

## НАПАЙКА GAN-КРИСТАЛЛОВ МОЩНЫХ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ L- И S-ДИАПАЗОНОВ ЧАСТОТ

А. И. Землянский<sup>1</sup>, А. Е. Бормонтов<sup>2</sup>, С. В. Тарасов<sup>2</sup>,  
О. В. Марченко<sup>2</sup>, В. В. Зенин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Воронежский государственный технический университет;

<sup>2</sup> – АО “Научно-исследовательский институт электронной техники”

Поступила в редакцию 01.07.2017 г.

**Аннотация.** Разработана технология напайки GaN-кристаллов транзисторов типа ПП9139А1 L- и S- диапазонов частот. Напайка кристаллов GaN осуществлялась с использованием преформ 80Au20Sn. Монтаж внутренних выводов проводился термозвуковой сваркой Au проволокой диаметром 30 мкм. Приведены результаты измерений выходной мощности, коэффициента усиления по мощности, коэффициента полезного действия сток данных транзисторов. Представлены типовые выходные характеристики и проходная характеристика в схеме с общим истоком. Проведено сравнение измеренных параметров транзисторов ПП9139А1 с GAN-транзистором CGH40045 фирмы Wolfspeed (США). Установлено, что выходная мощность, коэффициент усиления по мощности и КПД стока разработанного транзистора превышают значения аналога на 6,7 %, 0,2 дБ и 14 % соответственно.

**Ключевые слова:** нитрид галлия, подложка, корпус, монтаж кристаллов, транзистор ПП9139А1, электрические параметры.

## GAN DIE ATTACH OF RF POWER TRANSISTORS FOR L- AND S-BANDS

A. I. Zemlyanskiy, A. E. Bormontov, S. V. Tarasov,  
O. V. Marchenko, V. V. Zenin

**Abstract.** The GaN die attach technology of PP9139A1 transistor for L- and S-bands has been developed. GaN die attach was carried out with 80Au20Sn preform. Au wire interconnections with a diameter of 30  $\mu\text{m}$  were implemented with thermosonic wire bonding. The results of measurements of the output power, the power gain and the drain efficiency of these transistors are given. Typical output characteristics and a transfer characteristic in a common-source circuit are presented. The measured parameters of PP9139A1 transistors and GaN-transistor CGH40045 parameters of Wolfspeed (USA) are compared. It is established that the output power, power gain and drain efficiency of the developed transistor exceed the analogue values by 6.7%, 0.2 dB and 14%, respectively.

**Keywords:** gallium nitride, substrate, package, die attach, transistor PP9139A1, electrical parameters.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых перспективных оптоэлектронных материалов является нитрид галлия (GaN). Структуры на основе GaN перспективны не только в оптоэлектронике, но и для разработки компонентной базы силовой и СВЧ-электроники – диодов Шоттки и СВЧ транзисторов [1].

Электрические параметры полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия (GaN) стимулируют ведущие мировые компании разрабатывать и совершенствовать технологию производства полупроводниковых изделий (ППИ) на его основе. GaN ППИ применяются в высокочастотных усилителях мощности L- и S-диапазонов частот, базовых станциях сотовой связи, наземных станциях спутниковой связи, импульсных источниках питания, DC/DC преобразователях, электроприводах, интеллектуальных сетях электропитания Smart Grid. Применение GaN ППИ актуально в электронике военного и гражданского назначения [2].

Транзисторы на основе GaN позволяют значительно улучшить элементную базу ППИ за счет высоких рабочего напряжения и рабочих температур, КПД, а также возможности работы в широкой полосе частот. Такие транзисторы обеспечивают плотности потока мощности до 32 Вт/мм [3 – 5].

Следует отметить, что для работы нитрид-галлиевых транзисторов в обедненном режиме необходимо отрицательное напряжение смещения. Поэтому разработчикам аппаратуры важно помнить о последовательности подачи напряжения смещения и напряжения питания при проведении измерений электрических параметров нитрид-галлиевых транзисторов и их эксплуатации.

В большинстве случаев в качестве подложки для эпитаксиального слоя GaN используется полуизолирующий SiC, так как этот материал обладает высокой теплопроводностью. Кристаллические решетки SiC и GaN схожи, это способствует минимизации механических напряжений на границе подложка – эпитаксиальная пленка.

Использование подложек из Si позволяет применять стандартное оборудование для КМОП-технологии, что значительно снижает себестоимость ППИ.

## СБОРКА СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ GAN

АО “НИИЭТ” выполняет исследования по разработке конструкции и технологии производства НЕМТ транзисторов на основе GaN мощностью 5, 10, 15, 25, 50 Вт для применения в L- и S-диапазонах частот.

Номенклатура и основные электрические параметры разработанных транзисторов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры разработанных GaN-транзисторов при температуре корпуса 25 °С.

№ п/п	Шифр транзистора	Тип корпуса	U <sub>пит.</sub> , В	P <sub>вых.</sub> , не менее, Вт	$\eta_c$ , не менее	K <sub>ур</sub> , не менее, дБ
1	ПП9136А	КТ-81С	28	5	50	16
2	ПП9137А	КТ-81С	28	10	55	12
3	ПП9138А	КТ-81С	28	15	50	11
4	ПП9138Б	КТ-81С	28	25	50	9
5	ПП9139А1	КТ-55С-1	28	50	55	14

Периметр затвора разработанных транзисторных кристаллов варьируется от 1,5 мм до 14 мм. В зависимости от выбранной топологии кристалла были получены следующие значения статических параметров транзисторов: максимальный ток насыщения 1,7 – 15,6 А, напряжение отсечки от минус 2,55 до минус 2,88 В, пробивное напряжение сток-исток более 120 В, сопротивление сток-исток в открытом состоянии 1,5 – 0,18 Ом, крутизна 0,5 – 4,2 А/В.

На лицевую сторону кристаллов для разварки нанесена система металлизации Ti/W-Au, толщина финишного слоя Au составляет 5 мкм (рис. 1, а). На обратную сторону кристаллов под пайку нанесен слой Au толщиной ~6,8 мкм с подслоем Ti-Ti/W (рис. 1, б).

Важнейшим элементом СВЧ транзистора является корпус, состоящий из фланца, керами-

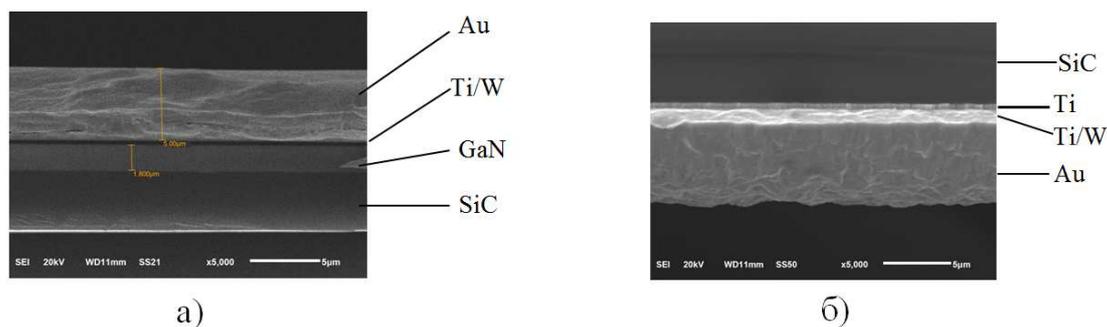


Рис. 1. Фрагмент скола кристалла в области контактной площадки (а) и в области металлизации обратной стороны под пайку (б).

ческого ободка, выводов и крышки.

Фланец СВЧ транзистора является одновременно теплоотводом и электродом. Непосредственно на фланец монтируется кристалл, поэтому материал фланца, его физико-механические свойства, плоскостность существенно влияют на характеристики СВЧ транзистора.

В качестве материала фланца СВЧ транзистора могут использоваться Cu, псевдосплавы CuMo и CuW, полиалмаз. Керамический ободок изолирует фланец и выводы корпуса. Для ободка используется оксид алюминия  $Al_2O_3$ . Если в качестве теплоотвода в конструкции корпуса используется керамика, то выбирают оксид бериллия BeO, нитрид алюминия AlN, полиалмаз. Пайка корпуса осуществляется серебром либо припоем серебро-медь (ПСР-72).

Фланцы корпусов КТ-81С и КТ-55С-1 выполняются из псевдосплава CuW, который получают многократным прессованием и спеканием смеси порошков меди и вольфрама, либо пропиткой медью спеченных пористых каркасов из вольфрама. Фланец корпуса КТ-81С плакирован медью (200 мкм). На фланец припаивают ободок из керамики  $Al_2O_3$  и выводы из ковара. На корпус наносят подслой Ni (2 мкм) и слой Au (4-5 мкм).

Металлизация фланца корпуса КТ-55С-1 отличается тем, что в ней исключена медь; перед сборкой корпуса на фланец CuW наносят Ni, припаивают керамический ободок и выводы из ковара, затем корпус никелируют повторно и наносят слой Au (4-5 мкм).

Монтаж кристаллов GaN осуществляется с использованием припоя 80Au20Sn. Эвтектический припой характеризуется высокой прочностью, коррозионной стойкостью, высокой электро- и теплопроводностью, механической прочностью, невысокой температурой плавления (280 °С). Паяное соединение, образованное с использованием данного припоя, не охрупчивается с течением времени. Припой позволяет осуществлять пайку без флюса, что позволяет избежать дефектов, возникающих при его использовании (коррозия, токи утечки, пустоты в паяном соединении). Пайку с использованием припоя 80Au20Sn рекомендуется проводить в формир-газе (90%N<sub>2</sub>, 10%H<sub>2</sub>) [6]. Для автоматизации процесса пайки припой используется в виде прокладок.

Схемы пайки кристаллов GaN в корпуса КТ-81С и КТ-55С-1 представлены на рис. 2.

Пайка кристаллов проводится при температуре 300 – 320 °С, при которой золото на кристалле и на корпусе переходит в припой [7]. Получаемое паяное соединение имеет сплошной паяный шов без пор и пустот. Припой равномерно смачивает кристалл и корпус, что обеспечивается подбором технологических режимов.

Разварка внутренних выводов осуществляется термозвуковой сваркой Au проволокой диаметром 30 мкм на полуавтоматической установке Delvotec 5630 методом клин-клин. Количество проволок на вывод затвора составляет 15, а на вывод стока – 25.

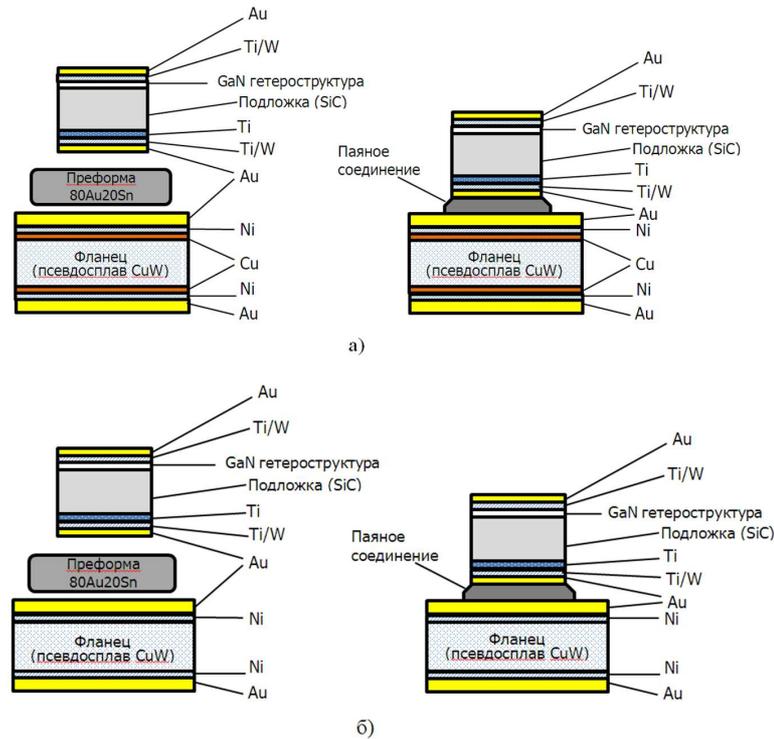


Рис. 2. Схемы пайки кристаллов с использованием прокладки припоя 80Au20Sn в корпусах KT-81C (а) и KT-55C-1 (б).

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для получения положительных результатов в области разработки топологии транзисторных кристаллов и технологии сборки были проведены измерения электрических параметров мощных СВЧ GaN транзисторов. Измерения выходной мощности, коэффициента усиления по мощности, коэффициента полезного действия стока транзисторов ПП9139А1 проводились на частотах 2 ГГц и 2,9 ГГц при рабочем напряжении питания 28 В в непрерывном режиме. В качестве измерительного оборудования использовались автоматические тюнеры фирмы Maury Microwave. Сравнение измеренных электрических параметров транзисторов ПП9139А1 проводилось с GaN транзистором CGH40045 (фирма Wolfspeed, США). Сравнительные характеристики представлены в табл. 2 [8].

Таблица 2. Сравнение характеристик GaN транзисторов ПП9139А1 и CGH40045

Наименование транзистора	Тестовая частота $f_{\text{ТЕСТ}}$ , ГГц	Выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$ , Вт	Коэффициент усиления по мощности $K_{\text{УР}}$ , дБ	КПД стока $\eta_{\text{С}}$ , %	Напряжение питания $U_{\text{ПИТ}}$ , В
ПП9139А1	2,9	58,7	14,2	69	28
CGH40045	2,5	55	14	55	28

Электрические параметры разработанных транзисторов измерялись на установке фирмы Agilent. Выходная и проходная характеристики транзистора ПП9139А1 приведены на рис. 3.

Ток насыщения ( $I_{\text{НАС}}$ ) для транзистора ПП9139А1 при напряжении сток-исток  $U_{\text{СИ}} = 10$  В и напряжении затвор-исток  $U_{\text{ЗИ}} = 2$  В составляет порядка 15,3 А. Напряжение отсечки для

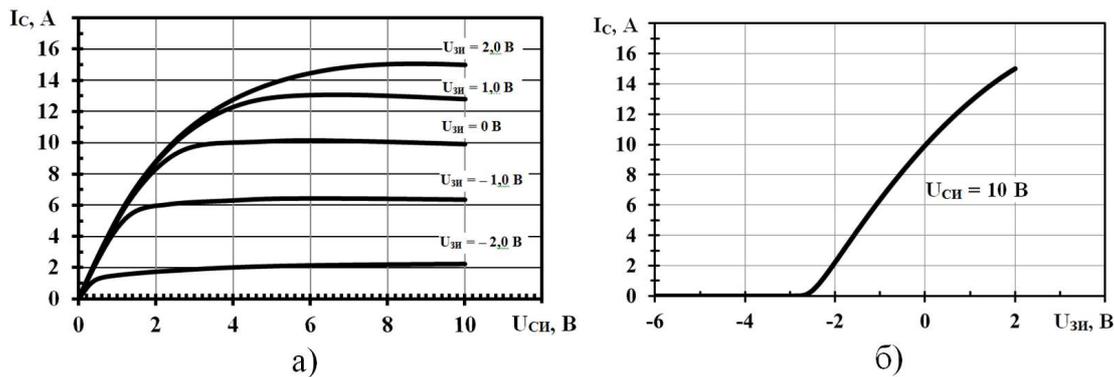


Рис. 3. Типовые выходные характеристики (а) и проходная характеристика (б) в схеме с общим истоком при  $t_C = 25 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$  для транзисторов типа ПП9139А1.

транзистора ПП9139А1 при  $U_{CE} = 10 \text{ В}$  составляет минус 2,8 В.

Типовые зависимости коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия стока от выходной мощности для транзисторов типа ПП9139А1 приведены на рис. 4, 5.

Выходная мощность транзистора ПП9139А1  $P_{\text{вых}}$  на частоте 2 ГГц при уровне компрессии коэффициента усиления  $K_{\text{ур}}$  на 1 дБ составляет 64,3 Вт. При выходной мощности 50 Вт коэффициент усиления по мощности составляет 17 дБ, коэффициент полезного действия стока – 65,2% в непрерывном режиме работы.

Выходная мощность транзистора ПП9139А1  $P_{\text{вых}}$  на частоте 2,9 ГГц при уровне компрессии коэффициента усиления  $K_{\text{ур}}$  на 1 дБ составляет 58,7 Вт. При выходной мощности 50 Вт коэффициент усиления по мощности составляет 14,2 дБ, коэффициент полезного действия стока – 69% в непрерывном режиме работы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология сборки транзисторов типа ПП9139А1 на основе GaN в корпусе КТ-55С-1. Измерены электрические параметры: выходная мощность, коэффициент усиления по мощности, коэффициент полезного действия стока данных транзисторов. Измерения проводились на частотах 2 ГГц и 2,9 ГГц при напряжении питания 28 В.

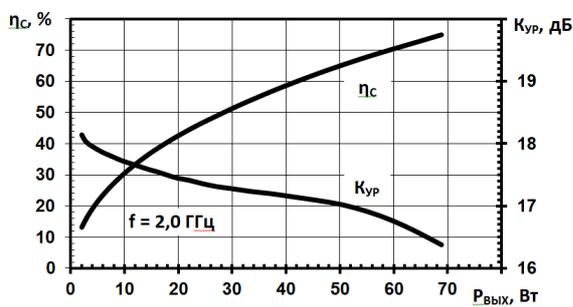


Рис. 4. Типовые зависимости коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия стока от выходной мощности для транзисторов типа ПП9139А1 при  $t_C = 25 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

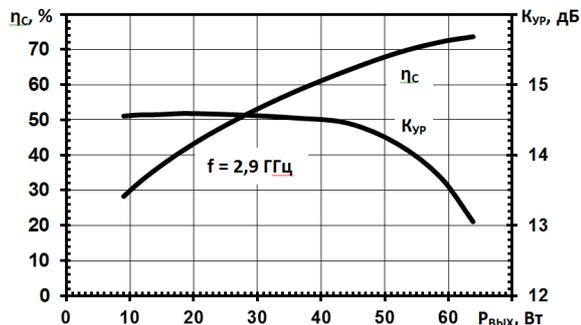


Рис. 5. Типовые зависимости коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия стока от выходной мощности для транзисторов типа ПП9139А1 при  $t_C = 25 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Представлены типовые выходные характеристики и проходная характеристика в схеме с общим истоком при  $t_C = 25 \pm 15$  °С для транзисторов типа ПП9139А1.

Ток насыщения для транзистора ПП9139А1 при напряжении сток-исток 10 В и напряжении затвор-исток 2 В составляет порядка 15,3 А, а напряжение отсечки минус 2,8 В.

Проведено сравнение измеренных параметров транзисторов ПП9139А1 с GAN-транзистором CGH40045 фирмы Wolfspeed (США). Установлено, что выходная мощность, коэффициент усиления по мощности и КПД стока разработанного транзистора превышают значения аналога на 6,7 %, 0,2 дБ и 14 % соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркин, А. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике / А. Туркин // Компоненты и технологии. — 2011. — № 5. — С. 6–10.
2. Гольцова, М. Мощные GaN-транзисторы истинно революционная технология / М. Гольцова // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2012. — № 4 (00118). — С. 86–100.
3. Стандартизованное производство гетероструктур III-N для твердотельной СВЧ-электроники / Д. Красовицкий, А. Алексеев, С. Петров, В. Чалый // Наноиндустрия. — 2011. — № 4(28). — С. 16–20.
4. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization / Y-F. Wu, A. Saxler, M. Moore et. al. // IEEE Electron Device Letters. — 2004. — V. 25, iss. 3. — P. 117–119.
5. An Over 100 W CW Output Power Amplifier Using AlGaIn/GaN HEMTs / Toshihide Kikkawa, Eizo Mitani, Kazukiyo Joshin et. al. // Compound Semiconductor Manufacturing Technology. — 2004. — [Электронный ресурс]. URL: <http://csmantech.org/OldSite/Digests/2004/2004Papers/6.1.pdf>. (дата обращения: 07.08.2017).
6. Кондратюк, Р. Припой 80Au20Sn — свойства и особенности применения / Р. Кондратюк // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2015. — № 10. — С. 154–160.
7. Yi Liu. Packaging of silicon carbide high temperature, high power devices – processes and materials : Dissertation, Doctor of Philosophy / Yi Liu. — Auburn, Alabama, 11.05.2006. — 116 p.
8. CGH40045 45 W, DC - 4 GHz RF Power GaN HEMT. — [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/387/product/120/cgh40045.pdf> (дата обращения: 07.08.2017).

## REFERENCES

1. Turkin A. Gallium nitride as one of the most promising materials in modern optoelectronics. [Turkin A. Nitrid galliya kak odin iz perspektivnykh materialov v sovremennoy optoelektronike]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2011, no. 5, pp. 6–10.
2. Gol'tsova M. High power GaN Transistors. A True Breakthrough Technology. [Gol'tsova M. Moshchnye GaN-tranzistory istinno revolyutsionnaya tekhnologiya]. *ELEKTRONIKA: Nauka. Tehnologiya. Biznes — Electronika: Science, Technology, Business*, 2012, no. 4 (00118), pp. 86–100.
3. Krasovitskiy D., Alekseev A., Petrov S., Chalyy V. Standardized production of III-N heterostructures for solid state microwave electronics. [Krasovitskiy D., Alekseev A., Petrov S., Chalyy V. Standartizovannoe proizvodstvo geterostruktur III-N dlya tverdotel'noy SVCh-elektroniki]. *Nanoindustriya — Nanoindustry*, 2011, no. 4(28), pp. 16–20.
4. Wu Y-F., Saxler A., Moore M. et. al. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. *IEEE Electron Device Letters*, 2004, vol. 25, iss. 3, pp. 117–119.
5. Toshihide Kikkawa, Eizo Mitani, Kazukiyo Joshin et. al. An Over 100 W CW Output Power Amplifier Using AlGaIn/GaN HEMTs. *Compound Semiconductor Manufacturing Technology*, 2004. Available at: <http://csmantech.org/OldSite/Digests/2004/2004Papers/6.1.pdf>. (Accessed:

6 september 2015).

6. Kondratyuk R. 80Au20Sn solder — properties and application features. [Kondratyuk R. Pripoy 80Au20Sn — svoystva i osobennosti primeneniya]. *ELEKTRONIKA: Nauka. Tehnologija. Biznes — Elektronika: Science, Technology, Business*, 2015, no. 10, pp. 154–160.

7. Yi Liu. Packaging of silicon carbide high temperature, high power devices – processes and materials. Doctor's thesis, Auburn, Alabama, 11.05.2006, 116 p.

8. CGH40045 45 W, DC — 4 GHz RF Power GaN HEMT. Available at: <http://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/387/product/120/cgh40045.pdf>. (Accessed: 7 august 2017).

*Землянский Александр Иванович, аспирант кафедры полупроводниковой электроники и нанoeлектроники Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Российская Федерация*  
*E-mail: a.zemlianskiy@mail.ru*

*Zemlyanskiy Aleksandr Ivanovich, Post-graduate of Department of Semiconductor Electronics and Nanoelectronics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation*  
*E-mail: a.zemlianskiy@mail.ru*

*Бормонтов Александр Евгеньевич, инженер-технолог АО “Научно-исследовательский институт электронной техники”, кандидат физико-математических наук, Воронеж, Российская Федерация*  
*E-mail: bormontovae83@mail.ru*

*Bormontov Aleksandr Evgen'evich, Production engineer of JSC Scientific-Research Institute of Electronic Technology, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Voronezh, Russian Federation*  
*E-mail: bormontovae83@mail.ru*

*Тарасов Сергей Викторович, ведущий инженер АО “Научно-исследовательский институт электронной техники”, Воронеж, Российская Федерация*  
*E-mail: tsv@mail.ru*

*Tarasov Sergey Viktorovich, Lead engineer of JSC Scientific-Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russian Federation*  
*E-mail: tsv@mail.ru*

*Марченко Олег Васильевич, начальник лаборатории АО “Научно-исследовательский институт электронной техники”, Воронеж, Российская Федерация*  
*E-mail: marchenko@niiet.ru*

*Marchenko Oleg Vasil'evich, Head of laboratory of JSC Scientific-Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russian Federation*  
*E-mail: marchenko@niiet.ru*

*Зенин Виктор Васильевич, профессор кафедры полупроводниковой электроники и нанoeлектроники Воронежского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор, Воронеж, Российская Федерация*  
*E-mail: zenvik@bk.ru*

*Zenin Viktor Vasil'evich, Professor, Department of Semiconductor Electronics and Nanoelectronics, Voronezh State Technical University, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh, Russian Federation*  
*E-mail: zenvik@bk.ru*