

УДК 621.315.592  
EDN: WZSRCVPACS: 73.40QV, 73.21AS,  
85.60GZ, 73.61GA

## Механизмы формирования тока в $nVn$ -структурах на основе $HgCdTe$ со сверхрешеткой в барьерной области

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

*В широком диапазоне температур проведено исследование механизмов формирования темнового тока и фототока в  $nVn$ -структуре на основе  $n-HgCdTe$ , выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), со сверхрешеткой в барьерной области. Исследовано влияние различных уровней постоянной подсветки на электрические характеристики структур. Проведен анализ поведения объемной компоненты тока  $J_V$  и компоненты тока поверхностной утечки  $J_S$  при различных напряжениях смещения и температурах. Исследование показало сильную зависимость плотности темнового тока от температуры. Продемонстрировано существенное влияние постоянной подсветки ИК-светодиодом на значение плотности тока. Показано доминирование компонент тока  $J_V$  над  $J_S$  во всём исследованном диапазоне напряжений смещения и температуры.*

*Ключевые слова:*  $HgCdTe$ , молекулярно-лучевая эпитаксия, барьерная структура,  $nVn$ , сверхрешетка, компоненты тока.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-46-52

### Введение

Актуальной и критически важной задачей при разработке униполярных фоточувствительных барьерных  $nVn$ -структур на основе МЛЭ  $n-HgCdTe$  для целей фотоприёма в средней (3–5 мкм) и дальней (8–14 мкм) областях ИК-спектра является формирование эффективного барьера для основных носителей заряда в зоне проводимости для снижения темновых токов и одновременное устранение

энергетического барьера в валентной зоне для повышения квантовой эффективности и чувствительности [1]. В настоящее время с учётом потенциала и возможностей технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [2] наиболее перспективной конфигурацией считается структура с барьером в виде сверхрешётки (СР) [3–6]. Обзор последних достижений в направлении исследования подобных структур был проведён в [7]. К настоящему моменту в мировой научной литературе имеется

Войцеховский Александр Васильевич<sup>1</sup>, гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Дзядух Станислав Михайлович<sup>1</sup>, н.с., к.ф.-м.н.

Горн Дмитрий Игоревич<sup>1</sup>, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Дворецкий Сергей Алексеевич<sup>1,2</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

Михайлов Николай Николаевич<sup>1,2</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

Сидоров Георгий Юрьевич<sup>2</sup>, зам. директора, к.ф.-м.н.

Якушев Максим Витальевич<sup>2</sup>, зам. директора,

д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Томский государственный университет.

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

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 31.05.2024

Принята к публикации 26.06.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., 2024

крайне мало работ [8–10], посвящённых изготовлению  $nVn$ -структур на основе  $HgCdTe$  с барьером в виде сверхрешётки и их экспериментальному исследованию. При этом подавляющее большинство работ по тематике  $nVn$ -структур на основе  $HgCdTe$  в целом являются теоретическими и описывают моделирование различных конфигураций фоточувствительных гетероструктур с целью снижения темновых токов и повышения чувствительности.

С учётом опыта проведения экспериментальных исследований барьерных  $nVn$ -структур на основе МЛЭ  $n-HgCdTe$  можно сказать, что наблюдаемые в эксперименте вольт-амперные характеристики (ВАХ) часто отличаются от теоретических, что связано, например, с наличием токов поверхностной утечки, туннелированием или рекомбинацией по механизму Шокли-Рида-Холла. Наличие данных механизмов формирования темнового тока зачастую связано с особенностями технологии изготовления экспериментальных образцов. Успешное решение задачи создания эффективного селективного барьера в  $nVn$  фоточувствительных структурах напрямую связано с пониманием механизмов протекания электрического тока в структурах подобного типа.

Данная работа посвящена анализу каналов формирования тока в  $nVn$ -структурах на основе  $HgCdTe$  со сверхрешеткой в барьерной области.

### Образцы и методики эксперимента

Для проведения исследований были изготовлены специальные тестовые  $nVn$ -структуры на основе эпитаксиальных слоев  $HgCdTe$  с барьерным слоем в виде свехрешетки. Для изготовления структур в Новосибирске в Институте физики полупроводников СО РАН на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь-М» была выращена эпитаксиальная пленка. В качестве подложки была использовала пластина  $GaAs$  толщиной 600 мкм с ориентацией (013), на которой для согласования кристаллических решеток были выращены буферные слой  $ZnTe$  и  $CdTe$  толщинами 0,03 мкм и 5,6 мкм, соответственно. Выращенная пленка  $HgCdTe$  преднамеренно не легировалась. После выращивания эпитаксиальной пленки, производилось её травление через

специальную маску на глубину, соответствующую положению границы раздела поглощающего и барьерного слоев. В результате на поверхности пленки были сформированы отдельно стоящие  $nVn$ -структуры (меза-структуры), диаметр которых варьировался от 0,50 мм до 0,02 мм. Наличие структур различного диаметра необходимо для исследования влияния тока поверхностной утечки на характеристики изготовленных структур и оценки качества наносимого пассивирующего покрытия. После формирования отдельных структур, методом атомного слоевого осаждения производилась пассивация всей поверхности эпитаксиальной пленки слоем  $Al_2O_3$ , в котором производилось вскрытие окон над  $nVn$ -структурами, что давало возможность последующим напылением индия создавать контакты. Для создания сверхрешетки формировались 15 ям ( $x_{CdTe} = 0,03$ ) толщиной 1,6 нм, и 16 барьеров толщиной 3 нм с содержанием  $x_{CdTe} = 0,5$ . Состав  $x_{CdTe}$  в поглощающем слое был равен 0,32, а в контактном слое – 0,30. Параметры барьеров и ям СР выбирались на основании теоретических оценок таким образом, чтобы обеспечить максимальную вероятность прохождения неосновных носителей в валентной зоне и одновременно минимальную вероятность пролёта основных носителей через барьерный слой.

Исследования проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса гетероструктур. В состав исследовательского комплекса входило: пикоамперметр Keithley 6487, который использовался в качестве источника напряжения и измерителя тока; криогенная система термостатирования; система вакуумирования. Данная установка может быть использована для исследования гетероструктур на основе как узкозонных, так и широкозонных полупроводников и способна длительное время поддерживать стабильную температуру рабочего столика, на котором располагается образец, в диапазоне от 11 К до 475 К с точностью термостатирования не хуже чем 0,2 К.

Для исследования влияния подсветки на плотность тока через структуру использовался ИК-светодиод с максимумом излучения на длине волны 940 нм. При помощи управляемого блока питания проводилась стабилизация тока через светодиод при различных зна-

чениях тока в целях изменения уровня потока излучения воздействующей подсветки. При этом в течении всего цикла измерений светодиод находился снаружи криостата при комнатной температуре, а излучение в криостат заводилось через специальную фокусирующую систему.

### Результаты и их обсуждение

Для гетероструктур с различными диаметрами меза-структур были проведены измерения ВАХ в темновом режиме (при отсутствии засветки светодиодом) при различных температурах. На рисунке 1 представлены зависимости плотностей тока от напряжения смещения для структур диаметром 0,3 мм и 0,15 мм при температурах 230 К, 260 К и 300 К. Из рисунка видно, что плотность тока увеличивается с уменьшением диаметра структуры, причем при положительных напряжениях смещениях этот эффект выражен в большей степени.

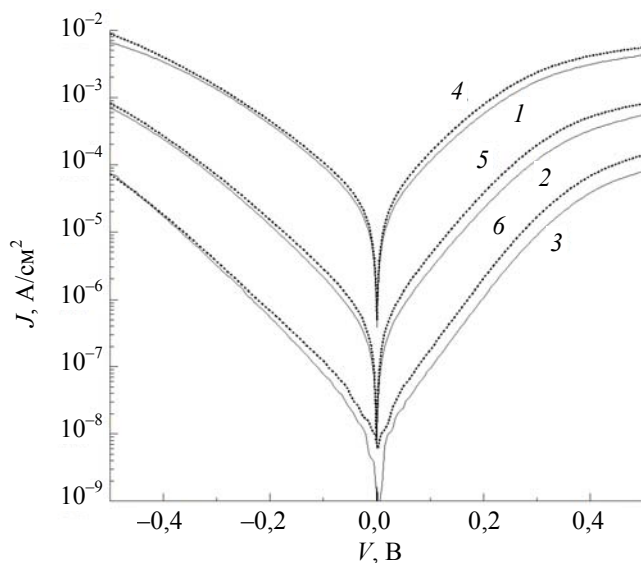


Рис. 1. Зависимости плотности тока  $J$  от напряжения смещения  $V$  для меза-структур диаметром 0,3 мм (1, 2, 3) и 0,15 мм (4, 5, 6) при температурах 230 К (3, 6), 260 К (2, 5) и 300 К (1, 4)

На рисунке 2 изображены зависимости плотности тока от температуры при двух уровнях постоянной подсветки, соответствующих токам светодиода 2 мА и 18 мА. Данная температурная зависимость построена из серии ВАХ, измеренных при различных темпе-

ратурах при значениях напряжения смещения +0,3 В и -0,3 В. В целом для исследуемой структуры имеет место сильная зависимость плотности тока от температуры, и при снижении температуры от 300 К до 130 К плотность темнового тока снижается более чем на 5 порядков при напряжениях  $\pm 0,3$  В. Как следует из рисунка 2, рост уровня подсветки приводит к возрастанию фототока более чем в 10 раз в интервале температур 11–170 К. Видно, что в данном диапазоне температур уровень плотности тока при наличии подсветки при отрицательном напряжении смещения остается практически неизменным. При положительном напряжении с уменьшением температуры наблюдается снижение плотности тока при температурах менее 70 К.

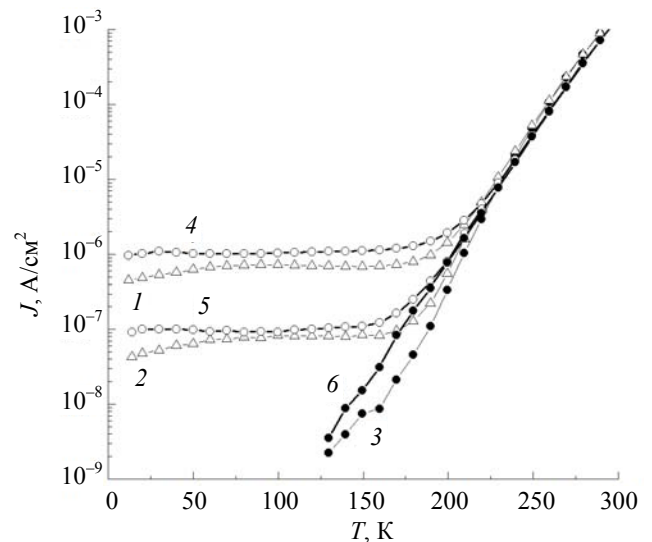


Рис. 2. Зависимости плотности тока  $J$  от температуры  $T$  при напряжениях смещения +0,3 В (1, 2, 3) и -0,3 В (4, 5, 6) для меза-структуры диаметром 0,35 мм: темновые (3, 6), а также в условиях подсветки, соответствующих токам светодиода 2 мА (2, 5) и 18 мА (1, 4)

Измерения ВАХ меза-структур с различным поперечным сечением позволило разделить вклады объемной компоненты тока и компоненты, связанной с поверхностной утечкой, в общую плотность темнового тока и провести анализ их поведения при изменении напряжения смещения и температуры [4]. Для выделения объемной компоненты тока и компоненты тока поверхностной утечки по измеренным ВАХ для нескольких меза-структур строились графики зависимости плотности тока от отношения периметра  $P$  к площади  $A$

меза-структуры при фиксированных значениях напряжения смещения и температуры. По наклону этих графиков определялась компонента тока поверхностной утечки, а по отрезку, отсекаемому на оси ординат – объемная компонента. Пример такого графика, построенного при температуре 250 К и напряжениях +0,3 В и –0,3 В, представлен на рисунке 3.

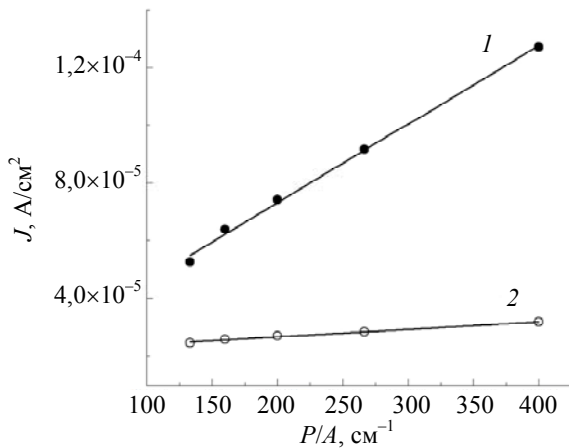


Рис. 3. Зависимости плотности тока  $J$  от отношения  $P/A$  при температуре 250 К и напряжениях смещения +0,3 В (1) и –0,3 В (2)

Из рисунка видно, что зависимости хорошо аппроксимируются прямыми, что свидетельствует о малом разбросе технологических параметров от одной меза-структуры к другой. Также видно, что зависимость, построенная при напряжении +0,3 В, имеет больший наклон по сравнению с зависимостью, построенной при –0,3 В, что свидетельствует о большем вкладе в общую плотность тока компоненты связанной с поверхностной утечкой при положительных смещениях. Проводя построения графиков зависимости плотности тока от отношения площади к периметру структур при различных напряжениях, можно получить графики зависимости объемной компоненты тока  $J_B$  и компоненты тока поверхностной утечки  $J_S$  от напряжения. Данные зависимости, построенные при температуре 250 К, приведены на рисунке 4.

Во всём исследованном диапазоне напряжений смещения величина плотности объемной компоненты  $J_B$  темнового тока на 2–3 порядка превышает величину плотности поверхностной компоненты тока  $J_S$ , что свидетельствует о высоком качестве нанесения пассивирующего покрытия, формирующего

поверхность полупроводника боковых граней меза-структур, сводящую к минимуму поверхностную рекомбинацию. На рисунке 4 также можно наблюдать различный характер поведения компонент темнового тока при отрицательных и положительных напряжениях. При одинаковых по модулю напряжениях величина плотности тока поверхностной утечки  $J_S$  при отрицательных смещениях имеет меньшие значения, чем при положительных. Для объемной компоненты тока  $J_B$  наблюдается обратная картина – при отрицательных смещениях плотность объемной компоненты тока имеет большие значения, чем при положительных.

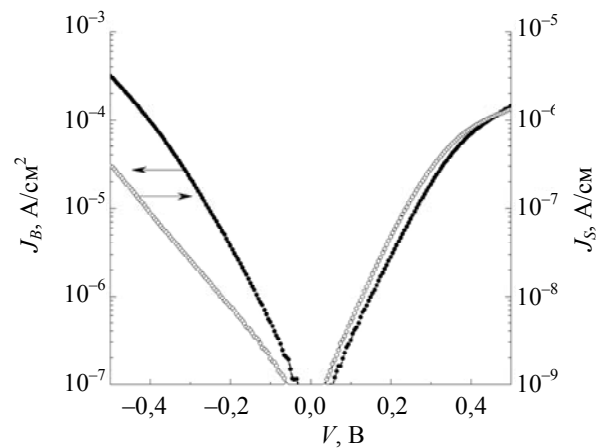


Рис. 4. Зависимости объемной  $J_B$  и поверхностной  $J_S$  компонент темнового тока от напряжения смещения  $V$  при температуре 250 К

Приведённые на рисунке 4 данные позволяют сделать важный практический вывод в контексте определения оптимальных условия работы фоточувствительной структуры на основе подобной гетероструктуры, а именно, выбора оптимального значения напряжения смещения. Данный вывод заключается в том, что для случая исследуемой структуры увеличение значения отрицательного смещения уменьшает вклад поверхностной компоненты тока в темновой ток.

Анализ температурных зависимостей компонент тока при различных значениях напряжения обратного (отрицательного) смещения (рисунок 5) показывает, что в диапазоне температур 230–300 К происходит монотонное увеличение значений плотностей тока с ростом температуры как для объемной, так и для поверхностной компоненты. При этом из

представленных кривых видно, что увеличение температуры в исследованном диапазоне не приводит к увеличению вклада компоненты тока поверхностной утечки. Более того, при напряжении смещения  $-0,1$  В вклад поверхностных токов с ростом температуры уменьшается. Подобное поведение даёт предпосылки к увеличению рабочей температуры в исследуемой барьерной гетероструктуре.

При температурах ниже  $230$  К с уменьшением общей плотности тока растет относительная случайная погрешность измерений, а вместе с ней растет и погрешность определения  $J_B$  и  $J_S$ , и при небольших напряжениях смещения достоверное их выделение из общей плотности тока становится невозможным.

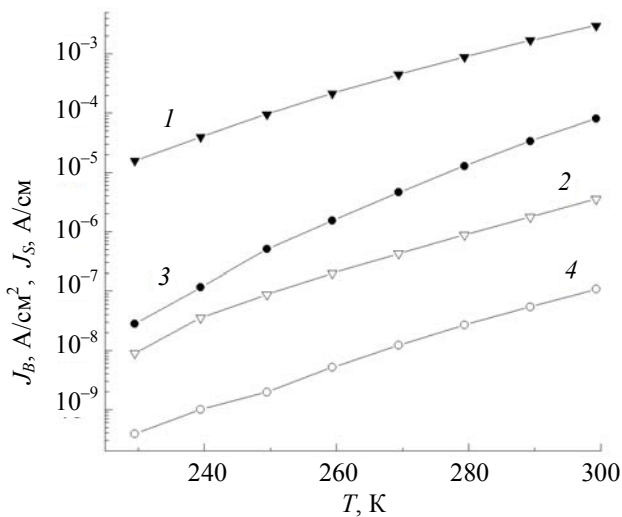


Рис. 5. Температурные зависимости объемной  $J_B$  (1, 3) и поверхностной  $J_S$  (2, 4) компонент темнового тока при напряжениях смещения  $-0,4$  В (1, 2) и  $-0,1$  В (3, 4)

### Заключение

В работе представлены результаты исследования ВАХ  $n$ Вп-структур на основе МЛЭ  $n$ -HgCdTe со сверхрешеткой в барьерной области в темновом режиме и при воздействии постоянной подсветки. Исследовалась  $n$ Вп-структура, барьерный слой в которой формировался в виде сверхрешетки, состоящей из 15 ям ( $x = 0,03$ ,  $d = 1,6$  нм) и 16 барьеров ( $x = 0,5$ ,  $d = 3$  нм). Состав  $x$  в поглощающем слое был равен  $0,32$ , а в контактном слое –  $0,30$ . Параметры барьеров и ям СР выбирались, исходя из теоретических оценок, таким образом, чтобы обеспечить максималь-

ную вероятность прохождения неосновных носителей в валентной зоне и одновременно минимальную вероятность пролёта основных носителей через барьерный слой.

Исследование показало сильную зависимость плотности темнового тока от температуры. При снижении температуры от  $300$  К до  $130$  К плотность темнового тока снижается более чем на 5 порядков при напряжениях смещения  $\pm 0,3$  В. Рост уровня подсветки, соответствующий увеличению тока светодиода с  $2$  мА до  $18$  мА приводит к возрастанию фототока более чем в 10 раз в интервале температуры  $11$ – $170$  К.

Исследование ВАХ для меза-структур с различными диаметрами позволило произвести выделение из общей плотности тока компонент объемного тока и тока поверхностной утечки, а также проанализировать их зависимость от напряжения смещения и температуры. Во всём исследованном диапазоне напряжений смещения величина плотности объёмной компоненты  $J_B$  темнового тока на 2–3 порядка превышает величину плотности поверхностной компоненты тока  $J_S$ , что свидетельствует о высоком качестве нанесения пассивирующего покрытия. Результаты данных измерений позволяют сделать важный практический вывод: для случая исследуемой структуры увеличение значения отрицательного смещения уменьшает вклад поверхностной компоненты тока в темновой ток. Данный вывод важен в контексте определения оптимальных условий работы фоточувствительной структуры на основе исследованной гетероструктуры, связанном с выбором оптимального значения напряжения смещения.

Анализ температурных зависимостей компонент тока при различных значениях напряжения обратного смещения показывает, что в диапазоне температур  $230$ – $300$  К происходит монотонное увеличение значений плотностей тока с ростом температуры как для объёмной, так и для поверхностной компоненты. При этом увеличение температуры в исследованном диапазоне не приводит к увеличению вклада компоненты тока поверхностной утечки. Подобное наблюдение даёт предпосылки к увеличению рабочей температуры в исследуемой барьерной гетероструктуре.

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 23-62-10021,  
<https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y. Ch. 6, II-VI Semiconductor-Based Unipolar Barrier Structures for Infrared Photodetector Arrays in Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors. – Cham: Springer, 2023. P. 135–154.
2. Михайлов Н. Н., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Менищников Р. В., Ремесник В. Г., Ужасков И. Н. / Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 76–87.
3. Kopytko M., Wrobel J., Jozwikowska K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Faraone L., Becker C. R. / Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. № 1. P. 158–166.
4. Benyahia D., Martyniuk P., Kopytko M., Antoszewski J., Gawron W., Madejczyk P., Rutkowski J., Gu R., Faraone L. / Opt. Quant. Electron. 2016. Vol. 48. P. 215.
5. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Asadnia M., Antoszewski J., Faraone L. / IEEE Transactions On Electron Devices. 2016. Vol. 63. № 12. P. 4811–4818.
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R. / IEEE Transactions On Electron Devices. 2018. Vol. 65. № 2. P. 591–598.
7. Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Михайлов Н. Н., Дворецкий С. А., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 6–22.
8. Izhnin I. I., Kurbanov K. R., Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y., Yakushev M. V. / Applied Nanoscience. 2020. № 10. P. 4571–4576.
9. Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2023. № 4. С. 78–86.
10. Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2023. № 5. С. 75–83.
11. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. / Infrared Physics & Technology. 2019. Vol. 102. P. 103035.

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

## Mechanisms of current formation in nBn structures based on HgCdTe with a superlattice in the barrier region

A. V. Voitsekhovskii<sup>1</sup>, S. M. Dzyadukh<sup>1</sup>, D. I. Gorn<sup>1</sup>, S. A. Dvoretzky<sup>1,2</sup>, N. N. Mikhailov<sup>1,2</sup>,  
G. Yu. Sidorov<sup>2</sup> and M. V. Yakushev<sup>2</sup>

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

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

Received 31.05.2024; accepted 26.06.2024

*Over a wide temperature range, a study was carried out of the mechanisms of formation of dark current and photocurrent in an nBn structure based on n-HgCdTe, grown by molecular beam epitaxy, with a superlattice in the barrier region. The influence of different levels of constant illumination on the electrical characteristics of structures was studied. The behavior of the bulk current component  $J_B$  and the surface leakage current component  $J_S$  was analyzed at various bias voltages and temperatures. The study showed a strong dependence of dark current density on temperature. A significant effect of constant illumination with an IR LED on the current density value has been demonstrated. The dominance of current components  $J_B$  over  $J_S$  is shown throughout the entire range of bias voltages and temperatures studied.*

**Keywords:** HgCdTe, molecular beam epitaxy, barrier structure,  $nBn$ , superlattice, current components.

## REFERENCES

1. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N. and Sidorov G. Y. Ch. 6, II-VI Semiconductor-Based Unipolar Barrier Structures for Infrared Photodetector Arrays in Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors. Cham: Springer, 2023. pp. 135–154.
2. Mikhailov N. N., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Menshchikov R. V., Remesnik V. G. and Uzhakov I. N., *Optichesky zhurnal* **91** (2), 76–87 (2024) [in Russian].
3. Kopytko M., Wrobel J., Jozwikowska K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Faraone L. and Becker C. R., *Journal of Electronic Materials* **44** (1), 158–166 (2015).
4. Benyahia D., Martyniuk P., Kopytko M., Antoszewski J., Gawron W., Madejczyk P., Rutkowski J., Gu R. and Faraone L., *Opt. Quant. Electron* **48**, 215 (2016).
5. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Asadnia M., Antoszewski J. and Faraone L., *IEEE Transactions On Electron Devices* **63** (12), 4811–4818 (2016).
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A. and Gu R., *IEEE Transactions On Electron Devices* **65** (2), 591–598 (2018).
7. Voitsekhovskii A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., *Optichesky zhurnal* **91** (2), 6–22 (2024) [in Russian].
8. Izhnin I. I., Kurbanov K. R., Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y. and Yakushev M. V., *Applied Nanoscience*, № 10, 4571–4576 (2020).
9. Voitsekhovskii A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., *Applied Physics*, № 4, 78–86 (2023) [in Russian].
10. Voitsekhovskii A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., *Applied Physics*, № 5, 75–83 (2023) [in Russian].
11. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., *Infrared Physics & Technology* **102**, 103035 (2019).