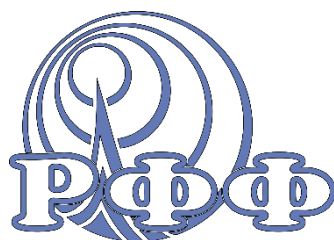


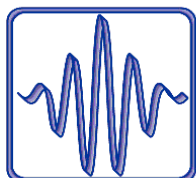


Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



Радиофизический факультет



9-я Международная научно-практическая конференция
Актуальные проблемы радиофизики
АПР-2021

Сборник трудов конференции

при поддержке:



20-22 октября 2021 года
г. Томск

Электрофизические характеристики униполярных барьерных структур на основе МЛЭ HgCdTe для детектирования в спектральных диапазонах 3 – 5 и 8 – 12 мкм

Войцеховский Александр Васильевич,

Несмелов Сергей Николаевич,

Дзядух Станислав Михайлович,

Горн Дмитрий Игоревич,

Дворецкий Сергей Алексеевич,

Михайлов Николай Николаевич,

Якушев Максим Витальевич,

Сидоров Георгий Юрьевич

Томский государственный университет

E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Наземное детектирование в спектральных диапазонах окон прозрачности земной атмосферы 3–5 (MWIR) и 8–12 (LWIR) мкм представляет особый интерес для решения ряда прикладных задач гражданского и оборонного назначения. При детектировании в MWIR и LWIR областях высокие пороговые характеристики обеспечиваются гибридными матрицами фотодиодов на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Для формирования *p-n* переходов в МЛЭ HgCdTe используется ионная имплантация, которая приводит к снижению качества материала из-за генерации радиационных дефектов [1]. Использование при создании детекторов на основе МЛЭ HgCdTe униполярных барьерных архитектур предоставляет значительные технологические преимущества, поскольку в этом случае можно отказаться от сложной и дефектообразующей процедуры ионной имплантации (а также сопутствующих отжигов). Простейшим вариантом униполярной барьерной архитектуры является *nBn*-структура [2], которая впервые была предложена для уменьшения в детекторах на основе полупроводников III-V компонент темнового тока, связанных с поверхностной утечкой и генерацией Шокли-Рида-Холла в обедненных областях. В настоящее время наиболее успешны достигнуты при практической реализации детекторов на основе полупроводников III-V [3–5], что связано с возможностями реализации нулевого барьера в валентной зоне в таких материалах. Известно значительное число работ, посвященных теоретическим исследованиям процессов в униполярных барьерных детекторах на основе HgCdTe [6–8]. Попыток практической реализации MWIR *nBn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe пока немного [9–11], а LWIR *nBn*-структуры на основе МЛЭ HgCdTe ранее не создавались (судя по доступной литературе). В работах [12, 13] сообщалось об изготовлении MWIR *nBn*-структур, выращенных методом МЛЭ на подложках из GaAs(013), в которых темновой ток в широком диапазоне температур (180–300 К) был ограничен диффузионными процессами. В этих структурах для формирования барьера использовался широкозонный материал Hg_{0.16}Cd_{0.84}Te, хотя теоретически показано, что наиболее высокие значения обнаружительной способности могут быть обеспечены при меньшем составе в барьерном слое (<0.70). В докладе представлены результаты исследований электрических свойств MWIR и LWIR *nBn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe, при изготовлении которых были выбраны параметры слоев, оптимальные для детектирования в спектральных областях 3–5 и 8–12 мкм, соответственно.

Структуры для исследований были выращены методом МЛЭ на подложках из GaAs(013) в ИФП имени А.В. Ржанова СО РАН. В MWIR *nBn*-структурах состав в поглощающем слое был выбран в диапазоне от 0.29 до 0.32, а состав в барьерном слое – от 0.60 до 0.67. Толщина барьерного слоя изменялась для разных структур в диапазоне от 0.27 до 0.40 мкм. В LWIR *nBn*-структурах содержание CdTe в поглощающем слое составляло 0.20 – 0.21, а в барьерном слое – 0.61 – 0.63. Толщина барьерного слоя для LWIR *nBn*-структур находилась в диапазоне от 0.20 до 0.32 мкм. Для создания приборной структуры при помощи фотолитографии проводилось локальное травление контактного покрывающего слоя и барьерного слоя до поглощающего (нижнего) слоя *n*-типа. Были изготовлены MWIR и LWIR *nBn*-структуры с различными диаметрами (от 20 до 500 мкм), что позволяло исследовать роль различных компонент тока. Боковые стенки меза-структур пассивировались пленками Al₂O₃ [14], сформированными при помощи плазменного атомно-слоевого осаждения при температуре 120 оС, а также для сравнения изготавливались структуры без пассивации. Измерения электрических характеристик проводились на автоматизированной установке на основе измерителя иммитанса Agilent E4980A и неоптического криостата Janis. Проводились измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) при различных температурах, а также адмиттанса *nBn*-структур [15] и тестовых МДП-приборов на основе таких структур [16].

Исследования MWIR *nBn*-структур с составом в барьерном слое, равном 0.64–0.67, показали, что в таких структурах возрастает роль компоненты поверхностной утечки (по сравнению с более широкозонным барьером). Темновые токи в MWIR *nBn*-структурах хорошо согласуются с эмпирической моделью Rule07, что свидетельствует о возможности создания эффективных униполярных барьерных детекторов на основе МЛЭ HgCdTe. На рис. 1 показаны ВАХ, измеренные для первых вариантов LWIR *nBn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe. Плотность поверхностной компоненты темнового тока в LWIR *nBn*-структурах при температуре 300 К

и смещении -2 В составляет 0.241 – 0.247 А/см при пассивации боковых стенок пленкой Al₂O₃. В LWIR nВn-структурах без пассивации боковых стенок возрастает роль поверхностной утечки (рис. 2).

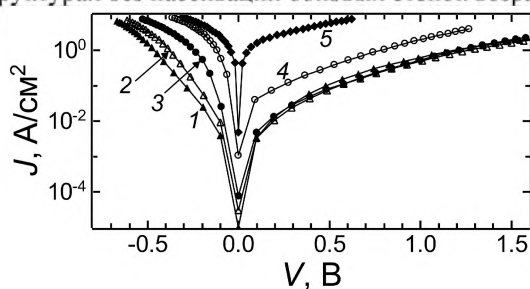


Рис. 1. ВАХ LWIR nВn-структуры с пассивацией при различных температурах, К: кр. 1 – 10; кр. 2 – 77; кр. 3 – 150; кр. 4 – 220; кр. 5 – 300

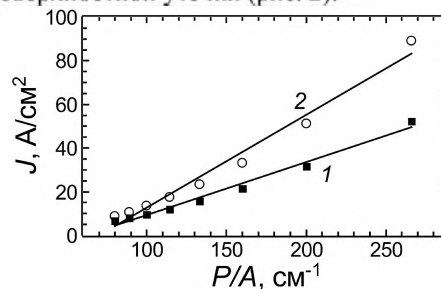


Рис. 2. Зависимости плотности темного тока от отношения P/A для LWIR nВn-структуры с пассивацией боковых стенок (кр. 1) и без такой пассивации (кр. 2), измеренные при обратном смещении 0.3 В

Для LWIR nВn-структур темновые токи при малых обратных смещениях ограничены объемной компонентой, причем энергия активации этого тока хорошо согласуется с шириной запрещенной зоны поглощающего слоя. Также построены графики Аррениуса для плотности тока поверхностной утечки, найденной из измерений ВАХ nВn-структур различного размера при разных температурах (рис. 3). Видно, что в координатах графиков Аррениуса температурные зависимости плотности темного тока хорошо спрямляются. Энергии активации при смещениях 0.2, -0.1 и -0.2 В оказались равными 0.275, 0.134 и 0.075 эВ, соответственно. На рис. 4 проведено сравнение температурных зависимостей темного тока LWIR nВn-структур с эмпирической моделью Rule07. Изучение в широком диапазоне температур адмиттанса тестовых МДП-приборов на основе nВn-структур показали, что при качественной пассивации боковых стенок меза-структур возможно создание эффективных LWIR nВn-детекторов на основе МЛЭ HgCdTe.

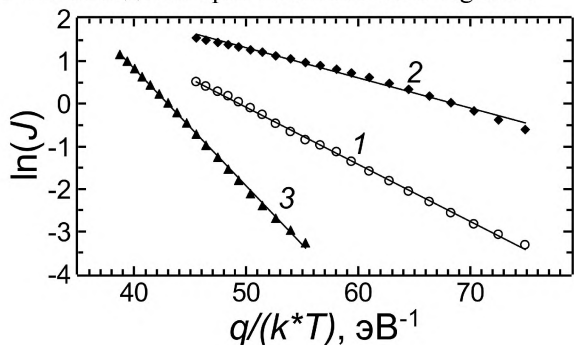


Рис. 3. Графики Аррениуса для LWIR nВn-структуры с пассивацией при различных напряжениях смещения, В: кр. 1 – -0.1; кр. 2 – -0.2; кр. 3 – 0.2

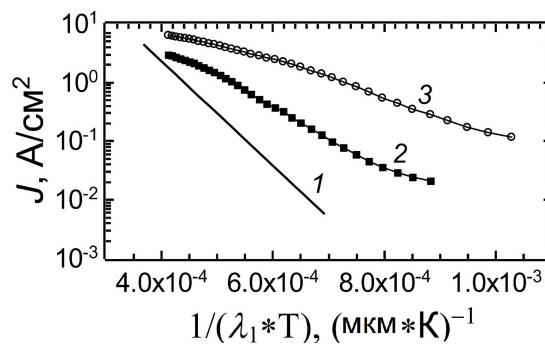


Рис. 4. Сравнение с моделью Rule07 (кр. 1) температурных зависимостей темного тока LWIR nВn-структуры с пассивацией при различных напряжениях смещения, В: кр. 2 – -0.1; кр. 3 – -0.2

Барьерные униполярные структуры изготовлены и исследованы при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00135).

Список публикаций:

[1] Izhnin I. I., Mynbaev K. D., Swiatek Z., et al. // *Infrared Phys. Technol.* 2020. V. 109. P. 103388.
 [2] Maimon S., Wicks G. W. // *Appl Phys Lett.* 2006. V. 89. No.15. P. 151109.
 [3] Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M. // *Appl. Phys. Rev.* 2017. V. 4. No. 3. P. 031304.
 [4] Ting D. Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., et al. // *Infrared Phys. Technol.* 2019. V. 97. P. 210-216.
 [5] Savich G. R., Sidor D. E., Du X., et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2017. V. 35. No. 2. P. 02B105.
 [6] Akhavan N. D., Jolley G., Umara-Membreno G. A., et al. // *J Electron Mater.* 2015. V. 44. No. 9. P. 3044.
 [7] Uzgur F., Kocaman S. // *Infrared Phys Technol.* 2019. V. 97. P. 123.
 [8] He J., Wang P., Li Q., et al. // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2020. V. 67. No. 5. P. 2001-2007.
 [9] Istano A. M., Phillips J. D., Velicu S. // *Appl Phys Lett.* 2012. V. 100. No. 16. P. 161102.
 [10] Velicu S., Zhao J., Morley M., et al. // *Proc SPIE.* 2012. V. 8268. P. 82682X.
 [11] Gravrand O., Boulard F., Ferron A., et al. // *J Electron Mater.* 2015. V. 44. No. 9. P. 3069.
 [12] Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019. V. 53. No. 5. P. 055107.
 [13] Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., et al. // *Infrared Phys. Technol.* 2019. V. 102. P. 103035.
 [14] Zakirov E. R., Kesler V. G., Sidorov G. Y., et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2019. V. 34. No. 6. P. 065007.
 [15] Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., et al. // *Mater. Res. Expr.* 2019. V. 6. No. 11. P. 116411.
 [16] Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2020. V. 35. No. 5. P. 055026.