

УДК 621.316.825

Мощные высокотемпературные кремниевые резисторы таблеточного исполнения

С. С. Асина, Д. Ю. Беккерман

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

Представлены результаты исследования возможности повышения максимально допустимой температуры ($T_{\text{доп}}$) мощных кремниевых резисторов и, как следствие, увеличение номинальной мощности с помощью согласования режимов радиационно-технологического процесса с исходными электрофизическими параметрами резистивных элементов. По результатам исследований разработана технология электронного облучения и отжига, позволившая повысить максимально допустимую температуру ранее разработанных резисторов со 125°C до $140\div 200^\circ\text{C}$.

Первоначально необходимость в мощных кремниевых резисторах таблеточного исполнения была продиктована удобством монтажа резисторов, используемых в защитных РС-цепях, в единой системе охлаждения с мощными быстродействующими диодами и тиристорами таблеточного исполнения.

В процессе разработки резисторов и их апробации в эксплуатационных режимах различных видов электрофизической и измерительной аппаратуры (электропривод, системы питания разного рода генераторов и другие мощные преобразователи энергии и частоты) были обнаружены другие, не менее полезные, достоинства мощных таблеточных резисторов. К ним следует отнести:

- низкое значение собственной индуктивности (менее $5,0\text{ нГн}$), что делает их практически незаменимыми при использовании в качестве измерительных шунтов на токи до 100 кА со скоростью нарастания 20 кА/мкс и выше;
- высокие показатели надежности при эксплуатации, вероятность безотказной работы и ресурс в $2\div 3$ раза выше, чем у сравнимых по мощности обычных резисторов (ТВО, МОУ, С5-40В);

• высокие значения отношения номинальной мощности рассеяния к объему резистора (в 5÷6 раз выше, чем в обычных резисторах).

Основные параметры разработанной серии резисторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	PK123	PK133	PK143	PK153	PK173
Диапазон номинальных сопротивлений ($R_{ном}$), Ом	2,2÷82	1,0÷39	0,68÷22	0,33÷12	0,18÷5,6
Температурная характеристика сопротивления (ТХС), %: 20 ÷ 125 °С -40 ÷ +20 °С	±10 ±20				
Номинальная мощность рассеяния ($P_{ном}$), Вт ($T_c = 85$ °С)	500	800	1000	2000	4000
Размеры, мм: диаметр высота	40 14	54 20	60 20	73 26	107 26
Прижимное усилие, Н ±10 %	3000	6000	12000	18000	25000
Масса, кг	0,08	0,18	0,25	0,6	1,6

Как видно из табл. 1, максимально допустимая температура приборов составляет 125 °С, однако имеется ряд областей, где резисторы могут эксплуатироваться при повышенной температуре окружающей среды. Например, для погружных инверторов в нефтяных скважинах, где $T_{окр. ср} \sim 140$ °С, а также при использовании в высокочастотных и нагрузочных режимах для увеличения надежности преобразователей необходимо повышение максимально допустимой температуры резисторов вплоть до 200 °С.

Кроме того, увеличение $T_{доп}$ не только расширит функциональные возможности мощных таблеточных резисторов, но также позволит повысить номинальную мощность рассеяния, так как

$$P_{ном} = \frac{T_{доп} - T_c}{R_{thrc}},$$

где T_c — температура корпуса резистора, обычно принимаемая равной 85 °С;
 R_{thrc} — тепловое сопротивление резистивный элемент—корпус, которое является константой для каждого типа резистора.

Предпосылки к разработке высокотемпературных резисторов

Особенностью кремния, используемого для изготовления резисторов, является наличие растущей температурной зависимости удельного сопротивления до определенной температуры (T_i), после которой начинается резкий спад, из-за наступления собственной проводимости, обусловленной резким ростом концентрации основных носителей заряда.

Для кремния n -типа проводимости (обычно используемого для изготовления резисторов) имеем [1]:

$$\rho_n = (qn\mu_n)^{-1}, \tag{1}$$

где n — концентрация подвижных электронов в зоне проводимости;
 μ_n — дрейфовая подвижность электронов;
 q — заряд электрона.

Рост $\rho_n(T)$ обусловлен, преимущественно, уменьшением подвижности ($\mu_n = A \cdot T^{-\alpha}$) с увеличением температуры в предположении полной ионизации мелкой примеси в интересующем интервале температур (0–200 °С).

Поскольку сопротивление резистора определяется общеизвестной формулой:

$$R = \rho_n l / S, \quad (2)$$

где ρ_n — вышеупомянутое удельное сопротивление кремния;

l — толщина и S — площадь резистивного элемента,

то температурная характеристика сопротивления резистора (ТХС) может быть вычислена по формуле

$$\text{ТХС} = \frac{R(T_m) - R(T_0)}{R(T_m)} \cdot 100 \% = \frac{\rho_n(T_m) - \rho_n(T_0)}{\rho_n(T_m)} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где T_0 — комнатная температура;

T_m — температура в интервале от T_0 до $T_{\text{доп}}$, при которой сопротивление наиболее отличается от сопротивления при комнатной температуре.

Таким образом, видно, что ТХС резисторов определяется зависимостью $\rho_n(T)$ и, как показывает эксперимент, может находиться в интервале 60–200 % в зависимости от марки кремния и технологии изготовления резисторов.

Для компенсации температурной зависимости сопротивления в [2–4] предлагается вводить в запрещенную зону глубокие уровни, которые при комнатной температуре захватывают подвижные носители (поэтому увеличивается удельное электрическое сопротивление), а с ростом температуры постепенно освобождают их.

Нами [3] разработана технология обеспечения $\text{ТХС} \leq \pm 10 \%$ в интервале температур от $T_0 = 20$ °С до $T_{\text{доп}} = 125$ °С с помощью облучения резистивных элементов ускоренными электронами и последующего термоотжига. При этом концентрация в знаменателе формулы (1) примет вид:

$$n' = n \pm \sum_{i=1}^m N_i / \left\{ 1 + q_i e^{(E_i - F)/kT} \right\}, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^m N_i$ — суммарная концентрация радиационных дефектов, оставшихся

после облучения и отжига, см⁻³;

E_i — энергетический уровень дефекта i -го типа, эВ;

q_i — спиновый фактор вырождения дефекта;

k — постоянная Больцмана, эВ/К.

При правильном выборе режима облучения и отжига [3] можно получить такой температурный рост концентрации $n'(T)$, который скомпенсирует температурный спад дрейфовой подвижности $\mu(T)$ и достичь слабого изменения сопротивления в рабочем интервале температур.

Очевидно, что значение максимально допустимой температуры резистора будет находиться вблизи температуры начала собственной проводимости, выше которой имеет место резкий спад сопротивления кремния.

Чем ниже удельное сопротивление исходного кремния, тем выше температура, при которой начинается собственная проводимость кремния. Данная температура может быть теоретически рассчитана по известной [1] формуле:

$$T_i = \frac{E_g}{k \ln \left(\frac{N_c N_v}{N_d^2} \right)}, \quad (5)$$

где T_i — температура при которой наступает собственная проводимость кремния;

$$E_g = 1,17 - \frac{4,73 \cdot 10^{-4} T^2}{4(T + 636)} \quad (\text{эВ})$$

— температурная зависимость ширины запрещенной зоны кремния;

N_c и N_v — эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне, соответственно;

N_d — концентрация легирующей примеси.

На основании формулы (5) можно произвести расчет зависимости температуры начала собственной проводимости от величины исходного удельного сопротивления кремния n -типа электропроводности (рис. 1). С помощью данной зависимости можно оценить выбор исходного удельного сопротивления для получения требуемой максимально допустимой температуры резистора. Например, для резистора с $\rho_0 = 120$ Ом·см расчетная температура начала собственной проводимости составит 186 °С. Но температура начала собственной проводимости находится в области резкого спада удельного сопротивления, что может привести к положительной обратной связи по температуре и, как следствие, тепловому пробую резистора. Кроме того, при облучении происходит увеличение удельного сопротивления, что приводит к незначительному уменьшению температуры начала собственной проводимости, поэтому на практике принято считать $T_{\text{доп}} = (0,7 \div 0,8) T_i$.

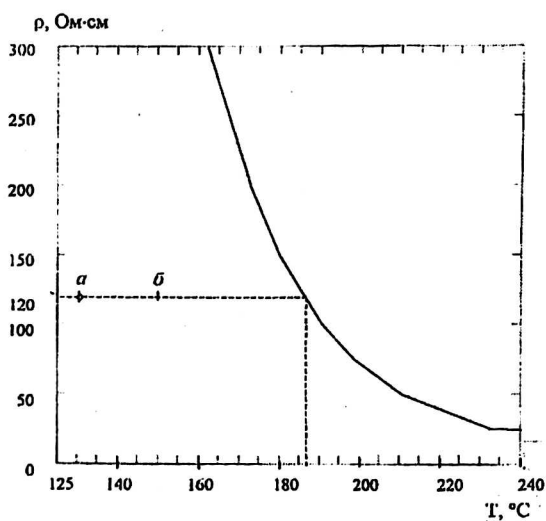


Рис. 1. Зависимость температуры начала собственной проводимости от величины исходного удельного сопротивления кремния n -типа электропроводности

Таким образом, для рассматриваемого резистора с $\rho_0 = 120$ Ом·см максимально допустимая температура будет находиться в пределах $T_{\text{доп}} = (0,7 \div 0,8) \cdot 186 \text{ °С} = (130 \div 149) \text{ °С}$ (см. рис. 1, точки "а" и "б"). Аналогичные оценки могут быть произведены для кремния с другими значениями удельного сопротивления.

Экспериментальные исследования

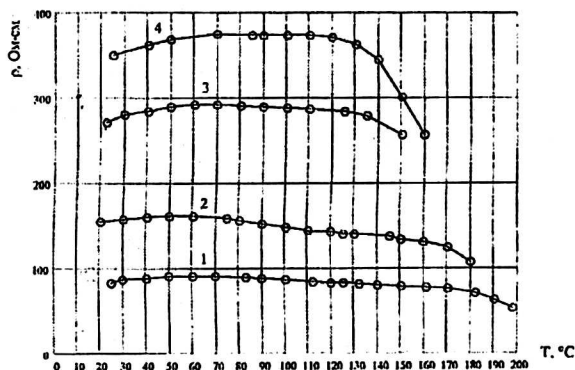
Для проведения экспериментальных исследований возможности повышения $T_{\text{доп}}$ с помощью радиационной обработки при сохранении ТХС $\pm 10\%$ были изготовлены резистивные элементы по стандартной технологии [3, 4] на кремнии с различными значениями исходного удельного сопротивления $\rho_0 \approx 23, 60, 120$ и 150 Ом·см.

Подбор режимов облучения ускоренными электронами и последующего отжига производился с помощью разработанной программы "Термит" (см. приложение).

Облучение производилось на электронном ускорителе с энергией $\sim 3,5$ МэВ, плотностью пучка $0,05$ мкА/см². На рис. 2 приведены температурные зависимости удельного электрического сопротивления изготовленных резисторов.

Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления кремния, прошедшего радиационную обработку:

- 1 — $\rho_0 = 23$ Ом·см;
- 2 — $\rho_0 = 60$ Ом·см;
- 3 — $\rho_0 = 120$ Ом·см;
- 4 — $\rho_0 = 150$ Ом·см



Как следует из анализа ТХС (рис. 3) для резисторов с $\rho_0 = 23$ Ом·см максимально допустимая температура составляет 180°C , для $\rho_0 = 60$ Ом·см — $T_{\text{доп}} = 160^\circ\text{C}$, для $\rho_0 = 120$ Ом·см — $T_{\text{доп}} = 140^\circ\text{C}$, для $\rho_0 = 150$ Ом·см — $T_{\text{доп}} = 125^\circ\text{C}$, что достаточно хорошо согласуется с расчетными значениями (см. рис. 2).

Разработанные технические решения защищены заявкой на изобретение [6].

В табл. 2 приведены основные параметры мощных кремниевых резисторов с повышенным значением максимально допустимой температуры.

Таблица 2

$T_{\text{доп}}$, °C	Номинальное сопротивление ($R_{\text{ном}}$), Ом, не более					$P_{\text{ном}}(T_{\text{доп}})$
	РКТ123	РКТ133	РКТ143	РКТ153	РКТ173	$P_{\text{ном}}(125^\circ\text{C})$
125	82	39	22	12	5,6	1
130	56	27	15	6,8	3,9	1,12
160	27	12	6,8	3,3	1,8	1,87
180	2,7	1,2	0,82	0,39	0,22	2,375
200	1,5	0,68	0,46	0,22	0,12	2,875

В результате повышения максимально допустимой температуры становится возможным использовать резисторы при более высокой температуре корпуса, т. е. можно снизить требования к системе охлаждения, или при большей номинальной мощности рассеяния ($P_{\text{ном}}$), чем для резисторов, у которых $T_{\text{доп}} = 125^\circ\text{C}$.

Как видно из табл. 2, увеличение максимально допустимой температуры резистивного элемента позволяет увеличить номинальную мощность рассеяния резисторов ($P_{\text{ном}}$) или увеличить надежность резисторов при эксплуатации с номинальной мощностью рассеяния $P_{\text{ном}}(T_{\text{доп}} = 125^\circ\text{C})$, что может быть использовано в высокочастотных и нагрузочных режимах работы.

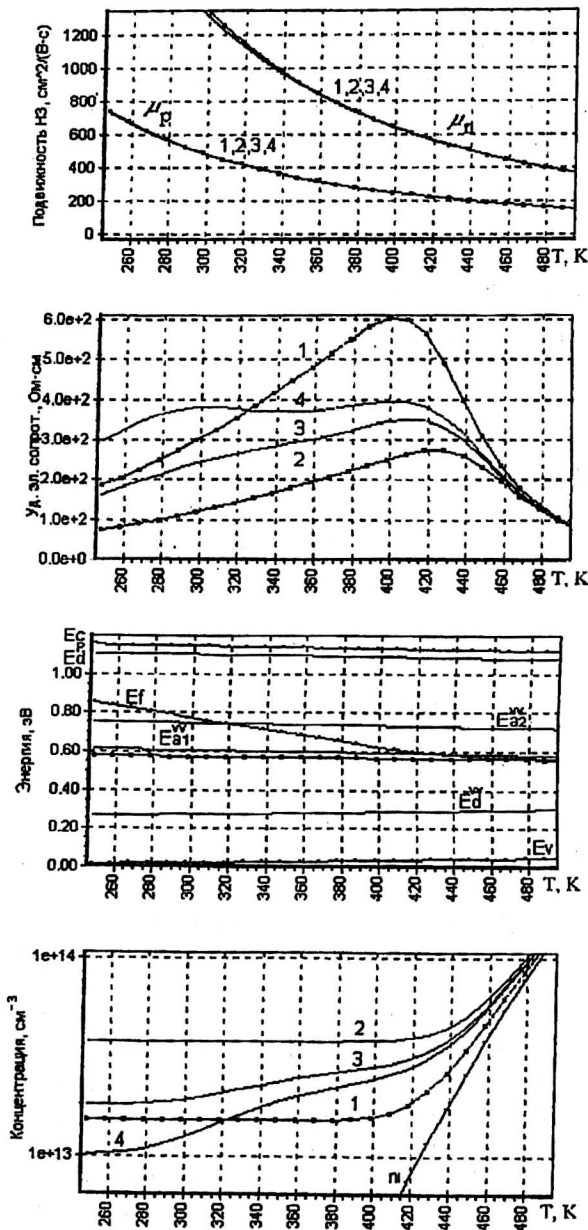


Рис. 3. Пример расчетов программой "Термит" для исходного кремния n-типа проводимости с $\rho_0 = 300 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (кривая 1), $\rho_0 = 120 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (кривая 2), а также для $\rho_0 = 120 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ с концентрацией дивакансий $N_{VV} = 1,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (кривая 3) и $N_{VV} = 1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (кривая 4)

Следовательно, становится возможным понизить себестоимость схем, разработанных на основе резисторов с повышенной максимально допустимой температурой. Например, можно использовать резистор РКТ123 с повышенной $T_{\text{доп}} \approx 180 \text{ }^\circ\text{C}$ вместо двух резисторов РК123 с $T_{\text{доп}} \approx 125 \text{ }^\circ\text{C}$, соединенных последовательно или параллельно.

Выводы

В данной работе проведено согласование режимов радиационной обработки и величины удельного электрического сопротивления кремния, позволяющее повысить максимально допустимую температуру мощного кремниевого резистора от 125 до 200 $^\circ\text{C}$ при сохранении ТХС в пределах $\pm 10 \%$ (в интервале температур от 25 $^\circ\text{C}$ до $T_{\text{доп}}$).

Повышение максимально допустимой температуры позволяет либо увеличить номинальную мощность рассеяния, либо эксплуатировать резисторы при повышенной температуре окружающей среды, что приводит к улучшению массогабаритных показателей преобразователей, собранных на их основе и к снижению себестоимости схем, собранных на основе усовершенствованных резисторов.

Приложение

Программа "Термит"

Известно, что сопротивление резистора может быть вычислено по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p} \frac{l}{S}, \quad (6)$$

где l — толщина резистивного элемента;

S — площадь поперечного сечения;

ρ — удельное электрическое сопротивление полупроводника.

Для расчета удельного сопротивления кремния при отсутствии внешних электрических полей необходимо:

- решить уравнение электронейтральности:

$$\sum N_d^+ + p = \sum N_a^- + n, \quad (7)$$

- рассчитать подвижности носителей заряда, учитывая основные типы рассеяния:

на акустических колебаниях кристаллической решетки;

на атомах ионизированной примеси, что оказывает существенное влияние, особенно при низких температурах;

на нейтральной примеси необходимо учитывать, когда концентрация ионизированной примеси мала, а нейтральной — велика. Это наблюдается при очень низких температурах;

на дефектах, созданных при облучении высокоэнергетичными электронами, необходимо учитывать как рассеяние на ионизированной примеси.

На основе формул (1)—(7) создана программа "Термит", позволяющая производить расчет температурных зависимостей уровня Ферми, концентрации подвижных носителей заряда и ионизированных центров, подвижности и удельного электрического сопротивления. Программа предназначена для работы в графической операционной системе MS Windows 95 (и выше). Она позволяет графически отображать и обрабатывать результаты расчетов, а также сохранять их в текстовом файле. При необходимости можно распечатать форму с графиками на принтере непосредственно из программы. Для удобства анализа зависимостей в программе можно строить графики от температуры в градусах Цельсия и Кельвина, а также от обратных градусов Кельвин (T^{-1}). Возможны хранение и выборочное построение графиков, запомненных в трех массивах данных.

Исходными данными для проведения расчетов являются глубины залегания в запрещенной зоне и концентрации легирующей примеси и радиационных дефектов. Решение уравнения электронейтральности позволяет вычислить как концентрации подвижных носителей заряда, так и степень ионизации электрически активной легирующей примеси и радиационных дефектов. На основе информации о степени ионизации атомов и дефектов

можно определить величину подвижности, ограниченной механизмом рассеяния на ионизированной примеси. Проведя расчеты в заданном интервале температур можно получить температурные зависимости положения уровня Ферми, концентрации подвижных носителей заряда, степени ионизации примесных атомов и радиационных дефектов, дрейфовой подвижности носителей заряда и удельного электрического сопротивления кремния.

Пример расчетов см. на рис 3. Из рисунка видно, что при температуре $T \sim 320$ К уровень Ферми проходит один из компенсирующих энергетических уровней ($E_{VV} = E_c - 0,4$ эВ), введенных при облучении ускоренными электронами и последующей термообработке. При температурах, близких к указанной, происходит увеличение концентрации подвижных носителей заряда, обусловленное освобождением электронов с компенсирующего акцепторного уровня дивакансий. Повышение концентрации носителей заряда компенсирует спад дрейфовой подвижности и, как следствие, снижает резкую (до 200 %) температурную зависимость сопротивления до величины менее 20 %. На рис. 3 кривая 3 моделирует облучение дозой Φ_1 , а кривая 4 — дозой $\Phi_2 > \Phi_1$. Кроме дивакансий, программа позволяет производить расчеты для других радиационных дефектов (А-, Е-, К-центров) и примесей (например, Au и Pt), создающих глубокие уровни в запрещенной зоне кремния и тем самым компенсирующих температурную зависимость дрейфовой подвижности.

В настоящее время ведется дальнейшая работа над программой в целях совершенствования математических моделей и расширения ряда описываемых физических процессов.

Л и т е р а т у р а

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. UK patent Application GB 2025147, Calligaro A. M.: Silicon resistor having a very low temperature coefficient.
3. Пат. 2086043 РФ, кл. Н 01 2, 29/30, 21/263. Мощный полупроводниковый резистор и способ его изготовления/Асина С. С., Горкин Е. В., 1995.
4. Asina S. S., Gorkin E. V. Power Semiconductor Resistor//6th European Conference on Power Electronics (Spain), Proceedings, 1995. V. 1. P. 1207.
5. Асина С. С., Горкин Е. В. Мощный полупроводниковый резистор и перспективы его использования//Электротехника, 1997. № 8. С. 56.
6. Асина С. С., Беккерман Д. Ю. Заявка на изобретение № 2000122023. Мощный полупроводниковый резистор и способ его изготовления. Приоритет от 17.08.2000 (положительное решение от 24.01.01).

Power high temperature press-pack resistors

S. S. Asina, D. U. Bekkerman

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The investigation results of possibility to increase maximum allowable temperature for power silicon resistors (T_{rm}) by means of irradiation technology agreeable with initial electrophysical parameters of resistive elements are presented. On results of the investigations technology of electron irradiation and postirradiation annealing in order to increase maximum allowable temperature for before known power resistors from 125 °C to 140—200 °C was designed.