

УДК 621.315.592

PACS: 42.70.Gi, 44.10+i, 66.70.Dr,
73.61.Ga, 78.30.Fs, 79.60.Jv

Трехмерная модель нагрева многослойного матричного фотоприемника в поле интенсивного лазерного излучения

М. В. Сахаров, В. Г. Средин, Д. С. Конради

Работа посвящена имитационному моделированию эволюции температурного поля в многослойной фоточувствительной структуре матричного фотоприемника (МФП) при облучении его интенсивным лазерным излучением. Разработанная модель позволяет учитывать топологию и параметры многослойной структуры МФП, физические характеристики ее материалов, а также свойства криогенной охлаждающей системы. Результаты использованы для оценки нагрева InSb МФП импульсным лазерным излучением.

Ключевые слова: матричный фотоприемник, интенсивное лазерное излучение, имитационное моделирование, теплопередача, криогенная система.

Ссылка: Сахаров М. В., Средин В. Г., Конради Д. С. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 43.

Refernce: M. V. Sakharov, V. G. Sredin, and D. S. Konradi, Prikl. Fiz., No. 6, 43 (2018).

Введение

Современные системы технического зрения, получившие существенное развитие в последнее время, оснащаются, как правило, матричными фотоприемными устройствами (МФПУ) «смотрящего» типа, функционирующими в различных спектральных диапазонах. Заметное место среди них занимают МФПУ ИК-диапазона, современный уровень развития которых характеризуется укрупнением формата, уменьшением шага матриц и габаритов, оптимизацией стоимости, повышением надежности в эксплуатации и расширением функциональных возможностей [1, 2]. В связи с последними из указанных тенденций следует отметить проблему их оптической стойкости, поскольку в ряде случаев МФПУ должны функционировать при высокой интенсивности регистрируемого сигнала и (или) при наличии мощных оптических помех. Роль последних может играть лазерное излучение (ЛИ).

Вопросам влияния ЛИ на функционирование МФПУ различных типов посвящен ряд работ

[3–7], в которых в основном приводятся результаты экспериментальных исследований, позволяющих определять пороговые значения параметров ЛИ, вызывающие необратимую деградацию матричных фотоприемников (МФП) и выявлять отдельные закономерности их реакции на интенсивное ЛИ. Как правило, в этих экспериментах используются импульсные лазеры с длительностью импульса не более нескольких сотых долей секунды. Заметим, что в этих условиях чрезвычайно сложно осуществлять непосредственный контроль температуры фоточувствительного слоя, поэтому создание адекватных имитационных моделей даёт возможность изучать динамику развития температурного поля и анализировать процессы при различных граничных условиях, спектральном составе излучения, длительностях импульсов ЛИ и т. д.

Целью данной работы является разработка трехмерной модели нагрева многослойного полупроводникового фотоприемника в поле интенсивного лазерного излучения с учетом производительности криогенной системы охлаждения, позволяющей прогнозировать его поведение при попадании в поле интенсивного ЛИ.

Сахаров Михаил Викторович, нач. кафедры, д.т.н.
Средин Виктор Геннадьевич, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.
Конради Дмитрий Сергеевич, адъюнкт.
Военная академия РВСН им. Петра Великого.
Россия, 143900, г. Балашиха, Московская обл.,
ул. Карбышева, 8.
E-mail: m_sakharov@mail.ru; sredinvg@rambler.ru;
demon125@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 22 августа 2018 г.

© Сахаров М. В., Средин В. Г., Конради Д. С., 2018

Описание имитационной модели

Математическому моделированию взаимодействия ЛИ с полупроводниковыми материалами посвящен ряд работ [8–11], основывающихся на решении уравнений теплопроводности. Известные модели описывают возникновение и эволюцию температурного поля на облучаемой поверхности

и в объеме материала, что позволяет судить о протекающих в нем физических процессах и изменениях оптических, теплофизических и других характеристик. Однако число слоев в этих моделях, как правило, не превышает двух–трех. При этом, ввиду высоких вычислительных нагрузок на ПЭВМ, практически не рассматриваются эффекты распространения тепла в поперечном сечении МФП, в том числе через подложку. Кроме того, ввиду значительных (по сравнению с одноэлементными фотоприемниками) линейных размеров МФП (единицы–десятки миллиметров) при моделировании требуется снятие традиционно прини-

маемого допущения о равномерном распределении энергии по профилю пучка ЛИ.

В настоящей работе сделана попытка снятия указанных ограничений и создания трехмерной тепловой модели гипотетического полупроводникового ИК МФП с заданными топологией и параметрами многослойной структуры (см. рис. 1), находящейся в поле интенсивного ЛИ с известным пространственно-временным распределением (рис. 2). При этом считаются известными температурные зависимости оптических и теплофизических характеристик материалов, входящих в состав многослойной структуры,

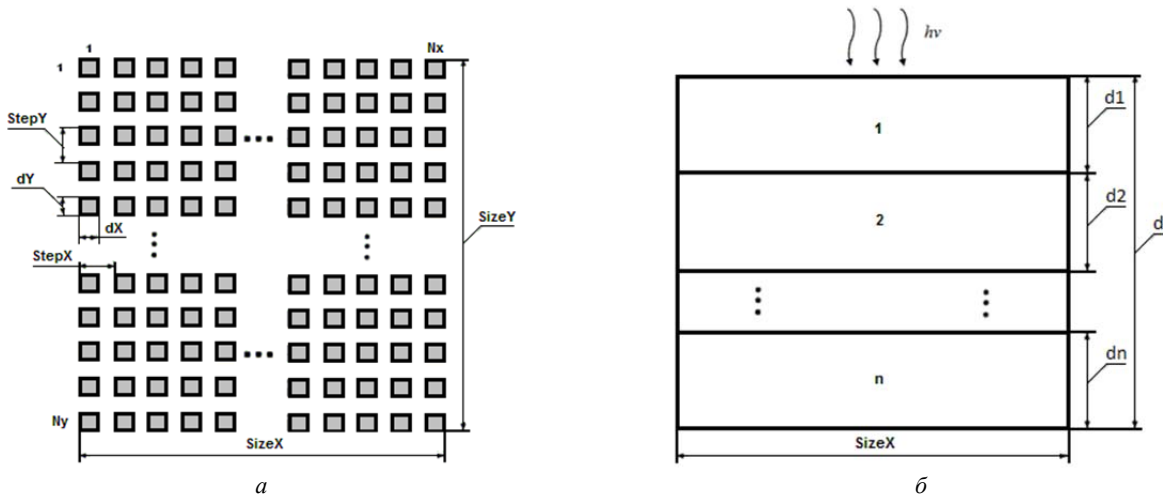


Рис. 1. Упрощенная схема МФП размерностью $N_x \times N_y$: а) – топология фотоприёмника; б) – многослойная структура фотоприёмника.

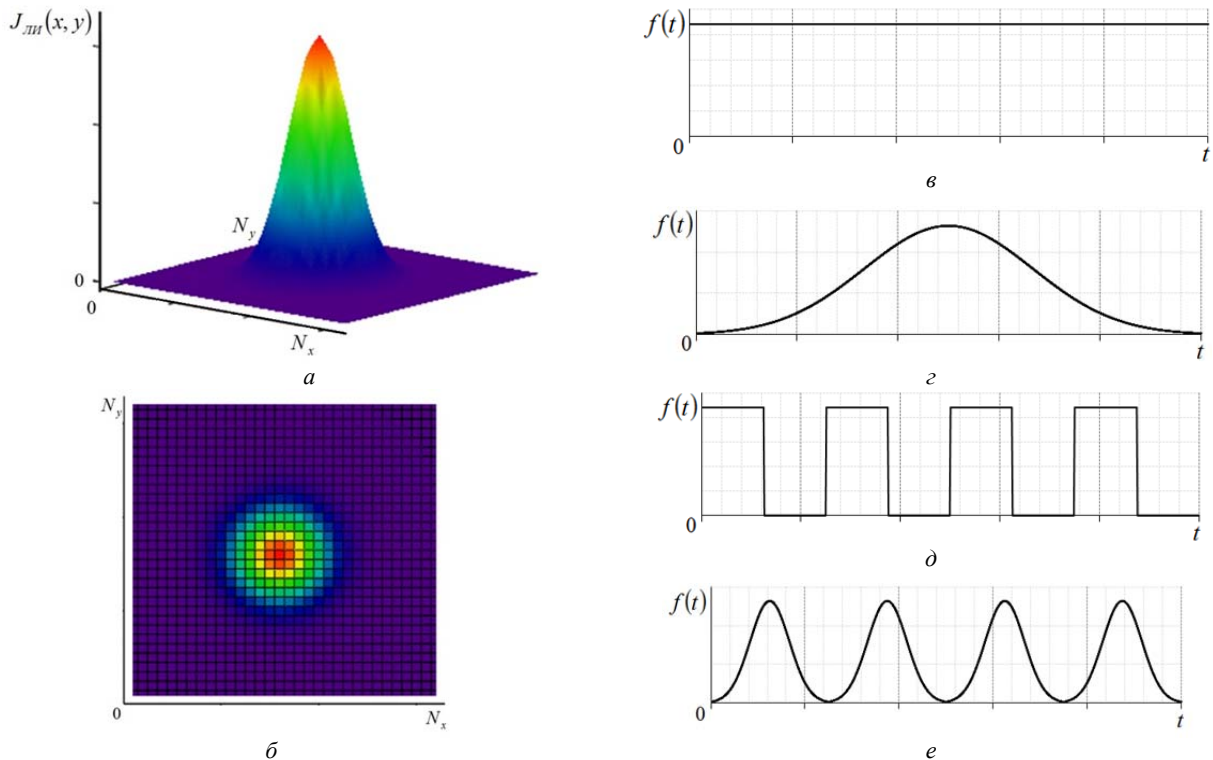


Рис. 2. Примеры законов пространственного (а, б) и временного (в–е) распределения энергии в пучке ЛИ для использования в тепловой модели.

В модели введены следующие ограничения и допущения: материалы многослойной структуры МФП изотропны в пределах каждого слоя; пучок ЛИ, воздействующего на МФП, падает нормально к поверхности, частично или полностью ее накрывает; законы пространственного и временного распределения энергии в пучке ЛИ и их параметры известны; плотность энергии в части пучка ЛИ, накрывающего один пиксель, полагается равномерно распределенной по его площади; до воздействия температура многослойной структуры одинакова во всем объеме МФП; отсутствуют механические напряжения; нижний слой многослойной структуры МФП прилегает к хладопроводу, коэффициент теплоотдачи в хладопровод известен.

В реальных МФП тепловой контакт с хладопроводом осуществляется через индиевые столбики-контакты к кристаллу с мультиплексором, непосредственно размещенному на охлаждающей

поверхности. Высокая плотность указанных столбиков позволяет поддерживать рабочую температуру МФП. Прямой учет конфигурации тепловых стоков через систему столбиков ведет к значительному усложнению процедуры вычислений, поэтому в нашей имитационной модели указанная особенность конструкции МФП учитывается введением коэффициента теплоотдачи $\alpha_{отд}$ в уравнении Ньютона-Рихмана, которое используется нами для описания процесса теплообмена между МФП и системой охлаждения.

В условиях принятых допущений неоднородный и нестационарный нагрев фоточувствительной структуры МФП (возникновение поля температуры), а также распространение температуры во внутренние ее области (эволюция температурного поля) описываются уравнением теплопроводности:

$$\rho(z,T)C(z,T)\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \lambda(z,T)\left(\frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial z^2}\right) + Q(x,y,z,t), \quad (1)$$

где $\rho(z,T)$ – плотность материала в слое, находящемся на глубине z от поверхности МФП, при температуре T , (размерность – г/см³); $C(z,T)$ – удельная теплоемкость материала в слое, находящемся на глубине z от поверхности МФП, при температуре T , (размерность – Дж/(г К)); $\lambda(z,T)$ – теплопроводность материала в слое, находящемся на глубине z от поверхности МФП, при температуре T , (размерность – Вт/(см К)); $T(x,y,z,t)$ – температура слоя чувствительного элемента с координатами (x,y) , находящегося на глубине z от поверхности МФП толщиной d , в момент времени t , (размерность – К); $Q(x,y,z,t)$ – объемный тепловой источник, описывающий выделение тепла при поглощении лазерного излучения в слое чувствительного элемента с координатами (x,y) , находящегося на глубине z от поверхности МФП, (размерность – Вт/см³). Для объемного теплового источника можно записать следующее соотношение:

$$Q(x,y,z,t) = (1-R(T))q(x,y,t)\alpha(z,T) \times e^{-\int_0^z \alpha(z',T)dz'} \quad (2)$$

где $R(T)$ – коэффициент отражения лазерного излучения от поверхности МФП; $\alpha(z,T)$ – коэффициент поглощения ЛИ в чувствительном слое, находящемся на глубине z , (размерность – см⁻¹);

$q(x,y,t) = J_u(x,y) \times f(t)$ – пространственно-временная функция распределения плотности подведенной к поверхности чувствительного элемента с координатами (x,y) мощности ЛИ, (размерность – Вт/см²); $J_u(x,y)$ – пространственное распределение плотности подведенной к поверхности чувствительного элемента МФП энергии импульса ЛИ, (размерность – Дж/см²); $f(t)$ – функция распределения плотности энергии ЛИ по времени, (размерность – с⁻¹). Подробности распределения ЛИ представлены на рис. 3, в-е.

Уравнение (1) дополняется начальными и граничными условиями, приведенными в [12], к которым, в отличие от указанной работы, добавлено дополнительное граничное условие, описывающее сток тепла через поверхность МФП, прилегающую к хладопроводу, соотношением Ньютона-Рихмана:

$$-\lambda_n \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{отд} (T(x,y,z=d,t) - T_{хл}), \quad (3)$$

где $\alpha_{отд}$ – коэффициент теплоотдачи с тыльной поверхности МФП в хладопровод; $T_{хл}$ – температура хладопровода.

Решение системы уравнений (1) проводилось численно методом конечных разностей. При этом температура l -го слоя (i,j) –пикселя в следующий $k+1$ момент времени выражалось через его температуру, температуру соседних $i-1, i+1,$

$j-1$, $j+1$, $l-1$ и $l+1$ слоев, количество подведенной к нему и отведенной энергии в текущий k момент времени:

$$T_{i,j,l}^{k+1} = T_{i,j,l}^k + \frac{CurX_l^k}{2} (T_{i-1,j,l}^k - T_{i,j,l}^k) + \frac{CurX_l^k}{2} (T_{i+1,j,l}^k - T_{i,j,l}^k) + \frac{CurY_l^k}{2} (T_{i,j,l-1}^k - T_{i,j,l}^k) + \frac{CurY_l^k}{2} (T_{i,j,l+1}^k - T_{i,j,l}^k) + \frac{CurZ_l^k}{2} (T_{i,j,l-1}^k - T_{i,j,l}^k) + \frac{CurZ_l^k}{2} (T_{i,j,l+1}^k - T_{i,j,l}^k) + \Psi_{i,j,l}^k \times \Delta t - \Phi_{i,j,l}^k \times \Delta t,$$

где $CurX_l^k = \frac{2\Delta t \chi_l^k}{\Delta x^2}$, $CurY_l^k = \frac{2\Delta t \chi_l^k}{\Delta y^2}$,

$CurZ_l^k = \frac{2\Delta t \chi_l^k}{\Delta z^2}$ – числа Куранта для соответствующих

координат, $\Psi(x, y, z, t) = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho(z, T)C(z, T)}$,

$\Phi_{i,j,l}^k = \frac{\alpha_{отд} (T_{i,j,l}^k - T_{хл})}{C_i(z, T)M_l}$, M_l – масса последнего

слоя гибридной структуры, прилегающей к хладопроводу.

Критерий устойчивости расчетов по данной модели имеет вид:

$$\max_{i,j,l,k} \{CurX_i^k, CurX_j^k, CurX_l^k\} < 1.$$

Для автоматизации расчетов с использованием тепловой модели разработано программное обеспечение на языке программирования C#. Калибровка модели проведена с использованием результатов выполненных экспериментальных исследований [12–14] и показала удовлетворительную сходимость.

Пример использования имитационной модели

На рис. 3 приведен пример результатов расчета параметров пространственно-временной структуры температурного поля, возникающего в многослойной структуре InSb МФП с Si-подложкой в поле интенсивного ЛИ. В качестве исходных данных использовались типовые параметры МФП и температурные зависимости оптических и теплофизических характеристик материалов фоточувствительного слоя и подложки [12–14].

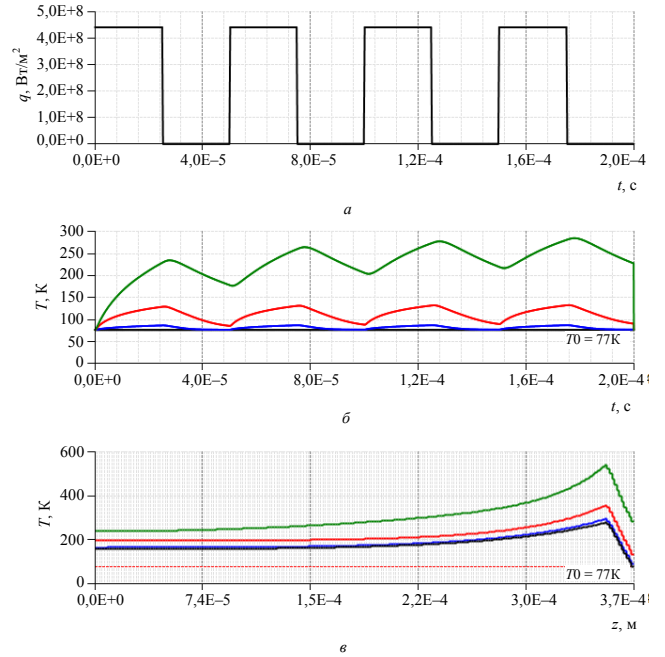


Рис. 3. Пример результатов расчета пространственно-временной структуры температурного поля, возникающего в многослойной структуре InSb МФП в поле интенсивного лазерного излучения. Подробности цветового оформления графиков в тексте.

На рис. 3, а показано заданное распределение плотности мощности ЛИ во времени (длина волны 2,94 мкм, форма импульсов – строб, расчет проведен для 4 импульсов длительностью 25 мкс и плотностью мощности $4,3 \times 10^8$ Вт/м² каждый, следующих с периодом 50 мкс). Расчетная сетка с учетом устойчивости схемы принята с шагом 1,67 мкм по пространственным координатам и 0,324 нс по времени. Результаты приведены для одного из пикселей МФП, полностью накрытого пучком ЛИ.

На рис. 3, б показаны результаты расчета температуры тыльного (прилегающего к хладопроводу) слоя МФП: черным цветом показан график для случая идеального холодильника (прилегающий к хладопроводу слой имеет постоянную рабочую температуру), синим цветом при $\alpha_{отд} = 0,1$ Вт/(м² К), красным – при $\alpha_{отд} = 0,01$ Вт/(м² К) и зеленым – при $\alpha_{отд} = 0,001$ Вт/(м² К).

На рис. 3, в показано расчетное распределение температуры по профилю фоточувствительной структуры МФП (в расчете приняты толщины слоев: Si-подложки 350 мкм, фоточувствительного слоя из InSb 20 мкм) в конце каждого импульса: черным цветом – первого, синим – второго, красным – третьего, зеленым – четвертого).

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о существенном влиянии криогенной системы МФП на эволюцию температурного поля в фоточувствительной структуре МФП в по-

ле интенсивного ЛИ. Закономерности растекания тепла в латеральном направлении приведены в работах авторов [8, 12].

Заключение

Разработанная имитационная модель, с учетом принятых допущений, может использоваться для прогнозирования поведения матричного фотоприемника (МФП) на основе InSb в поле интенсивного лазерного излучения, а также для исследования процессов возникновения и эволюции температурных полей в них с учетом производительности криогенной системы. Адекватность модели подтверждается удовлетворительным соответствием с результатами экспериментальных исследований [12–14]. Предложенная модель может быть использована для расчета температурных полей в ИК МФП и других типов, что потребует ввода и учета температурных зависимостей оптических и теплофизических характеристик материалов их многослойной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко В. П. Квантовая фотосенсорика. – М.: 2018.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга, 2007.

3. Асанов С. В., Егоров М. С., Игнатъев А. Б., Морозов В. В., Резунков Ю. А., Степанов В. В. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 9. С. 62.

4. Стафеев В. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Средин В. Г., Сахаров М. В., Суховой С. Б. // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2007. № 2. С. 31.

5. Schleijsen H. M. A., Carpenter S. R., Mellier B., Dimmeler A. // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6397. P. 63970E-1.

6. Жвавий С. П., Зыков Г. Л. // ФТП. 2006. Т. 40. С. 652.

7. Средин В. Г., Сахаров М. В. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 5.

8. Сахаров М. В., Средин В. Г., Астраускас Й. И., Васильева Ю. В. // Известия ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56. № 9-2. С. 98.

9. Велецук В. П., Власенко О. I., Власенко З. К., Гнатюк В. А., Левицкий С. М. // Укр. фіз. журн. 2017. Т. 62. № 2. С. 159.

10. Сахаров М. В., Астраускас Й. И. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 78.

11. Voitsekhovskii A. V., Shulga S. A., Sredin V. G., Talipov N. K. // Russian Physics Journal. 2011. Vol. 53. No. 9. P. 936.

12. Сахаров М. В., Средин В. Г., Чишко В. Ф., Автин А. А. // Труды НПО им. Лавочкина. 2016. № 4. С. 103.

13. Сахаров М. В., Средин В. Г., Чишко В. Ф., Суховой С. Б., Астраускас Й. И., Конради Д. С., Маркеев Б. М. / Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, НПО «Орион», 2018. Т. 2. С. 494.

14. Чишко В. Ф., Средин В. Г., Сахаров М. В., Воробьев А. А., Астраускас Й. И., Васильева Ю. В., Карпов В. В., Астахов В. П. / Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, НПО «Орион», 2014. С. 403.

PACS: 42.70.Gi, 44.10+i, 66.70.Dr, 73.61.Ga, 78.30.Fs, 79.60.Jv

Three-dimensional model of heating a multilayer matrix photodetector in the field of intense laser radiation

M. V. Sakharov, V. G. Sredin, and D. S. Konradi

Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Force
8 Karbysheva str., Balashikha, Moscow Region, 143900, Russia
E-mail: m_sakharov@mail.ru; sredinvg@rambler.ru; demon125@inbox.ru

Received August 22, 2018

The simulation model of the evolution of the temperature field in a multilayer photosensitive structure of a focal plane array (FPA) under irradiation with intense laser radiation is discussed. The developed model takes into account the topology and parameters of the multilayer structure of the FPA, the physical characteristics of its materials, as well as the properties of the cryogenic cooling system. The results were used to estimate heating the InSb FPA by pulsed laser radiation.

Keywords: focal plane array, intense laser irradiation, simulation modeling, heat conduction, cryogenic system.

REFERENCES

1. V. P. Ponomarenko, *Quantum photosensorics* (Moscow, 2018) [in Russian].
2. V. V. Tarasov and Yu. G. Yakushenkov, *Two- and multi-band optical-electronic systems with matrix detectors of radiation* (Moscow, University Book, 2007) [in Russian].
3. S. V. Asanov, M. S. Egorov, A. B. Ignat'ev, V. V. Morozov, Y. A. Rezunkov, and V. V. Stepanov, *Optical journal* **81** (9), 62 (2014).
4. V. I. Stafeev, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, V. G. Sredin, M. V. Sakharov, and S. B. Sukhovey, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki*, No. 2, 31 (2007).
5. H. M. A. Schleijsen, S. R. Carpenter, B. Mellier, and A. Dimmeler, *Proc. of SPIE* **6397**, 63970E-1 (2006).
6. S. P. Zhvayyi and G. L. Zykov, *Semiconductors* **40**, 652 (2006).
7. V. G. Sredin and M. V. Sakharov, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 5 (2011).
8. M. V. Sakharov, V. G. Sredin, J. I. Astrauskas, and Y. V. Vasiliev, *Russian Physics Journal* **56** (9-2), 98 (2013).
9. V. P. Valeschuk, A. I. Vlasenko, Z. K. Vlasenko, V. A. Gnatyuk, and S. M. Levitsky, *Ukr. Fiz. Zhurn.*, **62** (2), 159 (2017).
10. M. V. Sakharov and J. I. Astrauskas, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 78 (2014).
11. A. V. Voitsekhovskii, S. A. Shulga, V. G. Sredin, and N. K. Talipov, *Russian Physics Journal* **53** (9), 936 (2011).
12. M. V. Sakharov, V. G. Sredin, F. V. Chishko, and A. A. Davtyan, *Proceedings of the NPO. Lavochkina*, No. 4, 103 (2016).
13. M. V. Sakharov, V. G. Sredin, V. F. Chishko, S. B. Sukhovei, I. I. Astrauskas, D. S. Conradi, and B. M. Markeev, in *Proceedings of the XXV International scientific-technical conference and school on photoelectronics and night vision devices. Vol. 2.* (NPO Orion, Moscow, 2018). P. 494.
14. V. F. Chishko, V. G. Sredin, M. V. Sakharov, A. A. Vorob'ev, J. I. Astrauskas, Y. V. Vasilieva, V. V. Karpov, and V. P. Astakhov, in *Proceedings of the XXIII International scientific-technical conference on photoelectronics and night vision devices.* (NPO Orion, Moscow, 2014) P. 403.