

Радиационная технология изготовления мощных кремниевых резисторов

АСИНА С.С., КОКИН С.А., ФИЛАТОВА Т.В.

Представлены результаты разработки радиационной технологии изготовления мощных кремниевых резисторов. Одним из оригинальных решений при этом является использование эффекта «отрицательного» отжига радиационных дефектов для уменьшения дозы облучения низкоомного кремния в 3–4 раза, что является следствием снижения себестоимости изготовления. Благодаря разработанной технологии стал возможным выпуск нового поколения мощных кремниевых резисторов с широким спектром $R_{\text{НОМ}}=0,15\text{--}82\text{ Ом}$, $P_{\text{НОМ}}=500\text{--}7500\text{ Вт}$, $T_{\text{рм}}=125\text{--}180\text{ °С}$ для комплектации энергосберегающей преобразовательной техники.

Ключевые слова: кремниевые резисторы, метод изготовления, радиационная технология

Мощные кремниевые резисторы таблеточного исполнения впервые были разработаны и изготовлены в ВЭИ им. В.И. Ленина в начале 90-х годов прошлого столетия. Конструкция и способ изготовления запатентованы в России [1] и отмечены золотой медалью на Международной выставке патентов в 1999 г. Инициатором разработки был ВНИИТВЧ, для которого в те годы были разработаны и поставлялись мощные быстродействующие тиристоры ТБ 333-320-18 А2К3 и диоды ДЧЛ 133-320-16 для комплектации генераторов СЧГ9-250/10.

Необходимость разработки таблеточных резисторов мотивировалась прежде всего удобством монтажа резисторов (используемых в защитных РС-цепях) в единой системе водяного охлаждения с мощными быстродействующими диодами и тиристорами таблеточного исполнения. Позже были выявлены и другие достоинства: высокая удельная мощность, низкие значения паразитной индуктивности, высокие показатели надежности и др.

Кремниевые резисторы появились почти на 30 лет позже мощных полупроводниковых приборов (диодов и тиристоров), в то время, когда достаточно широко стала использоваться радиационная технология регулирования параметров диодов и тиристоров со всеми ее достоинствами. Дело в том, что резистивный элемент представляет собой кремниевый диск диаметром D , толщиной d с исходным удельным сопротивлением ρ_0 , выбираемых в зависимости от требуемых номинальных значений

Results of the development of a radiation technology for making high-capacity silicon resistors are presented. Using the so-called negative annealing effect of radiation flaws for reducing the radiation dose of low-resistance silicon by a factor of 3–4 is one of original solutions applied in the developed technology, due to which a lower cost of manufacture is achieved. The developed technology made it possible to manufacture new-generation silicon resistors with a wide spectrum: $R_{\text{nom}}=0,15\text{--}82\text{ ohm}$, $P_{\text{nom}}=500\text{--}7500\text{ W}$, and $T_{\text{rm}}=125\text{--}180\text{ °C}$ for use in energy-efficient converter systems.

Key words: high-capacity silicon resistors, manufacturing method, radiation technology

мощности $P_{\text{НОМ}}$ и сопротивления $R_{\text{НОМ}} = \rho_n \frac{d}{\pi D^2}$.

Особенностью кремния, используемого для изготовления мощных полупроводниковых приборов, является наличие растущей температурной зависимости удельного сопротивления $\rho_n = (q \times n \times \mu_n)^{-1}$, обусловленной падающей с ростом температуры T дрейфовой подвижности носителей заряда ($\mu \sim T^{-3/2}$). Как показывает эксперимент, температурная характеристика сопротивления (ТХС) может находиться в интервале $60\pm 200\%$ в зависимости от марки кремния и технологии изготовления приборов. Именно по этой причине долгое время кремниевые резисторы не разрабатывались.

Идея разработанного нами способа стабилизации температурной зависимости удельного сопротивления кремния [1, 3] заключается в том, что с помощью радиационного облучения и последующего отжига при температуре 200 °С в запрещенную зону кремния вводятся такие центры захвата основных носителей заряда, чтобы с ростом температуры увеличение удельного сопротивления за счет уменьшения дрейфовой подвижности носителей компенсировалось увеличением концентрации основных носителей заряда, освобождающихся с захваченных уровней при более низких температурах. Таким образом, в выражении $\rho_n = (q \times n \times \mu_n)^{-1}$ с ростом T значение μ_n падает, а n должно расти,

обеспечивая тем самым стабилизацию $\rho_n \approx \text{const}$ в интервале рабочих температур резисторов.

При правильном выборе режима облучения ускоренными электронами и последующего термоотжига в зависимости от исходных параметров кремния можно получить температурный рост концентрации $n(T)$, который скомпенсирует температурный спад дрейфовой подвижности $\mu(T)$, и достичь ТХС $\pm 5\%$. Для подбора режимов облучения и отжига разработано программное обеспечение «Термит» [2].

По радиационной технологии были разработаны и выпускаются два поколения мощных кремниевых резисторов РК123, РК223, РК133, РК233, РК143, РК243, РК153, РК253 и РК173, РК273 [4], имеющих широкий спектр $R_{\text{ном}}=0,15 \div 82$ Ом, $P_{\text{ном}}=500 \div 7500$ Вт, $U_{\text{max}}=1000 \div 2500$ В, ТХС $\leq \pm 5\%$ в интервале максимально допустимых температур $T_{\text{rm}}=125 \div 200$ °С.

Увеличение максимально допустимой температуры резисторов, являющееся внутренним резервом увеличения номинальной мощности, сопряжено с необходимостью использования низкоомного кремния, увеличения дозы электронного облучения для компенсации температурной зависимости удельного сопротивления кремния и, как следствие, увеличения себестоимости изготовления.

Для наглядности в табл. 1 приведены примерные соотношения между требуемой максимально допустимой температурой T_{rm} , необходимым исходным удельным сопротивлением ρ_0 , дозой облучения Φ , временем облучения t и стоимостью облучения C одного резистивного элемента на ускорителе «Электроника ЭЛУ-6» энергией $\sim 3,5$ МэВ с последующим термоотжигом при $T=200$ °С в течение 1 ч при изготовлении резисторов РК233.

Таблица 1

Параметр	Температура T_{rm} , °С		
	125	180	200
ρ_0 , Ом·см	120	20	10
Φ , см ⁻²	3,4·10 ¹⁵	2·10 ¹⁶	3,6·10 ¹⁶
t , ч	0,76	4,5	8,1
C , USD	2,64	15,75	28,35

Полная себестоимость изготовления резистора РК233 ($T_{\text{rm}}=125$ °С) составляет (60÷64) USD.

Из табл. 1 видно, что необходимость увеличения максимально допустимой температуры резистора РК233 со 125 до 200 °С ведет к увеличению стоимости процесса облучения более чем в 10 раз и может составить примерно 50% полной себестоимости изготовления резистора, что неприемлемо для большинства пользователей.

Для решения данной проблемы предлагается способ изготовления мощных высокотемпературных резисторов, при котором облучение резистивных элементов происходит ускоренными электронами [4], дозами, в 3÷4 раза меньшими ранее известных, с последующим термоотжигом в интервале температур 260÷280 °С.

Экспериментально наблюдаемое увеличение концентрации радиационных дефектов при отжиге в интервале температур 240÷300 °С, по-видимому, обусловлено возникновением К-центров (дивакансия – углерод-кислород) и вызвано так называемым «отрицательным» отжигом [5] (рис. 1).

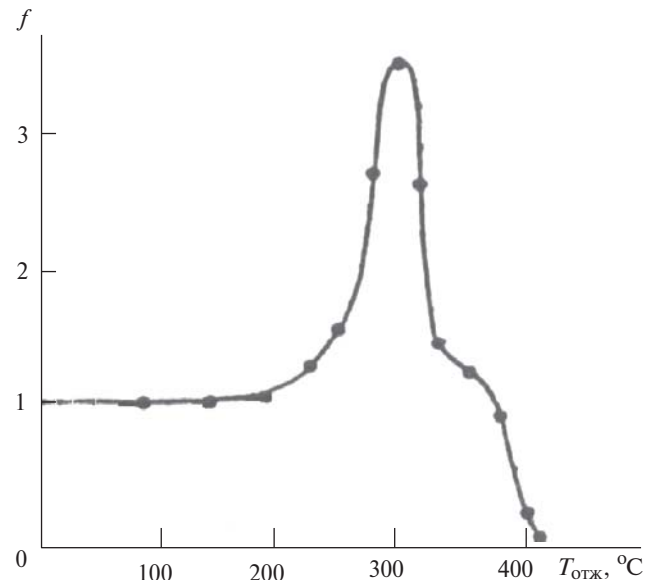


Рис. 1. Зависимость доли неотожженных дефектов от температуры отжига в n -кремнии с $\rho_0=90$ Ом·см, облученном дозой электронов $3 \cdot 10^{15}$ см⁻²

Достаточно высокая концентрация дефектов, обусловленная «отрицательным» отжигом, позволяет снизить дозу электронного облучения, в результате чего возможно производство мощных высокотемпературных резисторов вплоть до $T_{\text{rm}}=200$ °С по приемлемым ценам. Повышение максимально допустимой температуры резистора и, как следствие, увеличение номинальной мощности (см. табл. 2) позволяет снизить массогабаритные показатели и себестоимость изготовления мощных преобразователей.

Таблица 2

Резистор	Параметр		
	ρ_0 , Ом·см	T_{rm} , °С	$P_{\text{ном}}$, Вт ($T_c = 85$ °С)
РК133	120	125	800
РК233	60	160	1500
РК233	20	180	200
РК233	10	200	2300

Одним из последних достижений в области расширения возможностей радиационной технологии изготовления мощных кремниевых резисторов является способ контролируемого увеличения удельного сопротивления кремния в процессе двухстадийного облучения ускоренными электронами и термоотжига.

Актуальность. Номинальное сопротивление резисторов должно удовлетворять требованиям гостированного ряда, например E24, т.е. быть кратным значениям 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1. Кремний выпускается также согласно гостированному ряду исходного удельного сопротивления. Например, марка кремния КОФ 76 имеет ряд с ρ_0 , равным 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120 и т.д. до 350 Ом·см (ТУ 48-4-443-830). Нетрудно показать, что при изготовлении резисторов, например типа РК133 (\varnothing 32 мм, $d=2,4$ мм) из кремния КОФ76 с $\rho_0 = 30$ Ом·см, 40 Ом·см и 50 Ом·см, можно получить резисторы с $R_{\text{НОМ}} = 1,8; 2,4$ и 3,0 Ом соответственно. Тогда как резисторы РК133 с ближайшими значениями $R_{\text{НОМ}} = 2,0; 2,2; 2,7; 3,0; 3,3$ Ом из ряда E24 не могут быть изготовлены из-за отсутствия кремния с промежуточными значениями ρ_0 .

Цель – создать способ изготовления мощных кремниевых резисторов с широким спектром номинальных сопротивлений из кремния с ограниченным рядом значений исходных удельных сопротивлений.

Сущность. В отличие от известных способов изготовления мощных кремниевых резисторов предлагается облучение ускоренными электронами проводить в два этапа. На первом облучение проводят дозой, которая обеспечивает контролируемое увеличение удельного сопротивления до требуемого значения посредством термического отжига при температуре 470 ± 480 °С в течение 2÷3 ч. На втором этапе облучение проводят дозой, которая обеспечивает минимизацию ТХС требуемого увеличенного удельного сопротивления посредством термического отжига (рис. 2).

Наблюдаемое увеличение удельного сопротивления *n*-кремния ускоренными электронами с последующим отжигом в интервале температур 460 ± 490 °С, по-видимому, обусловлено возникновением термоакцепторов (активация атомов бора), частично компенсирующих донорную проводимость исходного кремния [6] (рис. 3).

Предложенный способ имеет ряд ограничений. С одной стороны, суммарная доза облучения не должна быть настолько большой, чтобы процесс облучения стал экономически нецелесообразным, с другой стороны, недопустимо облучение дозами,

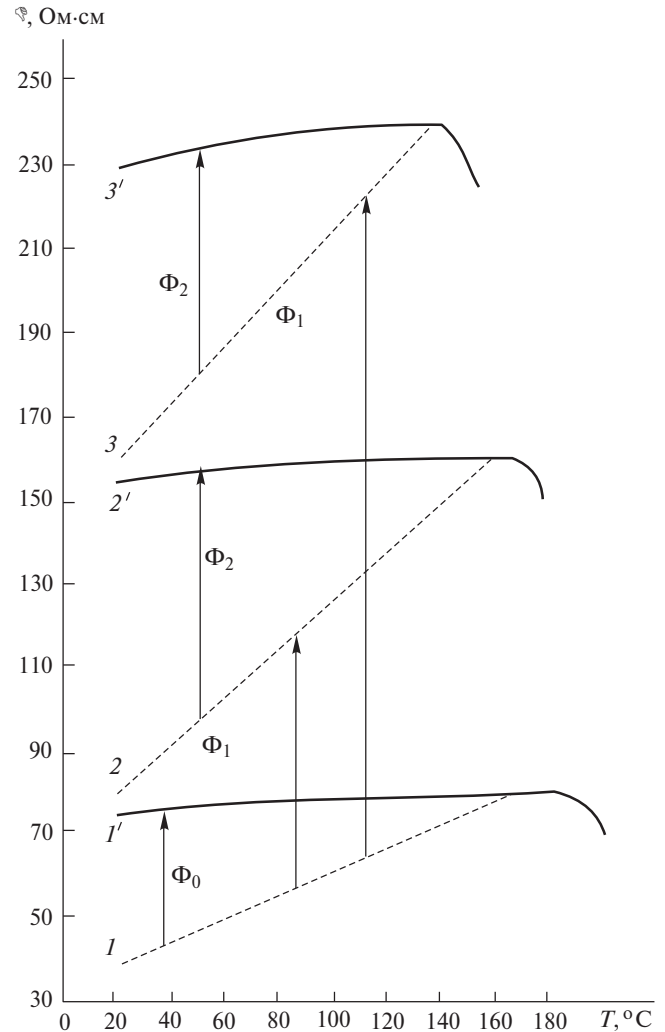


Рис. 2. Температурные характеристики удельного сопротивления резистивных элементов РК133, изготовленных из кремния с $\rho_0=40$ Ом·см: 1 – ТХС исходного элемента, изготовленного из кремния с $\rho_0=40$ Ом·см; 1' – ТХС элемента после электронного облучения дозой $\Phi_0=10^{16}$ см⁻² и отжига при температуре 200 °С по известному способу [1], позволяющему получить РК133 с $R_{\text{НОМ}}=2,4$ Ом и ТХС $=\pm 5\%$; 2 – ТХС элемента, изготовленного из кремния с исходным $\rho_0=40$ Ом·см, облученного на первом этапе дозой $\Phi_1=10^{16}$ см⁻² с отжигом при температуре 475 °С в течение 2,5 ч; 2' – ТХС элемента, облученного на втором этапе дозой $\Phi_2=0,5\cdot 10^{16}$ см⁻² с отжигом при 200 °С, позволяющими поднять ρ с 40 до 80 Ом·см и получить резистор РК 133 с $R_{\text{НОМ}} = 4,8$ Ом и ТХС $= \pm 3,2\%$ по предлагаемому методу; 3 – ТХС элемента, изготовленного из кремния с исходным $\rho_0=40$ Ом·см, облученного на первом этапе дозой $\Phi_1=1,5\cdot 10^{16}$ см⁻² с отжигом при температуре 475 °С в течение 2,5 ч; 3' – ТХС элемента, облученного на втором этапе дозой $\Phi_2=0,33\cdot 10^{16}$ см⁻² с отжигом при 200 °С, позволяющими поднять ρ с 40 до 240 Ом·см и получить резистор РК133 с $R_{\text{НОМ}} = 7,2$ Ом и ТХС $= \pm 4\%$

приводящими к увеличению удельного сопротивления кремния $\rho_m \geq 300$ Ом·см, так как максимально допустимая температура таких резисторов становится менее 125 °С, что не соответствует требованиям технических условий. Тем не менее данный способ позволяет прецизионно увеличивать удельное сопротивление кремния и, как следствие, расширять ряд номинальных сопротивлений при использовании одной марки кремния и сохранении ТХС $\leq \pm 10\%$.

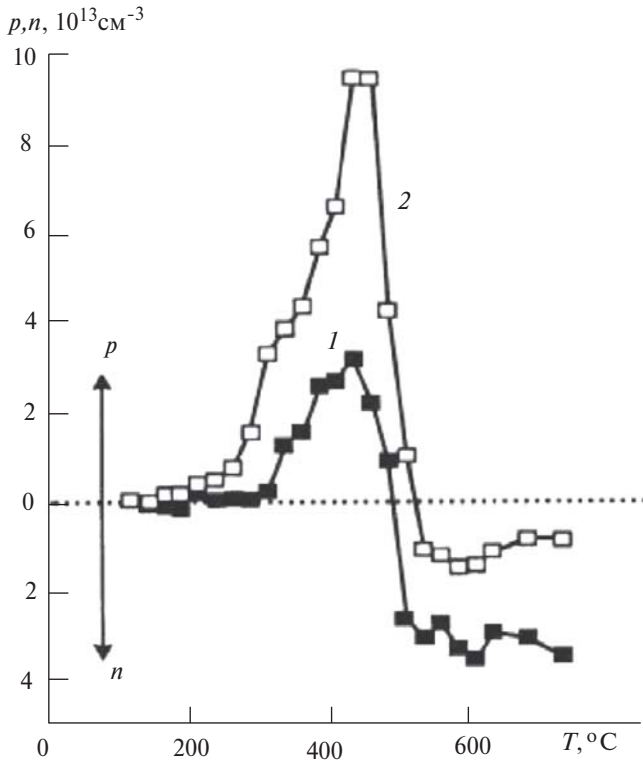


Рис. 3. Зависимость концентрации носителей заряда (n, p) в n -кремнии с исходным удельным сопротивлением 200 Ом·см (1) и 800 Ом·см (2), облученном ускоренными электронами дозой $3 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$, от температуры отжига

Из табл. 3 видно, что с помощью предлагаемого способа из кремния с $\rho_0 = 30$ Ом·см можно изготовить не один резистор с $R_{НОМ} = 1,8$ Ом, а еще семь со значениями $R_{НОМ}$ из гостированного ряда, а при изготовлении РК 133 из кремния с $\rho_0 = 60$ Ом·см — десять с указанными значениями $R_{НОМ}$.

Таблица 3

Сопротивление резистора	Удельное сопротивление кремния ρ_0 , Ом·см	
	30	60
$R_{НОМ}$, Ом (по прототипу)	1,8	3,9
$R_{НОМ}$, Ом (по предлагаемому способу) ряд E24	2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6	4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1; 10,0

Радиационная технология позволяет повысить выход годной продукции, снизить ее себестоимость, сократить сроки изготовления и поставки. К ее достоинствам при изготовлении мощных кремниевых резисторов следует также отнести возможность восстановления удельного сопротивления кремния за счет высокотемпературного отжига и повторного использования.

В зависимости от назначения (поглотители, делители, шунты, РС-снабберы и др.), а также достигнутого уровня значений $R_{НОМ}$ и $P_{НОМ}$ разработанные резисторы применяются во многих видах электронной, электрофизической и измерительной аппаратуры (электропривод, системы питания генераторов и лазеров, другие мощные преобразователи энергии и частоты). Например, в ЗАО «Энергомаш» (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш» при комплектации преобразователей частоты на напряжение 3000 В и номинальный ток 2×1250 А для сброса энергии коммутационных перенапряжений наряду с запираемыми тиристорами IGCT типа 5SHY35L4511 фирмы АВВ применяются мощные высокотемпературные резисторы РК 273-2,5. Приборы были испытаны в режиме мощности 4500 Вт. Поставлено более 1000 шт., за время эксплуатации выхода из строя резисторов не было. Аналогичные отзывы поступают от изготовителей различных по мощности преобразователей, использующих мощные кремниевые резисторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент №2086043 РФ. Мощный кремниевый резистор и способ его изготовления/С.С. Асина, Е.В. Горкин. Приоритет 23.03.1995.
2. Асина С.С., Беккерман Д.Ю. Мощные высокотемпературные кремниевые резисторы таблеточного исполнения. — Прикладная физика, 2001, №4.
3. ФГУП ВЭИ сайт: www.vei.ru
4. Патент № 2284610 РФ. Способ изготовления мощных высокотемпературного полупроводникового резистора/С.С. Асина, Н.Г. Комыса. Приоритет 07.04.2005.
5. Лугаков П.Ф., Лукашевич Т.А., Шуша В.В. Стадия отрицательного отжига радиационных дефектов в n -кремнии. — Физика и техника полупроводников, 1979, т.13.
6. Стась В.Ф. и др. Термоакцепторы в облученном кремнии. — Физика и техника полупроводников, 2000, т. 34, вып. 2.

Авторы: Асина Светлана Степановна окончила факультет электронной техники МЭИ в 1969 г. В 1979 г. защитила кандидатскую диссертацию «Исследование коммутационных параметров тиристоров и симисторов и разработка конструктивно-технологических способов их регулирования». Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Кокин Сергей Александрович окончил Московский институт стали и сплавов в 1999 г. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.

Филатова Татьяна Викторовна окончила факультет электронной техники МЭИ в 1981 г. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.