

УДК 621.315.592

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

Диффузионное ограничение темнового тока в nVn -структурах на основе МЛЭ HgCdTe

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядх, С. А. Дворецкий,
Н. Н. Михайлов, Г. Ю. Сидоров, М. В. Якушев

Изучены темновые токи в средневолновых nVn -структурах на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs (013). Пассивация поверхности боковых стенок мезоструктур проводилась путем формирования пленок Al_2O_3 методом плазменного атомно-слоевого осаждения. Показано, что при составе в барьерном слое, равном 0,84, в nVn -структурах доминирует объемная компонента темнового тока. Энергия активации тока близка к ширине запрещенной зоны поглощающего слоя. Сопоставление экспериментальных результатов с эмпирической моделью Rule07 показало, что в диапазоне температур 180–300 К в изготовленных структурах реализуется диффузионное ограничение темнового тока. Из проведенных исследований следует, что молекулярно-лучевая эпитаксия HgCdTe на альтернативных подложках является перспективным способом создания униполярных барьерных детекторов для спектрального диапазона 3–5 мкм.

Ключевые слова: инфракрасные детекторы, HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, nVn -структура, темновой ток, вольт-амперная характеристика, диффузионное ограничение.

Ссылка: Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 24.

Reference: A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, G. Yu. Sidorov, and M. V. Yakushev, Applied Physics, No. 1, 24 (2020).

Введение

Фундаментальные свойства HgCdTe хорошо подходят для создания высокочувствительных инфракрасных детекторов, а зависимость ширины запрещенной зоны от компонентного состава позволяет оптимизировать такие детекторы для действия в различных спектральных диапазонах [1]. Актуальными задачами современной инфракрасной

фотоэлектроники является повышение рабочей температуры и совершенствование технологии гибридных матричных детекторов на основе теллурида кадмия и ртути [2, 3]. Решению этих задач способствует использование для детектирования униполярных барьерных детекторов на основе HgCdTe (например, в nVn -конфигурации [4]). В этом случае появляется возможность уменьшения значений темновых токов (и повышения рабочей темпера-

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

Несмелов Сергей Николаевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Дзядх Станислав Михайлович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Дворецкий Сергей Алексеевич^{1,2}, зав. отделом, к.ф.-м.н.

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

Сидоров Георгий Юрьевич², зав. лаб., к.ф.-м.н.

Якушев Максим Витальевич², зав. лаб., д.ф.-м.н.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. 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, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13. E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 31 января 2020 г.

© Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., 2020

туры) за счет подавления компонент Шокли-Рида-Холла и поверхностной утечки. Кроме этого, из технологического цикла создания детекторов можно исключить дефектообразующие процедуры ионной имплантации и сопутствующих отжига, которые широко применяются при формировании p - n -переходов в фотодиодных чувствительных элементах на основе HgCdTe , выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Наибольшие успехи достигнуты в практической реализации nVn -детекторов на основе соединений III-V [5–8], что связано с благоприятной структурой энергетических зон в гетеропереходах из этих материалов (возможностью создания структур без барьера в валентной зоне). Довольно много работ посвящено теоретическому анализу характеристик nVn -детекторов на основе HgCdTe и изучению возможности снижения или исключения барьера для дырок [9–14].

Число попыток практической реализации nVn -детекторов на основе МЛЭ HgCdTe пока невелико [15–17], причем характеристики изготовленных приборных структур были далеки от идеальных из-за больших значений темновых токов. Лучшие характеристики были получены при изготовлении nVn -структур на основе HgCdTe , полученного методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD) [18]. Можно отметить, что метод MOCVD позволяет создавать слои p - HgCdTe без имплантации, что используется при изготовлении nVn -детекторов для снижения барьера в валентной зоне путем формирования барьерного слоя p -типа. Недавно представлены первые результаты электрической диагностики nVn -структур на основе МЛЭ HgCdTe , разработанных для детектирования в спектральном диапазоне 3–5 мкм (MWIR) [19–21]. Изготовленные nVn -структуры исследовались при помощи измерения вольт-амперных характеристик [19, 20, 22] и адмиттанса [21, 23]. Кроме этого, свойства контактного слоя изучались путем измерения адмиттанса тестовых МДП-систем на основе nVn -структур из МЛЭ HgCdTe [24].

В данной работе представлены некоторые результаты исследований темновых токов в nVn -структурах на основе МЛЭ HgCdTe с пассивацией боковых стенок мезаструктуры

пленками Al_2O_3 .

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые nVn -структуры на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ были выращены методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из GaAs (013). Сверху подложки последовательно выращивались буферный слой ZnTe (толщиной 50 нм), релаксированный буфер CdTe (5 мкм), варизонный слой $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (1 мкм, начальный состав 0,78). Рабочая область nVn -структуры из $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ состояла из поглощающего, барьерного и контактного слоев (см. рис. 1). Поглощающий слой $\text{Hg}_{0,64}\text{Cd}_{0,36}\text{Te}$ имел толщину около 3,3 мкм, содержание CdTe в барьерном слое толщиной 210 нм составляло 0,84, а состав в контактном слое толщиной около 1 мкм был близок к 0,35. Скорость эпитаксиального выращивания рабочей области была выбрана равной 1,68 мкм/час. В процессе выращивания проводилось легирование рабочей области донорной примесью индия, причем концентрация примеси в поглощающем и барьерном слоях составляла $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а в контактном слое – $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

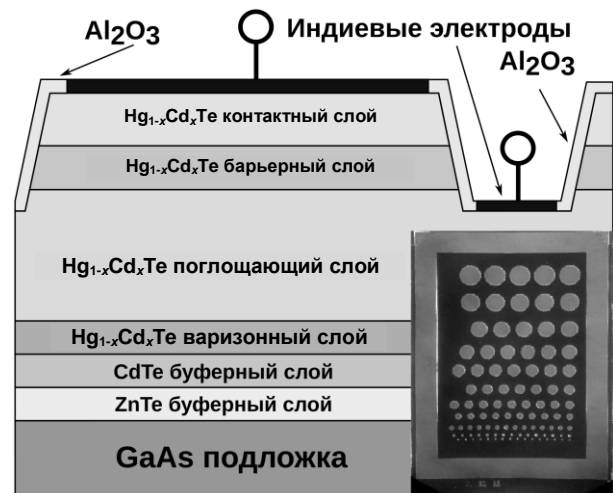


Рис. 1. Схематическое расположение слоев в nVn -структуре на основе МЛЭ HgCdTe . На вставке – фотография изготовленного образца для исследований.

При создании приборной структуры проводилось травление HgCdTe для дальнейшего нанесения контактной рамки по периметру образца. Использование такой формы электрода позволяло уменьшить роль последовательного сопротивления объема поглощающего слоя. Также проводилось

травление мезоструктур для физического отделения исследуемых элементов. Травление HgCdTe проводилось в 0,5%-растворе Br в HBr. Пассивация мезоструктур проводилась путем нанесения пленки Al₂O₃ методом плазменного атомно-слоевого осаждения (PE ALD) [25, 26] при температуре 120 °С. Затем проводилось травление диэлектрика в области дальнейшего формирования контактной рамки. В диэлектрическом слое при помощи травления также создавались окна для нанесения фронтального электрода на контактный слой. Травление диэлектрика PE ALD Al₂O₃ проводилось при использовании смеси плавиковой кислоты и фтористого аммония. На последней стадии изготовления приборных структур создавались электроды из индия с помощью термического напыления при температуре образца, не превышающей 100 °С. Диаметр мезоструктур для исследованных образцов находился в диапазоне от 20 до 500 мкм (см. вставку на рис. 1).

Измерения электрических характеристик проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis, контроллера температуры Lake Shore и измерителя иммитанса Agilent E4980A. Измерения темновых токов проводились в диапазоне температур 9–300 К при изменении напряжения на структуре от –3 до 3 В. Ошибка при измерениях тока не превышала 1 нА.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Предварительно изучался адмиттанс тестовых МДП-систем, сформированных путем нанесения пленки PE ALD Al₂O₃ сверху контактного слоя. Было показано, что изготовленные МДП-системы демонстрируют небольшие напряжения плоских зон и низкую скорость генерации неосновных носителей заряда в приповерхностном слое МЛЭ HgCdTe [20, 24]. Вопрос о качестве пассивирующего покрытия имеет принципиальное значение при создании *nVn*-структур, поскольку, например, темновые токи в некоторых ранних аналогах были ограничены поверхностной утечкой [15].

На рис. 2 показаны экспериментальные

вольт-амперные характеристики (ВАХ) *nVn*-структуры на основе МЛЭ HgCdTe, измеренные при различных температурах. Из рис. 2 видно, что при температуре 300 К темновой ток при обратном (отрицательном) напряжении меньше, чем при прямом (положительном напряжении). При снижении температуры асимметрия ВАХ относительно нулевого напряжения проявляется более явно – например, при температуре 180 К можно выделить область напряжений (примерно от 0 до -1 В) с очень малыми значениями темнового тока. Подсветка инфракрасным излучением с длиной волны 2,2 мкм приводит к значительным изменениям величины темнового тока при обратных смещениях, но практически не изменяет значения тока при прямых смещениях. Наблюдаемые особенности ВАХ связаны с тем, что при прямых смещениях темновой ток через *nVn*-структуру определяется переносом через барьер основных носителей заряда (электронов), а при обратном смещении – неосновных носителей заряда (дырок). Возникновение области напряжений с малыми значениями тока объясняется наличием в валентной зоне барьера для дырок, который уменьшается при увеличении обратного смещения. Напряжение включения (turn-on voltage) для исследованной структуры приблизительно равно -1 В, что согласуется с результатами работы [15]. Можно отметить, что для структур с меньшими значениями состава в барьерном слое ($x = 0,67$ и $0,75$) ВАХ практически симметричны относительно нулевого напряжения, а значения темнового тока очень слабо зависят от температуры [19].

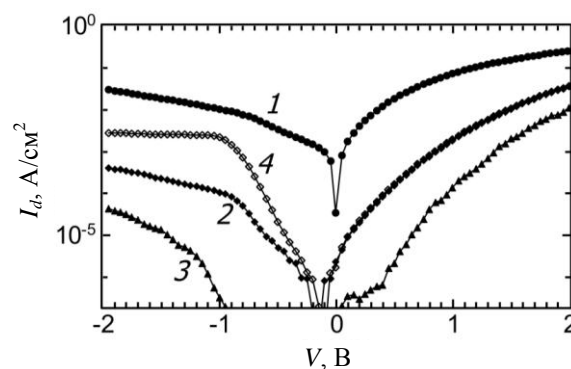


Рис. 2. Зависимости плотности тока I_d от напряжения V для *nVn*-структуры на основе МЛЭ HgCdTe, измеренные в темноте (кр. 1–3) и при освещении (кр. 4) при температурах, К:

300 (кр. 1), 230 (кр. 2, 4), 180 (кр. 3).

На рис. 3 показаны зависимости темного тока от температуры, измеренные в темноте и при освещении инфракрасным излучением. Из рис. 3 видно, что при обратных смещениях темновой ток для исследованной структуры резко уменьшается при охлаждении от 300 К. При освещении ток через nVn -структуру значительно слабее зависит от температуры. Можно отметить, что показанная на рис. 3 температурная зависимость темнового тока наблюдалась для образцов с диаметром мезаструктуры менее 350 мкм. Для части структур с большим диаметром ток слабо зависел от температуры при температурах, больших, чем 150 К, но наблюдалась заметная температурная зависимость темнового тока в диапазоне от 70 до 150 К. Для структур с меньшим составом в барьерном слое ($x = 0,67$ и $0,75$) темновой ток очень слабо зависел от температуры в диапазоне от 8 до 300 К [19, 22].

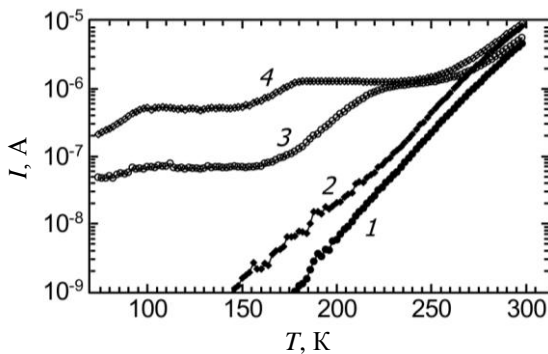


Рис. 3. Зависимости тока I от температуры T для nVn -структуры на основе МЛЭ $HgCdTe$, измеренные в темноте (кр. 1, 2) и при освещении (кр. 3, 4) при напряжениях V_s : -1,0 В (кр. 1, 3); -1,5 В (кр. 2, 4).

На рис. 4 приведена зависимость плотности темного тока от отношения периметра мезаструктуры к её диаметру. Полную плотность тока через nVn -структуру можно представить в следующем виде [22]:

$$J = J_A + \frac{P}{A} J_P,$$

где J_A – плотность тока объемной утечки, пропорциональная площади прибора (в A/cm^2), J_P – плотность тока поверхностной утечки на единицу длины периметра (в A/cm). Из этого

выражения следует, что плотность общего тока линейно зависит от отношения P/A , что позволяет легко определить значения поверхностной и объемной компонент тока при построении графика в соответствующих координатах. При температуре 300 К и напряжении

-3 В значение плотности объемной компоненты тока J_A для исследованной структуры составило $2,3 \times 10^{-3} A/cm^2$, а значение плотности поверхностной утечки J_P оказалось равным $6,7 \times 10^{-5} A/cm$. Можно отметить, что значения поверхностной и объемной компонент тока возрастают при увеличении обратного смещения на структуре [19]. Для структур с меньшим составом в барьерном слое ($x = 0,67$ и $0,75$) темновой ток определялся поверхностной утечкой, плотность тока которой находилась в диапазоне $0,013$ – $0,14 A/cm$ [19]. На рис. 4 также показаны графики Аррениуса при напряжениях -1,0 и -1,5 В.

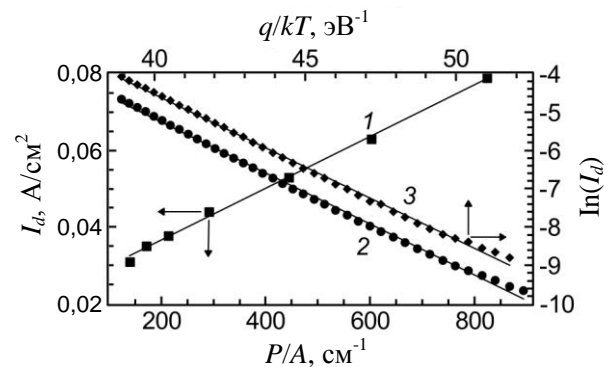


Рис. 4. Зависимости плотности тока I_d от отношения периметра мезаструктуры к площади P/A (кр. 1), а также графики Аррениуса, построенные при напряжениях -1 В (кр. 2) и -1,5 В (кр. 3).

Из рис. 4 видно, что температурные зависимости темнового тока хорошо спрямляются в соответствующих координатах. Найденные значения энергии активации составили 0,384 и 0,379 эВ при напряжениях -1,0 и -1,5 В соответственно. Эти значения достаточно близки к энергии ширины запрещенной зоны поглощающего слоя, что свидетельствует о доминирующей роли диффузионного механизма в формировании темнового тока через nVn -структуру. Можно отметить, что для мезаструктур с большими диаметрами (> 350 мкм) и температурной зависимостью в диапазоне от

70 до 150 К энергии активации значительно меньше и составляют 32–34 мэВ, что может быть связано с доминированием компоненты, связанной с туннелированием через уровни в запрещенной зоне. Величина этой компоненты тока в диапазоне температуры от 70 до 150 К лимитируется тепловым забросом, а при более высоких температурах – вероятностью туннельного перехода. ВАХ для структур такого типа более подробно рассмотрены в работе [22].

На рис. 5 приведена температурная зависимость, рассчитанная согласно эмпирической модели Rule07 [27], которая описывает темновые токи в качественных фотодиодах на основе МЛЭ HgCdTe и является эталоном для сравнения значений темновых токов для различных типов детекторов. В таких фотодиодах доминируют процессы Оже 1 [28]. На рис. 5 также приведены экспериментальные зависимости темнового тока от температуры для исследованной *nBn*-структуры. Для сравнения показаны значения темновых токов для барьерных детекторов MWIR диапазона на основе материалов A^3B^5 и известных аналогов на основе HgCdTe. Для современных детекторов на основе материалов A^3B^5 [5–8] на рисунке приведена краткая информация о материале барьерного слоя, а также о материалах поглощающего слоя, который может быть реализован в виде сверхрешетки (СР).

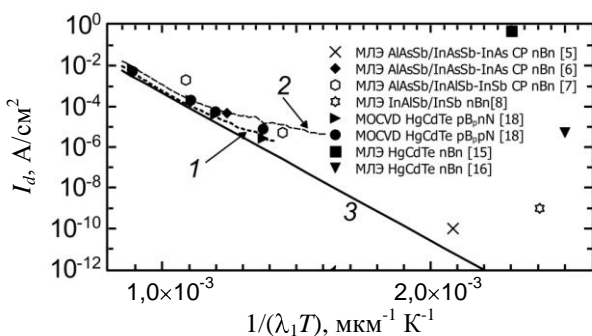


Рис. 5. Экспериментальные зависимости плотности темнового тока I_d от обратной температуры $1/(\lambda_1 T)$ при напряжениях -1 В (кр. 1) и $-1,5$ В (кр. 2), расчетная зависимость согласно эмпирической модели Rule07 (кр. 3), а также представленные ранее значения плотности тока для различных барьерных структур на основе A^3B^5 и HgCdTe.

Из рис. 5 видно, что в диапазоне температур 180–300 К значения темнового тока для

изготовленных *nBn*-структур достаточно близки к расчетной зависимости (по модели Rule07). Исследовать значения темновых токов при более низких температурах не удалось из-за ограничений использованного измерительного оборудования, хотя заметно некоторое расхождение экспериментальной и расчетной зависимостей при низких температурах. Значения темновых токов для изготовленной структуры сопоставимы со значениями токов для детекторов на основе материалов A^3B^5 [5–8] и МOCVD HgCdTe [18]. Изготовленные *nBn*-структуры имеют намного меньшие значения темновых токов, чем детекторы первого поколения на основе МЛЭ HgCdTe [15] и несколько меньшие значения темновых токов, чем детекторы второго поколения [16]. Для исследованных *nBn*-структур и детекторов второго поколения на основе МЛЭ HgCdTe могут наблюдаться близкие значения темновых токов, но в созданных детекторах такие значения темнового тока реализуются при значительно более высоких температурах (примерно на 100 К). Изготовленные *nBn*-структуры на основе МЛЭ HgCdTe, имеющие очень низкие значения темновых токов, перспективны для создания на основе таких структур инфракрасных детекторов для MWIR диапазона.

Для исследованных структур проведены предварительные измерения чувствительности при освещении излучением с длиной волны 2,2 мкм. Полученные значения чувствительности (около 0,15 А/Вт при температуре 220 К и напряжении -1 В [20]) примерно в 10–20 раз меньше предельных значений, рассчитанных для *nBn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe [16, 29, 30]. Это свидетельствует о необходимости дальнейшей оптимизации параметров изготавливаемых *nBn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe. Для установления причин больших значений компоненты поверхностной утечки в структурах с меньшими значениями состава в барьерном слое ($x = 0,67$ и $0,75$) необходимы дополнительные исследования.

Заключение

В работе исследованы темновые токи в *nBn*-структурах на основе МЛЭ HgCdTe с пассивацией боковых стенок мезоструктуры пленками Al_2O_3 . В диапазоне температур 180–

300 К изучены механизмы формирования темнового тока в nBn -структурах при составе в барьерном слое, равном 0,84. Определены плотности объемной и поверхностной компонент темнового тока при температуре 300 К. Установлено, что при обратных смещениях в структурах реализуется диффузионное ограничение темнового тока.

Показано, что изготовленные nBn -структуры не уступают по значениям темновых токов современным детекторам на основе материалов A^3B^5 и МOCVD HgCdTe и превосходят известные аналоги на основе МЛЭ HgCdTe. Согласно предварительным оценкам, чувствительность nBn -структур на длине волны 2,2 мкм составила около 0,15 А/Вт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-12-00135.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Infrared and Terahertz detectors: 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2019.
2. Kinch M. A. // J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 2969.
3. Бурлаков И. Д., Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 509.
4. Maimon S., Wicks G. W. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. No. 15. P. 151109.
5. Soibel A., Ting D. Z., Rafol S. B., Fisher A. M., Keo S. A., Khoshakhlagh A., Gunapala D. // Appl. Phys. Lett. 2019. Vol. 114. P. 161103.
6. Ting D. Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Rafol S. B., Keo S. A., Höglund L., Fisher A. M., Luong E. M., Gunapala S. D. // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 113. P. 021101.
7. Soibel A., Ting D. Z., Hill C. J., Fisher A. M., Höglund L., Keo S. A., Gunapala S. D. // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 109. P. 103505.
8. Evirgen A., Abautret J., Perez J. P., Cordat A., Nedelcu A., Christol P. // Electron. Lett. 2014. Vol. 50. P. 1472.
9. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Antoszewski J., Faraone L. // IEEE Trans. Electron Dev. 2018. Vol. 65. P. 4340.
10. Kopytko M. // Infrared Phys. Technol. 2014.

Vol. 64. P. 47.

11. Uzgur F., Kocaman S. // Infrared Phys. Technol. 2019. Vol. 97. P. 123.
12. Ye Z. H., Chen Y. Y., Zhang P., Lin C., Hu X. N., Ding R. J., He L. // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 90701L.
13. Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 53.
14. Войцеховский А. В., Горн Д. И. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 83.
15. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 161102.
16. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. // J. Electron. Mater. 2012. Vol. 41. P. 2886.
17. Gravrand O., Boulard F., Ferron A., Ballet P., Hassis W. // J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. P. 3069.
18. Kopytko M., Rogalski A. // Prog. Quant. Electron. 2016. Vol. 47. P. 1.
19. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. // Infrared Phys. Technol. 2019. Vol. 102. P. 103035.
20. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53. No. 5. P. 055107.
21. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. // Mater. Res. Expr. 2019. Vol. 6. No. 11. P. 116411.
22. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y. // Russ. Phys. J. 2019. Vol. 62. No. 6. P. 1054.
23. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y. // Russ. Phys. J. 2019. Vol. 62. No. 5. P. 818.
24. 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. No. 3. P. 289.
25. Fu R., Pattison J. // Opt. Engin. 2012. Vol. 51. No. 10. P. 104003.
26. Zakirov E. R., Kesler V. G., Sidorov G. Y., Prosvirin I. P., Gutakovskiy A. K., Vdovin V. I. // Semicond. Sci. Technol. 2019. Vol. 34. No. 6. P. 065007.
27. Tennant W. E., Lee D., Zandian M., Piquette E., Carmody M. // J. Electron. Mater. 2008. Vol. 37. No. 9. P. 1406.
28. Tennant W. E. // J. Electron. Mater. 2010. Vol. 9. No. 7. P. 1030.
29. Kopytko M., Kęblowski A., Gawron W., Madejczyk P. // Opto-Electron. Rev. 2015. Vol. 23. P. 143.
30. Akhavan N. D., Jolley G., Umana-Membreno G. A., Antoszewski J., Faraone L. // J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. P. 3044.

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

Diffusion limitation of the dark current in nBn structures based on MBE HgCdTe

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 Ave., Tomsk, 634050, Russia

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS
13 Lavrentieva pr., Novosibirsk, 630090, Russia

Received January 31, 2020

Dark currents were studied in medium-wave nBn structures based on HgCdTe grown by molecular beam epitaxy on GaAs (013) substrates. The passivation of the surface of the side walls of the mesa structures was carried out by forming Al₂O₃ films by the method of plasma atomic layer deposition. It was shown that with a composition in the barrier layer equal to 0.84, the bulk component of the dark current dominates in nBn structures. The activation energy of the current is close to the band gap of the absorbing layer. A comparison of the experimental results with the empirical model Rule07 showed that in the temperature range 180–300 K the diffusion limitation of the dark current is realized in the fabricated structures. From the conducted studies, it follows that molecular beam epitaxy of HgCdTe on alternative substrates is a promising way to create unipolar barrier detectors for the spectral range of 3–5 μm.

Keywords: infrared detectors, HgCdTe, molecular beam epitaxy, nBn structure, dark current, current-voltage characteristic, diffusion limitation.

REFERENCES

1. A. Rogalski *Infrared and Terahertz detectors: 3rd. ed.* (CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2019).
2. M. A. Kinch, *J. Electron. Mater.* **44**, 2969 (2015).
3. I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (5), 509 (2014).
4. S. Maimon, G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 151109 (2006).
5. A. Soibel, D. Z. Ting, S. B. Rafol, et al., *Appl. Phys. Lett.* **114**, 161103 (2019).
6. D. Z. Ting, A. Soibel, A. Khoshakhlagh, et al., *Appl. Phys. Lett.* **113**, 021101 (2018).
7. A. Soibel, D. Z. Ting, C. J. Hill, et al., *Appl. Phys. Lett.* **109**, 103505 (2016).
8. A. Evirgen, J. Abautret, J. P. Perez, et al., *Electron. Lett.* **50**, 1472 (2014).
9. N. D. Akhavan, G. A. Umana-Membreno, R. Gu, et al., *IEEE Trans. Electron Dev.* **65**, 4340 (2018).
10. M. Kopytko, *Infrared Phys. Technol.* **64**, 47 (2014).
11. F. Uzgur, S. Kocaman, *Infrared Phys. Technol.* **97**, 123 (2019).
12. Z. H. Ye, Y. Y. Chen, P. Zhang P., et al., *Proc. SPIE* **9070**, 90701L (2014).
13. N. I. Yakovleva, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 53 (2019).
14. A. V. Voitsekhovskii, D. I. Gorn, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 83 (2016).
15. A.M. Itsuno, J. D. Phillips, S. Velicu, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 161102 (2012).
16. A. M. Itsuno, J. D. Phillips, S. Velicu, *J. Electron. Mater.* **41**, 2886 (2012).
17. O. Gravrand, F. Boulard, A. Ferron, et al., *J. Electron. Mater.* **44**, 3069 (2015).
18. M. Kopytko, A. Rogalski, *Prog. Quant. Electron.* **47**, 1 (2016).
19. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Infrared Phys. Technol.* **102**, 103035 (2019).
20. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** (5), 055107 (2020).
21. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Mater. Res. Expr.* **6** (11), 116411 (2019).
22. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russ. Phys. J.* **62** (6), 1054 (2019).
23. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russ. Phys. J.* **62** (5), 818 (2019).
24. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *J. Comm. Technol. Electron.* **64** (3), 289 (2019).
25. R. Fu, J. Pattison, *Opt. Engin.* **51** (10), 104003 (2012).
26. E. R. Zakirov, V. G. Kesler, G. Y. Sidorov, et al., *Semicond. Sci. Technol.* **34** (6), 065007 (2019).
27. W. E. Tennant, D. Lee, M. Zandian, et al., *J. Electron. Mater.* **37** (9), 1406 (2008).
28. W. E. Tennant, *J. Electron. Mater.* **9** (7), 1030 (2010).
29. M. Kopytko, A. Kębłowski, W. Gawron, et al., *Opto-Electron. Rev.* **23**, 143 (2015).
30. N. D. Akhavan, G. Jolley, G. A. Umana-Membreno, et al., *J. Electron. Mater.* **44**, 3044 (2015).