

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.382.049.77:621.793

DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-22-29

## Металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе сплава вольфрама с титаном

*А.Н. Белов, А.А. Голишников, Д.А. Костюков, В.И. Шевяков*

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

*Shev@dsd.miee.ru*

Одним из приоритетных направлений развития электроники как в нашей стране, так и за рубежом является создание кремниевых полупроводниковых приборов и ИС с субмикронными топологическими нормами, способных функционировать при температуре 200 °С и выше. К критическим узлам кремниевой электронной компонентной базы с точки зрения тепловой устойчивости относится металлизация. В последнее время в качестве материала межсоединений используется вольфрам, который имеет более высокую электромиграционную стойкость по сравнению с алюминием (с добавками кремния и меди) и медью. В работе представлены результаты исследования технологических режимов магнетронного осаждения пленок сплава W(Ti-15 %). При исследовании механических свойств пленок установлено, что структура W(Ti-15 %)-Si характеризуется пониженным уровнем механических напряжений в латеральном направлении по сравнению со встроенными механическими напряжениями в структуре W-Si. Выявлено, что усилие на отрыв пленки сплава вольфрама с титаном превышает усилие на отрыв пленки вольфрама приблизительно в три раза. Показано, что металлизация на основе сплава вольфрама с титаном характеризуется более высокой электромиграционной стойкостью по сравнению с металлизацией на основе сплава алюминий – медь – кремний. Сравнительный анализ электрофизических и механических характеристик осажденных на кремний пленок вольфрама и сплава вольфрама с титаном подтвердил перспективность использования последних в качестве межсоединений в теплоустойчивых кремниевых ИС.

**Ключевые слова:** металлизация; вольфрам; «кремниевый эффект»; электрофизические и механические характеристики

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 15-19-00138).

*Для цитирования:* Белов А.Н., Голишников А.А., Костюков Д.А., Шевяков В.И. Металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе сплава вольфрама с титаном // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 22–29. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-22-29

## Metallization of High-Temperature Silicon ICs Based on Tungsten Titanium Alloy

*A.N. Belov, A.A. Golishnikov, D.A. Kostyukov, V.I. Shevyakov*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*Shev@dsd.miee.ru*

**Abstract:** Nowadays, one of the priority directions of development of electronics both in our country and abroad is the creation of silicon semiconductor devices and IC with the submicron topological dimensions capable of functioning at temperature 200 °C and higher. Metallization is a critical node of the silicon electronic component base from the point of view of thermal stability. Recently, as an interconnection material tungsten, which has higher electromigration resistance compared with aluminum (with silicon and copper additives) is used. In the work the results of the technological regimes research of W(Ti-15 %) alloy films magnetron sputtering have been presented. During investigating the mechanical properties of the films it has been determined that the structure W(Ti-15 %)-Si is characterized by a lower level of mechanical stresses in lateral direction compared to the built-in mechanical stresses in the W-Si structure. It has been revealed that the full force of the film of tungsten with titanium alloy approximately three times exceeds that one of the tungsten film. It has been shown that the metallization based on tungsten alloyed with titanium is characterized by a significantly higher electromigration resistance compared to metallization based on an alloy of aluminum with copper and silicon. The results based on a comparative analysis of the electric-physical and mechanical characteristics of sputtered on silicon tungsten films and the alloy of tungsten with titanium from the point of view of using them as interconnections in heat-resistant silicon IC have confirmed their promising implementation.

**Keywords:** metallization; tungsten; «rhenium effect»; electrophysical and mechanical characteristics

**Acknowledgements:** this work was done with financial support of Russian scientific foundation (grant 15-19-00138).

**For citation:** Belov A.N., Golishnikov A.A., Kostyukov D.A., Shevyakov V.I. metallization of high-temperature silicon ICs based on tungsten titanium alloy. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 22–29. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-22-29

**Введение.** Современные технологии кремниевых ИС позволяют расширить температурный диапазон работы приборов, эксплуатируемых при повышенных температурах (свыше 200 °C) [1, 2]. Одним из основных функциональных элементов кремниевых ИС является система металлизации. В ее состав входят межсоединения, к которым предъявляются качественно новые требования, связанные с надежностью функционирования

системы металлизации в целом: повышенная электромиграционная стойкость; химическая инертность материала межсоединений к материалам соприкасающихся с ними функциональных слоев при температурах выше 200 °С; пониженный уровень временного физического старения материала межсоединений и др. В современных ИС в качестве материала межсоединений используют алюминий (с добавками кремния и меди) и медь, также интерес представляют тугоплавкие металлы, в частности вольфрам [3]. Однако вольфрам в чистом виде имеет ряд недостатков, связанных в первую очередь с механическими свойствами, что затрудняет его применение в качестве межсоединений ИС.

В работах [4, 5] описан «рениевый эффект», проявляющийся в том, что добавка в объем пленки вольфрама рения (5–10 %) приводит к существенному улучшению его пластичности. Природа «рениевого эффекта» до сих пор недостаточно изучена. В [6] сделано предположение, что основной причиной хрупкости вольфрама является присутствие углерода на границах зерен пленки вольфрама, а «рениевый эффект» проявляется в увеличении степени растворимости углерода в вольфраме в присутствии рения и, как следствие, в повышении пластичности пленок вольфрама. В [7] с точки зрения физической химии представлены результаты теоретического исследования процесса взаимодействия компонентов в тонких пленках бинарного сплава, размещенных на кремниевой подложке. Авторами сделан вывод о том, что возможен процесс сегрегации одного из компонентов сплава с границ зерен в объем пленки сплава и кремния. Это определяется соотношением энергий сублимации компонентов сплава. Процесс сегрегации протекает для компонента с большей энергией. Данное представление позволяет объяснить процесс сегрегации углерода в объем вольфрама и повышение его растворимости в объеме вольфрама в присутствии рения. В [8] представлены результаты экспериментального исследования влияния рения на электрофизические и механические свойства вольфрама как металла межсоединений в системе металлизации ИС. Результаты сравнительного анализа характеристик осажденных на кремний пленок вольфрама и вольфрама, легированного рением, с точки зрения применения их в качестве межсоединений в теплоустойчивых кремниевых ИС подтвердили эффективность использования последних в первую очередь благодаря их повышенной адгезионной способности и пониженному уровню механических напряжений. Следует отметить, что рений – редкий и дорогой металл. Добавка титана в вольфрам вместо рения дает похожий эффект, обусловленный тем, что титан характеризуется меньшей энергией сублимации, чем углерод, и способен обеспечить процесс сегрегации углерода в объем вольфрама. Поэтому использование пленок сплава вольфрама с титаном в качестве межсоединений системы металлизации высокотемпературных кремниевых ИС перспективно.

В настоящей работе приводятся результаты исследования электрофизических и механических характеристик пленок сплава вольфрама с титаном как альтернатива пленкам сплава вольфрама с рением.

Применение пленок сплава вольфрама с титаном в металлизации ИС описано в [9]. Однако данные сверхтонкие пленки с содержанием титана 30–50 % использовали исключительно в качестве слоя диффузионного барьера. В качестве проводниковых межсоединений ИС пленки сплава должны иметь толщину, на порядок большую, содержание титана должно быть существенно меньше. В зарубежной и отечественной литературе работы по исследованию адгезионных и механических свойств, а также электромиграционной стойкости сплава вольфрама с титаном практически отсутствуют.

**Описание эксперимента и результаты.** В качестве исходных использовали кремниевые подложки с термически выращенным на них слоем оксида кремния. Тонкие

пленки чистого вольфрама и сплава вольфрама с титаном наносили магнетронным способом. В качестве материала мишеней для осаждения пленок сплава вольфрама с титаном использовали W(Ti-5%), W(Ti-10%) и W(Ti-15%). Проведены исследования влияния технологических режимов магнетронного осаждения пленок на удельное объемное сопротивление и выбраны оптимальные режимы, обеспечивающие минимальное значение сопротивления. В табл.1 приведены следующие параметры пленок W(Ti-15%) и технологических режимов осаждения: поверхностное сопротивление  $R_s$ ; толщина  $h$ ; удельное объемное сопротивление  $\rho_v$ ; средняя шероховатость поверхности  $R_a$ ; мощность разряда  $N$ ; давление в камере  $P$ ; температура подложки  $T$ ; длительность процесса осаждения  $t$ . Как следует из таблицы, минимальное значение сопротивления было достигнуто для образца № 5.

Таблица 1

Параметры пленок W(Ti-15%), осажденных при различных технологических режимах

Table 1

Parameters of W(Ti-15%) films, sputtered under various technological regimes

Номер образца	$R_s$ , Ом/□	$h$ , нм	$\rho_v \cdot 10^{-6}$ , Ом·см	$R_a$ , нм	$N$ , Вт	$P$ , мторр	$T$ , °C	$t$ , мин
1	1,54	66,0	10,1	6,0	100	5	250	20
2	0,95	102,0	9,69	7,5	150	5	250	20
3	0,63	125,0	7,8	11,0	200	5	250	20
4	0,54	147,0	7,94	14,0	250	5	250	20
<b>5</b>	<b>0,62</b>	<b>120,0</b>	<b>7,44</b>	<b>10,0</b>	<b>200</b>	<b>3</b>	<b>250</b>	<b>20</b>
6	0,65	144,0	9,36	12,5	200	7	250	20
7	0,62	122,0	7,56	9,5	200	5	200	20
8	0,61	126,0	7,69	13,0	200	5	300	20

С помощью оже-спектроскопии и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) исследовали элементный состав осажденных пленок. Данные эксперимента подтвердили наличие равномерно распределенной примеси титана по толщине в пленках вольфрама с титаном. На рис.1 приведены данные оже-спектра пленки W(Ti-15%). Метод ВИМС, как более чувствительный, чем метод оже-спектроскопии, показал наличие углерода, также распределенного по всему объему пленки вольфрама.

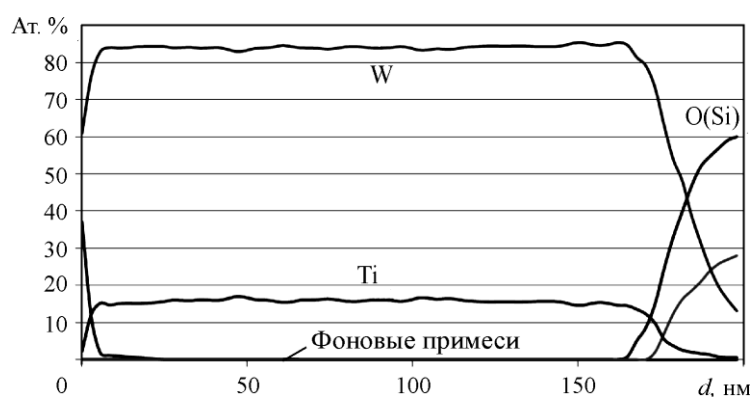


Рис.1. Оже-спектр структуры пленки W(Ti-15%), осажденной на окисленную кремниевую подложку

Fig.1. Auger – spectra of W(Ti-15%) film structure, deposited on oxidized silicon substrate

Проведен сравнительный анализ механических напряжений в системах Si–W и Si–W(Ti). Использовался неразрушающий метод оптического лазерного сканирования для измерения изменения кривизны пластин кремния из-за нанесенной пленки и определения уровня встроенных механических напряжений (установка FSM 500TC Technical Manual). Исследовали пленки вольфрама и вольфрама с титаном толщиной 0,45 мкм. Установлено, что с повышением концентрации примеси титана в вольфраме уровень механических напряжений снижался. При 15%-ной концентрации титана уровень механических напряжений снизился более чем в три раза. На рис.2 приведена картина, иллюстрирующая прогиб пластин кремния при нанесении на них пленок вольфрама и W(Ti-15 %).

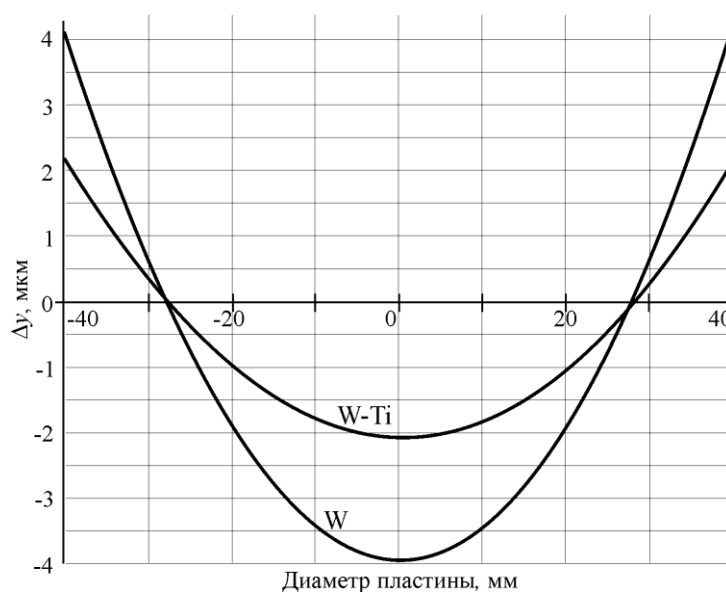


Рис.2. Картина распределений механических напряжений в латеральном направлении в структурах W–Si и W(Ti)–Si  
Fig.2. Mechanical stress distribution in lateral direction of W–Si and W(Ti)–Si structures

Отметим, что с увеличением процентного содержания титана в пленках вольфрама существенно увеличивается удельное сопротивление, что является негативным при их использовании в качестве межсоединений. В частности, для пленок с примесью титана на уровне 15% удельное сопротивление по сравнению с чистой вольфрамовой пленкой увеличилось более чем в два раза. Поэтому исследовали пленки сплава вольфрама с титаном, содержащего не более 15 % титана.

Для определения адгезионной прочности исследуемых пленок к оксиду кремния выбран метод равномерного нормального отрыва пленки от подложки. К пленкам ультразвуковым способом приваривали алюминиевую проволоку диаметром 40 мкм. Средняя величина усилия на отрыв составила 1150 и 3750 Г/мм<sup>2</sup> для пленок вольфрама и W(Ti-15 %) соответственно. В соответствии с 109-4 ОСТ 11 073.013-2008 «Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Испытания на воздействие механических факторов. Часть 1» для 40-мкм алюминиевой проволоки усилие на отрыв должно составлять не менее 3580 Г/мм<sup>2</sup>. Таким образом, пленки сплава W(Ti-15 %) характеризуются удовлетворительной адгезионной способностью к оксиду кремния.

Для исследования электромиграционной стойкости проводников применяли методику на основе ускоренных электромиграционных испытаний при постоянной температуре [10]. Критерием нарушения целостности проводника являлось изменение его сопротивления на 20 % по отношению к исходному значению этого сопротивления в установившемся режиме токовой нагрузки. На рис.3 показана топология тестовой структуры, использованная в эксперименте для оценки электромиграционных эффектов в пленках металлизации. В табл.2 приведены конструктивные параметры тестовых проводников.

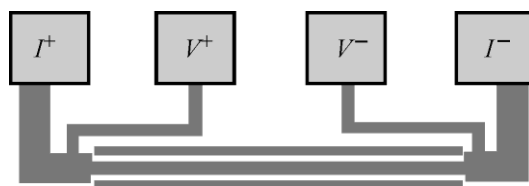


Рис.3. Топология тестовой структуры  
Fig.3. Test structure topology for investigation electromigration resistance of films

Таблица 2  
Конструктивные параметры тестовых проводников

Size of test conductors

Table 2

Параметр	Al(Si,Cu)	W(Ti-15 %)
Длина, мкм	800	800
Ширина, мкм	1,0	1,0
Толщина слоя, мкм	0,45	0,45
Зазор между тестовой шиной и соседними шинами, мкм	1,2	1,2

На рис.4 изображены полученные зависимости сопротивления различных проводников от времени при проведении ускоренных испытаний при разных температурах. Как следует из приведенных данных, проводники сплава Al(Si,Cu) в отличие от проводников на основе W(Ti-15%) имеют более низкую электромиграционную стойкость. При температуре 215 °С после выдержки в течение 25 мин в них активно начинается процесс электромиграции. У проводников на основе W(Ti-15%), как и предполагалось, при температуре 500 °С явления электромиграции при выдержке образцов в исследуемом временном интервале не наблюдаются. Это обусловлено более высокой температурой плавления материала.

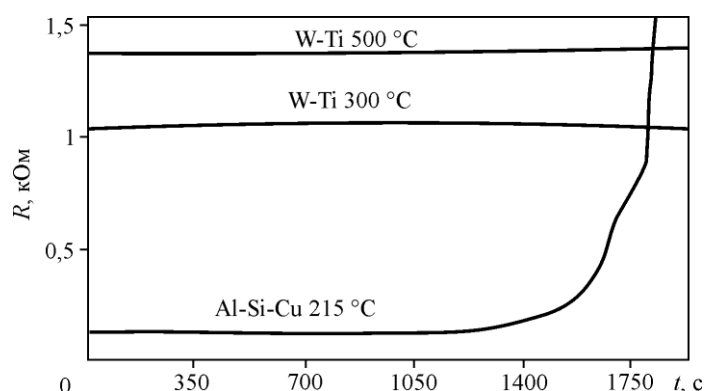


Рис.4. Зависимость сопротивления проводников от времени при разной температуре

Fig.4. Relation between conductors resistance and time during accelerated electromigration measurements under various temperature values



**Закключение.** При исследовании механических свойств пленок установлено, что структура W(Ti-15%)–Si характеризуется пониженным более чем в три раза уровнем механических напряжений по сравнению со встроенными механическими напряжениями в структуре W–Si. Усилие на отрыв пленки сплава W(Ti-15%) превышает усилие на отрыв пленки вольфрама приблизительно в три раза и составляет 3750 Г/мм<sup>2</sup>. Металлизация на основе сплава W(Ti-15%) характеризуется более высокой электромиграционной стойкостью по сравнению с металлизацией на основе сплава Al(Si, Cu).

Результаты сравнительного анализа электрофизических и механических характеристик осажденных на кремний пленок вольфрама и сплава W(Ti-15%) подтверждают перспективность использования сплава в качестве межсоединений в теплоустойчивых кремниевых ИС.

### Литература

1. Silicon-on-insulator based high temperature electronics for automotive applications / **B. Blalock, C Huque, L. Tolbert et al** // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2008. – P. 22.
2. **Watson J., Castro G.** High-temperature electronics pose design and reliability challenges // Analog dialogue. – 2012. – Vol. 46. – P. 1–7.
3. **Белоус А.И., Емельянов В.А.** Основы технологии микромонтажа интегральных схем. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 316 с.
4. **Венецкий С.И.** О редких и рассеянных. Рассказы о металлах. – М.: Металлургия, 1980. – 17 с.
5. **Krajnikov A., Morito F., Danylenko M.** Rhenium effect in irradiated Mo-Re alloys and welds // Universal Journal of Materials Science. – 2014. – Vol. 2. – P. 19–26.
6. <http://metalls.info/node/185/> (дата обращения: 25.07. 2018).
7. **Gromov D.G., Mochalov A.I., Pugachevich V.P., Sorokin I.N.** Interaction between binary alloy thin films and silicon substrate: the conditions of bilayer formation and the effect of additional component // Appl. Phys. – 2000. – Vol. 70. – P. 333–340.
8. Tungsten alloyed with rhenium as an advanced material for heat-resistant silicon ICs interconnects / **A.N. Belov, Y.A. Chaplygin, A.A. Golishnikov et al.** // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2016. – Vol.10224. – P. 10224041Q.
9. **Глебовский В.Г.** Способ получения составной мишени для распыления из сплава вольфрам–титан–кремний // Патент РФ №2352684, 2007.
10. **Safonov S.O., Bessalov V.P., Golishnikov A.A., Putrya M.G.** Estimating the reliability of aluminium metallization of integrated circuits by accelerated electromigration testing at constant temperature // Russian Microelectronics. – 2015. – Vol. 44. – No. 7. – P. 453–459.

Поступила в редакцию 03.08.2018 г.; после доработки 10.09.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

**Белов Алексей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [nanointech@mail.ru](mailto:nanointech@mail.ru)

**Голишников Александр Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [golishnikov1960@mail.ru](mailto:golishnikov1960@mail.ru)

**Костюков Денис Андреевич** – ведущий инженер кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [u001998@org.miet.ru](mailto:u001998@org.miet.ru)

**Шевяков Василий Иванович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [shhev@dsd.miee.ru](mailto:shhev@dsd.miee.ru)

### Reference

1. Blalock B., Huque C., Tolbert L., Su M., Islam S., Vijayaraghavan R. Silicon-on-Insulator Based High Temperature Electronics for Automotive Applications. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, p. 22.
2. Watson J., Castro G. High-Temperature Electronics Pose Design and Reliability Challenges. *Analog Dialogue*, 2012, vol. 46, pp. 1–7.
3. Belovs A.I., Emelyanov V.A. *Basics of integrated circuits micromachining technology*. Moscow, DMK Press Publ., 2013. 316 p. (in Russian).
4. Venechkiy S.I. *About rare and scattered. Stories about a metals*. Moscow, Metallurgy Publ., 1980. 17 p. (in Russian).
5. Krajnikov A., Morito F., Danylenko M. Rhenium Effect in Irradiated Mo-Re Alloys and Welds. *Universal Journal of Materials Science*, 2014, vol. 2, pp. 19–26.
6. Available at: <http://knowledge.su/a/volframovye-splavy/> (accessed: 23.05.2018).
7. Gromov D.G., Mochalov A.I., Pugachevich V.P., Sorokin I.N. Interaction between binary alloy thin films and silicon substrate: the conditions of bilayer formation and the effect of additional component. *Appl. Phys.*, 2000, vol. 70, pp. 333–340.
8. Belov, A.N., Chaplygin Y.A., Golishnikov, A.A., Safonov, S.O., Shevyakov, V.I. Tungsten alloyed with rhenium as an advanced material for heat-resistant silicon ICs interconnects. *Proceedings of SPIE– The International Society for Optical Engineering*, 2016, vol.10224, p. 10224041Q.
9. Glebovsky V.G. *Method of receipt composite target for sputtering from tungsten-titanium-silicon alloy*. Patent RF, no. 2352684, 2007. (in Russian).
10. Safonov S.O., Bespalov V.P., Golishnikov A.A., Putrya M.G. Estimating the reliability of aluminium metallization of integrated circuits by accelerated electromigration testing at constant temperature. *Russian Microelectronics*, 2015, vol. 44, no. 7, pp. 453–459.

Received 03.08.2018; Revised 10.09.2018; Accepted 27.11.2018.

### Information about the authors:

**Alexey N. Belov** – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Integral Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [nanointech@mail.ru](mailto:nanointech@mail.ru)

**Alexander A. Golishnikov** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Integral Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [golishnikov1960@mail.ru](mailto:golishnikov1960@mail.ru)

**Denis A. Kostuykov** – Senior Engineer of the Integral Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [u001998@org.miet.ru](mailto:u001998@org.miet.ru)

**Vasiliy I. Shevyakov** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Integral Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [shev@dsd.miee.ru](mailto:shev@dsd.miee.ru)