

УДК 621
EDN: BBGZSL

PACS: 85.30.-z

Влияние режимов отжига контактных систем Si-Al и Si-Ti-Al на коэффициент усиления *n-p-n* биполярных транзисторов© К. А. Попов^{1,2,*}, В. Е. Антонова^{1,2}, А. М. Родина^{1,3}, Е. А. Климанов^{1,4}, А. В. Ляликов¹¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: kostya.popov.2001@gmail.com

² НИТУ «МИСиС», Москва, 119049 Россия³ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005 Россия⁴ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

Статья поступила в редакцию 10.04.2025; после доработки 28.04.2025; принята к публикации 2.06.2025
Шифр научной специальности: 2.2.2

*Проведено исследование режимов отжига контактных систем Si-Al и Si-Ti-Al на коэффициент усиления по току биполярных транзисторов *n-p-n* типа. Показано, что при использовании контактных систем Si-Al требуемые значения коэффициента усиления достигаются при температурах отжига более 400 °С, в то время как для системы Si-Ti-Al необходим отжиг при температуре не менее 520 °С. Полученные результаты объясняются переходом подслоя Ti в соединения с последующим образованием на поверхности кремния слоя, обогащенного алюминием.*

Ключевые слова: отжиг; контактный слой; металлизация; коэффициент усиления.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-3-19-24

Известно, что для устранения взаимной диффузии алюминия и кремния при создании металлизации Al-Si в ИС, приводящей к образованию ямок травления на кремнии, заполненных алюминием (пиков Al) и закорачивающих *p-n*-переход [1–3], используются подслои тугоплавких металлов, в частности, титана.

Имеется большое число работ, посвященных влиянию термических отжигов на контактное сопротивление систем металлизации на основе алюминия и Ti-Al [4, 5]. Так, в работе [4] установлена монотонная зависимость контактного сопротивления Al-*n*+–Si от температуры отжига в диапазоне 440–565 °С с малыми изменениями в диапазоне 440–520 °С и возрастанием при больших температурах. Для контакта Al-*p*+–Si наблюдались малые изменения сопротивления во всем указанном диапазоне.

Однако практически отсутствует доступная информация о влиянии отжигов на ко-

эффициент усиления биполярных транзисторов (БТ) с указанными системами металлизации.

Целью работы являлось исследование влияния режимов отжигов в диапазоне температур 300–550 °С на коэффициент усиления по току биполярных транзисторов с системами металлизации на основе алюминия и Ti-Al.

Исследования проводились на биполярных ИС, изготавливаемых на эпитаксиальных структурах со скрытым слоем 100 КЭФ 1,5 25ЭКЭС / 460 КДБ10 (111) 4(110).

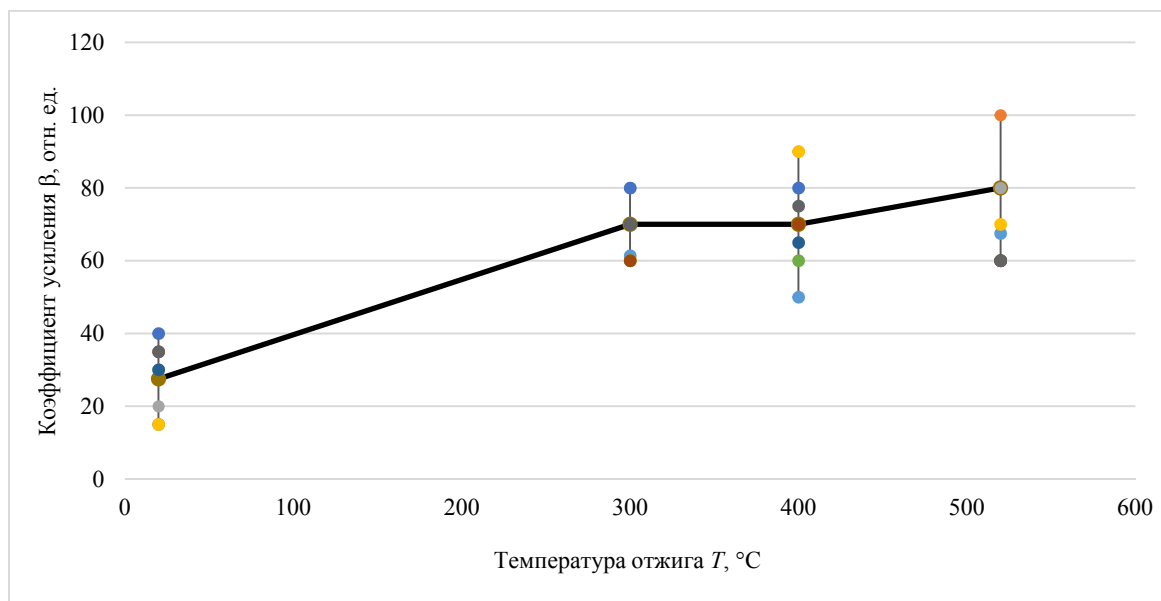
Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) и коэффициента усиления по току (β) проводились на тестовых структурах на зондовой установке и характеристикографе Agilent 4156С. Сравнение результатов измерений на зондах и после термокомпрессионной приварки проволоки к контактным площадкам не показали существенных различий при рабочих напряжениях на переходах эмиттер – база и эмиттер-коллектор.

Слои металлизации формировались методом магнетронного напыления из мишеней Al и Ti. Толщина слоев составляла для Al – 1,2–1,3 мкм, для Ti – 0,1 мкм. Отжиг проводился в диффузионной печи в атмосфере азота в диапазоне температур 300–550 °С в течение 30 минут.

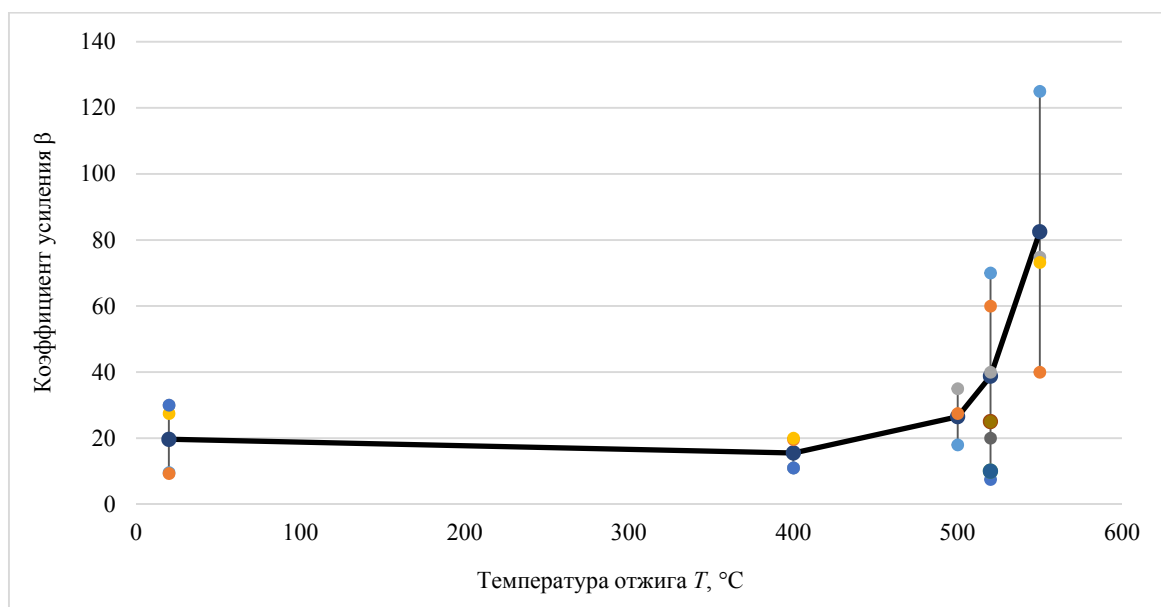
Из приведенных ниже графиков зависимости коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером β от температуры отжига

(рис. 1) видно существенное различие влияния отжига на усиление БТ с Al и Ti-Al металлизацией. В первом случае наблюдается резкое возрастание β , начиная с 300 °С, во втором для этого требуется отжиг при температуре 520–550 °С.

Различие в зависимостях коэффициента усиления от температуры отжига для систем металлизации Al и Ti-Al может быть связано с влиянием подслоя Ti.



а)



б)

Рис. 1. Зависимости коэффициента усиления от температуры отжига для а) – системы Si-Al, б) – системы Si-Ti-Al

Так, в работе [4] было проведено исследование влияния отжига на характеристики контактов алюминий-титан и предложена модель, объясняющая изменения электрических и структурных свойств контактов последовательным образованием соединений TiAl₃ и Ti-Si-Al. Показано, что образование второго соединения на границе с кремнием нарушает защитное действие пленки Ti и возобновляется взаимная диффузия алюминия и кремния, приводящая к образованию ямок травления в кремнии и резкому изменению сопротивления. Используя приведенное в этой работе выражение для толщины образуемого при отжиге слоя TiAl₃,

$$X^2 = td_0 \exp\left(-\frac{Ea}{kT}\right),$$

где $Ea = 1,85$ эВ, $d_0 = 0,15$ см²/с, можно получить значения толщин образуемого при отжиге слоя TiAl₃: при температурах 400 °С,

500 °С и времени отжига 30 минут $h = 0,02 \times 10^{-4}$ см и $h = 0,14 \times 10^{-4}$ см соответственно. Следовательно, при толщине слоя титана $h = 0,1 \times 10^{-4}$ см при температурах $T > 500$ °С следует ожидать полного перехода слоя титана в указанные соединения и взаимной диффузии Al и Si с образованием на поверхности образцов контактного слоя обогащенного Al.

Результаты исследования влияния образования контактного слоя на значения коэффициента усиления приведены в таблице, где сравниваются результаты отжига при 500 °С и 520 °С с контактным слоем Al и без него. Приведенные результаты показывают, что отжиг эффективен для увеличения β только при наличии слоя Al (образцы №№ 7–11). При этом химическое травление слоя алюминия с поверхности образца практически не изменяет величину β , полученную после отжига (образцы №№ 12–15).

Таблица

Результаты исследования влияния образования контактного слоя на значения коэффициента усиления

№ образца	β до отжига (отн. ед.)	β после отжига без Al (отн. ед.)	β после отжига с Al (отн. ед.)	β после травливания Al
1	7	6		
2	7	6,5		
3	12	15		
4	10	10		
5	15	12		
6	16	20		
7	20	20	200	
8	12	15	110	
8	15	14	140	
9	15	15	100	
10	20	20	100	
11	20	20	150	
12			100	80
13			100–150	100
14			150	150
15			150	200

Результаты влияния отжига на коэффициент усиления образцов с алюминиевой металлизацией могут объясняться образованием в приповерхностном слое кремния области, обогащенной алюминием. Этот слой не удаляется химическим травлением и обеспечивает

сохранение высоких значений β после травливания основного слоя алюминия.

Данный вывод подтверждается проведенным анализом примесного состава приповерхностной области образцов отожженных при 520 °С с алюминиевыми контактами после

химического травливания слоя алюминия. Анализ проводился с помощью регистрации рентгеновского излучения, возбуждаемого электронами с энергиями от 2 до 6 кэВ (электронно-зондовый рентгено-спектральный анализ). Обнаружен обогащенный алюминием слой глубиной порядка 300 Å с концентрацией Al до 10 атомных процентов. Качественный профиль распределения Al в приповерхностном слое кремния приведен на рис. 2. Существование локальных областей *p*-типа в при-

поверхностном слое было также обнаружено методом электрохимического вольт-фарадного профилирования на концентрационном профиле эмиттера (рис. 3).

Возможным механизмом влияния указанного слоя на усиление по току БТ может быть образование на поверхности эмиттера соединения кремния с алюминием, создающего потенциальный барьер, снижающий скорость поверхностной рекомбинации носителей.

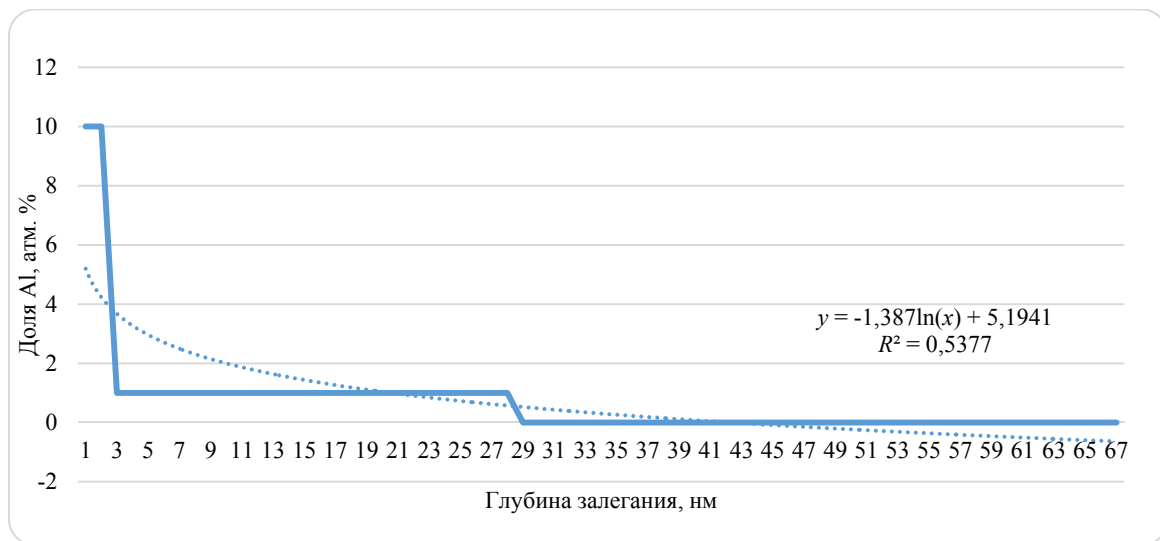


Рис. 2. Профиль распределения атомов Al от глубины залегания в слое Si

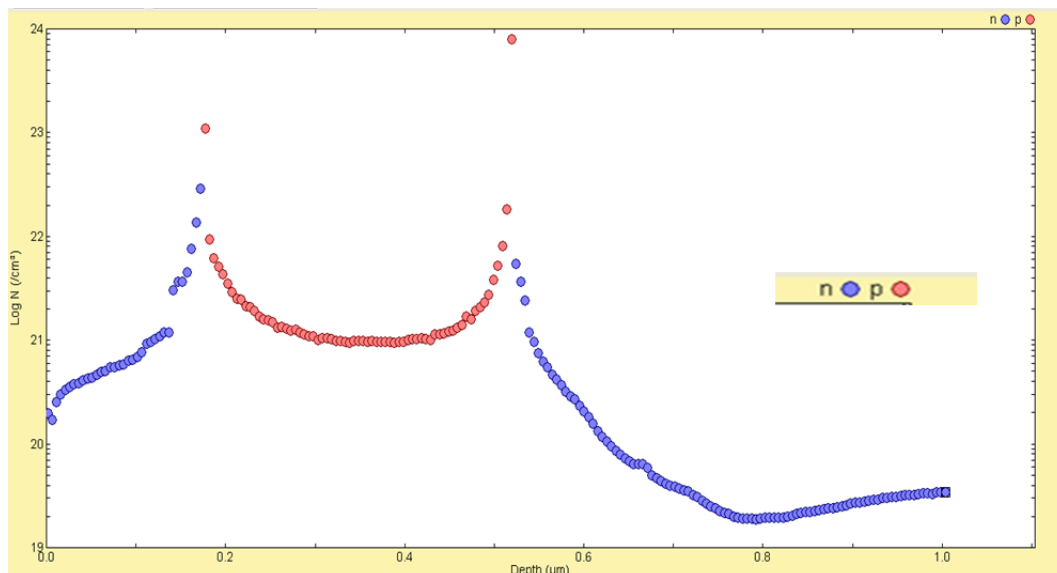


Рис. 3. Профиль распределения носителей заряда в эмиттере

Эффект уменьшения скорости поверхностной рекомбинации на поверхности диффузионного слоя фосфора в результате отжига при 400 °С с напыленным слоем Al на поверхности наблюдался в работе [6].

Образование приповерхностных слоев *p*-типа также наблюдалось в ряде работ на структурах с барьерами Шоттки, сформированными Al на кремнии *n*-типа с относительно низкой концентрацией носителей заряда [7, 8].

Существованием этого слоя объяснялось увеличение эффективной высоты потенциального барьера для электронов на поверхности и повышение эффективности солнечных элементов [9]. Механизм увеличения коэффициента усиления в БТ за счет образования барьера в эмиттере используется для объяснения больших значений β в БТ с эмиттером поликремний-монокремний [10].

В нашем случае из-за высокой концентрации фосфора на поверхности диффузионного слоя ($>10^{20} \text{ см}^{-3}$), превышающей предельную растворимость алюминия в кремнии (10^{19} см^{-3}), p -слой наблюдается на некотором расстоянии от поверхности и также может приводить к образованию в эмиттере потенциального барьера, снижающего скорость поверхностной рекомбинации носителей, что приводит к уменьшению базового тока и, следовательно, увеличению β .

Выводы

1. Показано, что значительное увеличение коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером β в биполярных транзисторах с системой металлизации Al-Si достигается отжигом при температурах выше $400 \text{ }^\circ\text{C}$, для системы металлизации Si-Ti-Al необходимая температура отжига не ниже $520\text{--}550 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Указанное различие объясняется переходом при отжиге слоя Ti в температурном интервале $520\text{--}550 \text{ }^\circ\text{C}$ в соединения TiAl_3 и Ti-Si-Al с последующим образованием на поверхности кремния локальных областей слоя, обогащенного алюминием.

3. Существование указанного слоя установлено с помощью электронно-зондового

рентгено-спектрального анализа и электрохимического вольт-фарадного профилирования.

4. Установлено, что возрастание коэффициента усиления β в результате отжига связано не с воздействием термической обработки, а с образованием указанного приповерхностного слоя.

5. Возможным механизмом возрастания β при образовании приповерхностного слоя является снижение скорости поверхностной рекомбинации в эмиттере за счет образования локальных областей p -типа в этом слое, создающих потенциальные барьеры для носителей заряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зу С. Технология СБИС. Т. 2. – М.: «Мир», 1986.
2. Громов Д. Г., Мочалов А. И., Сулимин А. Д., Шевяков В. И. Металлизация ультрабольших интегральных схем. – М.: БИНОМ, 2009.
3. Достанко А. П., Баранов В. В., Шаталов В. В. Пленочные токопроводящие системы СБИС. – Минск: «Высшая школа», 1989.
4. Bower R. W. / Applied Physics letters. 1973. Vol. 23. P. 99–101.
5. McNeil G. / Journal of electrochemical society. 1969. Vol. 116. № 9. P. 1311–1312.
6. King R. R., Sinton R. F., Swanson R. M. / IEEE Transaction on electron devices. 1990. Vol. 37. № 2. P. 365–371.
7. Basterfield J., Shannon J. M., Gill A. / Solid-State Electronics. 1975. Vol. 18. P. 290–291.
8. Card H. C. / IEEET Transaction on electron devices. 1976. Vol. ED-23. № 8. P. 538.
9. Peibst R. et al. / Solar Energy Materials and Solar Cells. 2016. Vol. 158. P. 1–8.
10. Post I. C., Ashburn P., Wolstenholm G. R. / IEEE Transaction on electron devices. 1992. Vol. 39. № 7. P. 1717–1730.

PACS: 85.30.–z

Influence of annealing modes of Si-Al and Si-Ti-Al contact systems on the gain n - p - n of bipolar transistors

K. A. Popov^{1,2,*}, V. E. Antonova^{1,2}, A. M. Rodina^{1,3}, E. A. Klimanov^{1,4} and A. V. Lyalikov¹

¹ RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: kostya.popov.2001@gmail.com

² National University of Science and Technology MISiS, Moscow, 119049 Russia

³ Bauman Moscow Technical University, Moscow, 105005 Russia

⁴ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

Received 10.04.2025; revised 28.04.2025; accepted 2.06.2025

A study of annealing modes of Si-Al and Si-Ti-Al contact systems for current gain of n-p-n type bipolar transistors is carried out. It is shown that when using Si-Al contact systems, the required gain values are achieved at annealing temperatures of more than 400 °C, while for the Si-Ti-Al system, annealing at a temperature of at least 520 °C is required.

Keywords: annealing; contact layer; metallization; gain.

REFERENCES

1. Zi S. Tekhnologiya SBIS. Vol. 2. Moscow, «Mir», 1986 [in Russian].
2. Gromov D. G., Mochalov A. I., Sulimin A. D. and Shevyakov V. I. Metallizatsiya ul'trabol'shikh integral'nykh skhem. Moscow, BINOM, 2009 [in Russian].
3. Dostanko A. P., Baranov V. V. and Shatalov V. V. Plenochnye tokoprovodyashchie sistemy SBIS. Minsk, «Vysheishaya shkola», 1989 [in Russian].
4. Bower R. W., Applied Physics letters **23**, 99–101 (1973).
5. McNeil G., Journal of electrochemical society **116** (9), 1311–1312 (1969).
6. King R. R., Sinton R. F. and Swanson R. M., IEEE Transaction on electron devices **37** (2), 365–371 (1990).
7. Basterfield J., Shannon J. M. and Gill A., Solid-State Electronics **18**, 290–291 (1975).
8. Card H. C., IEEE Transaction on electron devices **ED-23** (8), 538 (1976).
9. Peibst R. et al., Solar Energy Materials and Solar Cells. **158**, 1–8 (2016).
10. Post I. C., Ashburn P. and Wolstenholm G. R., IEEE Transaction on electron devices **39** (7), 1717–1730 (1992).

Об авторах

Попов Константин Алексеевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9); НИТУ «МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: kostya.popov.2001@gmail.com SPIN-код РИНЦ 5321-4009.

Антонова Валерия Евгеньевна, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9); НИТУ «МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: avaleriya98@mail.ru

Родина Алёна Максимовна, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9); МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1). E-mail: rodinalyona@gmail.com

Климанов Евгений Алексеевич, главный научный сотрудник, д.т.н., профессор, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9); МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, д. 78). E-mail: klimanov3@mail.ru SPIN-код РИНЦ 7697-4688.

Ляликов Алексей Владимирович, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: a.lyalikov@mail.ru