

УДК 621.315.592

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

Экспериментальное исследование барьерных NBvN-структур на основе МЛЭ n -HgCdTe для детектирования в MWIR и LWIR спектральных областях

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

Проведено исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик барьерных фоточувствительных структур в конфигурации NBvN на основе n -HgCdTe (КРТ). Исследовано семь различных типов фоточувствительных структур для MWIR и LWIR диапазонов инфракрасного (ИК) излучения, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), как темновых, так и при наличии засветки. Определены параметры NBvN-структуры, реализующей максимальные значения фототока и минимальные значения темновых токов в рабочем интервале напряжений смещения V для повышенных рабочих температур.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, адмиттанс, импеданс, КРТ, HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, барьерная структура, nVn , NBvN.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-37-42

Введение

Разработка фотоприемных устройств III поколения предъявляет повышенные требова-

ния к инфракрасным детекторам, среди которых повышение рабочей температуры, а также снижение стоимости, массы и габаритов приборов. Из-за своих фундаментальных свойств твердый раствор HgCdTe, выращенный методом МЛЭ, является идеальным материалом для создания ИК-детекторов.

Наряду с созданием фотодиодов типа n на p , а также фотодиодов типа p на n , для МЛЭ HgCdTe перспективно использование архитектур барьерных детекторов [1–3] на основе материала n -типа проводимости, которые могут обеспечить преимущество перед традиционными фотодиодами (а также двухслойными планарными гетеропереходами) из-за повышения качества материала в отсутствии постимплантационных дефектов [4]. Наиболее распространённой для МЛЭ HgCdTe является конфигурация nVn , обеспечивающая подавление темновых токов за счёт блокирования электронного тока широкозонным барьером V в зоне проводимости [1]. Теоретические и экспериментальные исследования nVn -структур на основе МЛЭ n -HgCdTe проводились нами ранее и широко освещены, например, в работах [5–8].

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

Другой перспективной архитектурой униполярных барьерных детекторов на основе МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ является NBvN-конфигурация, позволяющая повысить рабочую температуру детектора за счет подавления Оже генерационно-рекомбинационных процессов через неравновесное обеднение. Теоретически HgCdTe NBvN-детекторы сохраняют технологические преимущества $n\text{Vn}$ -конфигурации, но при этом могут показывать меньшие темновые токи, чем $p\text{-n}$ фотодиоды и $n\text{Vn}$ -детекторы [9]. Однако работ, посвящённых экспериментальным исследованиям подобных структур, в литературе практически нет.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию электрофизических и фотоэлектрических характеристик барьерных фоточувствительных структур в конфигурации NBvN на основе $n\text{-HgCdTe}$.

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*.

Рост производился на подложках (013) GaAs диаметром 2 и 3 дюйма с последовательным ростом буферных слоев ZnTe и CdTe (толщиной 30 нм и 5,5 мкм соответственно). Структуры содержали два типа рабочих слоев (v) в зависимости от требуемой для выращивания структуры длинноволновой границы: n -слои с $x \sim 0,3$ (для детектирования в MWIR-диапазоне ИК-излучения – 3–5 мкм) и $x \sim 0,20\text{--}0,23$ (для детектирования в LWIR-диапазоне ИК-излучения – 8–14 мкм) толщиной 2,8–4,4 мкм с уровнем легирования индием (N_d) $1,0 \times 10^{14}\text{--}3,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$; встроенный барьерный слой (В) с $x \sim 0,47\text{--}0,80$; N^1 -слой (покрывающий) толщиной 1–2 мкм с $x \sim 0,30\text{--}0,45$ и уровнем легирования $2,0 \times 10^{14}\text{--}7,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и N^2 -слой (нижний) толщиной 0,2–1 мкм с $x \sim 0,30\text{--}0,60$ и уровнем легирования $1 \times 10^{14}\text{--}3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены NBvN-структуры на основе МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ семи типов: структуры А, В, С для MWIR-диапазона и структуры D, E, F, G для LWIR-диапазона.

В работе была проведена отработка и оптимизация режимов выращивания NBvN-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с заданными параметрами: режимов роста v -слоев различного состава x , режимов легирования этих слоев и встроенных барьерных слоев. Для этого подбирались режимы работы нагревателей для поддержания параметров технологического процесса: температуры подложки, соотношения потоков кадмия и теллура, давления паров ртути (скорость роста составляла величину 2–3 мкм/час). Для получения резких гетерограниц применялась остановка процесса роста путем перекрытия молекулярных потоков заслонкой, вывода на нужный режим источников молекулярных потоков теллура, кадмия и индия и продолжения процесса роста.

Для исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик на основе выращенных гетероструктур изготавливались экспериментальные образцы.

Типичный технологический маршрут изготовления экспериментальных образцов включал в себя: разделение пластины выращенной гетероструктуры КРТ на части, исключающее возможность химического загрязнения поверхности пленки; фотолитографию для формирования меза-структур; травление меза-структур в 0,5 % растворе Вг в НВг на глубину, достаточную для разделения рабочего слоя, контроль глубины травления при помощи интерферометрии с точностью 0,25 мкм; нанесение диэлектрика на всю поверхность образца; фотолитографию рамки (базового контакта); травление диэлектрика в рамке с использованием смеси плавиковой кислоты и фтористого аммония; фотолитографию для нанесения металла на базовый контакт (рамку) и на меза-структуры; напыление индия методом термического испарения, а также удаление остатков фоторезиста.

Изготовленные в рамках данной работы образцы отличались наличием вскрытого контакта в диэлектрике на верхней поверхности меза-структуры. Вскрытие окна и нанесение металлического электрода производилось в ходе техпроцесса. Такая конфигурация образцов позволяла, с одной стороны, проводить прямые измерения ВАХ структуры, а с другой – обеспечивала пассивацию боковой поверхности меза-структур, что позволяло минимизировать влияние поверхностных эффектов на электрофизические свойства.

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

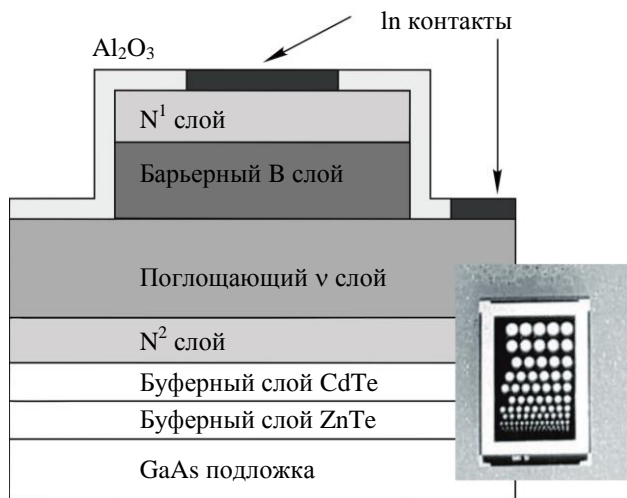


Рис. 1. Схематическое представление расположения слоев в экспериментальном образце фоточувствительной структуры на основе NBvN. На вставке – фотография образца NBvN-структуры

Несмотря на наличие пассивации боковой поверхности меза-структур, для обеспечения возможности анализа вероятного влияния боковой поверхности меза на измеряемые характеристики экспериментальных образцов, на одном образце сразу формировались меза-структуры разного диаметра. В результате этого для каждого типоразмера выполнялось свое отношение периметра к площади меза-структуры, определяющее вклад границы раздела диэлектрик-полупроводник и возможные эффекты на боковых поверхностях меза-структур. Изготавливались меза-структуры диаметром 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50, 20 мкм (вставка к рис. 1).

В качестве диэлектрического покрытия использовался Al₂O₃, наносимый методом плазменно-индуцированного атомно-слоевого осаждения (PE ALD) при температуре образца 120 °С.

Исследование параметров структур проводились методом спектроскопии комплексной проводимости в широком диапазоне температур (8–475 К) и частот тестового сигнала 500 Гц² МГц с применением автоматизированной установки спектроскопии адмиттанса гетероструктур на базе криостата Janis (в неоптической и оптической конфигурациях) и измерителя иммитанса Agilent E4980 А.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Были проведены измерения ВАХ структур для различных температур (темновые и при наличии засветки), а также температурных зависимостей плотности тока при различных напряжениях. Для выявления влияния поверхностной утечки определялись зависимости тока от отношения P/A , где P – периметр, A – площадь меза-структуры.

Измерения на NBvN-структурах MWIR-диапазона (структуры типа А, В, С) показали, что для структур типа А и В основным механизмом формирования темнового тока будет поверхностная утечка по боковым стенкам. Вольтамперные характеристики этих структур почти симметричны для разных знаков смещения для всех температур, при которых проводились измерения (11–300 К).

При этом ВАХ рассматриваемых структур изменялись при повышении температуры (рис. 2). Плотность тока при $T = 200–300$ К возрастала с ростом температуры на 2 порядка, причем при $T < 200$ К величина тока оставалась постоянной.

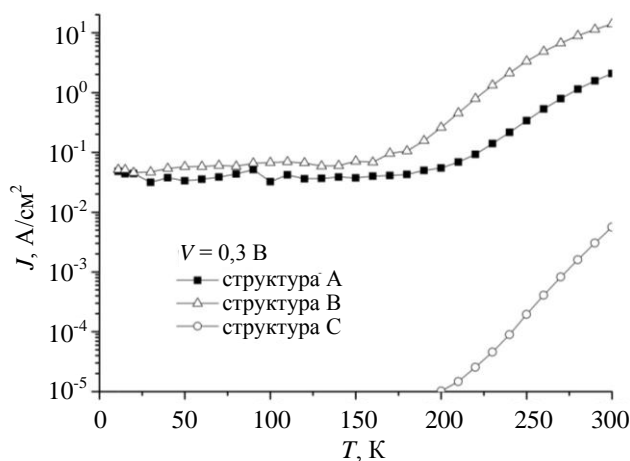


Рис. 2. Зависимости плотностей темновых токов J MWIR-структур А, В и С от температуры при напряжении смещения 0,3 В

ВАХ для структуры типа С имели другой вид: величина плотности тока была ниже более чем на 6 порядков при смещении $-0,5$ В для $T < 100$ К по сравнению со структурами А и В. Температурные зависимости тока ($V = 0,3$ В) для $T < 200$ К не были реализованы из-за ограничений установки для измерения малых токов (менее 10 нА/см²). Но по виду зависи-

мости для $T > 200$ К следует ожидать резкий (экспоненциальный) спад тока при низких температурах.

Для структуры типа С были построены графики Аррениуса при различных напряжениях смещения. Определенные величины энергии активации соответствуют значению, близкому к ширине запрещенной зоны (рис. 3). Такой же вывод об объемной природе тока можно сделать из вида зависимости плотности тока от отношения периметра к площади меза-структуры (рис. 4). Плотности темнового тока при этом составили значения $J_P = 1,443 \times 10^{-7}$ А/см² для тока поверхностной утечки и $J_A = 8,573 \times 10^{-4}$ А/см² для объемной компоненты тока.

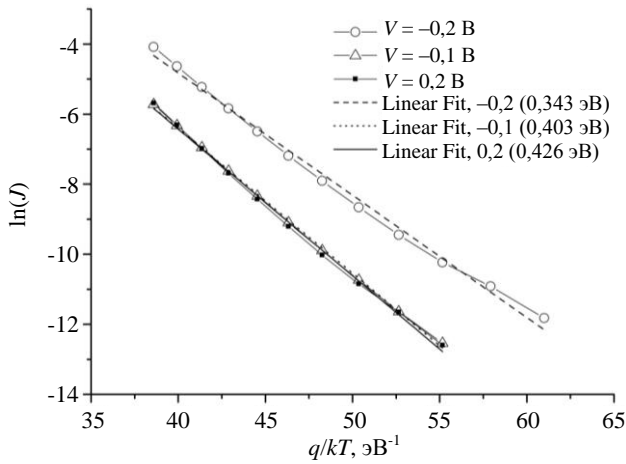


Рис. 3. Графики Аррениуса для MWIR-структуры С при различных напряжениях смещения

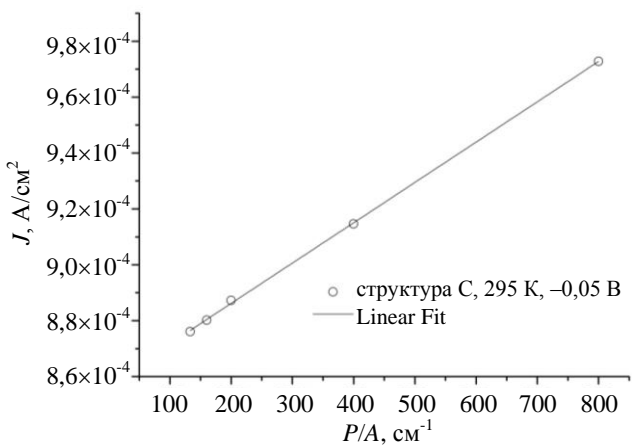


Рис. 4. Зависимости плотности темнового тока от отношения периметра P структуры к её площади A , измеренные для MWIR NBvN-структуры С при температуре 295 К и смещении $-0,05$ В

Сигнальные характеристики NBvN-структур исследовались посредством измерения ВАХ в режиме подачи внешнего излучения от различных источников: светодиодов (длина волны в диапазоне 0,91–3,6 мкм), ламп накаливания.

Для структур типа А и В не найдено значительных изменений ВАХ при освещении. В тоже время для структур типа С обнаружено значительное увеличение тока при засветке при обратных смещениях. Величина фототока превысила темновой ток более чем в 100 раз (для $T = 80$ К) (рис. 5) и составляла 10^{-2} А/см².

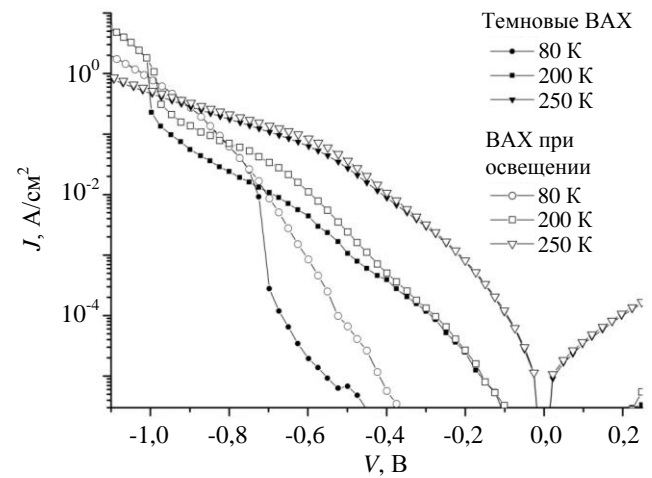


Рис. 5. Сравнение темновых ВАХ и ВАХ при воздействии подсветки для MWIR-структуры С при различных температурах

Также были проведены измерения ВАХ для NBvN-структур на основе n -HgCdTe ($x = 0,22$) для LWIR-диапазона (структуры типа D, E, F, G). Две структуры (D, F) продемонстрировали ВАХ, соответствующие механизму поверхностной утечки: относительная симметрия ($T > 200$ К) обеих ветвей зависимости $I(V)$, большие значения плотности тока. Температурные зависимости ($V = 0,3$ В) плотности тока для структур D и F характеризуются широким интервалом температур (10–150 К) постоянства тока. Другая картина поведения ВАХ наблюдалась для структур E, G. Значения плотности темнового тока в диапазоне температур 10–100 К оказались в 10^3 раз меньше, чем для структур D, F. Область температур постоянного значения тока существенно ниже (11–100 К).

При этом из графиков Аррениуса для структур E и G следуют значения энергии ак-

тивации, соответствующие ширине запрещенной зоны (при $V = -0,1, -0,2, 0,2$ В) для температур ниже 100 К. Факт роста вклада тока поверхностной утечки при высоких температурах подтверждается зависимостями плотности тока от отношения периметра к площади меза-структуры.

Измерения сигнальных характеристик NBvN-структур D, E, F, G не продемонстрировали заметного влияния засветки на ВАХ.

Заключение

Оптимальный режим работы NBvN-структур предполагает высокую чувствительность и минимальный уровень шумов. Это означает реализацию структур с максимальным фототоком (I_{ϕ}) и минимальными темновыми токами (I_T) в рабочем интервале напряжений смещения V для повышенных рабочих температур. Этим требованиям удовлетворяет NBvN-структура типа С, в которой реализуются минимальные темновые токи ($V = 0,5$ В, $I_T = 2 \times 10^{-6}$ А/см², $T = 100$ К) и максимальные фототоки ($V = -0,5$ В, $I_{\phi} = 10^{-4}$ А/см², $T = 80$ К).

Эти результаты означают, что для данной структуры был достигнут режим неравновесного обеднения области поглощения структуры за счет вытягивания дырок из границы раздела N^1B/v и дополнительного обеднения v -слоя за счет дрейфа дырок и электронов из границы раздела v/N^2 . В результате в v -слое реализуется минимальная концентрация темновых дырок (ниже равновесной), что определяет малый темновой ток. Фототок испытывает ограничение из-за наличия барьера в валентной зоне на границе раздела N^1B/v , который понижается при приложении смещения. Для больших напряжений смещения возможно понижение барьера для электронов и, как следствие, рост темнового тока. При повышенных рабочих температурах возрастают вклады процессов генерации-рекомбинации, туннелирования, что приводит к увеличению темнового тока. Как показали наши исследования, основной вклад в темновой ток дает ток поверхностной утечки по боковым стенкам NBvN-структуры. Оптимальный режим работы обеспечивается регулировкой рабочей

температуры (125–200 К) для LWIR и MWIR-диапазонов и рабочего напряжения смещения для получения неравновесного обеднения в области поглощения.

Возможности улучшения пороговых характеристик униполярных барьерных структур на основе МЛЭ n -HgCdTe определяются оптимизацией параметров слоёв (уровень легирования, толщина, распределение состава) в ходе выращивания барьерного (B), поглощающего (v) и контактных верхнего и нижнего (N^1, N^2) слоев многослойной системы NBvN. Отдельной задачей является решение проблемы снижения вклада поверхностной утечки, а также понижения энергетического барьера в валентной зоне.

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. Войцеховский А. В., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 50.
4. Bubulac L. O. // J. Crystal Growth. 1988. Vol. 86. № 1-4. P. 723.
5. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. // Infrared Physics and Technology. 2019. Vol. 102. P. 103035.
6. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. Vol. 53. P. 055107.
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. 2021. Vol. 64. № 5. P. 763.
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2022. Vol. 67. № 3. P. 308.
9. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. // Journal of Electronic Materials. 2012. Vol. 41. № 10. P. 2886.

Experimental study of NBvN barrier structures based on MBE *n*-HgCdTe for MWIR and LWIR photodetectors

A. V. Voitsekhovskii¹, S. M. Dzyadukh¹, D. I. Gorn¹, S. A. Dvoretzki^{1,2}, N. N. Mikhailov^{1,2},
G. Yu. Sidorov^{1,2}, 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. Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
13 Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received May 25, 2022

This work is devoted to an experimental study of the electrical and photoelectric characteristics of barrier photosensitive structures in the NBvN configuration based on n-HgCdTe. Seven different types of photosensitive structures for MWIR and LWIR infrared radiation ranges grown by molecular beam epitaxy have been studied. The current-voltage characteristics were measured both in the dark and under the illumination. The parameters of the NBvN structure, which realizes the maximum values of the photocurrent and the minimum values of dark currents in the operating range of bias voltages V for elevated operating temperatures, are determined.

Keywords: current-voltage characteristic, admittance, impedance, MCT, HgCdTe, molecular beam epitaxy, barrier structure, nBn, NBvN.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-37-42

REFERENCES

1. A. V. Voitsekhovskii and D. I. Gorn, Journal of Communications Technology and Electronics **62** (3), 314 (2017).
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, D. I. Gorn, S. A. Dvoretzki, and N. N. Mikhailov, Applied Physics, No. 5, 50 (2018) [in Russian].
4. L. O. Bubulac, J. Crystal Growth **86** (1-4), 723 (1988).
5. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzki, N. N. Mikhailov, G. Y. Sidorov, and M. V. Yakushev, Infrared Physics and Technology **102**, 103035 (2019).
6. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzki, N. N. Mikhailov, G. Y. Sidorov, and M. V. Yakushev, Journal of Physics D: Applied Physics **53**, 055107 (2020).
7. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzki, N. N. Mikhailov, G. Y. Sidorov, and M. V. Yakushev, Russian Physics Journal **64** (5), 763 (2021).
8. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, S. A. Dvoretzki, N. N. Mikhailov, G. Y. Sidorov, and M. V. Yakushev, Journal of Communications Technology and Electronics **67** (3), 308 (2022).
9. A. M. Itsuno, J. D. Phillips, and S. Velicu, Journal of Electronic Materials **41** (10), 2886 (2012).