

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ/DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT**DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97> EDN: YGECUC**ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ ПРИ 600°C НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФфуЗИОННОГО КОНТАКТА АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ**

Научная статья

Назмиев А.И.^{1,*}, Михеев И.Д.², Дробышев С.В.³¹ORCID : 0009-0005-1986-2633;^{1, 2, 3} Казанский национальный исследовательский университет им. Туполева - КАИ, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (albert.nazmiev[at]mail.ru)

Предложена: 25.08.2026; Принята: 13.10.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

В работе представлен комплексный анализ влияния времени изотермической выдержки при температуре 600°C на электрофизические характеристики контактов на основе Al/Si. Рассмотрены механизмы диффузионных процессов и фазообразования, а также их корреляция с изменением удельного контактного сопротивления. Температура 600°C определена как критическая для активации диффузии алюминия в кремний, а время выдержки — как ключевой параметр, определяющий термическую стабильность и электрические свойства контактов. В экспериментальной части исследовано влияние длительности отжига (от 3 до 6 минут) при 600°C на сопротивление и вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта алюминий-кремний.

Анализ прямой и обратной ветвей ВАХ показал, что время выдержки является решающим фактором термической стабильности. Экспериментально установлено, что оптимальной является изотермическая выдержка в течение 5 минут, обеспечивающая минимальное среднее прямое сопротивление (545 ± 12 Ом при доверительной вероятности 0,95 и объёме выборки $n = 5$) и высокую однородность границы раздела (коэффициент вариации сопротивления не превышает 2,2%). Увеличение времени выдержки до 6 минут приводит к статистически значимому росту сопротивления на 24% ($p < 0,05$, критерий Манна-Уитни) и усилению нелинейности характеристик.

Ключевые слова: контакт алюминий-кремний, изотермический отжиг, диффузия, контактное сопротивление, вольт-амперная характеристика.

THE INFLUENCE OF ISOTHERMAL CURING TIME AT 600°C ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF AN ALUMINIUM-SILICON DIFFUSION CONTACT

Research article

Nazmiev A.I.^{1,*}, Mikhhev I.D.², Drobishev S.V.³¹ORCID : 0009-0005-1986-2633;^{1, 2, 3} Tupolev Kazan National Research University - KAI, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (albert.nazmiev[at]mail.ru)

Suggested: 25.08.2026; Accepted: 13.10.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The work presents a complex analysis of the effect of isothermal curing at 600°C on the electrophysical characteristics of Al/Si-based contacts. The mechanisms of diffusion processes and phase formation are examined, as well as their correlation with changes in the specific contact resistance. A temperature of 600°C is identified as the critical temperature for the activation of aluminium diffusion into silicon, and the holding time is identified as the key parameter determining the thermal stability and electrical properties of the contacts. In the experimental section, the effect of annealing duration (from 3 to 6 minutes) at 600°C on the resistance and current-voltage characteristics (CVC) of the aluminium-silicon contact was studied.

Analysis of the forward and reverse current-voltage curves showed that the curing is a decisive factor in thermal stability. It was experimentally established that an isothermal curing of 5 minutes is optimal, ensuring a minimum average forward resistance ($545 \pm 12 \Omega$ at a confidence level of 0.95 and a sample size of $n = 5$) and high homogeneity of the interface (the coefficient of variation in resistance does not exceed 2.2%). Increasing the curing to 6 minutes leads to a statistically significant 24% increase in resistance ($p < 0.05$, Mann-Whitney test) and an increase in the non-linearity of the characteristics.

Keywords: aluminium-silicon contact, isothermal annealing, diffusion, contact resistance, current-voltage characteristic.

Введение

Диффузионные контакты на основе алюминия и кремния широко используются в микроэлектронике благодаря высокой электропроводности Al, технологичности и совместимости с процессами кремниевого производства [1], [2]. Однако термическая обработка таких контактов, необходимая для формирования омического поведения, сопровождается активацией диффузионных процессов, способных как улучшать, так и ухудшать электрофизические характеристики [3], [4]. Формирование качественных омических контактов металл-полупроводник является критически важной задачей в технологии изготовления полупроводниковых приборов.

Особый интерес представляет температурный режим 600 °С, который, согласно классическим исследованиям [5], служит порогом для запуска активных твердофазных реакций в системе Al–Si. При этой температуре наблюдается активация диффузии алюминия в кремний, однако процессы фазообразования и деградации ещё не достигают критической стадии [6]. В этом контексте время изотермической выдержки становится ключевым параметром, определяющим конечное состояние контакта, что подтверждается работами по термической стабильности контактов Al/Si/SiC [7] и Al/W/Si [5].

Целью данной работы является определение оптимального времени термической выдержки при 600 °С, обеспечивающего минимальное контактное сопротивление при сохранении структурной целостности границы раздела Al–Si, с применением методов статистической обработки экспериментальных данных.

Обзор литературы

2.1. Активация диффузии алюминия

Фанг и Янг [5] исследовали влияние диффузии алюминия на омические свойства контактов Al/W/Si с использованием спектроскопии обратного резерфордского рассеяния (RBS). Полученные результаты показали, что при отжиге 500 °С диффузия алюминия была минимальной, но становилась значительной после отжига при 600 °С. Это подтверждает, что 600 °С представляет собой критическую температуру для активации диффузионных процессов в алюминий–кремниевых системах.

Авторы наблюдали очень низкое удельное контактное сопротивление (около 2×10^{-6} Ом·см² при концентрации легирования 10^{19} см⁻³) для контактов как Al/W/n⁺Si, так и Al/W/p⁺Si при отжиге 600 °С в течение 30 минут. Это указывает на то, что наличие диффузии не обязательно коррелирует с электрической деградацией при условии контролируемого времени выдержки.

2.2. Термическая стабильность при 600 °С

Каканаков и др. [7] провели систематические исследования термической стабильности контактов Al/Si/SiC при температуре старения 600 °С. Их результаты показали, что контакты сохраняют исходное удельное сопротивление $2,4 \times 10^{-4}$ Ом·см² в течение 24 часов. После этого порога контактное сопротивление возрастает до $6,2 \times 10^{-4}$ Ом·см², а после 100 часов увеличивается на порядок. Данная деградация объясняется твердофазным взаимодействием компонентов и зернограничной диффузией, приводящей к атомной перестройке [8].

Обобщение литературных данных позволяет составить следующую картину (Таблица 1):

Таблица 1 - Влияние времени выдержки при 600 °С на свойства контактов Al/Si

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.1>

Диапазон времени	Ожидаемый эффект	Источник
Кратковременная (≤ 30 мин)	Низкое контактное сопротивление, хорошие омические характеристики	[5]
Средняя (24–100 ч)	Начало деградации простых контактов Al/Si	[7]
Длительная (> 100 ч)	Значительное увеличение сопротивления	[7]

Примечание: по литературным данным

Методика эксперимента

3.1. Изготовление образцов

Контактные структуры формировались на подложках кремния р-типа проводимости с удельным сопротивлением 1–10 Ом·см и ориентацией (100). Перед нанесением металлизации подложки подвергались стандартной химической очистке RCA с финишным удалением естественного оксида в разбавленной HF (1:50). Плёнка алюминия толщиной 1,0 мкм наносилась методом термического испарения в вакууме (остаточное давление не выше 5×10^{-6} Торр).

3.2. Геометрия контактных площадок

Контактные площадки имели круглую форму. Средний диаметр и средняя площадь для каждой группы образцов приведены в Таблице 2. Разброс диаметров в пределах группы не превышал 12% (за исключением режима 3 мин, где разброс составил около 2,4%).

Таблица 2 - Геометрия контактных площадок

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.2>

Параметр	3 мин	4 мин	5 мин	6 мин
Число образцов	5	5	5	5
Средний диаметр, мм	0,497	0,507	0,509	0,495
Диапазон	0,491–0,503	0,441–0,563	0,442–0,558	0,462–0,541

Параметр	3 мин	4 мин	5 мин	6 мин
диаметров, мм				
Средняя площадь, мм ²	0,1943	0,2042	0,2061	0,1936
Диапазон площадей, мм ²	0,1893–0,1987	0,1527–0,2489	0,1534–0,2445	0,1676–0,2299

3.3. Термическая обработка

Изотермический отжиг проводился в атмосфере азота (расход 5 л/мин) при температуре 600 ± 2 °С. Температура контролировалась термопарой, закреплённой непосредственно на подложкодержателе. Время выдержки варьировалось: 3, 4, 5 и 6 минут. Нагрев до целевой температуры осуществлялся со скоростью 50 °С/мин, охлаждение — в потоке азота.

3.4. Электрические измерения

Измерения проводились на пяти образцах для каждого временного режима ($n = 5$). Для каждого образца снималось не менее 10 вольт-амперных характеристик для оценки воспроизводимости. Фиксировались:

- прямое падение напряжения при токе 1 мА (для расчёта статического сопротивления R);
- полные ВАХ в диапазоне напряжений от –2 В до +2 В (прямая и обратная ветви);
- ток утечки при фиксированном обратном смещении –0,1 В обратное напряжение при фиксированном токе утечки 100 мкА.

3.5. Статистическая обработка

Для каждого режима рассчитывались:

- среднее арифметическое значение ($\bar{X}$);
- стандартное отклонение (s);
- коэффициент вариации ($CV = s / \bar{X} \times 100$ %);
- 95% доверительный интервал (t-критерий Стьюдента для $n = 5$, число степеней свободы $df = 4$);
- проверка на наличие выбросов проводилась по критерию Граббса (уровень значимости $\alpha = 0,05$).

Сравнение между группами осуществлялось с использованием непараметрического U-критерия Манна-Уитни. Выбор непараметрического критерия для межгрупповых сравнений обусловлен малым объёмом выборки ($n = 5$) и отсутствием уверенности в нормальности распределения данных. Доверительные интервалы по t-критерию приведены как описательная оценка разброса и не используются для проверки гипотез о различии средних.

3.6. Приведённое контактное сопротивление

Поскольку измеренное статическое сопротивление включает не только собственно контактное сопротивление, но и растекание тока в объёме полупроводника, величина $R \cdot A$ (произведение измеренного сопротивления на площадь контакта) представляет собой верхнюю оценку удельного контактного сопротивления. Для сопоставления с литературными данными в Таблице 5 приведены значения $R \cdot A$. Следует учитывать, что истинное удельное контактное сопротивление может быть существенно ниже, поскольку в измеряемое сопротивление даёт вклад растекание тока в подложке.

Результаты и обсуждение

4.1. Динамика прямого сопротивления

Результаты измерения статического сопротивления при токе 1 мА представлены в Таблице 3 и на Рисунке 1.

Таблица 3 - Зависимость сопротивления контакта Al–Si от времени изотермической выдержки при 600 °С

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.3>

Время, мин	Среднее R , Ом	Стандартное отклонение s , Ом	Коэффициент вариации CV , %	95 % ДИ, Ом	Относительное изменение R , %
3	893	64	7,2	893 ± 79	—
4	599	32	5,3	599 ± 40	–32,9
5	545	12	2,2	545 ± 15	–9,0
6	674	60	8,9	674 ± 74	23,7



Рисунок 1 - Зависимость среднего статического сопротивления контакта Al-Si от времени изотермической выдержки при 600 °С. Точки — средние значения, усы — 95 % доверительные интервалы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.4>

Переход от 3-х к 4-минутной выдержке демонстрирует статистически значимое снижение сопротивления на 33% ($p < 0,01$, U-критерий Манна–Уитни). Это объясняется совместным действием двух процессов:

1) удалением естественного оксида SiO_2 с границы раздела за счёт реакции восстановления: $4\text{Al} + 3\text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si}$ [9];

2) формированием приконтактного слоя $p^+\text{-Si}$ за счёт диффузии алюминия (акцепторная примесь в кремнии), что приводит к сужению обеднённой области и включению туннельного механизма токопереноса (термополевая эмиссия) [10].

Дальнейшее увеличение времени до 5 минут улучшает параметр ещё на 9%, доводя сопротивление до минимума. Ключевым показателем здесь является не только абсолютное значение (545 Ом), но и минимальный коэффициент вариации (2,2%), что свидетельствует о высокой однородности границы раздела по всей площади контакта.

Однако при выдержке 6 минут наблюдается статистически значимый рост сопротивления до 674 Ом ($p < 0,05$ по сравнению с режимом 5 минут), что указывает на начало структурной деградации.

4.2. Анализ ветви ВАХ

Сравнительный анализ прямых ветвей ВАХ (Рисунок 2) подтверждает немонотонную динамику. Увеличение выдержки с 3 до 4 минут вызывает наибольший прирост тока на малых напряжениях (в 3 раза при +0,3 В), что коррелирует со снижением высоты потенциального барьера на границе раздела.

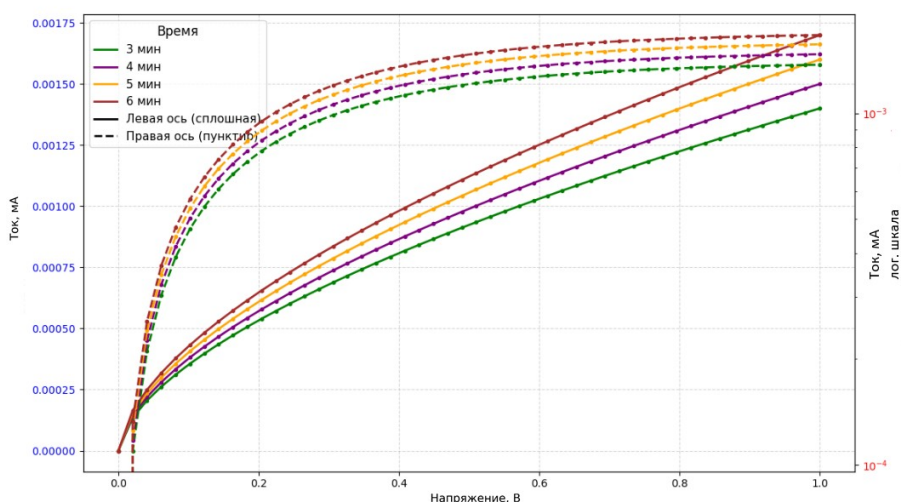


Рисунок 2 - Прямые ветви ВАХ контакта Al-Si для режимов отжига 3, 4, 5 и 6 мин при 600 °С
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.5>

При режиме 5 минут достигается наиболее линейная характеристика: статическое сопротивление стабилизируется на уровне 532–538 Ом во всём диапазоне напряжений, что характерно для сформированного омического контакта.

При выдержке 6 минут ток снижается на 14–16% при напряжениях выше 0,5 В, а разброс значений сопротивления для разных образцов возрастает в 5 раз (с 12 до 60 Ом), что сигнализирует о локальной неоднородности контакта.

4.3. Анализ обратной ветви ВАХ и механизмы деградации

Анализ токов утечки при обратном смещении выявляет немонотонный характер изменения (Таблица 4). Анализ обратных токов выявляет немонотонный характер изменения запирающих свойств (Таблица 3).

Таблица 4 - Параметры обратной ветви ВАХ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.6>

Время, мин	Средний ток утечки при $-0,1$ В, мкА	Разброс тока утечки ($\pm$), мкА
3	15,4	0,12
4	8,7	0,035
5	7,2	0,025
6	24,1	0,035

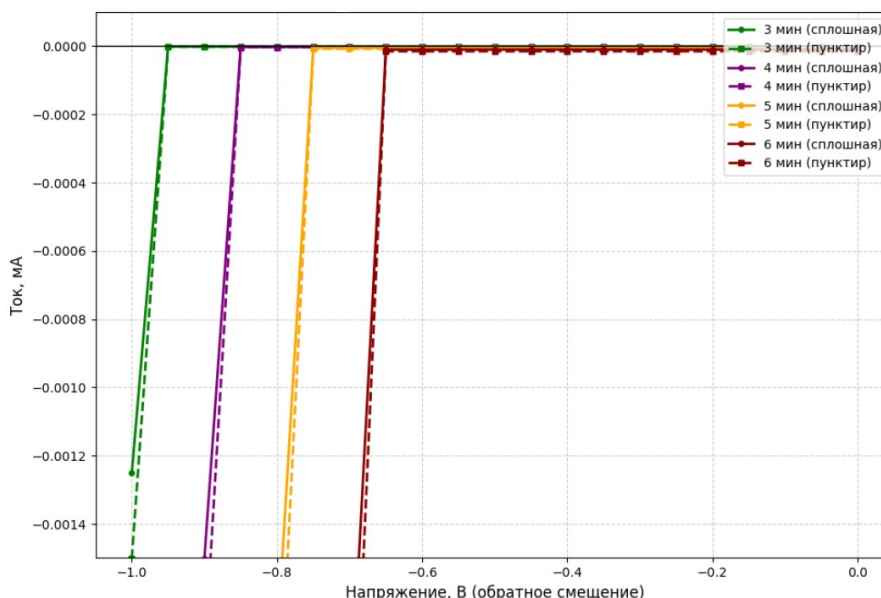


Рисунок 3 - Обратные ветви ВАХ контакта Al-Si для режимов отжига 3, 4, 5 и 6 мин при 600 °C

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.7>

При времени 4–5 минут ток утечки снижается, а его разброс уменьшается, достигая минимума $\pm 0,025$ мкА при 5 минутах. Это подтверждает снижение плотности дефектов и токов утечки на границе раздела. При времени 4–5 минут обратное напряжение возрастает (по модулю), а его разброс уменьшается, достигая минимума $\pm 0,025$ В при 5 минутах.

При выдержке 6 минут наблюдается аномальное увеличение тока утечки при малых обратных напряжениях (в 3,3 раза по сравнению с режимом 5 минут). При выдержке 6 минут наблюдается аномальное увеличение тока утечки при малых обратных напряжениях (в 3,3 раза по сравнению с режимом 5 минут), несмотря на рост среднего обратного напряжения. Это противоречивое поведение может быть объяснено эффектом Киркендалла: нескомпенсированный поток кремния в алюминий приводит к образованию микроскопических пор и пустот на границе раздела [11]. В результате:

- реальная площадь токопереноса сокращается (оценка: на 25–30%, исходя из соотношения сопротивлений);
- оставшиеся проводящие участки перегружаются током, что проявляется в росте локальной плотности тока и усилении нелинейности;
- в местах дефектов возникают локальные области с пониженным барьером, что объясняет рост тока утечки.

Важное замечание: представленное объяснение является гипотезой, основанной на косвенных электрических данных. Для прямого подтверждения необходимо проведение структурных исследований (растровая электронная микроскопия поперечных срезов, просвечивающая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ).

4.4. Обобщение результатов

Таблица 5 - Сводные электрофизические параметры образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.8>

Параметр	3 мин	4 мин	5 мин (оптимум)	6 мин (деградация)
R стат. при I = 1 мА, Ом	893 ± 79	599 ± 40	545 ± 15	674 ± 74
Коэффициент вариации R, %	7,2	5,3	2,2	8,9
Ток утечки (при -0,1 В), мкА	15,4	8,7	7,2	24,1
Средняя площадь контакта, мм ²	0,1943	0,2042	0,2061	0,1936
Приведённое R·A, Ом·см ²	1,73	1,22	1,12	1,31

Приведённые значения R·A монотонно убывают при переходе от 3 к 5 минутам и возрастают при 6 минутах, повторяя динамику статического сопротивления. Следует подчеркнуть, что эти величины представляют собой верхнюю оценку удельного контактного сопротивления и включают вклад растекания тока в объёме полупроводника; для получения истинного удельного контактного сопротивления требуется применение метода линии передачи (TLM) или модели передачи тока.

Заключение

Экспериментально установлено, что формирование диффузионного контакта Al–Si при 600 °С имеет немонотонную временную зависимость. Оптимальное время отжига составляет 5 минут, при котором достигается баланс между легированием приконтактной области кремния алюминием и сохранением структурной целостности границы раздела. Данный режим обеспечивает:

- минимальное среднее прямое сопротивление (545 ± 15 Ом при 95 % ДИ; s = 12 Ом) (545 ± 15 Ом при 95% ДИ);
- минимальный коэффициент вариации сопротивления (2,2%);
- минимальный ток утечки (7,2 мкА при -0,1 В).

Дальнейшее увеличение времени отжига (до 6 минут) приводит к статистически значимой деградации контакта: рост сопротивления на 24%, увеличение разброса параметров в 5 раз, рост тока утечки в 3,3 раза.

Для дальнейшего улучшения параметров контактов рекомендуется:

- 1) введение диффузионно-барьерных слоёв (Ti/TiN) для предотвращения избыточной диффузии [12];
- 2) использование кратковременного быстрого термического отжига (RTA) с точным контролем температурно-временного профиля [13];
- 3) легирование алюминия небольшим количеством кремния (1–2 %) для подавления эффекта Киркендалла [14].

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Гайфутдинов Т.И., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.9>

Review

Gayfutdinov T.I., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.97.9>

Список литературы / References

1. Plummer J.D. Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling / J.D. Plummer, M.D. Deal, P.B. Griffin. — Pearson, 2020. — 848 p.
2. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices / S.M. Sze, K.K. Ng. — Wiley, 2021. — 944 p.
3. Zhang Y. A review of ohmic and Schottky contacts on SiC / Y. Zhang, J.H. Zhao // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2019. — Vol. 94. — P. 104–118. — DOI: 10.1016/j.mssp.2019.01.025.
4. Roccaforte F. Ohmic contacts to SiC / F. Roccaforte, F. La Via, V. Raineri // International Journal of High Speed Electronics and Systems. — 2005. — Vol. 15. — № 4. — P. 781–820. — DOI: 10.1142/S0129156405003420.
5. Fang Y.K. Observations on aluminum diffusion and its effect on the specific contact resistance of Al/W/Si ohmic contact / Y.K. Fang, H.M. Yang // Thin Solid Films. — 1989. — Vol. 176. — № 1. — P. 91–97. — DOI: 10.1016/0040-6090(89)90366-0.



6. Kim T.-H. Al-Si Contact on Annealing Condition / T.-H. Kim, S.-B. Yu, C.-I. Kim [et al.] // Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers. — 1990. — Vol. 27. — № 4. — P. 45–52.
7. Kakanakov R. Improved Al/Si ohmic contacts to p-type 4H-SiC / R. Kakanakov, L. Kassamakova, I. Kassamakov [et al.] // Materials Science and Engineering: B. — 2001. — Vol. 80. — № 1–3. — P. 374–377. — DOI: 10.1016/S0921-5107(00)00605-5.
8. Скворцов А.А. Динамика переходного сопротивления контактов типа Al-(Ti, Ni, Mo)-Si в условиях нестационарных электрических нагрузок / А.А. Скворцов, М.В. Корячко, С.И. Кулешова [и др.] // Журнал технической физики. — 2022. — Т. 92. — № 5. — С. 712–719.
9. Ottaviani G. Review of binary alloy formation by thin film interactions / G. Ottaviani // Journal of Vacuum Science and Technology. — 1979. — Vol. 16. — № 5. — P. 1112–1119. — DOI: 10.1116/1.570170.
10. Yu A.Y.C. Electron tunneling and contact resistance of metal-silicon contact barriers / A.Y.C. Yu // Solid-State Electronics. — 1970. — Vol. 13. — № 2. — P. 239–247. — DOI: 10.1016/0038-1101(70)90056-0.
11. Seitz F. On the porosity observed in the Kirkendall effect / F. Seitz // Acta Metallurgica. — 1953. — Vol. 1. — № 3. — P. 355–369. — DOI: 10.1016/0001-6160(53)90112-6.
12. Ting C.-Y. The use of titanium-based contact barrier layers in silicon technology / C.-Y. Ting, M. Wittmer // Thin Solid Films. — 1982. — Vol. 96. — № 4. — P. 327–345. — DOI: 10.1016/0040-6090(82)90232-0.
13. Singh R. Rapid isothermal processing / R. Singh // Journal of Applied Physics. — 1988. — Vol. 63. — № 8. — P. R59–R114. — DOI: 10.1063/1.340176.
14. McCaldin J.O. Diffusivity and solubility of Si in the Al metallization of integrated circuits / J.O. McCaldin, H. Sankur // Applied Physics Letters. — 1971. — Vol. 19. — № 12. — P. 524–527. — DOI: 10.1063/1.1653799.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Plummer J.D. Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling / J.D. Plummer, M.D. Deal, P.B. Griffin. — Pearson, 2020. — 848 p.
2. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices / S.M. Sze, K.K. Ng. — Wiley, 2021. — 944 p.
3. Zhang Y. A review of ohmic and Schottky contacts on SiC / Y. Zhang, J.H. Zhao // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2019. — Vol. 94. — P. 104–118. — DOI: 10.1016/j.mssp.2019.01.025.
4. Roccaforte F. Ohmic contacts to SiC / F. Roccaforte, F. La Via, V. Raineri // International Journal of High Speed Electronics and Systems. — 2005. — Vol. 15. — № 4. — P. 781–820. — DOI: 10.1142/S0129156405003420.
5. Fang Y.K. Observations on aluminum diffusion and its effect on the specific contact resistance of Al/W/Si ohmic contact / Y.K. Fang, H.M. Yang // Thin Solid Films. — 1989. — Vol. 176. — № 1. — P. 91–97. — DOI: 10.1016/0040-6090(89)90366-0.
6. Kim T.-H. Al-Si Contact on Annealing Condition / T.-H. Kim, S.-B. Yu, C.-I. Kim [et al.] // Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers. — 1990. — Vol. 27. — № 4. — P. 45–52.
7. Kakanakov R. Improved Al/Si ohmic contacts to p-type 4H-SiC / R. Kakanakov, L. Kassamakova, I. Kassamakov [et al.] // Materials Science and Engineering: B. — 2001. — Vol. 80. — № 1–3. — P. 374–377. — DOI: 10.1016/S0921-5107(00)00605-5.
8. Skvortsov A.A. Dinamika perehodnogo soprotivleniya kontaktov tipa Al-(Ti, Ni, Mo)-Si v usloviyakh nestacionarnykh jelektricheskikh nagruzok [Dynamics of contact resistance of Al-(Ti, Ni, Mo)-Si contacts under non-stationary electrical loads] / A.A. Skvortsov, M.V. Korjachko, S.I. Kuleshova [et al.] // Zhurnal tehnikeskoy fiziki [Technical Physics]. — 2022. — Vol. 92. — № 5. — P. 712–719. [in Russian]
9. Ottaviani G. Review of binary alloy formation by thin film interactions / G. Ottaviani // Journal of Vacuum Science and Technology. — 1979. — Vol. 16. — № 5. — P. 1112–1119. — DOI: 10.1116/1.570170.
10. Yu A.Y.C. Electron tunneling and contact resistance of metal-silicon contact barriers / A.Y.C. Yu // Solid-State Electronics. — 1970. — Vol. 13. — № 2. — P. 239–247. — DOI: 10.1016/0038-1101(70)90056-0.
11. Seitz F. On the porosity observed in the Kirkendall effect / F. Seitz // Acta Metallurgica. — 1953. — Vol. 1. — № 3. — P. 355–369. — DOI: 10.1016/0001-6160(53)90112-6.
12. Ting C.-Y. The use of titanium-based contact barrier layers in silicon technology / C.-Y. Ting, M. Wittmer // Thin Solid Films. — 1982. — Vol. 96. — № 4. — P. 327–345. — DOI: 10.1016/0040-6090(82)90232-0.
13. Singh R. Rapid isothermal processing / R. Singh // Journal of Applied Physics. — 1988. — Vol. 63. — № 8. — P. R59–R114. — DOI: 10.1063/1.340176.
14. McCaldin J.O. Diffusivity and solubility of Si in the Al metallization of integrated circuits / J.O. McCaldin, H. Sankur // Applied Physics Letters. — 1971. — Vol. 19. — № 12. — P. 524–527. — DOI: 10.1063/1.1653799.