

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

УДК 621.382  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>

Поступила в редакцию 30.11.2017  
Received 30.11.2017

**В. Б. Оджаев<sup>1</sup>, А. К. Панфиленко<sup>2</sup>, А. Н. Петлицкий<sup>2</sup>, В. С. Просолович<sup>1</sup>,  
С. В. Шведов<sup>2</sup>, В. А. Филипеня<sup>2</sup>, В. Ю. Явид<sup>1</sup>, Ю. Н. Янковский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО  $n-p-n$ -ТРАНЗИСТОРА**

**Аннотация.** Загрязнение монокристаллического кремния технологическими примесями в процессе изготовления приборов оказывает существенное влияние на электрофизические характеристики биполярных  $n-p-n$ -транзисторов. Выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных планарных  $n-p-n$ -транзисторов является актуальным с целью установления факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров интегральных микросхем.

Исследованы вольт-амперные характеристики различных партий биполярных  $n-p-n$ -транзисторов, изготовленных по эпитаксиально-планарной технологии по аналогичным технологическим маршрутам, при идентичных используемых технологических материалах, однако в различное время.

Установлено, что электрофизические характеристики биполярных  $n-p-n$ -транзисторов существенным образом зависят от содержания технологических примесей в материале подложки. Наличие высокой концентрации генерационно-рекомбинационных центров, связанных с металлическими примесями, приводит как к увеличению обратного тока через переход коллектор–база транзисторов, так и к существенному снижению напряжения пробоя коллекторного перехода. Наиболее вероятной причиной ухудшения электрофизических параметров биполярных  $n-p-n$ -транзисторов является загрязнение материала технологическими примесями (такими, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса изготовления приборов. Источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

**Ключевые слова:** вольт-амперные характеристики, обратный ток  $p-n$ -перехода, напряжение пробоя  $p-n$ -перехода, биполярный транзистор, технологические примеси

**Для цитирования.** Влияние технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного  $n-p-n$ -транзистора / В. Б. Оджаев [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 244–249. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>

**V. B. Odzhaev<sup>1</sup>, A. K. Panfilenko<sup>2</sup>, A. N. Pyatlitski<sup>2</sup>, V. S. Prosolovich<sup>1</sup>, S. V. Shvedau<sup>2</sup>,  
V. A. Filipenya<sup>2</sup>, V. Yu. Yavid<sup>1</sup>, Yu. N. Yankovsky<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk, Belarus

**INVESTIGATION OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL IMPURITIES  
ON THE I–V CHARACTERISTICS OF THE BIPOLAR  $n-p-n$ -TRANSISTOR**

**Abstract.** Contamination of the monocrystal silicon with technological impurities in the devices fabrication process exerts a considerable influence on the electro-physical characteristics of the bipolar  $n-p-n$ -transistors. Revelation of the causes of the labile reproducibility of the basic characteristics of the bipolar planar  $n-p-n$ -transistors is vital for the purpose of establishing the factors, determining reliability and stability of the operational parameters of the integrated circuits.

There were investigated I–V characteristics of the various lots of the bipolar  $n-p-n$ -transistors, fabricated under the epitaxial-planar technology as per the similar process charts with the identical used technological materials, however, at different times.

It is established that the electro-physical characteristics of the bipolar  $n-p-n$ -transistors substantially depend on the contents of the technological impurities in the substrate material. Availability of the high concentration of the generation-

recombination centers, related to the metallic impurities, results both in increase of the reverse current of the collector – base junction of the transistors and the significant reduction of the breakdown voltage of the collector junction. The most probable cause of deterioration of the electro-physical parameters of the bipolar  $n-p-n$ -transistors is the material contamination with the technological impurities (such, as Fe, Cl, Ca, Cu, Zn and others) during the production process of the devices fabrication. The sources of impurity may be both the components and sub-assemblies of the technological units and the materials and reagents under usage.

**Key words:** I–V characteristics, reverse current of the  $p-n$ -junction, breakdown voltage of the  $p-n$ -junction, bipolar transistor, technological impurities

**For citation.** Odzhaev V. B., Panfilenko A. K., Pyatlitski A. N., Prosolovich V. S., Shvedau S. V., Filipenya V. A., Yavid V. Yu., Yankovsky Yu. N. Investigation of influence of technological impurities on the I–V characteristics of the bipolar  $n-p-n$ -transistor. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 244–249 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>

**Введение.** Повышенное содержание в монокристаллическом кремнии технологических примесей (Fe, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn и др.) оказывает существенное влияние как на качество подзатворного диэлектрика, так и на электрофизические характеристики МОП-транзисторов в процессе изготовления приборов [1]. В то же время одним из наиболее важных полупроводниковых приборов является биполярный транзистор, который используется в электронике в качестве дискретного активного элемента и в интегральных схемах. В настоящее время при создании приборов по планарной технологии применяется метод ионной имплантации с последующей термообработкой. При этом вблизи  $p-n$ -переходов в областях обеднения барьерных структур происходит аккумуляция генерационно-рекомбинационных центров (ГРЦ), которая возникает в результате миграции и активации технологических примесей вследствие формирования остаточных протяженных нарушений типа стержнеобразных дефектов  $\{113\}$ , дефектов упаковки и дислокационных петель. Эти структурные нарушения имеют междоузельную природу и обладают глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне кремния, что в значительной степени влияет на генерационно-рекомбинационные процессы, ухудшает эксплуатационные параметры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и приводит к снижению процента выхода годных приборов микроэлектроники [2]. В связи со сказанным актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных планарных  $n-p-n$ -транзисторов с целью выявления физических факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов.

**Объекты и методы исследований.** Нами были проведены исследования биполярных  $n-p-n$ -транзисторов в интегральных схемах, сформированных ионным легированием (серии *A* и *B*) по аналогичным технологическим маршрутам с использованием идентичных материалов с помощью метода измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), однако в различное время. Представленные результаты получены на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500A с применением зондовой станции Cascade Summit 11000 (минимальный измеряемый ток  $\sim 10^{-15}$  А) в интервале температур от  $-60$  до  $120$  °С. Легированные слои создавались в пластинах кремния  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $10$  Ом · см ионной имплантацией бора при формировании  $p$ -слоя, фосфора – при формировании  $n$ -слоя. Содержание технологических примесей на поверхности пластин кремния исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке Rigaku TXRF 3750 [3].

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Установлено, что обратный ток через  $p-n$ -переход коллектор–база транзисторов из партии *A* более чем на порядок ниже значений тока для приборов из партии *B* (рис. 1). Напряжение пробоя коллекторного перехода транзисторов из партии *A* почти на  $15$  В выше, чем из партии *B*. Полный обратный ток для резкого  $p-n$ -перехода можно приблизительно представить суммой диффузионного тока в нейтральной области и генерационного тока в обедненной области [4]:

$$I_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_d} + \frac{qn_i W}{\tau_e}}, \quad (1)$$

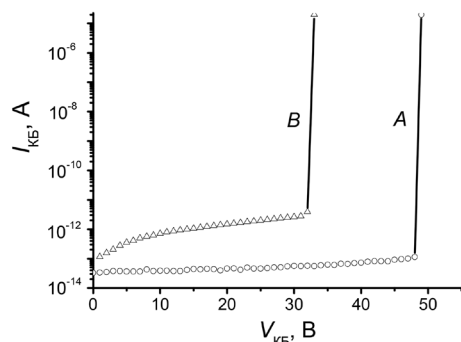


Рис. 1. Обратные вольт-амперные характеристики коллекторных переходов  $n-p-n$ -транзисторов при  $T = 20^\circ\text{C}$  партий  $A$  и  $B$   
 Fig.1 The reverse current-voltage characteristics of collector junction of  $n-p-n$ -transistors at  $T = 20^\circ\text{C}$  parties  $A$  and  $B$

где  $D_p$  – коэффициент диффузии дырок,  $N_d$  – концентрация доноров,  $\tau_p$  – время жизни дырок,  $\tau_e$  – эффективное время жизни носителей заряда, определяемое скоростью генерации электронно-дырочных пар ( $U$ ) в обедненной области  $p-n$ -перехода толщиной  $W$ .

В широкозонных полупроводниках с низкой концентрацией собственных носителей заряда  $n_i$  (таких, как кремний) и большой концентрацией ГРЦ (низкое значение  $\tau_e$ ) при комнатной температуре преобладает генерационный ток ( $I_{ген}$ ):

$$I_{ген} = \int_0^W q|U|dx \approx q|U|W = \frac{qn_iW}{\tau_e}, \tag{2}$$

$$I_{ген} \sim \frac{1}{\tau_e}; I_{ген} \sim W \sim (V_{bi} + V)^{1/2},$$

где  $V_{bi}$  – контактная разность потенциалов. Таким образом, при заданной температуре следует ожидать для резкого  $p-n$ -перехода степенную зависимость  $I_{ген}$  от приложенного напряжения с показателем степени 0,5.

При построении ВАХ в двойном логарифмическом масштабе (рис. 2) наблюдается наличие двух областей для ВАХ  $p-n$ -переходов при обратном смещении. Для приборов из партии  $A$  (рис. 2,  $a$ ) при напряжении меньше 10 В ток коллектора ( $I_{KB}$ ) практически не зависит от приложенного напряжения, что свидетельствует о преобладании в  $I_{KB}$  диффузионной составляющей. Это обусловлено как низкой концентрацией ГРЦ в исходном материале, так и малой скоростью возникновения данных центров в процессе формирования  $p-n$ -структур. Для партии  $B$  (рис. 2,  $b$ ) в этом интервале напряжений имеет место степенная зависимость тока от напряжения  $I \sim V^n$ , что характерно для обратной ВАХ  $p-n$ -перехода, в области пространственного заряда которого преобладает генерация электронно-дырочных пар [5]. Однако в отличие от значения показателя степени  $n = 0,5$  в классическом выражении в соответствии с (2), в нашем случае экспериментально получено значение показателя  $n = 1$ .

Данное отличие может иметь целый ряд причин, среди которых, прежде всего, следует выделить высокую концентрацию ГРЦ и их неравномерное распределение по объему кристалла. Кроме того, как было ранее установлено [6], эти центры могут входить в состав протяженных дефектов, дислокаций или областей скоплений, которые формируются в процессе создания приборов.

Следует отметить, что высокие значения  $n (\geq 0,5)$  наблюдались ранее в приборах, изготовленных по стандартной технологии, и характерны для диодов с дислокациями в области  $p-n$ -перехода [6]. Дислокации заметно увеличивают токи утечки  $p-n$ -перехода, что особенно губи-

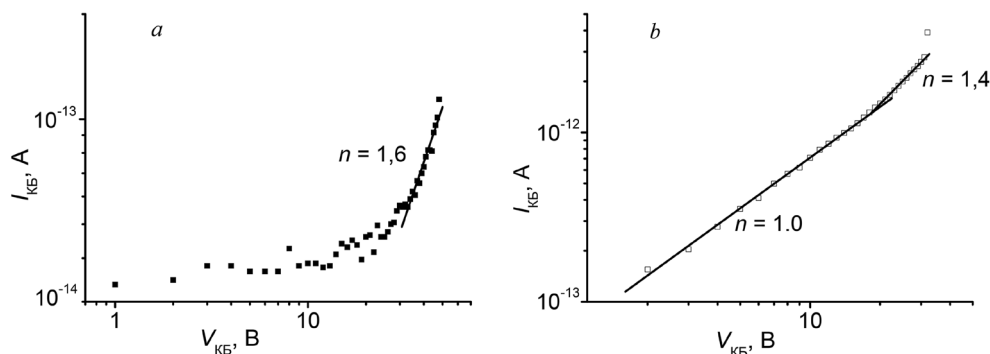


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики коллекторного  $n-p-n$ -перехода при обратном смещении для партий  $A$  ( $a$ ) и  $B$  ( $b$ )

Fig. 2. The reverse current-voltage characteristics of collector junction of  $n-p-n$ -transistors for the batch  $A$  ( $a$ ) and  $B$  ( $b$ )

тельно для приборов при наличии дислокаций и примесей металлов с большими коэффициентами диффузии. В  $p$ – $n$ -переходах, сформированных на кремнии, при декорировании дислокаций металлическими примесями наблюдалось увеличение токов утечки вплоть до короткого замыкания  $p$ – $n$ -перехода [6].

В настоящее время существует лишь качественное объяснение результатов экспериментов, в которых наблюдалось увеличение токов утечки. Это явление связывается авторами [6] с образованием по дислокациям «мостиков» повышенной проводимости через область пространственного заряда  $p$ – $n$ -перехода. Данная интерпретация опирается на известный факт осаждения примесей на дислокациях с формированием атмосфер Коттрелла. Оценки авторами [7] величины сопротивления этих «мостиков» дают значения от нескольких Ом до 20 МОм. Наиболее распространенное объяснение влияния дислокаций на токи утечки основывается на исследованиях, в которых показано, что дислокация в кремнии  $n$ -типа ведет себя как цепочка акцепторов, а в  $p$ -кремнии – как цепочка доноров. Поэтому исходя из условий электронейтральности дислокация должна образовывать вокруг себя трубку повышенной концентрации основных носителей заряда [6].

При напряжении на коллекторе выше 10–12 В для всех образцов в предпробойной области ВАХ наблюдается сверхлинейная зависимость ( $n = 1,4$ – $1,6$ ) тока от напряжения.

Описанные состояния могут быть связаны с присутствием как в объеме кремниевых подложек, так и адсорбированными на их поверхности ионами щелочных ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ) и тяжелых металлов, а также ионами  $\text{H}_3\text{O}^+$ , кислородными вакансиями, полярными молекулами, попадающими из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе. С учетом этого нами было проведено изучение распределения по поверхности пластин различных технологических примесей. Исследования содержания различных примесей на поверхности пластин методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения показали, что вся поверхность пластин из серии *B* покрыта слоем Fe со средней концентрацией  $3,4 \cdot 10^{11}$  ат/см<sup>2</sup>. Наблюдаются также пятна Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn. Топограммы распределения технологических примесей по поверхности пластин, на которых были изготовлены приборы серии *B*, представлены на рис. 3.

Расчет на основе полученных экспериментальных данных показывает, что если поверхностную концентрацию железа  $3,4 \cdot 10^{11}$  ат/см<sup>2</sup> распределить по объему пластины, то средняя объемная концентрация железа составит  $1,2 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup>. Такая высокая объемная концентрация технологической примеси железа оказывает существенное воздействие на генерационно-рекомбинационные процессы в биполярных транзисторах. На пластинах серии *A* наблюдаются только пятна Cl по периферии пластины. Содержание всех остальных примесей было ниже предела обнаружения (по Fe  $< 4,0 \cdot 10^9$  ат/см<sup>2</sup>).

Таким образом, наблюдаемое превышение величины обратного тока ( $I_R$ ) через коллекторный переход в приборах из партии *B* над приборами из партии *A* однозначно связано с более высокими значениями концентрации ГРЦ в структурах из партии *B*. Данные центры возникают или активируются в процессе создания полупроводниковых приборов, например при ионной имплантации или термическом воздействии. Другая возможная причина их проявления может состоять в значительном содержании в исходном монокристаллическом кремнии остаточных технологических примесей. Однако использовавшиеся в экспериментах пластины монокристаллического кремния были изготовлены из материала, который выращивался с соблюдением соответствующих стандартов, и содержание в нем

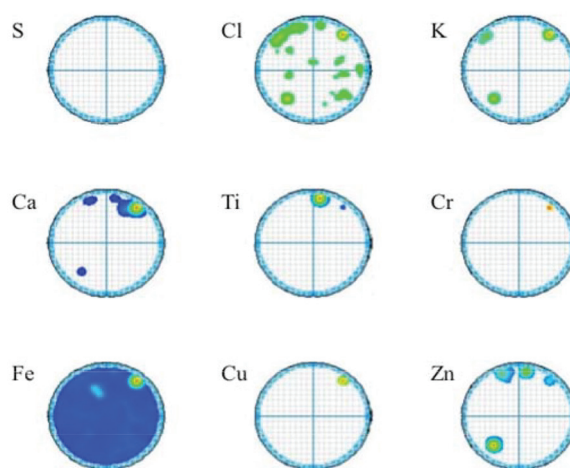


Рис. 3. Распределение технологических примесей по поверхности исходных кремниевых пластин, на которых были изготовлены приборы серии *B*

Fig. 3. The distribution of technological impurities on the surface of the original silicon wafers, which were made instruments of the series *B*

технологических примесей было строго регламентировано. Данное обстоятельство позволяет однозначно заключить, что формирование ГРЦ в приборах из серии *B* происходит вследствие адсорбции и последующей диффузии вглубь кремниевых подложек технологических примесей из промышленного оборудования и/или окружающей среды в процессе изготовления полупроводниковых приборов. Основными источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

**Заключение.** Установлено, что электрофизические характеристики биполярных *n-p-n*-транзисторов существенным образом зависят от содержания технологических примесей в материале подложки. Наличие высокой концентрации ГРЦ, связанных с металлическими примесями, приводит как к увеличению обратного тока через переход коллектор–база транзисторов, так и к существенному снижению напряжения пробоя коллекторного перехода. Наиболее вероятной причиной ухудшения электрофизических параметров биполярных *n-p-n*-транзисторов является загрязнение материала технологическими примесями (такими, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса изготовления приборов. Источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

### Список использованных источников

1. Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора / В. Б. Оджаев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 4. – С. 14–17.
2. Челябинский, А. Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А. Р. Челябинский, Ф. Ф. Комаров // Успехи физ. наук. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 813–846. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200308b.0813>
3. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike [et al.] // Fresenius Z. Anal. Chem. – 1989. – Vol. 333, iss. 4–5. – P. 524–526. <https://doi.org/10.1007/BF00572369>
4. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 с.
5. Improved device performance by multistep or carbon co-implants / R. Liefting [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1994. – Vol. 41, iss. 1. – P. 50–55. <https://doi.org/10.1109/16.259619>
6. Сорокин, Ю. Г. Влияние дислокаций на электрические параметры *p-n*-переходов / Ю. Г. Сорокин // Труды ВЭИ. – М.: Энергия, 1980. – Вып. 90. – С. 91–101.
7. Plantinga, G. H. Effect dislocations on the transistors parameters fabricated by shallow diffusion / G. H. Plantinga // IEEE Trans. Electron Devices. – 1969. – Vol. 16, № 4. – P. 394–400. <https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16763>

### References

1. Odzhaev V. B., Petlitskii A. N., Proslolovich V. S., Turtsevich A. S., Shvedov S. V., Filipenya V. A., Chernyi V. V., Yavid V. Yu., Yankovskii Yu. N., Dubrovskii V. A. The influence of technological impurities on the electrophysical parameters of a MOS transistor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2014, no. 4, pp. 14–17 (in Russian).
2. Chelyadinskii A. R., Komarov F. F. Defect-impurity engineering in implanted silicon. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2003, vol. 46, pp. 789–820. <https://doi.org/10.1070/PU2003v046n08ABEH001371>
3. Berneike W., Knoth J., Schwenke H., Weisbrod U., Fresenius Z. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis. *Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie*, 1989, vol. 333, iss. 4–5, pp. 524–526. <https://doi.org/10.1007/BF00572369>
4. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey, John Wiley & Sons, 1969. 812 p.
5. Liefting R., Wijburg R., Custer J. C., Wallinga H., Saris F. W. Improved device performance by multistep or carbon co-implants. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1994, vol. 41, iss. 1, pp. 50–55. <https://doi.org/10.1109/16.259619>
6. Sorokin Yu. G. The influence of dislocations on the electrical parameters of *p-n* junctions. *Trudy Vserossiiskogo elektrotekhnicheskogo instituta* [Proceedings of the All-Union Electrotechnical Institute]. Moscow, Energiya Publ., 1980, iss. 90, pp. 91–101 (in Russian).
7. Plantinga G. H. Effect dislocations on the transistors parameters fabricated by shallow diffusion. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, vol. 16, iss. 4, pp. 394–400. <https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16763>

### Информация об авторах

Оджаев Владимир Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [odzhaev@bsu.by](mailto:odzhaev@bsu.by)

Панфиленко Анатолий Кузьмич – главный инженер, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга

### Information about the authors

Vladimir B. Odzhaev – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [odzhaev@bsu.by](mailto:odzhaev@bsu.by)

Anatoliy K. Panfilenko – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [office@integral.by](mailto:office@integral.by)

«ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@integral.by

*Петлицкий Александр Николаевич* – кандидат физико-математических наук, директор центра, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: petan@tut.by

*Просолович Владислав Савельевич* – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: prosolovich@bsu.by

*Шведов Сергей Васильевич* – директор филиала, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by

*Филипеня Виктор Анатольевич* – ведущий инженер, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@integral.by

*Явид Валентин Юльянович* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yavid@bsu.by

*Янковский Юрий Николаевич* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yankouski@bsu.by

*Alyaxandr N. Pyatlitski* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director of the Center, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petan@tut.by

*Vladislav S. Prosolovich* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Head of the Laboratory, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prosolovich@bsu.by

*Sergey V. Shvedau* – Director of Design Center, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by

*Victor A. Filipenya* – Leading Engineer, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by

*Valentin Yu. Yavid* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yavid@bsu.by

*Yury N. Yankovsky* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yankouski@bsu.by