



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-5-11>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

## ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТОВ АЛЮМИНИЙ-ПОЛИКРЕМНИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КМОП МИКРОСХЕМ

В. А. ПИЛИПЕНКО, Н. С. КОВАЛЬЧУК, Я. А. СОЛОВЬЁВ, Д. В. ШЕСТОВСКИЙ,  
Д. В. ЖИГУЛИН

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 08.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Рассмотрено влияние быстрой термической обработки (450 °С, 7 с) на электрические параметры КМОП интегральных микросхем при формировании омического контакта между алюминиевой металлизацией и поликремнием. В качестве анализируемых параметров *n*- и *p*-канальных транзисторов были выбраны следующие вольт-амперные характеристики зависимости тока стока от напряжения: на затворе при диодном включении; на стоке при различных напряжениях на затворе; на стоке в режиме пробоя канала без подачи потенциала на затвор. Сравнение этих параметров проводилось относительно микросхем, изготовленных с применением стандартной технологии (450 °С, 20 мин) для формирования данных контактов. Анализ результатов показал, что применение быстрой термической обработки для формирования омического контакта алюминий-поликремний позволяет значительно улучшить вышеуказанные характеристики *n*-МОП- и *p*-МОП-транзисторов. Из вольт-амперных характеристик *n*- и *p*-канальных транзисторов следует, что в области напряжений на затворе более 0,65 В ток стока после длительной термообработки выше, чем после быстрой. Анализ вольт-амперной характеристики тока стока от напряжения на стоке показал, что ток стока при использовании длительной термообработки значительно выше, чем после быстрой термообработки. При этом для длительной термообработки имеют место уменьшение напряжения пробоя канала только для *n*-канальных транзисторов и увеличение тока стока в области более 5 В как для *n*-, так и для *p*-канальных транзисторов. Такие улучшения протекают за счет исключения образования конгломератов поликремния в алюминиевом контакте, значительного уменьшения эпитаксиальной рекристаллизации кремния, легированного алюминием, на поверхности кремния, а также снижения микрорельефа границы раздела данного контакта и уменьшения роста размера контактных окон за счет бокового взаимодействия алюминия с поликремнием.

**Ключевые слова:** быстрая термическая обработка, омические контакты, температурная нагрузка, вольт-амперная характеристика.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Влияние быстрой термообработки при формировании контактов алюминий-поликремний на электрические параметры КМОП микросхем / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-5-11>.

## THE INFLUENCE OF RAPID HEAT TREATMENT DURING THE FORMATION OF ALUMINUM-POLYSILICON CONTACTS ON THE ELECTRICAL PARAMETERS OF CMOS MICROCIRCUITS

VLADIMIR A. PILIPENKO, NATALLIA S. KOVALCHUK, JAROSLAV A. SOLOVJOV,  
DMITRY V. SHESTOVSKI, DMITRY V. ZHYHULIN

*JSC "INTEGRAL" – Manager Holding Company "INTEGRAL" (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 08.02.2024*

**Abstract.** The influence of rapid heat treatment (450 °C, 7 s) on the electrical parameters of CMOS integrated circuits during the formation of ohmic contact between aluminum metallization and polysilicon is considered. The following volt-ampere characteristics of the dependence of drain current on voltage were chosen as the analyzed parameters of *n*- and *p*-channel transistors: at the gate when diode-connected; on the drain at different gate voltages; on the drain in the channel breakdown mode without applying potential to the gate. A comparison of these parameters was carried out with respect to microcircuits manufactured using standard technology (450 °C, 20 min) to form these contacts. Analysis of the results showed that the use of rapid heat treatment to form an ohmic aluminum-polysilicon contact can significantly improve the above characteristics of *n*-MOS and *p*-MOS transistors. From the current-voltage characteristics of *n*- and *p*-channel transistors it follows that in the region of gate voltages greater than 0.65 V, the drain current after long-term heat treatment is higher than after quick heat treatment. Analysis of the current-voltage characteristics of the drain current versus the drain voltage showed that the drain current when using long-term heat treatment is significantly higher than after rapid heat treatment. In this case, for long-term heat treatment, there is a decrease in the channel breakdown voltage only for *n*-channel transistors and an increase in the drain current in the region of more than 5 V for both *n*- and *p*-channel transistors. Such improvements occur by eliminating the formation of polysilicon conglomerates in the aluminum contact, significantly reducing the epitaxial recrystallization of silicon doped with aluminum on the silicon surface, as well as reducing the microrelief of the interface of this contact and reducing the growth in the size of contact windows due to the lateral interaction of aluminum with polysilicon.

**Keywords:** rapid heat treatment, ohmic contacts, temperature load, current-voltage characteristics.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Pilipenko V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov Ja. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. (2024) The Influence of Rapid Heat Treatment During the Formation of Aluminum-Polysilicon Contacts on the Electrical Parameters of CMOS Microcircuits. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-5-11> (in Russian).

### Введение

Одним из важнейших условий создания надежных изделий микроэлектроники и увеличения степени их интеграции является снижение тепловой нагрузки, испытываемой кремнием при формировании на его поверхности интегральных микросхем (ИМС) [1]. Наиболее остро данный вопрос стоит при формировании омических контактов к поликремнию (ПКК) с применением длительной термической обработки (450 °C, 20 мин). Это обусловлено тем, что при таких температурах и времени обработки идет интенсивное взаимодействие ПКК с алюминием, приводящее к образованию конгломератов поликремния в алюминии, вызывающих увеличение его сопротивления, а, следовательно, изменения вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов. Как показано в [2, 3], это обусловлено тем, что при длительной термообработке происходит насыщение межзеренного пространства пленки алюминия кремнием, вызывая увеличение его сопротивления. Кроме того, в местах контакта ПКК с затвором МОП-транзисторов, резисторов и конденсаторов происходит осаждение ПКК в виде отдельных остроугольных островков, приводящих не только к ухудшению параметров микросхемы, но и к полному ее выходу из строя за счет короткого замыкания как между различными уровнями разводки, так и в разводке одного уровня.

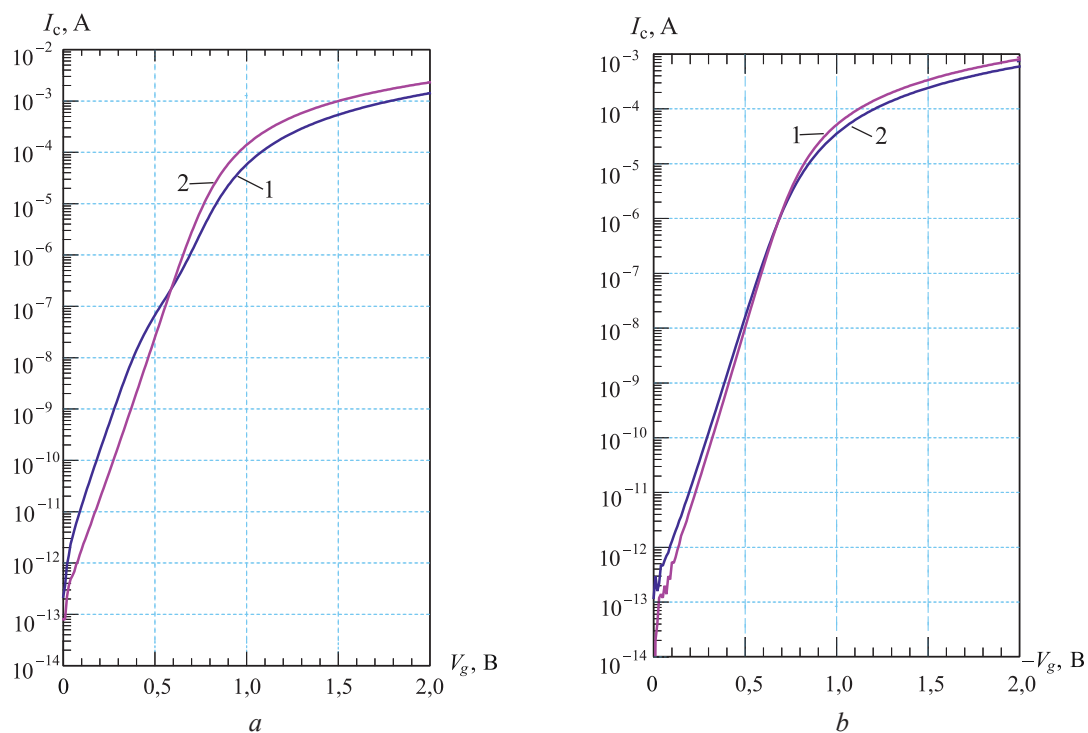
Одним из методов, снижающих протекание диффузионных процессов в различных микроэлектронных системах при высокотемпературных обработках, является применение быстрых термических обработок при создании ИМС [4–11]. Однако, если по механизму взаимодействия алюминий-кремний и алюминий-алюминий при различных видах термообработок и по их влиянию на электрические параметры ИМС имеются исчерпывающие данные в литературе, то отно-

сительно контактов алюминий-ПКК они практически отсутствуют. Исследования в этой области позволят установить основные причины их изменения при стандартном формировании таких контактов и определить пути их уменьшения.

### Методика проведения эксперимента

Для исследования влияния применения быстрой термообработки при формировании омических контактов алюминий-ПКК на электрические параметры ИМС была выбрана микросхема, выполненная по КМОП-технологии, т. е. имеющая как  $n$ -канальные, так и  $p$ -канальные транзисторы. Половина пластин из партии проходила быструю термообработку для формирования данного контакта при температуре  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение  $7\text{ с}$  в атмосфере  $\text{N}_2$ , вторая половина пластин обрабатывалась по стандартному процессу при  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение  $20\text{ мин}$  в аналогичной среде. Быстрая термообработка осуществлялась на установке УБТО ПИТ1801 путем облучения пластин с их нерабочей стороны импульсным фотонным потоком излучения галогенных ламп в режиме теплового баланса.

Исследуемыми параметрами ИМС являлись такие электрические характеристики  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов, как зависимость тока стока от напряжения: на затворе при диодном включении, на стоке при различных напряжениях на затворе, на стоке в режиме пробоя канала без подачи потенциала на затвор. Данные параметры определялись на комплексе прецизионных измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик Keysight B1500A Semiconductor Device Analyzer с зондовой станцией MPI TS2000-SE (США). Анализ хода подпороговых характеристик  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов со сформированными контактами алюминий-поликремний и алюминий-кремний при длительной и быстрой термообработках показан на рис. 1.



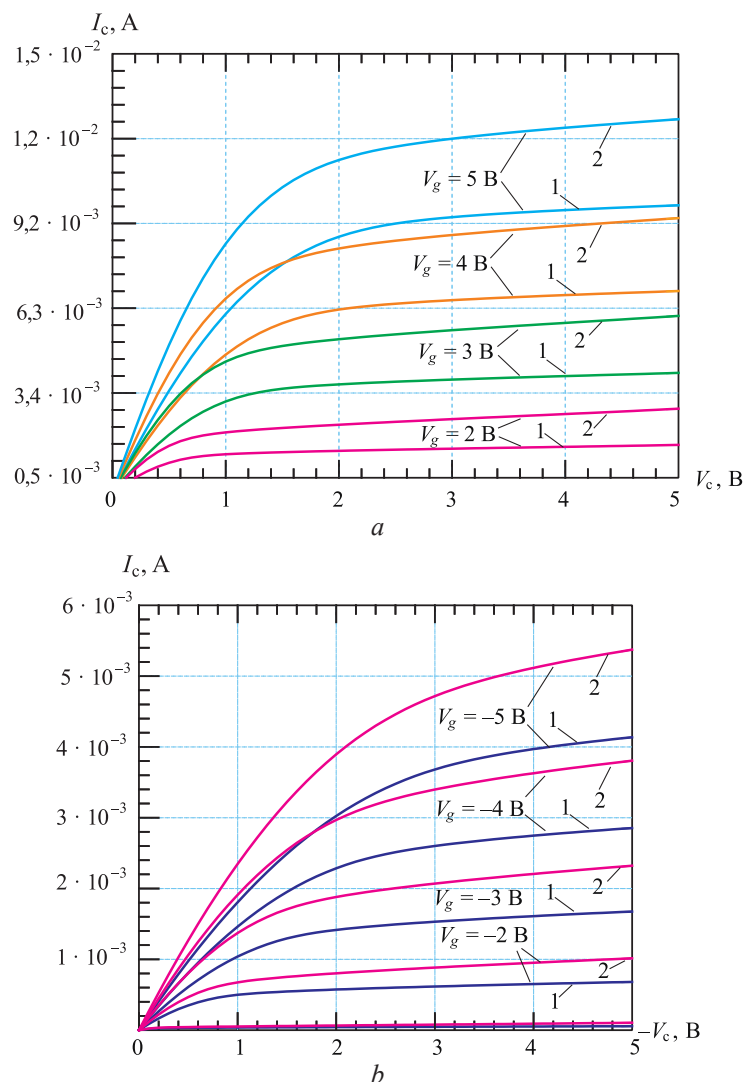
**Рис. 1.** Вольт-амперная характеристика зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на затворе  $V_g$  для  $n$ -МОП (а) и  $p$ -МОП (б) транзисторов при быстрой (1) и длительной (2) термообработках

**Fig. 1.** Current-voltage characteristic of the drain current  $I_c$  on the gate voltage  $V_g$  for  $n$ -MOS (a) and  $p$ -MOS (b) transistors using rapid (1) and long-term (2) heat treatments

В области малых напряжений на затворе ток стока после длительной термообработки меньше, чем после быстрой. В то же время при напряжении на затворе более  $0,65\text{ В}$  ток стока становится ниже, чем при использовании быстрой термообработки. Данный результат связан с различными процессами при формировании омических контактов к затвору и истоку при длительной и быстрой термообработках. Так, в первом случае контакт алюминия с поликремнием имеет развитый микрорельеф, приводящий к увеличению его площади, а омический контакт к истоку уменьшает-

ся за счет выделения эпитаксиально рекристаллизованного кремния, легированного алюминием на поверхности стокового контакта. Такой характер изменения площади контактов вызывает рост напряжения на затворе и уменьшение на стоке, приводя к более низкому току стока при напряжениях менее 0,65 В, по сравнению с контактами, полученными при быстрой термообработке, поскольку их площадь практически не изменяется. При дальнейшем росте напряжения на затворе эффект уменьшения площади истока, а, следовательно, и более низкого напряжения на нем, компенсируется значительным уменьшением сопротивления канала и быстрым ростом тока стока, который становится больше его величины на приборах, изготовленных с применением быстрой термообработки.

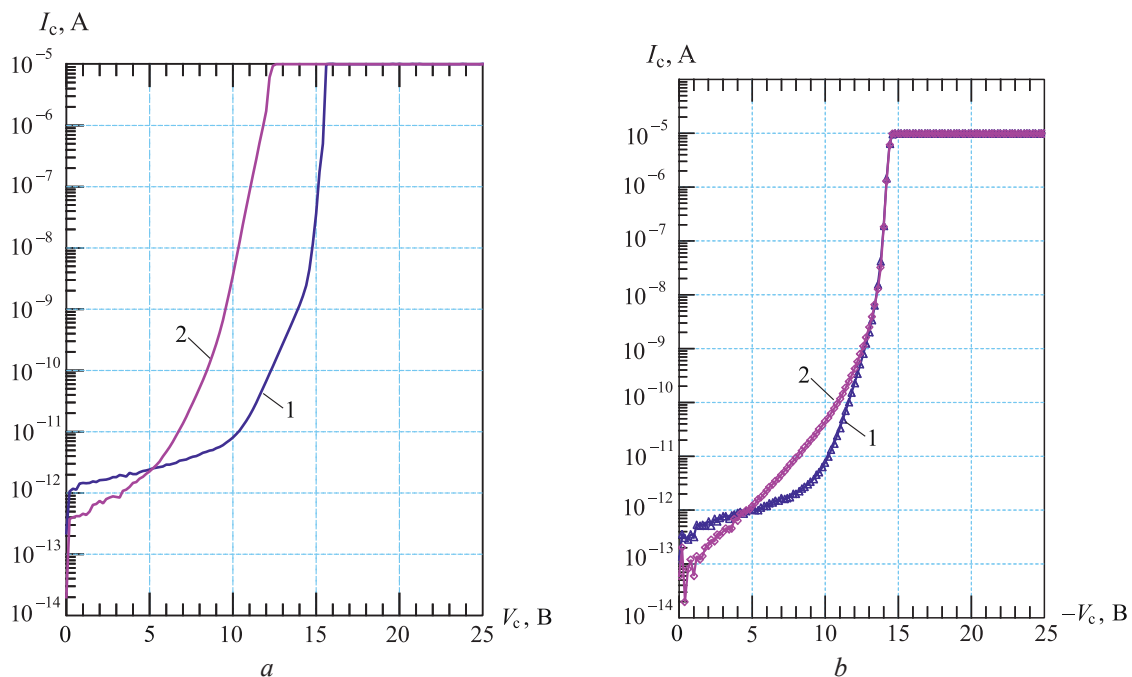
Из рис. 2 видно, что величина тока стока  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов при использовании длительной термообработки для формирования контакта алюминий-поликремний значительно больше, чем при быстрой термообработке. Данный факт обусловлен тем, что при длительной термообработке микрорельеф контакта алюминий-поликремний более развит, чем при быстрой, что приводит к большей его площади в первом случае. Поскольку контакт к затвору лежит вне транзистора, увеличение площади контакта ведет к увеличению тока к затвору, а, следовательно, и к росту напряжения на нем. Это будет приводить к уменьшению сопротивления канала и к более высокому току стока, чем в случае формирования контакта алюминий-поликремний с применением быстрой термообработки.



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на стоке  $V_c$  для  $n$ -МОП (а) и  $p$ -МОП (б) транзисторов при различных напряжениях на затворе  $V_g$  с применением быстрой (1) и длительной (2) термообработок

**Fig. 2.** Current-voltage characteristic of the drain current  $I_c$  on the drain voltage  $V_c$  for  $n$ -MOS (a) and  $p$ -MOS (b) transistors at different gate voltages  $V_g$  using rapid (1) and long-term (2) heat treatments

Исследование зависимости тока стока  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов от подаваемого на сток напряжения позволило установить следующие закономерности (рис. 3). При использовании для формирования омических контактов к стоку и затвору длительной термической обработки для  $n$ -канального транзистора после подачи на сток напряжения более 5 В ток стока становится значительно выше при более низких напряжениях стока, чем на приборах, изготовленных с применением быстрой термообработки. Это объясняется тем, что при таком напряжении происходит лавинный пробой локальных  $p$ - $n$ -переходов в области  $n^+$ -истока, сформированных на его поверхности за счет выделения островков эпитаксиально рекристаллизованного кремния, легированного алюминием, т. е. имеющих  $p$ -тип проводимости. Возникновение лавинного пробоя в области стока вызывает увеличение площади омического контакта и дальнейшее его развитие с увеличением напряжения на стоке вплоть до пробоя стока при напряжении 12 В. В случае быстрой термообработки такие островки кремния на поверхности стока практически отсутствуют, что и обуславливает их лучшие характеристики. Так, напряжение пробоя стока для них составляет 15,5 В.



**Рис. 3.** Вольт-амперная характеристика зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на стоке  $V_c$  для  $n$ -МОП (а) и  $p$ -МОП (б) транзисторов при быстрой (1) и длительной (2) термообработках  
**Fig. 3.** Current-voltage characteristic of the drain current  $I_c$  on the drain voltage  $V_c$  for  $n$ -MOS (а) and  $p$ -MOS (б) transistors, using rapid (1) and long-term (2) heat treatments

Для  $p$ -канального транзистора, изготовленного с применением длительной термообработки, наблюдается увеличение тока стока в области от 5 до 12 В. Это обуславливается наличием островков кремния  $p$ -типа проводимости, сформированных в результате эпитаксиальной рекристаллизации кремния из пленки алюминия на поверхности  $p^+$ -стокового контакта, что приводит к увеличению его контактного сопротивления и, как следствие, – к незначительному росту стокового напряжения и росту тока стока. Существенным отличием  $p$ -канального транзистора от  $n$ -канального, изготовленного с применением длительной и быстрой термообработок, является отсутствие на нем уменьшения напряжения пробоя стока. Данный результат связан с различной природой роста контактного сопротивления для  $n^+$ - и  $p^+$ -стоковых контактов, который в первом случае связан с формированием локальных областей с  $p$ - $n$ -переходами на стоковом контакте, а во втором – с локальными областями с более низкой концентрацией носителей  $p$ -типа. Поскольку контактное сопротивление в первом случае будет гораздо больше, чем во втором, то и падение напряжения на стоковом контакте в первом случае будет гораздо больше, чем во втором, что не привело к снижению пробоя стока для  $p$ -канального транзистора.

## Заключение

1. Применение быстрой термической обработки (450 °С, 7 с) для формирования омических контактов алюминий-поликремний в отличие от стандартной технологии (450 °С, 20 мин) позволяет значительно улучшить электрические характеристики *n*-МОП и *p*-МОП транзисторов. Подпороговые характеристики *n*- и *p*-канальных транзисторов показали, что в области напряжений на затворе более 0,65 В ток стока после длительной термообработки выше, чем после быстрой.

2. Анализ вольт-амперных характеристик зависимости тока стока от напряжения на стоке показал, что ток стока при длительной термообработке значительно выше, чем при быстрой. При этом для длительной термообработки имеют место уменьшение напряжения пробоя канала для *n*-канальных транзисторов и увеличение тока стока в области более 5 В для *p*-канальных. Такие улучшения связаны с отсутствием конгломератов поликремния в алюминии, со значительным уменьшением эпитаксиальной рекристаллизации кремния, легированного алюминием, а также со снижением микрорельефа границы раздела контакта и с уменьшением роста размера контактных окон за счет бокового взаимодействия алюминия с поликремнием.

## Список литературы

1. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. Минск: Изд. центр Бел. гос. ун-та, 2004.
2. Влияние термической нагрузки при формировании контактов Al-Al на электрические параметры интегральных микросхем с контактами Al-поликремний / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 7. С. 20–27.
3. Влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий-поликремний / В. А. Пилипенко [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2023. № 2. С. 51–57.
4. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / О. А. Агеев [и др.]. Харьков: Науч.-технол. комплекс «Институт монокристаллов» НАН Украины, 2008.
5. Афонин, Н. Н. Модель взаимодиффузии при формировании тонких пленок металлов на монокристаллическом кремнии в условиях ограниченной растворимости компонентов / Н. Н. Афонин, В. А. Логачева // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. Т. 24, № 1. С. 129–135.
6. Пилипенко, В. А. Взаимодействия кремния с алюминием при фотонной обработке / В. А. Пилипенко, В. В. Рожков, В. А. Горушко // Электронная техника. 1990. Сер. 2, вып. 3. С. 24–28.
7. Пилипенко, В. А. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки / В. А. Пилипенко, В. Н. Пономарь, В. А. Горушко // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 4. С. 95–98.
8. Влияние временных режимов термообработки на микроструктуру системы Pt-Si / В. А. Солодуха [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 2. С. 105–111.
9. Формирование подзатворного диэлектрика нанометровой толщины методом быстрой термообработки / Н. С. Ковальчук [и др.] // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 4. С. 103–112.
10. Шугуров, А. Р. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях / А. Р. Шугуров, А. В. Панин // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, вып. 12. С. 1971–1994.
11. Sachenko, A. V. Current Flow Through Metal Shunts in Ohmic Contacts to  $n^+$ -Si // A. E. Belyaev, V. A. Pilipenko // J. Semiconductors. 2014. Vol. 48, No 4. P. 492–496.

## References

1. Pilipenko V. A. *Rapid Thermal Processing in VLSI Technology*. Minsk, Publishing Center of Belarusian State University (in Russian).
2. Pilipenko V. A., Soloduha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov Ja. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. (2022) Thermal Load Influence During the Formation of Al-Al contacts on the Electrical Parameters of the Integrated Circuits with Al-Polysilicon Contacts. *Doklady BGUIR*. 20 (7), 20–27 (in Russian).
3. Pilipenko V. A., Kovalchuk N. S., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V., Anischik V. M., Ponariadov V. V. (2023) The Influence of Long-Term and Rapid Heat Treatments on the Formation of the Aluminum-Polysilicon Interface. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. (2), 51–57 (in Russian).
4. Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V., Milenin V. V., Pilipenko V. A. (2008) *Phases of Implantation in Semiconductor Devices and VLSI Technology*. Kharkov, Scientific and Technological Complex “Institute of Single Crystals” of the National Academy of Sciences of Ukraine (in Russian).
5. Afonin N. N., Logachova V. A. (2022) Model of the Formation of Thin Films of Metals on Single-Crystalline Silicon Under Conditions of Limited Solubility of Components. *Condensed Matter and Interphase Boundaries*. 24 (1), 129–135 (in Russian).

6. Pilipenko V. A., Rozhkov V. V., Gorushko V. A. (1990) Interactions of Silicon with Aluminum During Photonic Processing. *Electronic Equipment*. 2 (3), 24–28 (in Russian).
7. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Gorushko V. A. (2003) Controlling the Properties of Thin Film Systems Using Pulsed Photonic Processing. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 76 (4), 95–98 (in Russian).
8. Soloduha V. A., Pilipenko V. A., Komarov F. F., Gorushko V. A. (2020) Influence of Time Modes of Thermal Treatment on Pt-Si System Microstructure. *Doklady BGUIR*. 18 (2), 105–111 (in Russian).
9. Kovalchuk N. S., Omelchenko A. A., Pilipenko V. A., Soloduha V. A., Shestovski D. V. (2021) Formation of a Gate Dielectric of Nanometer Thickness Using Rapid Heat Treatment. *Doklady BGUIR*. 19 (4), 103–112 (in Russian).
10. Shugurov A. R., Panin A. V. (2020) Mechanisms of Stressgeneration in Thin Films and Coatings. *Journal of Technical Physics*. 90 (12), 1971–1994 (in Russian).
11. Sachenko A. V., Pilipenko V. A. (2014) Current Flow Through Metal Shunts in Ohmic Contacts to  $n^+$ -Si. *J. Semiconductors*. 48 (4), 492–496.

### Вклад авторов

Пилипенко В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В. осуществили постановку задачи для проведения исследования, участвовали в обсуждении результатов.

Пилипенко В. А., Жигулин Д. В. провели изготовление образцов и их измерения, подготовили аналитический обзор по тематике, выполнили анализ и систематизацию полученных результатов, подготовили рукопись статьи.

### Authors' contribution

Pilipenko V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov Ja. A., Shestovski D. V. carried out the formulation of the task for the research, participated in the discussion of the results.

Pilipenko V. A., Zhyhulin D. V. conducted the preparation of samples and their measurements, prepared an analytical review on the subject, analyzed and systematized the results, prepared the manuscript of the article.

### Сведения об авторах

**Пилипенко В. А.**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси, зам. дир. по научному развитию Государственного центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

**Ковальчук Н. С.**, канд. техн. наук, доц., первый зам. глав. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ»

**Соловьёв Я. А.**, канд. техн. наук, доц., зам. дир. филиала «Транзистор», ОАО «ИНТЕГРАЛ»

**Шестовский Д. В.**, инж.-техн. отдела перспективных технологических процессов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

**Жигулин Д. В.**, нач. сектора физико-технического анализа Государственного центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ»

### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Казинца, 121а  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Тел.: +375 29 684-43-35  
E-mail: zhygulin@mail.ru  
Жигулин Дмитрий Владимирович

### Information about the authors

**Pilipenko V. A.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the “Belmicroanalysis” State Center, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

**Kovalchuk N. S.**, Cand. of Sci., Associate Professor, First Deputy Chief Engineer, JSC “INTEGRAL”

**Solovjov Ja. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch, JSC “INTEGRAL”

**Shestovski D. V.**, Engineer-Technologist at the Advanced Technological Processes Department, JSC “INTEGRAL”

**Zhyhulin D. V.**, Head of the Sector of Physical and Technical Analysis of the “Belmicroanalysis” State Center, JSC “INTEGRAL”

### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Kazintsa St., 121a  
JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL”  
Tel.: +375 29 684-43-35  
E-mail: zhygulin@mail.ru  
Zhyhulin Dmitry Vladimirovich