

Моделирование воздействия импульсного лазерного излучения на матричный двухдиапазонный $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ фотоприемник в программном пакете суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС

В. Г. Средин, М. В. Сахаров, А. Э. Запонов, Д. С. Конради, И. В. Кузнецов, В. А. Глазунов, Ю. Д. Серяков

Для анализа закономерностей эволюции тепловых полей в двухдиапазонном $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ матричном фотоприемнике при воздействии на него интенсивного лазерного излучения построена имитационная модель, разработанная в пакете программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, полученных с её использованием, и их анализ.

Ключевые слова: двухдиапазонный полупроводниковый инфракрасный матричный фотоприемник, лазерное излучение, имитационное моделирование, температурное поле.

Ссылка: Средин В. Г., Сахаров М. В., Запонов А. Э., Конради Д. С., Кузнецов И. В., Глазунов В. А., Серяков Ю. Д. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 46.

Reference: V. G. Sredin, M. V. Sakharov, A. E. Zaponov, D. S. Konradi, I. V. Kuznetsov, V. A. Glazunov, and Y. D. Seryakov, Applied Physics, No. 3, 46 (2020).

Введение

Проблеме влияния лазерного излучения на физические свойства твердого раствора

Средин Виктор Геннадиевич¹, зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор.

Сахаров Михаил Викторович², зам. начальника института по научной работе, д.т.н., профессор.

Запонов Арсений Эдуардович³, н.с., к.т.н.

Конради Дмитрий Сергеевич¹, адъюнкт.

Кузнецов Игорь Владимирович¹, преподаватель.

Глазунов Виктор Алексеевич⁴, зам. нач. отдела – нач. лаб.

Серяков Юрий Дмитриевич⁴, м.н.с.

¹ Военная академия РВСН имени Петра Великого. Россия, 143900, МО, г. Балашиха, ул. Карбышева, 8. E-mail: sredinvg@rambler.ru

² 12 ЦНИИ Минобороны России.

Россия, 141307, МО, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26.

³ Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН. Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

⁴ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Россия, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37.

Статья поступила в редакцию 16 июня 2020 г.

© Средин В. Г., Сахаров М. В., Запонов А. Э., Конради Д. С., Кузнецов И. В., Глазунов В. А., Серяков Ю. Д., 2020

$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [1–4], а также оптоэлектронные приборы на их основе [5–9] посвящено значительное число экспериментальных и теоретических исследований. Ряд из них приводит к противоречивым результатам в силу значительного разнообразия способов и условий облучения, а также особенностям фоточувствительного материала и отличиям в конструкции самих приборов, наибольший интерес среди которых представляют матричные фотоприемники (МФП) ИК диапазона. В указанных обстоятельствах наиболее целесообразным методом исследований представляется имитационное моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с МФП. В основе подобного подхода обычно лежит построение модели преобразования поглощенного в МФП излучения в тепло, базирующейся на решении нестационарного уравнения теплопроводности в том или ином приближении с соответствующими начальными и граничными условиями [1, 4, 8, 9].

Модель должна учитывать энергетические, временные, спектральные и пространственные параметры воздействующего излучения, температурные зависимости оптичес-

ких и теплофизических характеристик полупроводниковых материалов, топологию матрицы, структуру чувствительных элементов, а также относительно низкий порог наступления нелинейного оптического поглощения в фоточувствительном материале [10] и т. д. Создаваемые модели предназначены для анализа пространственной и временной структуры тепловых полей, наведенных ЛИ в МФП, и прогнозирования на основе полученных результатов работоспособности МФП.

Детальный учет параметров, содержащихся в моделях подобного рода, существенно усложняют расчет, который возможен только численными методами в конечно-разностной форме с использованием обеспечивающих требуемую детализацию сеток. Это в свою очередь приводит к значительным временным затратам на получение результатов, составляющим десятки-сотни часов машинного времени [8, 9] и в конечном счете ограничивает точность и объем получаемой информации. В настоящей работе предпринимается попытка скомпенсировать этот недостаток предшествующих моделей распараллеливанием алгоритма вычислений и переходом благодаря этому к использованию высокопроизводительных и супер-ЭВМ. Для этих целей использовался пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров) [11], который является сертифицированным средством автоматизации имитационного моделирования отечественной разработки, реализующий численные алгоритмы решения задач теплопереноса и излучения, аэро-, гидро-, газодинамики, турбулент-

ного перемешивания, статической и динамической прочности, разрушения и деформации.

Переход к пакету ЛОГОС позволяет сократить время расчета до 10^4 раз. Так, например, для расчета теплового поля в материале, разбитом на 850000 ячеек, методом конечных разностей в собственном программном продукте [9] при последовательном счете требовалось около 44 часов, тогда как в ЛОГОСе решение этой же задачи заняло 8 минут. Такой выигрыш во времени расчета может быть достигнут и в собственных программных продуктах на основе существующих программных средств, реализующих алгоритмы параллельных и распределенных вычислений, таких как MPI или OpenMP. Однако ЛОГОС обладает также рядом других несомненных достоинств – современными средствами визуализации и анализа полученных результатов, возможности учета полученных экспериментально температурных зависимостей оптических и теплофизических характеристик и др. Все это, при условии калибровки модели по результатам экспериментальных исследований, обуславливает выбор среды моделирования в пользу ЛОГОСа.

Имитационная модель $Cd_xHg_{1-x}Te$ матричного фотоприемника

В качестве объекта исследований выбран двухдиапазонный МФП на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ размерностью 32×32 чувствительных элемента с размером фоточувствительной площадки 25×25 мкм каждый с шагом 25 мкм между ними. Конструкция отдельного чувствительного элемента представлена на рис. 1.

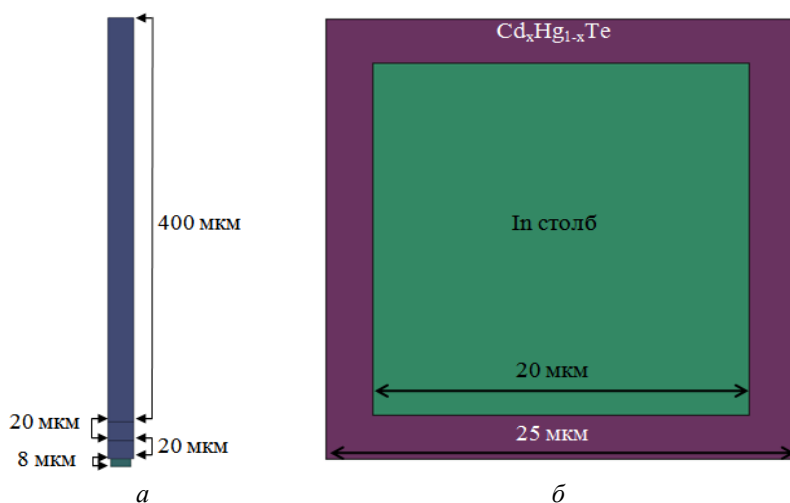


Рис. 1. 3D-модель элемента $Cd_xHg_{1-x}Te$ МФП, виды сбоку (а) и снизу (б).

Модельный объект в целом повторяет конструкцию матричного фотоприемника на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [12], но содержит два фоточувствительных слоя с различными составами твердого раствора. Непосредственно за подложкой расположен слой с составом $x = 0,3$, с областью чувствительности 3–5 мкм, за которым формируется слой с составом $x = 0,2$, чувствительный в диапазоне 8–11 мкм. Толщина слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ принималась для расчетов равной 20 мкм, предполагалось также отсутствие флуктуаций состава твердого раствора в пределах каждого из этих слоев.

Слой с фоточувствительными элементами сформированы на GaAs подложке толщиной 400 мкм, в качестве контактов к фоточувствительным элементам с мультиплексором используются индиевые столбы поперечным размером 20 мкм и высотой 8 мкм.

Приняты следующие граничные условия:

верхняя (облучаемая ЛИ) поверхность GaAs подложки излучает в окружающую среду как серое тело;

нижняя поверхность In столба отдает тепло в мультиплексор конвективным тепловым потоком, причем значение коэффициента теп-

лоотдачи подобрано таким образом, что обеспечивается охлаждение МФП от 300 до 80 К за 5 минут [13];

стенки боковых поверхностей чувствительных элементов теплоизолированы.

В качестве начальных условий принято равномерное распределение температуры в МФП $T_0 = 80$ К.

С целью обеспечения достаточной детализации, требуемой точности и приемлемого времени счета для численных расчетов выбрана сетка с переменным пространственным шагом. По толщине каждый элемент разбивался: в слое GaAs подложки на 10 шагов; в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ слоях на 5 шагов каждый и в In столбах на 5 шагов. В поперечном сечении все элементы МФП разбивались на 3 шага в каждом измерении. Модель чувствительного элемента МФП с нанесенной расчетной сеткой приведена на рис. 2.

Численные значения физических характеристик материалов матрицы были получены из [14–18], в некоторых случаях ставились отдельные эксперименты для уточнения параметров конструкционных материалов матрицы особенно для температур, превышающих 300 К.

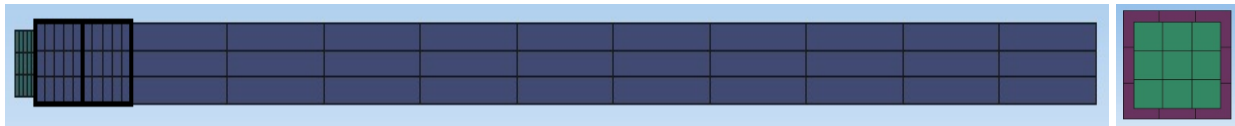


Рис. 2. Трехмерная модель чувствительного элемента МФП с нанесенной расчетной сеткой.

Результаты численных экспериментов

Моделировалось воздействие на $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ МФП, освещаемый через GaAs подложку импульсным ЛИ с длинами волн 3,98 и 10,6 мкм и равномерным распределением энергии в сечении пучка, полностью накрывающего один элемент в центре МФП площадью $1,225 \times 10^{-5} \text{ см}^2$. Моделирование проводилось для моноимпульса ЛИ с энергией 1 мДж при длительности воздействия 200 мкс и форме импульса «строб». Таким образом, плотность мощности лазерного излучения, падающего на облучаемый элемент МФП, составила $\sim 0,4 \text{ МВт/см}^2$. Расчёты проводились на высокопроизводительной ЭВМ с 18 ядерным процессором с тактовой частотой 2,3 ГГц, 42,75 Мб кэш-памяти и объёмом оперативной памяти 64 Гб.

Время, затрачиваемое на нахождение температурного поля, и определение его эволюции путем решения трехмерного уравнения теплопроводности методом конечных объемов в программном пакете ЛОГОС составляло 8–10 минут.

Результаты расчетов, выполненных с использованием пакета ЛОГОС, для воздействия ЛИ на фоточувствительный слой в среднем ИК-диапазоне показаны на рис. 3, для дальнего ИК-диапазона – на рис. 4. Заметим, что при построении термограмм для большей наглядности использовалась нелинейная цветовая шкала. Матрица освещена через подложку (нижняя часть рис. 3 и 4). «Гребенка» в верхней их части – профиль контактных индиевых столбов.

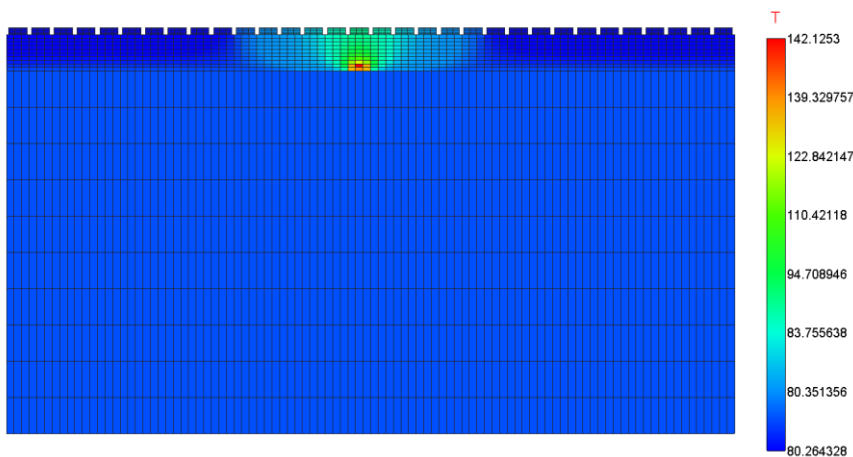


Рис. 3. Результат моделирования воздействия ЛИ с длиной волны 3,98 мкм.

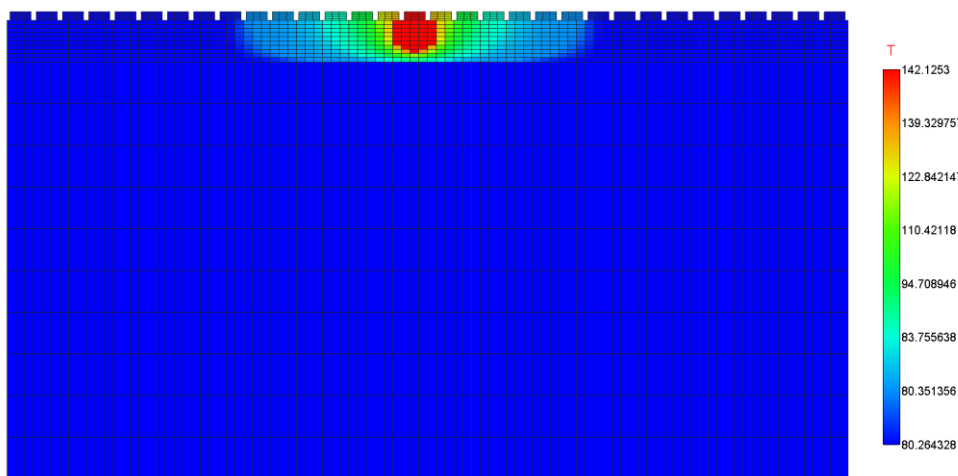
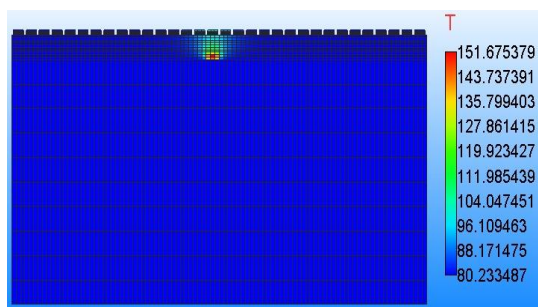


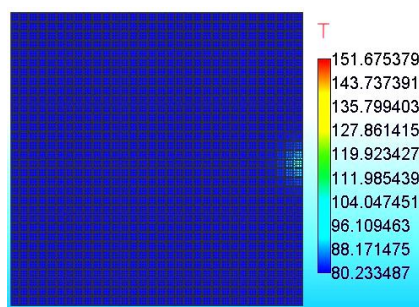
Рис. 4. Результат моделирования воздействия ЛИ с длиной волны 10,6 мкм.

Проведено также моделирование воздействия ЛИ с теми же параметрами на чувствительные элементы, расположенный в углу

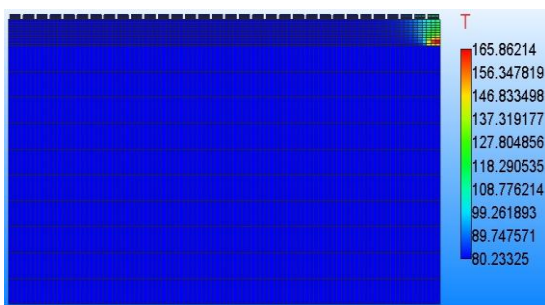
МФП и центре крайнего ряда, результаты которого приведены на рис. 5.



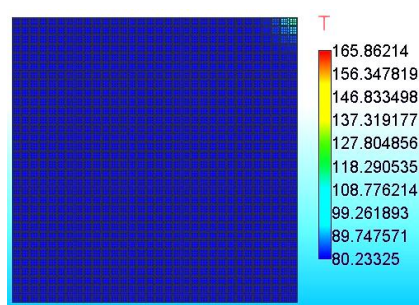
а



б



в



г

Рис. 5. Результаты воздействия ЛИ с длиной волны 3,98 мкм: а, б – в центре крайнего ряда МФП; в, г – в угол МФП (а, в – вид «в профиль», б, г – вид «анфас»).

Из их анализа сделан вывод о том, что при воздействии ЛИ на угловой чувствительный элемент заметен его больший нагрев, чем при воздействии в центре МФП. Это обусловлено тем, что по двум из четырех боковых граней отсутствует соприкосновение с охлаждаемыми до рабочей температуры материалами.

В дальнейшем проводилось моделирование воздействия на $Cd_xHg_{1-x}Te$ МФП лазерным излучением с различными энергетическими и временными характеристиками. Это позволило сформировать банк термограмм, аналогичных показанным на рис. 3–5, анализ которых позволил выявить следующие закономерности:

поглощение ЛИ по толщине слоя $Cd_xHg_{1-x}Te$ подчиняется закону Бугера, градиент температуры обусловлен теплопроводностью материала и стоком тепла в мультиплексор через In столбы. Поглощение в слое, чувствительном в дальнем ИК-диапазоне, выше вследствие большего значения коэффициента поглощения, в результате чего его нагрев оказывается больше при тех же уровнях воздействия;

тепло, поглощенное в фоточувствительном слое, растекается в поперечном направлении вследствие обычной теплопроводности, причем на размер области растекания тепла существенно влияет величина коэффициент теплоотдачи через In столбы;

нагретая область $Cd_xHg_{1-x}Te$ слоя приводит к нагреву GaAs подложки в направлении, противоположном воздействующему ЛИ, при этом, величина этого нагрева возрастает при увеличении времени воздействия ЛИ.

Результаты численных экспериментов показывают, что при воздействии ЛИ с мощностью порядка 1 Вт, сфокусированного на один чувствительный элемент, длительностью порядка секунды, приводит к нагреву всей структуры исследуемой МФП до температуры не ниже 180 К, превышающей ее рабочую температуру. Также при интенсивных режимах воздействия ЛИ нагретая подложка для фоточувствительного слоя сама становится источником ИК-излучения и препятствует нормальной регистрации полезного сигнала, экранируя его. Таким образом, при освещении одного или небольшой группы чувствительных элементов даже при режимах воздействия, не приводящих к деградации фоточувствительного материала, может достигаться температура, приводящая к нарушению нор-

мального функционирования всей МФП, что подтверждается результатами экспериментальных исследований [7].

Заключение

Разработана имитационная модель, предназначенная для анализа возникновения и эволюции тепловых полей в МФП на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ в поле интенсивного ЛИ в пакете программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС, которая позволяет за счет распараллеливания ресурсоемких алгоритмов расчетов получение результатов за приемлемое время с высокой степенью детализации и точности. Модель может быть также применена к расчету тепловых полей в МФП, созданных на основе других фоточувствительных материалов, имеющих иную топологию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головань Л. А., Каишаров П. К., Лакеенков М. В., Тимошенко Ю. В. // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 8. С. 931.
2. Кугаенко О. М., Сенатулин Б. Р., Карнаух И. М., Петраков В. С., Щербачев К. А., Средин В. Г., Сахаров М. В., Астраускас Й. И., Васильева Ю. В., Курбанов К. Р. // Материаловедение. 2015. № 5. С. 3.
3. Шкумбатюк П. С. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. № 9. С. 986.
4. Stroevo A. K., Brodevoli T., Scenersen K. // J. Electron. Mat. 2010. Vol. 39. № 10. P. 2220.
5. Асанов С. В., Егоров М. С., Игнатьев А. Б., Морозов В. В., Резунков Ю. А., Степанов В. В. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 9. С. 62.
6. Schleijsen H. M. A., Carpenter S. R., Mellier B., Dimmeler A. // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6397. P. 63970E-1.
7. Стафеев В. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Средин В. Г., Сахаров М. В., Суховой С. Б. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2007. № 2. С. 31.
8. Средин В. Г., Сахаров М. В. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 5.
9. Сахаров М. В., Средин В. Г., Астраускас Й. И., Васильева Ю. В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9-2. С. 98.
10. Средин В. Г., Укроженко В. М. // Физика и техника полупроводников. 1989. Т. 23. № 10. С. 1762.
11. [Электронный ресурс]: URL: <http://logos.vniief.ru> (дата обращения: 18.11.2019).
12. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Акимов В. М., Климанов Е. А., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Мансветов Н. Г., Пономаренко В. П., Тимофеев А. А., Филачёв А. М. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 10. С. 1257.

13. [Электронный ресурс]: ФГБУН Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, URL: <https://www.isp.nsc.ru/> (дата обращения: 30.10.2019).

14. Пономоренко В. П. Квантовая фотосенсорика. – М.: АО «НПО «Орион», 2018.

15. Madelung O. Semiconductors: Data Handbook. – Springer, 2004.

16. Triboulet R., Siffert P. CdTe and Related Compounds; Physics, Defects, Hetero- and Nano-Structures, Crystal Growth, Surfaces and Applications. – Elsevier, 2010.

17. Chu J., Sher A. Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors. – Springer, 2008.

18. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Никонов А. В., Бункина Н. А. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 61.

PACS: 85.60.-q

Model study of pulsed laser radiation impact on a matrix dual-band Cd_xHg_{1-x}Te photodetector in supercomputer simulation software package LOGOS

V. G. Sredin¹, M. V. Sakharov², A. E. Zaponov³, D. S. Konradi¹, I. V. Kuznetsov¹,
V. A. Glazunov⁴, and Y. D. Seryakov⁴

¹ Military Academy of Strategic Rocket Troops named after Peter The Great
8 Karbysheva st., Balashikha, Moscow Region, 143900, Russia

² 12 Central Research Institute, Sergiev Posad
2B Vesennaya st., Sergiev Posad-7, Moscow Region, 141307, Russia

³ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

⁴ Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics
37 Mira Ave., Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia

Received June 16, 2020

Simulation model was developed in the software package for engineering analysis and supercomputer modeling LOGOS for thermal field evolution patterns analysis in dual-band Cd_xHg_{1-x}Te matrix photodetector under interaction of intense laser radiation. Computational results were obtained and analyzed.

Keywords: semiconductor infrared matrix photodetector, laser radiation, simulation modeling, temperature field.

REFERENCES

1. L. A. Golovan, P. K. Kashkarov, M. V. Lakeenkov, and Y. V. Timoshenko, Semiconductors **31** (8), 931 (1997).
2. O. M. Kugaenko, B. R. Senatulin, B. M. Karnauh, et al., Materialovedenie, № 5, 3 (2015).
3. P. S. Shkumbatuk, Semiconductors **52** (9), 986 (2018).
4. A. K. Stroevo, T. Brodevoli, and K. Scenersen, J. Electron. Mat. **39** (10), 2220 (2010).
5. S. V. Asanov, M. S. Egorov, A. B. Ignatiev, et al., Optical Journal **81** (9), 62 (2014) [in Russian].
6. H. M. A. Schleijsen, S. R. Carpenter, B. Mellier, and A. Dimmeler, Proc. of SPIE **6397**, 63970E-1 (2006).
7. V. I. Stafeev, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, et al., Materials of Electronics Engineering, № 2, 31 (2007) [in Russian].
8. V. G. Sredin and M. V. Sakharov, Prikl. Fiz., № 2, 31 (2011).
9. M. V. Sakharov, V. G. Sredin, I. I. Astrauska, and Y. V. Vasilieva, Izvestiya vuzov. Fizika **56** (9-2), 98 (2013).
10. V. G. Sredin and V. M. Ukrojenko, Semiconductors **23** (10), 1762 (1989).
11. [Electronic resource]: URL: <http://logos.vniief.ru/> (Request date: 18.11.2019).
12. V. I. Stafeev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, et al., Semiconductors **39** (10), 1257 (2005).
13. [Electronic resource]: URL: <https://www.isp.nsc.ru/> (Request date: 30.10.2019).
14. V. P. Ponomarenko, Quantum photosensorics (JSC Scientific and Production Association «Orion», Moscow, 2018).
15. O. Madelung, Semiconductors: Data Handbook (Springer, 2004).
16. R. Triboulet and P. Siffert, CdTe and Related Compounds; Physics, Defects, Hetero- and Nano-Structures, Crystal Growth, Surfaces and Applications (Elsevier, 2010).
17. J. Chu and A. Sher, Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors (Springer, 2008).
18. N. I. Jakovleva, K. O. Boltar, A. V. Nikonov, and N. A. Bunkina, Prikl. Fiz., No. 3, 61 (2014).