

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, д. т. н. А. З. РАХМАТОВ, к. ф.-м. н. О. А. АБДУЛХАЕВ,
к. т. н. У. Х. АРИПОВА, А. Ю. ХИДИРНАЗАРОВА, Ш. М. КУЛИЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

E-mail: karimov@uzsci.net

УПРАВЛЕНИЕ ПАДЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО ДИОДА ПУТЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Приведены результаты исследования вольт-амперных и емкостных характеристик кремниевой диодной $p^+ - p - n - p^+$ -структуры, облученной флюенсами быстрых электронов, до и после термической обработки. Показано, что после термической обработки уменьшаются как прямое падение напряжения, так и ток утечки, создавая условия для увеличения выдерживаемой импульсной мощности.

Ключевые слова: диффузионный диод, вольт-амперная характеристика, емкостная характеристика, радиационное облучение, термическая обработка, падение напряжения.

Высокочастотные выпрямительно-ограничительные диоды используются в источниках питания для выпрямления переменного тока, в элементах защиты радиоэлектронного оборудования, а также в переключающих устройствах [1]. Они составляют основу устройств энергосберегающих технологий, отвечая высоким требованиям по выдерживаемой мощности и стабильности параметров. В зависимости от значения допустимого прямого тока выпрямительные диоды подразделяются на диоды малой (прямой ток до 1,0 А) и средней (до 10 А) мощности и мощные (более 10 А). Каждый тип полупроводникового прибора характеризуется рядом эксплуатационных характеристик, которые зависят от электрофизических параметров и совершенства используемых технологических процессов.

Основной задачей в технологическом процессе изготовления высокочастотных диодов является обеспечение оптимального значения прямого падения напряжения, сравнимого с контактной разностью потенциалов $p - n$ -перехода, и малого тока утечки. Также необходимо добиться как можно меньших значений времени восстановления обратного тока и времени жизни неосновных носителей заряда, и для этого диодные структуры подвергаются радиационному воздействию (гамма, электронному, нейтронному или протонному [2–4]). Так, в [5] впервые было показано, что при обработке кремниевых $n^+ - p^+$ -структур ускоренными протонами (500 кэВ , $(3 - 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) имеет место снижение прямого падения напряжения за счет формирования на границе $n^+ - p^+$ -областей локаль-

ной области толщиной 1 мкм. Кроме того, в [6] было показано, что путем нейтронного облучения можно идентифицировать пробивное напряжение диодных структур, а также уменьшить время жизни неосновных носителей [7, 8].

В [9] на основе исследования зависимости прямого падения напряжения $U_{\text{пр}}$ диодов 2Д237 и 2Д2992 от интегрального потока «быстрых» электронов показано, что при облучении дозой до 10^{16} см^{-2} величина $U_{\text{пр}}$ растет за счет компенсации легирующей примеси радиационными дефектами с энергетическими уровнями $E_C - 0,19 \text{ эВ}$, $E_C - 0,21 \text{ эВ}$ (А-центры), а при повышении дозы до $(2 - 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ $U_{\text{пр}}$ уменьшается за счет отжига центров $E_C - 0,38 \text{ эВ}$, $E_C - 0,42 \text{ эВ}$ (дивакансии). Соответственно, если проводится облучение малыми дозами, то для снижения падения напряжения до номинальных значений необходимо провести термический отжиг, что на данный момент мало изучено.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния радиационного воздействия и последующей термической обработки на вольт-амперные и емкостные характеристики высокочастотных диодов.

Образцы для исследований

Исследовались высокочастотные кремниевые диффузионные диоды с $p^+ - p - n - p^+$ -структурой, изготовленные на основе кремния КЭФ-4 n -типа проводимости (рис. 1). В исходной пластине кремния толщиной 235 мкм путем последовательной диффузии алюминия на глубину 100 мкм и бора на 45 мкм были получены области p - и p^+ -типа, а диффузией фос-

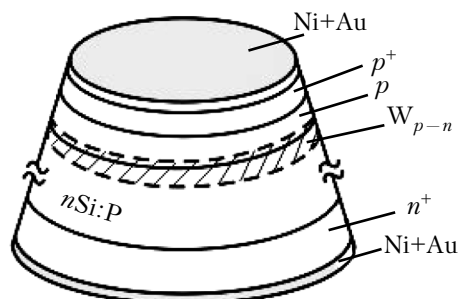


Рис. 1. Геометрическая модель высокочастотного диффузионного диода

фора на тыльную поверхность — сильнолегированная область n^+ -типа. При этом толщина базовой области n -типа составляла 75–80 мкм [8].

Омические контакты получены последовательным нанесением тонких слоев никеля и золота.

Радиационную обработку диодных структур проводили на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-6 при величине интегрального потока «быстрых» электронов от $1,0 \cdot 10^{15}$ до $2,6 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ с энергией 1,5 МэВ, плотность потока электронов составляла $1,7 \cdot 10^{11}$ — $5,5 \cdot 10^{13}$ см $^{-2} \cdot c^{-1}$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исходная вольт-амперная характеристика (ВАХ) исследуемого высокочастотного кремниевого диода с $p^+ - p - n - n^+$ -структурой описывается экспоненциальной зависимостью с коротким пологим участком, связанным с влиянием сопротивления базы, который после облучения образца становится более протяженным из-за зависимости сопротивления базы от величины тока (рис. 2).

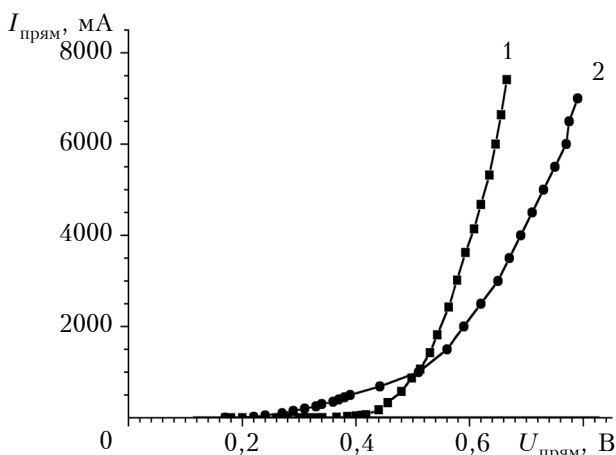


Рис. 2. ВАХ кремниевой диодной $p^+ - p - n - n^+$ -структуры до (1) и после (2) облучения электронами

Зависимость тока от напряжения с учетом падения напряжения на базе описывается уравнением

$$I = I_0 \exp \frac{q(U - I r_0)}{mkT}, \quad (1)$$

где I_0 — ток насыщения;

q — заряд;

U — приложенное напряжение;

$I \cdot r_0$ — падение напряжения в базе (произведение тока на сопротивление базы);

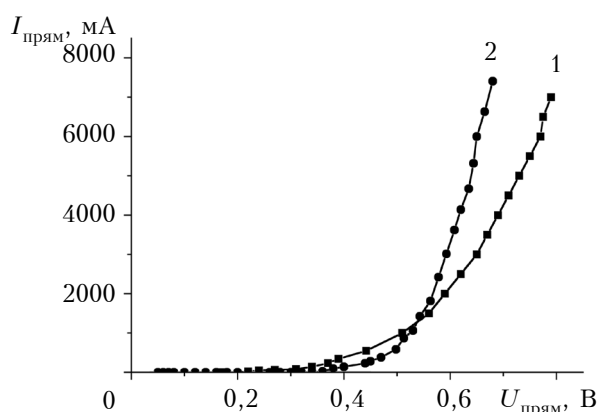
m — коэффициент неидеальности ($m = 1,08$, что соответствует преобладанию диффузионного механизма токопереноса [10]);

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

На рис. 3 приведены прямая и обратная ВАХ облученного кремниевого диода до и после термической обработки галогенной лампой при 90°C в течение 5 часов в специальной камере. Как видно из рис. 3, а, термообработка приводит к смещению прямой ВАХ в область меньших напряжений (т. е. заданный ток можно достичь при меньшем напряжении). При этом, однако, следует отметить, что в области малых значе-

а)



б)

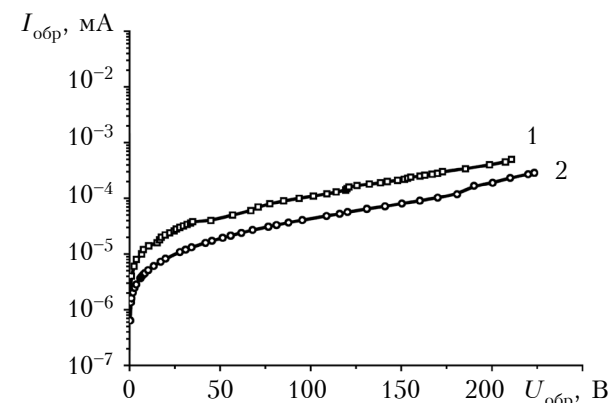


Рис. 3. Прямая (а) и обратная (б) ВАХ кремниевой диодной $p^+ - p - n - n^+$ -структуры до (1) и после (2) термической обработки

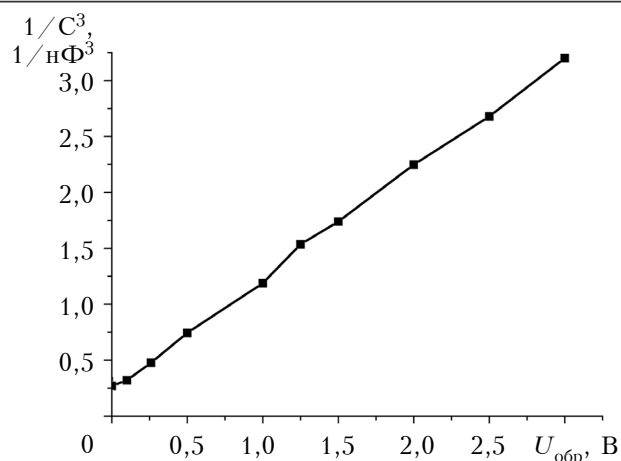


Рис. 4. Зависимость емкости C от запирающего напряжения кремниевой диодной $p^+ - p - n - n^+$ -структуры после облучения

ний тока падение напряжения после термообработки может увеличиться, например, с 0,38 до 0,48 В. Ток обратной ветви ВАХ после термической обработки уменьшился примерно в пять раз (рис. 3, б).

Исследования зависимости емкости от напряжения (рис. 4) показали, что в координатах $1/C^3 - U$ она является прямой линией, подтверждая тем самым плавный переход, обусловленный линейным нарастанием концентрации примеси [10]:

$$C_{бар} = S \sqrt[3]{\frac{q \epsilon \epsilon_0 N}{2(\phi_{кон} - U)}}$$

где $C_{бар}$ — барьерная емкость;

S — площадь структуры;

ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;

N — концентрация примеси в базовой области;

$\phi_{кон}$ — контактная разность потенциалов на $p - n$ -переходе;

U — запирающее напряжение.

Здесь следует отметить, что, несмотря на плавность $p - n$ -перехода исследуемых диодных структур, после соответствующей радиационной обработки их исходная емкость уменьшается, поэтому снижается напряженность электрического поля и время включения диодной структуры [8].

Заключение

Экспериментальные исследования показали, что в кремниевой диодной $p^+ - p - n - n^+$ -структуре после облучения быстрыми электронами и соответствующей термической обработки прямое падение напряжения уменьшается, приближаясь к первоначальным значениям, а обратный ток уменьшается примерно в пять раз,

что приводит к уменьшению выделяемой диодом мощности. При этом также улучшаются и временные характеристики высокочастотного диода за счет снижения емкости (до одного порядка). Механизм токопереноса до и после обработки остается диффузионным, а линейное распределение примеси в базовой области способствует снижению искажений сигнала при изменении частоты полезного сигнала.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сеница А. В., Глухов А. В., Скорняков С. П. и др. Некоторые особенности конструирования мощных выпрямительно-ограничительных диодов для сетевых защитных устройств // Силовая электроника. — 2015. — № 4. — С. 54–56.
2. Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K. Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons // Microelectronics Journal. — 2004. — Vol. 35, № 3. P. 249–257. — [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(03\)00194-0](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(03)00194-0)
3. Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами // Физика и техника полупроводников. — 2001. — Т. 35, № 7. — С. 769–795.
4. Vobecky J., Hazdra P., Zahlava V. Impact of the electron, proton and helium irradiation on the forward $I - V$ characteristics of high-power $p - i - n$ diode // Microelectronics Reliability. — 2003. — Vol. 43, N 4. — P. 537–544. — [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(03\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00023-4)
5. Лагов П. Б., Дренин А. С. Разработка радиационной технологии прецизионного управления характеристиками переключения кремниевых силовых приборов // Сб. трудов Междунар. науч.-технич. Конф. им. Леонардо да Винчи. — Wissenschaftliche Welt, 2013. — Том 1. — С. 130–132.
6. Rakhmatov A. Z., Petrov D.A., Karimov A.V., Yodgorova D.M., Abdulkhaev O.A. Influence of neutron radiation on breakdown voltage of silicon voltage limiter // Radioelectronics and Communication Systems. — 2012. — Vol. 55, iss. 7. — P. 332–334. — <https://doi.org/10.3103/S0735272712070060>
7. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Tarasik M. I., Shpakovskii S. V., Filipenia V. A., Skuratov V. A., Wieck A., Koltunowicz T. N. Effects of fluences of irradiation with 10^7 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon $p^+ - n$ -diodes // Acta Physica Polonica A. — 2011. — Vol. 120, № 1. — P. 111–114. — <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.111>
8. Рахимов А. З., Каримов А. В., Сандлер Л. С. и др. Влияние гамма- и электронного облучения на ключевые параметры мощных высокочастотных диффузионных диодов // Компоненты и технологии. — 2013. — № 10. — С.140–142.
9. Ладьгин Е. А., Орлова М. Н., Волков Д. Л. Основные типы радиационных центров и их влияние на электрофизические параметры кремниевых диодных структур при обработке быстрыми электронами // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. — 2007. — № 2. — С. 22–27.
10. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. — Hoboken-New Jersey, Wiley-Interscience, 2007. — 477 p.

Дата поступления рукописи
в редакцию 01.08 2018 г.

А. В. КАРИМОВ, А. З. РАХМАТОВ, О. А. АБДУЛХАЄВ,
У. Х. АРИПОВА, А. Ю. ХІДІРНАЗАРОВА, Ш. М. КУЛІЄВ

Узбекистан, м. Ташкент,
Фізико-технічний інститут
НВО «Фізика-Сонце» АН РУз
E-mail: karimov@uzsci.net

УПРАВЛІННЯ ПАДІННЯМ НАПРУГИ КРЕМНІЄВОГО ДІОДА ШЛЯХОМ ОПРОМІНЕННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Високочастотні випрямні обмежувальні діоди використовуються в джерелах живлення для випрямлення змінного струму, в елементах захисту радіоелектронного обладнання, а також в перемикаючих пристроях. Вони складають основу пристроїв енергозберігаючих технологій, відповідаючи високим вимогам щодо витримуваної потужності і стабільності параметрів. Основним завданням у технологічному процесі виготовлення високочастотних діодів є забезпечення оптимального значення прямого падіння напруги, яке можна порівняти з контактною різницею потенціалів $p-n$ -переходу, і малого струму витоку.

Дана робота присвячена вивченню впливу радіаційного опромінення та подальшої термічної обробки на вольт-амперні та ємнісні характеристики високочастотних кремнієвих діодів.

Досліджувалися діоди з $p^+-p-n-n^+$ -структурою, виготовлені з пластин кремнію КЕФ-4 n -типу провідності вихідною товщиною 235 мкм. Радіаційну обробку проводили на лінійному прискорювачі електронів ЕЛУ-6. Інтегральний потік «швидких» електронів складав від $1,0 \cdot 10^{15}$ до $2,6 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} , енергія 1,5 МеВ, щільність $1,7 \cdot 10^{11} - 5,5 \cdot 10^{13}$ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Термічну обробку проводили протягом 5 годин за температури 90°C у спеціальній камері.

На основі проведених досліджень показано, що термообробка призводить до зміщення прямої вольт-амперної характеристики в область менших напруг (тобто заданий струм можна досягти за меншої напруги), однак за малих значень струму падіння напруги після термообробки може збільшитися. Зворотній струм зменшується в n разів, спричинюючи зменшення виділеної потужності. При цьому також покращуються і часові характеристики діода за рахунок зниження ємності (до одного порядку).

Ключові слова: дифузний діод, вольт-амперна характеристика, ємнісна характеристика, радіаційне опромінення, термічна обробка, падіння напруги.

DOI: 10.15222/TKEA2018.4.33
UDC 621.315.592.2:546.681'19

A. V. KARIMOV, A. Z. RAKHMATOV, O. A. ABDULKHAEV,
U. H. ARIPOVA, A. Yu. KHIDIRNAZAROVA, Sh. M. KULIYEV

Uzbekistan, Tashkent, Physical-Technical Institute,
Scientific Association Physics-Sun,
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
E-mail: karimov@uzsci.net

CONTROLLING VOLTAGE DROPS IN SILICON DIODES BY ELECTRON IRRADIATION AND THERMAL TREATMENT

High-frequency limiting rectifier diodes are used in power sources for rectifying alternating current, in protective elements of radio-electronic equipment, and in switching devices. They are the basis of energy-saving devices, meeting the high requirements for power limit and performance. The main task in the manufacturing process of high-frequency diodes is to ensure the low leakage current and the optimum value of the forward voltage drop which can be compared with the contact potential difference of the $p-n$ junction.

This paper is devoted to studying the effect of radiation exposure and subsequent heat treatment on the current-voltage and capacitance characteristics of high-frequency silicon diodes. The authors studied $p^+-p-n-n^+$ diodes made of n -type KEF-4 (КЭФ-4) silicon wafers with an initial thickness of 235 μm . Radiation processing was performed using an ELU-6 (ЭЛУ-6) linear electron accelerator. The integral flux of "fast" electrons ranged from $1,0 \cdot 10^{15}$ to $2,6 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} , energy was 1.5 MeV, density was $1,7 \cdot 10^{11} - 5,5 \cdot 10^{13}$ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Heat treatment was performed for 5 hours at a temperature of 90°C in a special chamber.

The studies have shown that heat treatment lead to a shift of the forward current-voltage characteristic to a region of lower voltages (i.e., a given current can be reached at a lower voltage); at low current values, however, the voltage drop may increase after heat treatment. Reverse current decreased fivefold, resulting in a decrease in power output. At the same time, the temporal characteristics of the diode could also be improved by reducing the capacitance (to one order of magnitude).

Keywords: diffuse diode, current-voltage characteristic, capacitance characteristic, radiation exposure, heat treatment, voltage drop.

REFERENCES

1. Sinitsa A.V., Glukhov A.V., Skornyakov S.P., Karimov A.V., Rakhmatov A.Z. [Some features of designing powerful rectifier-limiting diodes for network protection devices]. *Power electronics*, 2015, no. 3, pp. 54–56. (Rus)
2. Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K. Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons. *Microelectronics Journal*, 2004, vol. 35, no. 3, pp. 249–257. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(03\)00194-0](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(03)00194-0)
3. Kozlov V. A., Kozlovski V. V. Doping of semiconductors using radiation defects produced by irradiation with protons and alpha particles. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, iss. 7, pp. 735–761. <https://doi.org/10.1134/1.1385708>.
4. Vobecky J., Hazdra P., Zahlava V. Impact of the electron, proton and helium irradiation on the forward I–V characteristics of high-power P–i–N diode. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, no. 4, pp. 537–544. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(03\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00023-4)
5. Lagov P.B., Drenin A.S. Development of radiation technology for precision control of switching characteristics of silicon power devices. *Proceedings of the International Scientific and Technical Leonardo da Vinci Conference*. Wissenschaftliche Welt, 2013, vol. 1, pp. 130–132. (Rus)
6. Rakhmatov A. Z., Petrov D.A., Karimov A.V. et al. Influence of neutron radiation on breakdown voltage of silicon voltage limiter. *Radioelectronics and Communication Systems*, 2012, vol. 55, iss. 7, pp. 332–334. <https://doi.org/10.3103/S0735272712070060>
7. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Tarasik M. I. et al. Effects of fluences of irradiation with 10^7 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon p⁺-n-diodes. *Acta Physica Polonica A*, 2011, vol. 120, no. 1, pp. 111–114. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.111>
8. Rakhmatov A.Z., Karimov A.V., Sandler L.S., Yodgorova D.M., Skornyakov S.P. [Influence of gamma and electron irradiation on the key parameters of high-power high-frequency diffusion diodes]. *Components and technologies*, St. Petersburg, 2013, no. 10, pp. 140–142. (Rus)
9. Ladygin E.A., Orlova M.N., Volkov D.L. [The main types of radiation centers and their influence on the electro-physical parameters of silicon diode structures during processing by fast electrons]. *Journal Materials of Electronics*, 2007, no. 2, pp. 22–27. (Rus)
10. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Hoboken-New Jersey, Wiley-Interscience, 2007, 477 p.

Описание статьи для цитирования:

А. В. Каримов, А. З. Рахматов, О. А. Абдулхаев, У. Х. Арипова, А. Ю. Хидирназарова, Ш. М. Кулиев. Управление падением напряжения кремниевого диода путем облучения электронами и термической обработки. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 4, с. 33–37. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.4.33>

Cite the article as:

Karimov A. V., Rakhmatov A. Z., Abdulkhaev O. A., Aripova U. H., Khidirnazarova A. Yu., Kuliyeu Sh. M. Controlling voltage drops in silicon diodes by electron irradiation and thermal treatment. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 4, pp. 33–37. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.4.33>

НОВИ КНИГИ

НОВИ КНИГИ

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 3. Методы повышения надежности. — Одесса: Политехперіодика, 2018.

Книга посвящена одной из ключевых проблем проектирования термоэлектрических устройств (ТЭУ) — поиску путей повышения их надежности. Исследованы основные методы повышения показателей надежности ТЭУ: конструктивный, параметрический, структурный и комбинированный. Приведены результаты расчетов основных характеристик и показателей надежности одно- и двухкаскадных ТЭУ в зависимости от геометрии ветвей термоэлементов, токового режима работы, параметров исходных материалов термоэлементов (термоэлектрической эффективности, коэффициента термо-эдс и электропроводности) и проведен анализ полученных результатов. Также рассмотрены простейшие схемы резервирования элементов и проведен сравнительный анализ различных способов включения резерва. Показаны возможности комбинированного (совмещенного) метода повышения показателей надежности ТЭУ путем оценки совместного использования конструктивного и параметрического методов в сравнении с результатами, которые можно получить при их раздельном применении.

Предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, а также разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.

