



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-20-27>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТОВ Al-Al НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С КОНТАКТАМИ АЛЮМИНИЙ-ПОЛИКРЕМНИЙ

В. А. ПИЛИПЕНКО, В. А. СОЛОДУХА, 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 11.08.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Статья посвящена установлению влияния применения быстрой термической обработки (450 °С, 7 с) для формирования омического контакта между двумя слоями алюминиевой металлизации на электрические параметры и надежность интегральных микросхем. В качестве анализируемых параметров выбраны величины сопротивлений контактных цепочек алюминий-кремний, алюминий-поликремний, поликремний-кремний p<sup>+</sup>, алюминий-кремний p<sup>+</sup>, вольт-амперные характеристики тестовых биполярных транзисторов, а также результаты анализа их надежности путем проведения термополевых испытаний. Сравнение этих параметров проводилось относительно микросхем, изготовленных с применением стандартной термообработки (450 °С, 20 мин) для формирования данного контакта. Анализ результатов величины сопротивления различных контактных цепочек показал, что независимо от вида термообработки все контактные цепочки, за исключением цепочки контактов алюминий-поликремний, имеют практически одинаковое сопротивление. Путем анализа элементного состава скола в области данного контакта методом растровой электронной микроскопии установлено, что при быстрой термической обработке глубина проникновения алюминия в поликремний в два раза меньше, чем при стандартном его формировании, за счет уменьшения в два раза времени воздействия высокой температуры. Это приводит к более низкой концентрации алюминия в кремнии и, как результат, – к более высокому контактному сопротивлению между алюминием и поликремнием. Анализ вольт-амперных характеристик показал, что все они идентичны за исключением хода прямой ветви зависимости величины базового тока от напряжения эмиттер-база. Отклонение линейного характера данной зависимости в области малых значений напряжения ( $\leq 200$  мВ) в случае формирования омических контактов Al-Si и Al-Al с применением длительных термических обработок обусловлено преобладанием в данной области генерационно-рекомбинационного тока, связанного с повышенной плотностью ловушек в обедненной области и на поверхности полупроводника. Идеальное поведение базового тока в зависимости от напряжения эмиттер-база сохраняется с применением быстрой термообработки по формированию контакта Al-Al за счет устранения ловушек как в обедненном слое, так и на поверхности полупроводника. Проведенные испытания на надежность таких изделий показали, что она не зависит от вида формирования омического контакта между слоями металлизации.

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

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

**Для цитирования.** Пилипенко В. А., Солодуха В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В., Жигулин Д. В. Влияние термической нагрузки при формировании контактов Al-Al на электрические параметры интегральных микросхем с контактами алюминий-поликремний. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 20–27.

## THERMAL LOAD INFLUENCE DURING THE FORMATION OF Al-Al CONTACTS ON THE ELECTRICAL PARAMETERS OF THE INTEGRATED CIRCUITS WITH ALUMINUM-POLYSILICON CONTACTS

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

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

*Submitted 11.08.2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** This work is devoted to establishing the effect of using rapid thermal processing (RTP) method (450 °C, 7 s) to form an ohmic contact between two layers of aluminum metallization on the electrical parameters and reliability of integrated circuits. The resistance values of contact chains aluminum-silicon, aluminum-polysilicon, polysilicon-silicon n<sup>+</sup>, aluminum-silicon n<sup>+</sup>, current-voltage characteristics of the tested bipolar transistors, as well as the results of the reliability analyses by conducting thermal field tests were chosen as the analyzed parameters of this microcircuit. Comparison of these parameters was carried out with respect to the microcircuits manufactured using standard RTP method (450 °C, 20 min) to form this contact. An analysis of the results of the resistance value of various contact chains showed that, regardless of the type of thermal treatment, all contact chains, with the exception of the aluminum-polysilicon contact chain, have almost the same resistance. By analyzing the elemental composition of the cleavage in the area of this contact by scanning electron microscopy, it was found that during rapid heat treatment, the depth of penetration of aluminum into polysilicon is 2 times less than during its standard formation due to a 2-fold reduction in the time of exposure to high temperature compared to the standard process. This leads to a lower concentration of the aluminum in the silicon and as a result to a higher contact resistance between the aluminum and polysilicon. An analysis of the current-voltage characteristics showed that they are all identical, except for the course of the direct branch of the base current value from the emitter-base voltage. The deviation of the linear nature of this dependence in the region of their low voltage values ( $\leq 200$  mV) in the case of the formation of ohmic Al-Si and Al-Al contacts with the use of long-term heat treatments is due to the predominance of the generation-recombination current in this region associated with an increased density of traps in the depleted region and on the surface of the semiconductor. The ideal behavior of the base current versus the emitter-based voltage is maintained by applying rapid RTP method to form an Al-Al contact by eliminating traps both in the depletion layer and on the surface of the semiconductor. The tests carried out on the reliability of these products showed that it does not depend on the type of formation of ohmic contacts between the metallization layers.

**Keywords:** rapid thermal processing method, ohmic contact, thermal load, I-V characteristics.

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

**For citation.** Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov J. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. Thermal Load Influence during the Formation of Al-Al Contacts on the Electrical Parameters of the Integrated Circuits with Aluminum-Polysilicon Contacts. *Doklady BGUIR*. 2022. 20 (7), 20–27.

### Введение

Одним из основных условий увеличения степени интеграции электронной элементной базы, а также повышения ее надежности, является снижение тепловой нагрузки, оказываемой на полупроводниковую пластину в процессе формирования на ней интегральных микросхем (ИМС). Данный подход позволяет уменьшить перераспределение введенной при ионном легировании примеси, величину переходного слоя «эпитаксиальная пленка – скрытый n<sup>+</sup>-слой», глубину проникновения алюминия в кремний и практически исключить загрязнение полупроводникового материала неконтролируемыми примесями [1]. Особенно остро этот вопрос стоит при формировании омических контактов к кремнию и поликремнию

с применением длительной термической обработки (510 °С, 10 мин). Как ранее установлено, такая термическая обработка для формирования омических контактов вызывает интенсивное взаимодействие кремния с алюминием, приводящее к значительному ухудшению параметров создаваемых ИМС, а, следовательно, к снижению процента выхода годных изделий [2]. Согласно [2], здесь имеет место либо значительное проникновение алюминия в кремний для пленок чистого алюминия, либо образование островков кремния, легированного алюминием, на границе между алюминием и кремнием для пленок алюминия, легированного кремнием. В первом случае это приводит к уменьшению пробивных напряжений эмиттер-база или даже к их короткому замыканию, во втором – к повышению контактного сопротивления алюминий-кремний  $n^+$ .

Один из методов, существенно снижающих диффузионные процессы при высокотемпературных обработках, в том числе при формировании омических контактов, – применение быстрых термических обработок [3–11]. Однако в этих публикациях рассматриваются моменты, касающиеся только формирования омического контакта между алюминием и монокристаллическим кремнием. При этом совершенно не затрагиваются вопросы по формированию такого контакта с поликристаллическим кремнием и влияния на его поведение снижения температурных нагрузок при создании многоуровневой металлизации. Проведение таких исследований позволит установить основные причины его деградации при использовании длительной термической обработки и предложить пути их уменьшения.

### Методика проведения эксперимента

Для исследования влияния быстрой термообработки на электрические параметры ИМС выбрали микросхему, имеющую в своем составе как биполярные, так и МОП-транзисторы с поликремневыми эмиттерами и затворами. В данном случае термообработкой либо процессом быстрой термообработки (БТО) формировались омические контакты между первым и вторым уровнями алюминиевой металлизации.

Стандартную термообработку проводили в атмосфере  $N_2$  с температурой основного интервала 450 °С и длительностью 20 мин. Термообработку выполняли для всех пластин после напыления первого уровня Al и для одной части пластин после напыления второго уровня Al. Для второй части пластин после напыления второго слоя Al проводили БТО.

Процесс БТО пластин выполнялся в стационарной атмосфере  $N_2$  при атмосферном давлении системой УБТО ПИТ1801. Пластины облучались с непланарной стороны потоками фотонов 20 галогенных ламп импульсами постоянной мощности длительностью 7 с в режиме теплового баланса. Мощность излучения ламп подбирали предварительно по достижении максимальной температуры фотонной обработки 450 °С в течение 7 с при проведении тестовых процессов на аналогичных пластинах.

В качестве анализируемых параметров ИМС были выбраны величины сопротивлений контактных цепочек алюминий-кремний, алюминий-поликремний, поликремний-кремний  $n^+$ , алюминий-кремний  $n^+$ , вольт-амперные характеристики тестовых биполярных транзисторов, а также результаты анализа их надежности путем проведения термополевых испытаний. Определение величин сопротивлений контактных цепочек и измерения вольт-амперных характеристик тестовых транзисторов осуществляли на комплексе прецизионных измерений вольт-амперных (I-V) и вольт-фарадных (C-V) характеристик B1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade.

Оценку надежности микросхемы выполняли путем проведения термополевых испытаний подзатворного диэлектрика. При этом оценивали изменения параметров МОП-структуры после перевода ее в состояние принудительного распределения подвижных ионов вблизи границы раздела «кремний – диэлектрик» относительно исходного состояния. Процедура оценки надежности состояла из следующих операций:

- измерение исходной вольт-амперной характеристики для МОП-транзистора;
- выдержка структуры при температуре  $T = 200$  °С в течение  $t = 5$  мин с приложением положительного потенциала на затвор относительно подложки (кармана) величиной, соответствующей напряженности электрического поля в диэлектрике  $E = 2$  МВ/см;

- охлаждение образца до температуры  $T \leq 40$  °С без снятия напряжения на затворе;
- измерение конечной сток-затворной вольт-амперной характеристики для МОП-транзистора.

Изменение параметров МОП-структуры оценивали по величине сдвига порогового напряжения для МОП-транзисторов путем анализа его величины и соответствия ее установленным нормам. Исследование границы раздела контакта алюминий-поликремний осуществляли на его сколе путем анализа изображения и распределения элементного состава на сколе в области данного контакта с применением растрового электронного микроскопа S-4800 фирмы Hitachi (Япония) с энергодисперсионным спектрометром Quantax 200 фирмы Bruker (Германия).

### Результаты исследований и их обсуждение

Анализ результатов величины сопротивления различных контактных цепочек, полученных на тестовых элементах ИМС, показал, что в независимости от вида термообработки все контактные цепочки, за исключением цепочки контактов алюминий-поликремний (Al-poly-Si), имеют практически одинаковое сопротивление (табл. 1).

**Таблица 1.** Влияние вида термообработки на величину сопротивления контактных цепочек интегральных микросхем с двухуровневой системой металлизации

**Table 1.** Influence of the type of thermal treatment on the resistance value of contact chains with a two-level metallization system

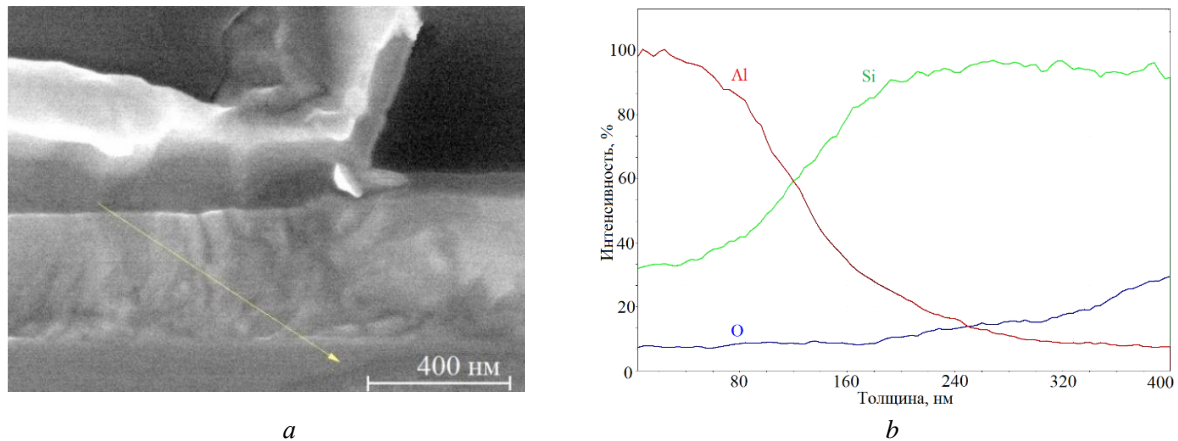
Параметр / Parameter	Вид термообработки для формирования омических контактов / Type of heat treatment for the formation of ohmic contacts	
	Первый и второй уровни Al-металлизации (450 °С, 20 мин) / First and second levels of Al-plating (450 °С, 20 min)	Первый (450 °С, 20 мин) и второй (450 °С, 7 с) уровни Al-металлизации / First (450 °С, 20 min) and second (450 °С, 7 s) levels Al-plating
Сопротивление контактной цепочки, кОм: Al-p <sup>+</sup> -Si	88,08	88,05
Al-poly-Si	16,70	18,17
Al-n <sup>+</sup> -Si	19,26	19,57
Al-n <sup>+</sup> -Si	7,09	7,85

Учитывая, что в случае длительной термической обработки (450 °С в течение 20 мин) для формирования омических контактов как первого уровня алюминиевой металлизации к поликремнию и кремнию, так и второго уровня алюминиевой металлизации к нижнему слою разводки, контакты первого уровня разводки фактически подвергаются термообработке в течение 40 мин. В этом случае следует ожидать, что за счет более длительного времени диффузии алюминия в поликремний (по сравнению с использованием для формирования контакта Al-Al быстрой термообработки при 450 °С в течение 7 с) глубина проникновения алюминия в поликремний должна быть больше в два раза, а также выше его концентрация. Поскольку диффузия алюминия в поликремний идет в основном по межзеренному пространству, то это должно приводить к снижению сопротивления поликремния, а следовательно, и к более низкому сопротивлению контактной цепочки Al-poly-Si, что имеет место в действительности.

Для подтверждения предположения о разной глубине диффузии алюминия в поликремний при формировании омических контактов при различных видах термообработки методом растровой электронной микроскопии на сколах кристалла, проходивших через контакт Al-poly-Si, анализировали элементный состав по глубине скола (рис. 1, 2).

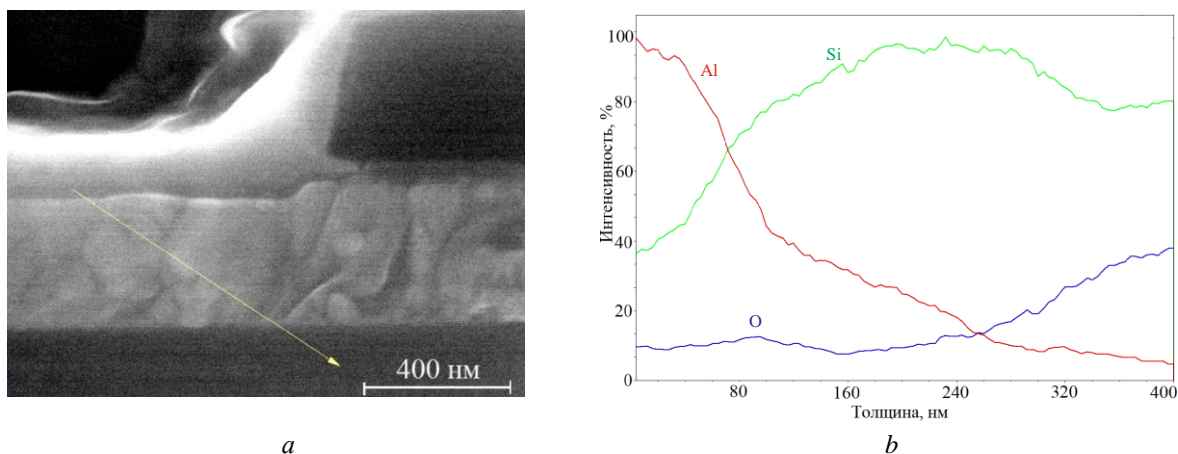
Как показали проведенные исследования в случае применения БТО (450 °С, 7 с) для формирования омического контакта между двумя слоями металлизации, глубина проникновения алюминия в поликремний в два раза меньше, чем при стандартном его формировании. Это обуславливается тем, что в первом случае время воздействия высокой температуры (450 °С, 20 мин) в два раза меньше, чем время воздействия данной температуры в стандартном процессе формирования омических контактов. Кроме того, по результатам исследований также видны изменения как в величине концентрации кремния в алюминии, так и смещение границы раздела Al-poly-Si в сторону поликремния. Увеличение концентрации кремния в алюминии полностью обуславливается как его диффузией в пленку алюминия,

так и насыщением алюминием пленки поликремния. При этом данные процессы протекают быстро потому, что идут по границам зерен, где коэффициенты Al в Si и Si в Al значительно выше, чем при формировании контакта алюминия с монокристаллическим кремнием.



**Рис. 1.** Вид скола контакта алюминий-полукремний (а) и профиль распределения элементов по указанному на нем направлению (b) для приборов с формированием омического контакта между слоями металлизации с применением длительной термообработки

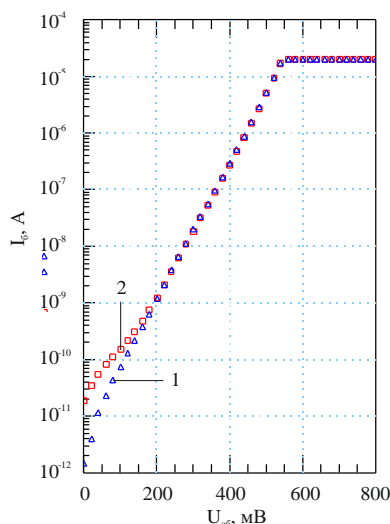
**Fig. 1.** View of the cleavage of the aluminum-polosilicon contact (a) and the profile of the distribution of elements along the direction indicated on it (b) for devices with the formation of an ohmic contact between metallization layers using long thermal treatment



**Рис. 2.** Вид скола контакта алюминий-полукремний (а) и распределение элементов по указанному на нем направлению (b) для приборов с формированием омического контакта между слоями металлизации с применением быстрой термообработки

**Fig. 2.** View of the cleavage of the aluminum-polosilicon contact (a) and the distribution of elements along the direction indicated on it (b) for devices with the formation of an ohmic contact between metallization layers using rapid thermal processing

Данное обстоятельство объясняется, с одной стороны, снижением энергии активации процесса диффузии по межзеренному пространству по сравнению с объемным материалом, а с другой – более низкой энергией активации процессов диффузии для материалов, имеющих поликристаллическую структуру. В конечном счете, происходит как уменьшение толщины пленки поликремния, так и насыщение его поверхности алюминием. Насыщение алюминия кремнием приводит к увеличению его сопротивления из-за насыщения его межзеренного пространства кремнием, препятствующим протеканию электрического тока через эти границы. Для решения вопроса о влиянии применения БТО при формировании омического контакта между двумя слоями металлизации на параметры тестового биполярного транзистора, входящего в состав ИМС, проводили анализ его вольт-амперных характеристик на приборах, изготовленных по традиционной технологии и с применением БТО. Анализ полученных результатов показал, что все характеристики идентичны за исключением хода прямой ветви зависимости величины базового тока от напряжения эмиттер-база (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость величины базового тока от напряжения эмиттер-база для приборов с формированием омических контактов Al-Si и Al-Al с применением длительных (450 °С, 20 мин в среде N<sub>2</sub>) (1) и быстрой термообработок (450 °С, 7 с в среде N<sub>2</sub>) для формирования контакта Al-Al (2)  
**Fig. 3.** Dependences of the value of the base current on the emitter-base voltage for devices with the formation of ohmic Al-Si and Al-Al contacts with the use of long (450 °C, 20 min in N<sub>2</sub> medium) (1) and the use of RTP (450 °C, 7 s in N<sub>2</sub> medium) for forming Al-Al contact (2)

Отклонение линейного характера зависимости величины базового тока от напряжения эмиттер-база в области их малых значений ( $\leq 200$  мВ) в случае формирования омических контактов Al-Si и Al-Al с применением длительных термических обработок (450 °С, 20 мин в среде N<sub>2</sub>) происходит из-за преобладания в данной области генерационно-рекомбинационного тока, обусловленного повышенной плотностью ловушек в обедненной области и на поверхности полупроводника. Образование таких ловушек на поверхности связано в основном с наличием на ней или вблизи ее ионных загрязнений, а также деформационных нарушений кристаллической решетки кремния за счет ее химико-механической полировки. Такие ловушки индуцируют образование зарядов в кремнии, приводя к формированию поверхностных каналов или поверхностных обедненных слоев [12]. Их наличие из-за влияния на обедненную область  $p$ - $n$ -перехода приводит к возрастанию поверхностных токов утечки за счет генерационно-рекомбинационного тока.

В случае применения БТО (450 °С, 7 с в среде N<sub>2</sub>) для формирования контакта Al-Al идеальное поведение базового тока в зависимости от напряжения эмиттер-база сохраняется. Данный результат позволяет утверждать, что при таком виде нагреве для формирования контакта Al-Al можно практически устранить данные ловушки как в обедненном слое, так и на поверхности полупроводника.

Для анализа влияния применения БТО при формировании омического контакта между слоями металлизации на надежность ИМС по сравнению с традиционным методом его формирования проводили термополевые испытания. По их результатам отмечено, что надежность данных изделий соответствует установленным нормам и не зависит от вида формирования омического контакта между слоями металлизации. Это означает, что применение БТО для формирования такого контакта не приводит к ухудшению надежности изделия и может быть использовано для уменьшения тепловых нагрузок при его создании.

### Заключение

Использование в технологическом маршруте создания интегральных микросхем процесса быстрой термообработки пластин в стационарной атмосфере N<sub>2</sub> с длительностью фотонной обработки 7 с и максимальной температурой 450 °С для формирования омических контактов между первым и вторым уровнями алюминиевой металлизации приводит к увеличению сопротивления цепочки контактов алюминий-поликремний. Данное обстоятельство обуславливается тем, что глубина проникновения алюминия в поликремний в два раза меньше, чем при стандартном его формировании, что приводит к более низкой концентрации алюминия

в кремнии и, как результат, – к более высокому контактному сопротивлению между алюминием и поликремнием. При этом имеет место устранение генерационно-рекомбинационного тока, связанного с повышенной плотностью ловушек в обедненной области и на поверхности полупроводника. Испытания на надежность таких изделий показали, что она не зависит от вида формирования омического контакта между слоями металлизации.

### Список литературы

1. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. Минск: Издательский центр БГУ, 2004.
2. Технология СБИС. Т. 2 / Под ред. С. М. Зи. М.: Мир, 1986.
3. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / О. А. Агеев [и др.]. Харьков: НТК Институт монокристаллов, 2008.
4. Физические основы быстрой термообработки. Создание многоуровневой металлизации / В. М. Анищик [и др.]. Минск: БГУ, 2000.
5. Особенности взаимодействия системы Al-Si при термической и импульсной оптической обработках / Л. Д. Буйко [и др.] // Электронная техника. 1984. Сер. 6, вып. 2. С. 16–19.
6. Пилипенко, В. А. Использование фотонных технологических процессов при изготовлении интегральных микросхем / В. А. Пилипенко, Ю. П. Попов // Электронная промышленность. 1988. Вып. 5. С. 3–9.
7. Пилипенко, В. А. Модель 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.
8. Улучшение термостабильности пленок алюминия и его сплавов на кремнии с использованием быстрой термообработки / В. А. Пилипенко [и др.] // Вестник БГУ. 1998. Сер. 1, № 3. С. 53–58.
9. Пилипенко, В. А. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки / В. А. Пилипенко, В. Н. Пономарь, В. А. Горушко // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 4. С. 95–98.
10. Моделирование морфологии пленок алюминия до и после различных видов термообработки / В. А. Пилипенко [и др.] // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 4. С. 99–103.
11. Токотенос по металлическим шунтам в омических контактах  $n^+$ -Si / А. В. Саченко [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, вып. 4. С. 509–514.
12. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, Lee M. K. New York: John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012.

### References

1. Pilipenko V. A. (2004) *Rapid Thermal Processing in VLSI Technology*. Minsk, Publishing Center of Belarusian State University (in Russian).
2. Sze S. M. (ed.) (1986) *VLSI Technology*. 2. Moscow, Mir (in Russian).
3. 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, NTK Institute of Single Crystals (in Russian).
4. Anyshchik V. M., Horushko V. A., Pylypenko V. A., Ponomar V. N., Ponaryadov V. V. (2000) *Physical Fundamentals of Rapid Thermal Processing. Creation of Multilevel Metallization*. Minsk, Belarusian State University (in Russian).
5. Buiko L. D., Lesnikova V. P., Pilipenko V. A., Rozhkov V. V. (1984) Features of Al-Si System Interaction During Thermal and Pulsed Optical Processing. *Elektronnaya Tekhnika = Electronic Technique*. 6 (2), 16–19 (in Russian).
6. Pilipenko V. A., Popov Yu. P. (1988) The Use of Photonic Technological Processes in the Manufacture of Integrated Circuits. *Elektronnaya Promyshlennost = Electronic Industry*. (5), 3–9 (in Russian).
7. Pilipenko V. A., Rozhkov V. V., Horushko V. A. (1990) Model of Interaction of Silicon with Aluminum During Photonic Processing. *Elektronnaya Tekhnika = Electronic Technique*. 2 (3), 24–28 (in Russian).
8. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Horushko V. A., Tarasik M. I., Yanchenko A. M. (1998) Improving the Thermal Stability of Aluminum Films and its Silicon Alloys Using Rapid Heat Treatment. *Vestnik BGU = Newsletter of BSU*. 1 (3), 53–58 (in Russian).
9. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Horushko V. A. (2003) Control of Properties of Thin-Film Systems Using Pulsed Photon Processing. *IFJ = EPJ*. 76 (4), 95–98 (in Russian).
10. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Molofeev V. M., Mikhnyuk A. N., Borzdov V. M. (2003) Modeling the Morphology of Aluminum Films before and after Various Types of Heat Treatment. *IFJ = EPJ*. 76 (4), 99–103 (in Russian).
11. Savchenko A. V., Belyaev A. E., Pilipenko V. A., Petlitskaya T. V., Anishchik V. M., Boltovets N. S., Konakova R. V., Kudrik Ya. Ya., Vinogradov A. O., Sheremet V. N. (2014) Current Transfer via Metal

- Shunts in Ohmic Contacts n<sup>+</sup>-Si]. *Fizika i Tekhnologiya Poluprovodnikov = Physics and Technology of Semiconductors*. 48 (4), 509–514 (in Russian).
12. Sze S. M., Lee M. K. (2012) *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York, John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited.

### Вклад авторов

Пилипенко В. А., Солодуха 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 этой статьи.

### Authors' contribution

Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov J. 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 this article.

### Сведения об авторах

**Пилипенко В. А.**, д.т.н., профессор, член-кор. НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию Государственного центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

**Солодуха В. А.**, д.т.н., генеральный директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

**Ковальчук Н. С.**, к.т.н., доцент, первый зам. главного инженера ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

**Соловьёв Я. А.**, к.т.н., доцент, замдиректора филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

**Шестовский Д. В.**, инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

**Жигулин Д. В.**, начальник сектора физико-технического анализа Государственного центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «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, Corr. Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the “Belmicroanalysis” State Center of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

**Solodukha V. A.**, Dr. of Sci. (Tech.), General Director of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

**Kovalchuk N. S.**, Cand. of Sci., Assistant Professor, First Deputy Chief Engineer of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

**Solovjov J. A.**, Cand. of Sci., Assistant Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

**Shestovski D. V.**, Engineer-Technologist of the Advanced Technological Processes Department of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

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

### Address for correspondence

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