

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.382.3

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-15-22

## Исследование методов вжигания омических контактов к $n$ -слоям гетеробиполярных наногетероструктур

*В.И. Егоркин, В.Е. Земляков, А.В. Неженцев, В.И. Гармаш*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*kfn@miee.ru*

Изготовление омических контактов к гетеробиполярным наногетероструктурам характеризуется рядом особенностей. Помимо основного требования, заключающегося в необходимости обеспечения минимального уровня контактного сопротивления, контакты к данному типу структур имеют переходный слой, глубина проникновения которого не должна превышать толщину эмиттерного слоя из-за возможности закоротки эмиттер-базового  $p$ - $n$ -перехода.

Рассмотрено влияние основных технологических параметров вжигания омических контактов на их характеристики и проведена оптимизация процесса получения низкоомного омического контакта к областям гетеробиполярного транзистора. Исследованы омические контакты к  $n$ -слоям гетеробиполярных наногетероструктур на основе арсенида галлия, полученные методом послойного электронно-лучевого напыления Ge/Au/Ni/Au. Рассчитаны и исследованы с помощью растровой электронной микроскопии диффузионные профили распределения легирования примеси германия в зависимости от времени и температуры вжигания. На основе анализа границы раздела металл – полупроводник предложена методика вжигания омических контактов.

Установлено, что вжигание в течение 60 с при температуре 398 °С позволяет получать омические контакты с низким сопротивлением, гладкой морфологией поверхности и минимальным размером переходного слоя.

*Ключевые слова:* омический контакт; легирование; гетеробиполярная наногетероструктура.

*Для цитирования:* Егоркин В.И., Земляков В.Е., Неженцев А.В., Гармаш В.И. Исследование методов вжигания омических контактов к  $n$ -слоям гетеробиполярных наногетероструктур // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 15–22. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-15-22

## Investigation of RTA Ohmic Contacts Methods to *n*-Layers of Heterobipolar Nanoheterostructures

V.I. Egorkin, V.E. Zemlyakov, A.V. Nezhentsev, V.I. Garmash

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

kfn@miee.ru

The production of ohmic contacts to heterobipolar nanostructures has a number of peculiarities. In addition to the basic requirement of minimizing the contact resistance, the contacts to this type of structures have a transient layer, the penetration depth of which should not exceed the emitter layer thickness, otherwise the short-circuit of the emitter-base *p-n*-junction is possible.

We have examined the influence of the main technological parameters of annealing on contact characteristics. As a result, optimization of the low-resistance ohmic contact to heterobipolar transistor layers obtaining process has been carried out. The ohmic contacts to the *n*-layers of heterobipolar nanoheterostructures based on gallium arsenide, obtained by the layer-by-layer electron-beam deposition of Ge/Au/Ni/Au, have been investigated. The diffusion profiles of the Ge impurity doping distribution as a function of time and the temperature of RTA have been calculated and SEM investigated.

It has been determined that RTA for 60 sec at temperature of 398 °C makes it possible to obtain the ohmic contacts with low resistance, smooth morphology of the surface and the minimum size of the transition layer.

*Keywords:* ohmic contact; doping; heterobipolar nanoheterostructure.

*For citation:* Egorkin V.I., Zemlyakov V.E., Nezhentsev A.V., Garmash V.I. Investigation of RTA ohmic contacts methods to *n*-layers of heterobipolar nanoheterostructures // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 1. – P. 15–22. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-15-22

**Введение.** Омический контакт к *n*-слоям наногетероструктур на основе арсенида галлия широко используется в сверхвысокочастотных, цифровых и оптических устройствах. Контактная металлизация может быть изготовлена на основе тонких слоев Ag, Ni, Pt, Pd, Ti и других материалов [1–3]. Наиболее распространенными являются системы металлизаций на основе Au/Ge [4, 5].

Омические контакты изготавливаются с помощью вакуумного напыления слоев металлов с последующей специальной термической обработкой, заключающейся в быстром нагреве, выдержке при определенной температуре и быстром охлаждении. Такой процесс называется вжиганием. Он необходим для создания высоколегированного низкоомного слоя в приконтактной области. Механизм формирования такого слоя до конца не изучен. Процесс легирования на границе раздела металл/арсенид галлия сложен, и удельное сопротивление контакта Ni-Au-Ge/GaAs очень чувствительно к процедуре термической обработки. Разработанные схемы металлизации позволяют получать минимальный уровень контактного сопротивления в диапазоне 0,1–0,2 Ом/мм. Однако литературные данные показывают, что протяженность переходного слоя при этом составляет несколько десятых долей микрона [6].

В настоящей работе моделируется распределение примесей в переходном слое и на основе расчета диффузионных профилей проводится оптимизация процесса получения низкоомного омического контакта по длительности и температуре отжига.

**Теоретические расчеты.** Для расчета диффузии тонкого слоя германия в арсенид галлия рассмотрена диффузия из ограниченного источника в полубесконечное тело в течение определенного временного промежутка. Поскольку задача моделирования заключается в расчете профиля распределения примеси по глубине, изучен одномерный случай. Расчет диффузионных процессов сводится к решению дифференциального уравнения с заданными начальными и граничными условиями. Таким уравнением является второй закон Фика:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2},$$

где  $N$  – концентрация продиффундировавших частиц;  $t$  – время диффузии;  $D$  – коэффициент диффузии;  $x$  – глубина легирования.

Данное уравнение описывает процесс изменения концентрации диффундирующего вещества от времени диффузии. При этом создается высоколегированный слой в приповерхностной области полупроводника. Максимальная поверхностная концентрация диффундирующей примеси соответствует пределу ее растворимости  $N_0$  для данного тела. Отсюда определяем начальные условия:  $N = N_0$  при  $x = 0, t > 0$ . В объеме тела концентрация стремится к нулю и граничные условия следующие:  $N = 0$  при  $x \gg 0, t > 0$ .

Решение диффузионного уравнения имеет вид

$$N(x, t) = N_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (1)$$

Коэффициент диффузии примеси зависит от температуры согласно закону Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right),$$

где  $D_0$  – значение коэффициента диффузии при  $T = 0$ ;  $E_a$  – энергия активации диффузии, равная 2,06 эВ (энергия, необходимая для того, чтобы атом германия продиффундировал в арсениде галлия);  $k$  – постоянная Больцмана [6, 7];  $T$  – абсолютная температура.

Для проведения расчетов использовался пакет прикладных программ Matlab. Результатом работы программы является построение профилей распределения диффузионной примеси в арсениде галлия. Профиль определяется выражением (1). Цель расчетов – получить условия формирования переходного слоя глубиной 50 нм, которая соответствует толщине контактного слоя гетеробиполярной структуры. Большая глубина переходного слоя приведет к проплавлению контактного слоя, меньшая – к контакту с достаточно высоким уровнем сопротивления. Следовательно, необходимо получить переходный слой заданной глубины с высокой точностью.

Германий – электрически активная примесь для арсенида галлия. Для получения омического контакта концентрация легирующей примеси в приконтактной области должна составлять не менее  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Предел растворимости германия в арсениде галлия определяется максимальной концентрацией вакансий германия. Эти вакансии образуются в процессе диффузии и замещаются атомами германия. При диффузии чистого германия концентрация вакансий и, соответственно, предел растворимости составляют  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  [8]. Для повышения степени легирования диффузию германия осуществляют

при наличии золота, так как в этом случае галлий активнее покидает полупроводник, образуя соединения AuGa (концентрация вакансий около  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). В одном из пяти случаев германий, занимающий вакансию, является электрически активной примесью, в остальных случаях примесь нейтральна [8, 9]. Рассчитывалась концентрация донорной примеси, так как именно она определяет параметры контакта. Соответственно, предел растворимости в таком случае будет равен  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Для проведения расчетов необходимо определить условия формирования диффузионного фронта заданной глубины. Главными параметрами процесса диффузии являются время и температура. Вначале рассчитываются профили в зависимости от времени (рис.1,а). Временная зависимость диффузионных профилей показывает, что с ростом времени вжигания происходит увеличение глубины проникновения диффундирующей примеси.

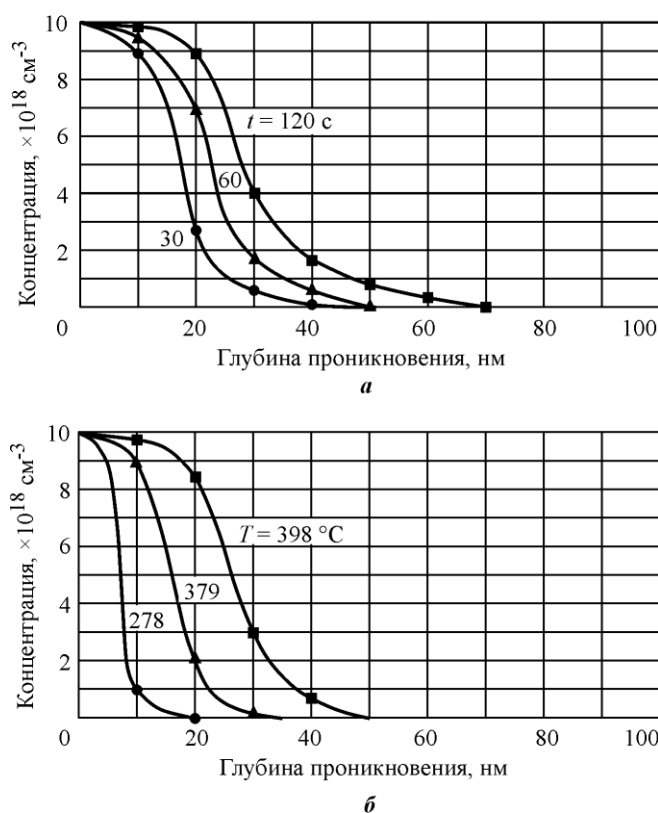


Рис.1. Диффузионные профили германия в арсениде галлия:  
 а – температура вжигания  $398 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – время вжигания 60 с  
 Fig.1. Germanium diffusion profiles in gallium arsenide:  
 а – RTA temperature is  $398 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – RTA time is 60 sec

На следующем этапе определяется влияние температуры вжигания (рис.1,б). Температурная зависимость, как и временная, демонстрирует увеличение глубины проникновения с ростом температуры.

Исходя из проведенных расчетов, определены время и температура диффузии, при которых глубина проникновения соответствует 50 нм. Расчет показывает значительное изменение глубины залегания примеси от времени и температуры вжигания. Сильная диффузия примеси идет и при повышении температуры, и при увеличении времени вжигания. Однако если создать режим быстрого нагрева и охлаждения, можно получить неразмытые переходные слои.

**Эксперимент.** Для проверки расчетов проведен эксперимент, в ходе которого изготавливались контакты к *n*-слоям гетеробиполярных наногетероструктур на основе арсенида галлия. Особенность данного вида структур в том, что глубина переходного слоя не должна превышать толщину слоя контактного (не более 50 нм). После формирования металлизации и мезы пластину резали на части размером 10 × 10 мм и вжигали. Время и температура процесса задавались в соответствии с результатами расчетов. В работе [10] скорость охлаждения сравнима со скоростью нагрева, что позволяет фиксировать («замораживать») диффузионный фронт, задаваемый временем и температурой нагрева. Измерение контактных сопротивлений проводилось по методу передающей линии с прямоугольными металлизированными областями шириной 100 мкм [11]. Для наблюдения переходного слоя использовался РЭМ с фокусированным ионным пучком FEI Quanta 3D FEG. Данная технология позволяет формировать поперечные срезы на образце для исследования его структуры. Наблюдение среза переходного слоя проводилось с помощью РЭМ-технологии во вторичных электронах с разрешением 1,2 нм при ускоряющем напряжении до 30 кВ.

**Результаты и их обсуждение.** На рис.2 приведена зависимость контактного сопротивления от времени вжигания при различных температурах. Существует минимум контактного сопротивления от времени вжигания при  $T = 278\text{ }^{\circ}\text{C}$  [12]. При повышении температуры вжигания наблюдается гораздо меньшая зависимость контактного сопротивления от времени вжигания. Из рис.2 видно, что при температуре вжигания 398 °С контактное сопротивление практически не зависит от времени вжигания.

На рис.3 представлены РЭМ-изображения границ раздела металл – полупроводник контактов, полученных при различных параметрах. Переходный слой контакта, полу-

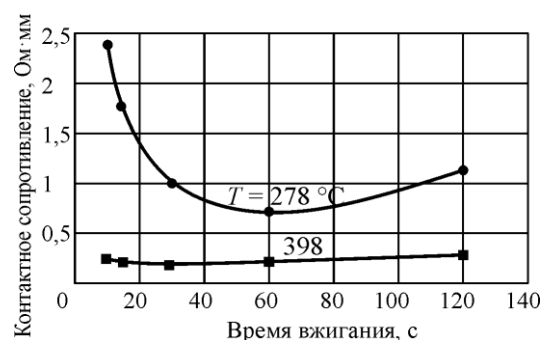


Рис.2. Зависимость контактного сопротивления от времени вжигания

Fig.2. Dependence of the contact resistance on the RTA time

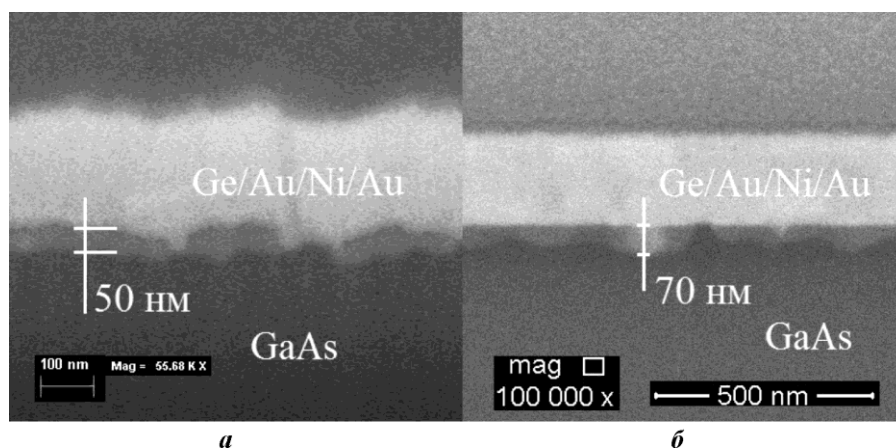


Рис.3. РЭМ-изображение границ раздела металл – полупроводник после термообработки при температуре вжигания 398 °С: *a* – время вжигания 60 с, переходный слой менее 50 нм; *б* – время вжигания 120 с, переходный слой 70 нм

Fig.3. SEM image of metal-semiconductor interfaces, after heat treatment: *a* – RTA time 60 sec., temperature 398 °C, transition layer less than 50 nm; *b* – RTA time 120 sec., temperature 398 °C, transition layer 70 nm

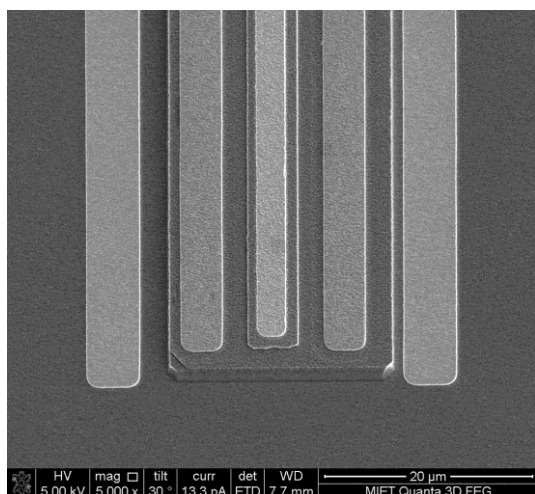


Рис.4. РЭМ-изображение полученного гетеробиполярного транзистора

Fig.4. SEM image of the heterobipolar transistor

следующих условиях: время вжигания 60 с; температура вжигания 398 °С; контактное сопротивление 0,11 Ом·мм. В результате омические контакты имеют гладкую морфологию поверхности и ровные края.

**Заключение.** В результате расчета профилей диффузионного распределения смеси оптимизирован процесс вжигания омических контактов к *n*-слоям гетеробиполярных наногетероструктур на основе арсенида галлия. Оптимизация режима термообработки омических контактов позволила уменьшить толщину переходного слоя до нескольких сотен ангстрем при сохранении уровня контактного сопротивления 0,11 Ом·мм к *n*-слоям. Полученные контакты имеют отличную морфологию поверхности и ровные края. Исследование влияния на контактное сопротивление к наногетероструктурам изменения температуры и времени вжигания показало существование оптимальных параметров процесса, при которых уровень контактного сопротивления минимален и слабо зависит от вариации параметров.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение №14.578.21.0212, уникальный идентификатор RFMEFI57816X0212).*

### Литература

1. *Iliadis A., Singer K.E.* Metallurgical behaviour of Ni/Au–Ge ohmic contacts to GaAs // Solid State Communications. – 1984. – Vol. 49. – P. 99–101.
2. *Wang L.C., Lau S.S., Hsieh E.K., Velebir J.R.* Low-resistance nonspiking ohmic contact for AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors using the Ge/Pd scheme // Applied Physics Letters. – 1989. – Vol. 54. – P. 2677–2679.
3. *Jones K.A., Linfield E.H., Frost J. E. F.* Contact resistances of NiGeAu, PdGeTiPt, and TiPd ohmic contacts to GaAs and their temperature dependence from 4.2 to 350 K // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 69. – P. 4197–4199.
4. *Kim T.-J., Holloway P.H.* Ohmic contacts to GaAs epitaxial layers // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 1997. – Vol. 22(3). – P. 239–273.
5. Optimization of AuGe–Ni–Au ohmic contacts for GaAs MOSFETs / *Hung-Cheng Lin, Sidat Senanayake, Keh-Yung Cheng* // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Vol. 50. – No. 4. – P. 880–885.

6. On the annealing mechanism of AuGe/Ni/Au ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures / *E.J. Koop, M.J. Iqbal, F. Limbach et al.* // *Semiconductor Science and Technology*. – 2013. – Vol. 28. – No. 2. – P. 1–9.
7. *Sarma K.* Ge diffusion at Ge/GaAs heterojunctions // *J. of Applied Physics*. – 1984. – Vol. 56. – No. 10. – P. 2703–2707.
8. *Nebauer E., Trapp M.* Ge and Au profiles in GaAs produced from AuGe contacts and studied by SIMS // *Physica Status Solidi (a)*. – 1984. – Vol. 84. – No. 1. – P. 39–42.
9. *Gupta R.P., Khokle W.S.* Gallium-vacancy-dependent diffusion model of ohmic contacts to GaAs // *Solid State Electronics*. – 1985. – Vol. 28. – No. 8. – P. 823–830.
10. *Egorkin V., Zemlyakov V., Nezhentsev A., Garmash V.* Optimization of ohmic contact to GaAs-based n-layers of heterobipolar nanoheterostructures // *Russian Microelectronics*. – 2017. – Vol. 44. – № 2. – P. 1–5.
11. *Shur M.S.* GaAs devices and circuits. – Springer Science & Business Media, 2013.
12. *Christou A.* Solid phase formation in Au: Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au: Ge GaAs ohmic contact systems // *Solid State Electronics*. – 1979. – Vol. 22. – No. 2. – P. 141–149.

Поступила после доработки 19.08.2017 г.; принята к публикации 09.11.2017 г.

**Егоркин Владимир Ильич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), kfn@miee.ru

**Земляков Валерий Евгеньевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), VZML@rambler.ru

**Неженцев Алексей Викторович** – аспирант, инженер кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), alekseyu\_nejencev@rambler.ru

**Гармаш Валентин Игоревич** – инженер кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), garmashvalentine@gmail.com

## References

1. Pliadis A., Singer K.E. Metallurgical behaviour of Ni/Au-Ge ohmic contacts to GaAs. *Solid State Communications*, 1984, vol. 49, pp. 99–101.
2. Wang L.C., Lau S.S., Hsieh E.K., Velebir J.R. Low-resistance nonspiking ohmic Contact for AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors using the Ge/Pd scheme. *Applied Physics Letters*, 1989, vol. 54, pp. 2677–2679.
3. Jones K.A., Linfield E.H., Frost J.E.F. Contact resistances of NiGeAu, PdGeTiPt, and TiPd ohmic contacts to GaAs and their temperature dependence from 4.2 to 350 K. *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 69, pp. 4197–4199.
4. Kim T.-J., Holloway P.H. Ohmic contacts to GaAs epitaxial layers. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 1997, vol. 22, no.3, pp.239–273.
5. Hung-Cheng Lin, Sidat Senanayake, Keh-Yung Cheng. Optimization of AuGe–Ni–Au ohmic contacts for GaAs MOSFETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, vol. 50, no. 4, pp. 880–885.
6. E.J. Koop, M.J. Iqbal, F. Limbach, M. Boute, van Wees, D. Reuter, A.D. Wieck, B.J. Kooi, and C.H. van der Wal. On the annealing mechanism of AuGe/Ni/Au ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures. *Semiconductor Science and Technology*, 2013, vol. 28, no. 2, p. 1–9.
7. Sarma K. Ge diffusion at Ge/GaAs heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 56, no. 10, pp. 2703–2707.
8. Nebauer E., Trapp M. Ge and Au profiles in GaAs produced from AuGe contacts and studied by SIMS. *Physica status solidi (a)*, 1984, vol. 84, no. 1, pp. 39–42.
9. Gupta R.P., Khokle W.S. Gallium-vacancy-dependent diffusion model of ohmic contacts to GaAs. *Solid-state electronics*, 1985, vol. 28, no. 8, pp. 823–830.

10. Egorkin V., Zemlyakov V., Nezhentsev A., Garmash V. Optimization of ohmic contact to GaAs-based n-layers of heterobipolar nanoheterostructures. *Russian Microelectronics*, 2017, vol. 44, no. 2, pp. 1–5.
11. Shur M.S. *GaAs devices and circuits*. Springer Science & Business Media, 2013.
12. Christou A. Solid phase formation in Au: Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au: Ge GaAs ohmic contact systems. *Solid-State Electronics*, 1979, vol. 22, no. 2, pp. 141–149.

Submitted 19.08.2017; accepted 09.11.2017

***Egorkin Vladimir I.*** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Leading Researcher of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kfn@miee.ru

***Zemlyakov Valeriy E.*** – Cand. Sci. (Eng.), senior research of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), VZML@rambler.ru

***Nezhentsev Aleksei V.*** – PhD student, engineer of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alekseyy\_nejencev@rambler.ru

***Garmash Valentine I.*** – engineer of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), garmashvalentine@gmail.com