей Алексеевич², в.н.с., к.ф.м.н.

E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Михайлов Николай Николаевич², с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru

Сидоров Георгий Юрьевич², зав. лаб., 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 25 мая 2022 г.

© Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., 2022

ности, в конфигурации nVn и $NVnN$ [6]). Ранее методом спектроскопии адмиттанса нами были исследованы структуры металл-диэлектрик-полупроводник на основе униполярных барьерных МЛЭ n -HgCdTe в конфигурации nVn [7–10].

Перспективной архитектурой униполярных барьерных детекторов на основе МЛЭ n -HgCdTe в настоящее время считается N^1VnN^2 -конфигурация, в которой N^1 – покрывающий широкозонный слой, выполняющий роль коллектора, V – широкозонный барьерный слой, блокирующий ток основных носителей заряда при обратном смещении, v – рабочий слой, в котором происходит поглощение падающего ИК-излучения и N^2 – широкозонный нижний слой, обеспечивающий эксклюзию носителей заряда из слоя v . Согласно теоретическим оценкам данная конфигурация позволяет повысить рабочую температуру детектора за счет подавления Оже генерационно-рекомбинационных процессов через неравновесное обеднение. Теоретически HgCdTe $NVnN$ -детекторы сохраняют технологические преимущества nVn -конфигурации, но при этом могут показывать меньшие темновые токи, чем p - n фотодиоды и nVn -детекторы [6]. Однако работ, посвящённых экспериментальным исследованиям подобных структур, в литературе практически нет.

Наряду с исследованиями вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур на основе МЛЭ n -HgCdTe в конфигурации $NVnN$, дающими информацию об эффективности блокирования потока электронов барьерным слоем, о наличии и величине напряжения включения при обратных смещениях, о соотношении вкладов поверхностных и объёмных компонент в результирующий ток, о величине энергии активации, характеризующей механизмы формирования темнового тока, более широкие исследования электрофизических свойств могут быть проведены методом спектроскопии адмиттанса. Измерения адмиттанса барьерных структур в конфигурации МДП, проведенные в широком диапазоне температур, частот и смещений, позволяют определить некоторые параметры многослойных униполярных систем и выявить особенности, протекающих в таких системах процессов.

Данная работа посвящена исследованию структур МДП на основе МЛЭ n -HgCdTe в конфигурации $NVnN$, предназначенных для разработки на их основе инфракрасных детекторов с пониженными темновыми токами для MWIR и LWIR спектральных областей.

Образцы и методики эксперимента

Выращивание структур осуществлялось в ИФП СО РАН на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь-М» с эллипсометрическим контролем толщины и состава растущих слоев *in-situ*.

Исследовались МДП-структуры на основе MWIR и LWIR МЛЭ n -HgCdTe $NVnN$ -структур семи типов (А, В, С, D, E, F, G). Структуры содержали два типа рабочих слоев (v) в зависимости от требуемой для выращиваемой структуры длинноволновой границы: n -слои с $x \sim 0,3$ (для детектирования в MWIR-диапазоне ИК-излучения – 3–5 мкм) и $x \sim 0,20$ – $0,23$ (для детектирования в LWIR-диапазоне ИК-излучения – 8–14 мкм) толщиной 2,8–4,4 мкм с уровнем легирования индием (N_d) $1,0 \times 10^{14}$ – $3,5 \times 10^{15}$ см⁻³; встроенный барьерный слой (В) с $x \sim 0,47$ – $0,80$; N^1 -слой (покрывающий) толщиной 1–2 мкм с $x \sim 0,30$ – $0,45$ и уровнем легирования $2,0 \times 10^{14}$ – $7,5 \times 10^{16}$ см⁻³ и N^2 -слой (нижний) толщиной 0,2–1 мкм с $x \sim 0,30$ – $0,60$ и уровнем легирования 1×10^{14} – 3×10^{17} см⁻³.

Для исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик на основе выращенных гетероструктур изготавливались экспериментальные образцы МДП-структур. Для физического разделения исследуемых областей при помощи жидкостного травления пленка HgCdTe разделялась на отдельные меза-структуры круглого сечения с различными диаметрами, в результате чего получалась серия отдельных МДП-структур с различными значениями отношения периметра к площади меза-структуры. В качестве функционального диэлектрика применялся слой Al_2O_3 , на котором размещался полевой электрод из In.

Последовательность расположения слоёв, включая защитный диэлектрик, а также расположение контактов изображены на рисунке 1.

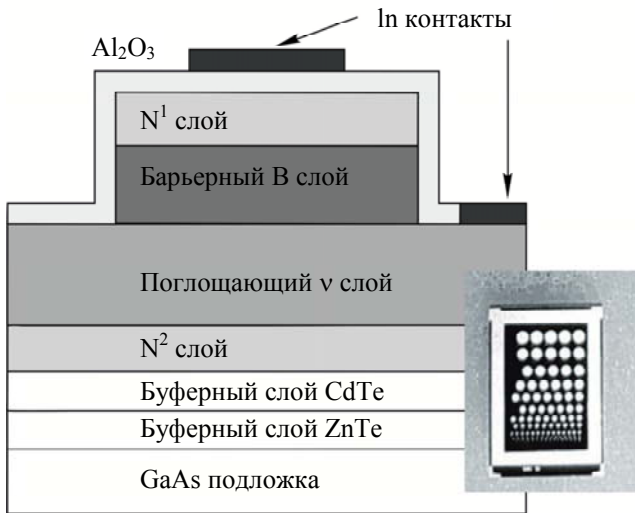


Рис. 1. Схематическое представление расположения слоев в экспериментальном образце МДП-структуры на основе NBvN. На вставке – фотография образца NBvN-структуры

Исследование параметров структур проводилось методом спектроскопии комплексной проводимости в широком диапазоне температур (8–475 К) и частот тестового сигнала $500 \text{ Гц}^2 \text{ МГц}$ с применением автоматизированной установки спектроскопии адмиттанса гетероструктур на базе криостата Janis (в неоптической и оптической конфигурациях) и измерителя иммитанса Agilent E4980 A.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В рамках данной работы были проведены измерения зависимостей ёмкости и проводимости структур от напряжения и температуры при различных частотах. На рисунках 2–3 приведены результаты данных измерений для структуры С, рассчитанной на работу в MWIR диапазоне.

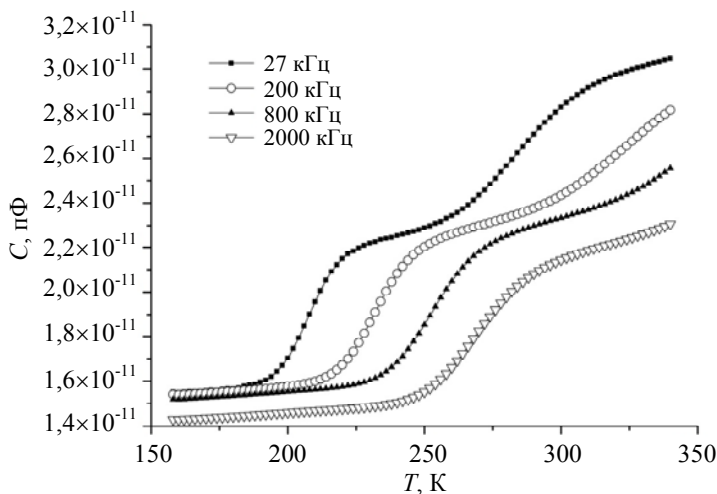


Рис. 2. Температурные зависимости ёмкости МДП-структуры на основе MWIR NBvN-структуры С, измеренные на различных частотах в режиме обогащения

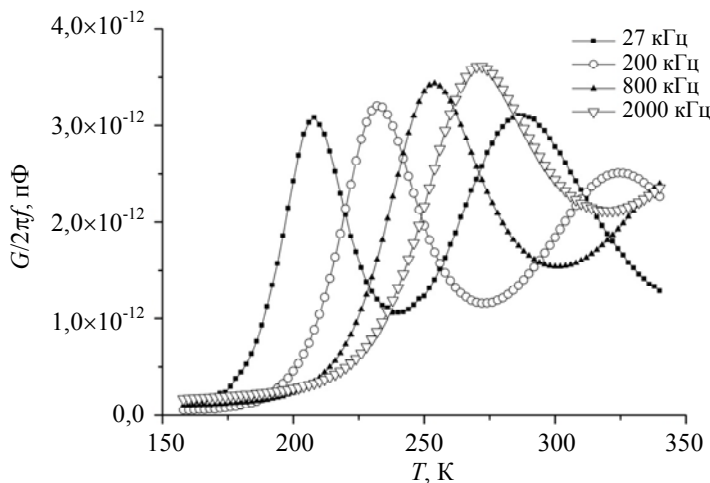


Рис. 3. Температурные зависимости приведенной проводимости МДП-структуры на основе MWIR NBvN-структуры С, измеренные на различных частотах (f) в режиме обогащения

Проведённые измерения показывают, что измерения частотных зависимостей адмиттанса МДП-приборов позволяют точно определить дифференциальное сопротивление барьерной структуры. Установлено, что дифференциальное сопротивление структуры определяется объемной компонентой темнового тока, а компонента поверхностной утечки не оказывает влияния на измеряемый

адмиттанс МДП-приборов. Дифференциальное сопротивление барьерных структур определяется диффузией дырок из поглощающего слоя. Это подтверждается графиками Аррениуса для высоких рабочих температур, из которых следует, что энергия активации соответствует энергии запрещенной зоны исследуемых структур (рис. 4). Здесь e_n – скорость термоактивационной эмиссии электронов.

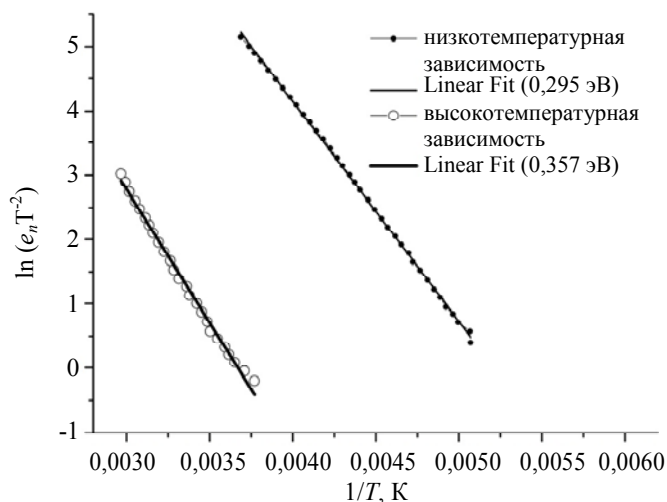


Рис. 4. График Аррениуса для МДП-структуры на основе MWIR NBvN-структуры C

Аналогичные измерения были проведены и для МДП-структур на основе LWIR NBvN-структур. Были измерены C-V характеристики при различных температурах для LWIR структуры G, а также температурные зависимости ёмкости и проводимости МДП-структур G (при разных частотах). На основании графиков Аррениуса (рис. 5) показано, что энергия активации несколько превосходит ширину запрещенной зоны, что объясняется наличием энергетического барьера для дырок в валентной зоне.

Заключение

В результате проведения исследований было показано, что измерения частотных зависимостей адмиттанса МДП-приборов позволяют точно определить дифференциальное сопротивление барьерной структуры. Установлено, что значения дифференциального сопротивления MWIR структуры типа C определяются объемной компонентой темнового тока, а компонента поверхностной утечки не оказывает существенного влияния на измеряемый адмиттанс МДП-приборов. Показано, что механизм формирования дифференциального сопротивления барьерных структур определяется диффузией дырок из поглощающего слоя.

Показано, что в случае решения проблемы пассивации меза-структур возможно изготовление эффективных MWIR и LWIR nBn, NBvN-детекторов на основе МЛЭ HgCdTe с высокими пороговыми параметрами.

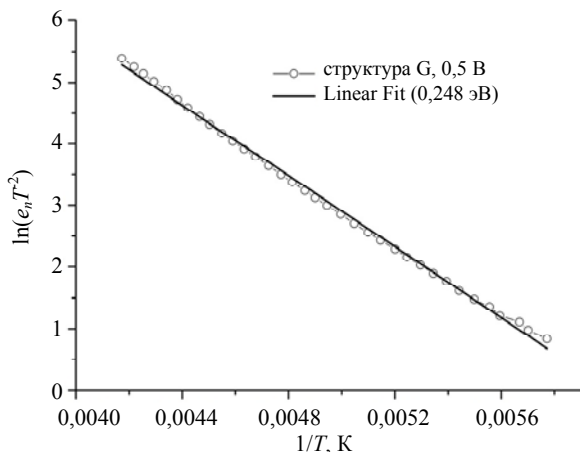


Рис. 5. График Аррениуса для МДП-структуры G на основе LWIR NBvN-структуры

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский А. В., Горн Д. И. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 83.
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.
3. Voitsekhovskii A. V., Gorn D. I. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. Vol. 62. № 3. P. 314.
4. Войцеховский А. В., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 50.
5. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. // Infrared Physics and Technology. 2019. Vol. 102. P. 103035-1.
6. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. // Journal of Electronic Materials. 2012. Vol. 41. № 10. P. 2886.
7. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. // Russian Physics Journal. 2020. Vol. 63. № 6. P. 907.
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. // Semiconductor Science and Technology. 2020. Vol. 35. P. 055026.
9. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. // Technical Physics Letters. 2021. Vol. 47. № 6. P. 616.
10. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. // Journal of Electronic Materials. 2021. Vol. 50. P. 4599.

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

Investigation of characteristics of MIS structures based on MBE *n*-HgCdTe NBvN barrier structures by admittance spectroscopy

A. V. Voitsekhovskii¹, S. M. Dzyadukh¹, D. I. Gorn¹, S. A. Dvoretzky², N. N. Mikhailov², G. Yu. Sidorov², and M. V. Yakushev²

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

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

Received May 25, 2022

This work is devoted to the study of metal-insulator-semiconductor (MIS) structures based on *n*-HgCdTe (MCT) grown by molecular beam epitaxy (MBE) in the NBvN configuration, intended for the development of infrared (IR) detectors with reduced dark currents for MWIR and LWIR spectral ranges. Seven types of MIS structures have been studied by admittance spectroscopy method. It is shown that the measurements of the frequency dependences of the impedance of MIS devices make it possible to accurately determine the differential resistance of the barrier structure. It has been established that for one of the studied structures, the values of the differential resistance are determined by the bulk component of the dark current, while the surface leakage component does not significantly affect the measured impedance. It is shown that if the problem of passivation of mesa structures is solved, it is possible to fabricate efficient MWIR and LWIR *n*Bn, NBvN detectors based on MBE HgCdTe with high threshold parameters.

Keywords: MIS structure, admittance, impedance, MCT, HgCdTe, MBE, barrier structure, *n*Bn, NBvN.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-40-45

REFERENCES

1. A. V. Voitsekhovskii and D. I. Gorn, *Applied Physics*, No. 4, 83 (2016) [in Russian].
2. I. D. Burlakov, N. A. Kulchitsky, A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, and D. I. Gorn, *Journal of Communications Technology and Electronics* **66** (9), 1084 (2021).
3. A. V. Voitsekhovskii and D. I. Gorn, *Journal of Communications Technology and Electronics* **62** (3), 314 (2017).
4. A. V. Voitsekhovskii, D. I. Gorn, S. A. Dvoretzky, and N. N. Mikhailov, *Applied Physics*, No. 5, 50 (2018) [in Russian].
5. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, G. Yu. Sidorov, and M. V. Yakushev, *Infrared Physics and Technology* **102**, 103035 (2019).
6. A. M. Itsuno, J. D. Phillips, and S. Velicu, *Journal of Electronic Materials* **41** (10), 2886 (2012).
7. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, G. Yu. Sidorov, and M. V. Yakushev, *Russian Physics Journal* **63** (6), 907 (2020).
8. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, G. Yu. Sidorov, and M. V. Yakushev, *Semiconductor Science and Technology* **35**, 055026 (2020).
9. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, G. Yu. Sidorov, and M. V. Yakushev, *Technical Physics Letters* **47** (6), 616 (2021).
10. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, G. Yu. Sidorov, and M. V. Yakushev, *Journal of Electronic Materials* **50**, 4599 (2021).