

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. А. ГРИГОРЯН

ПОЛУЧЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ НОМИНАЛОВ ВАРИСТОРОВ  
 НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО  
 СОПРОТИВЛЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Варисторы — это нелинейные полупроводниковые сопротивления (НПС), вольтамперная характеристика которых симметрична относительно начала координат, а аналитическая зависимость аппроксимируется в виде

$$I = BU^{\beta}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент нелинейности,

$B$  — постоянная, зависящая от физико-химических свойств материала и технологии изготовления изделия.

По определению коэффициент нелинейности есть отношение динамической проводимости к статической

$$\beta = \frac{\sigma_d}{\sigma_{ст}} = \frac{dI}{dU} \cdot \frac{U}{I}. \quad (2)$$

В основе изготовления варисторов лежит керамическая технология [1, 2], в качестве сырья служит электротехнический карбид кремния в виде порошка зернистостью до 150 микрон. Порошок скрепляется соответствующей связкой с оформлением в определенную конструкцию, согласно технологии, схема которой приведена на рис. 1.

Установлено, что с увеличением гранулометрии порошка уменьшается удельное сопротивление спрессованного конгломерата (рис. 2). Теоретически обосновать этот экспериментально полученный результат пока не удалось из-за неясностей в энергетической диаграмме поликристаллических структур. Однако в первом приближении можно использовать модель со сферическими частицами при точечном контактировании зерен. С увеличением крупности зерен напряжение, приходящееся на каждый последовательный зазор, увеличится при одном и том же значении приложенного напряжения, а следовательно, электропроводность порошка с более крупными зёрнами (рис. 3а) при прочих равных условиях должна быть больше, чем порошка с мелкими зёрнами (рис. 3б). Поскольку  $U_1 > U_2$ , то эмиссия носителей на контактах больших зерен будет больше, чем на малых. Это явление может быть взято за основу для сортировки зерен по фракциям. Согласно ГОСТ 3584-53 карборунд можно просеять по зерни-

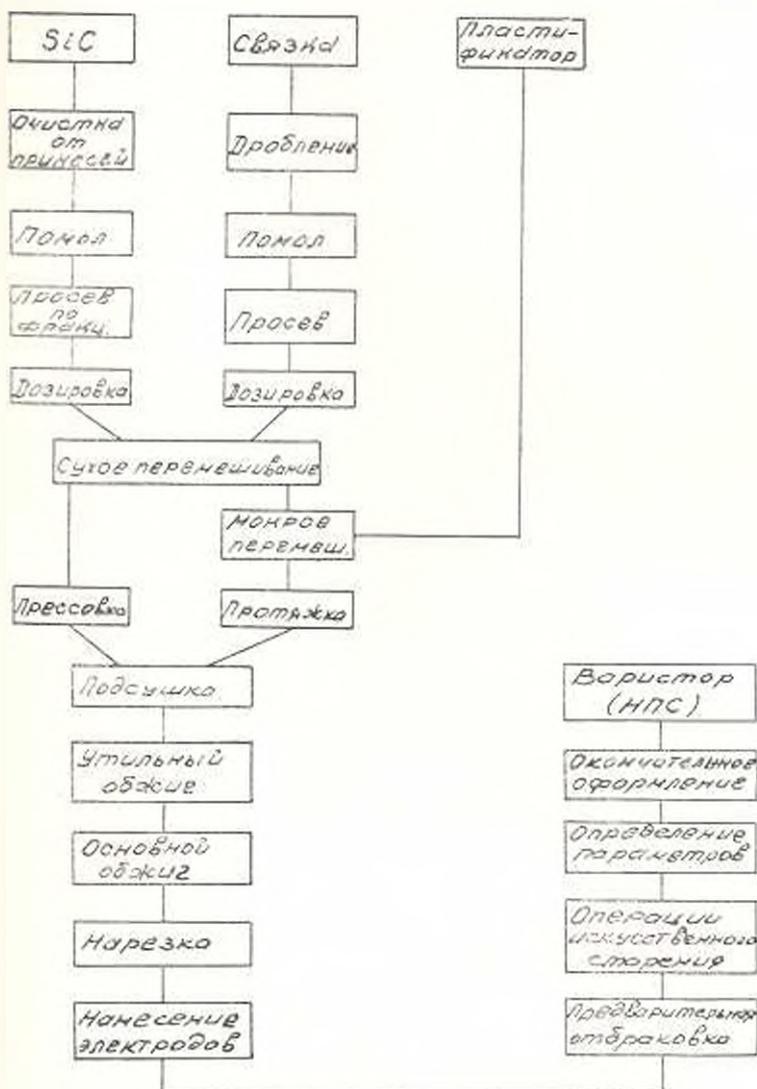


Рис. 1 Схема технологического процесса изготовления варистора на керамической связке.

стости на группы через сита 005, 0063, 008, 0100, 0125, 0160 и др. Это значит, что в первую группу попадут зерна с размерами 50–63 микрон, во вторую — 63–80 микрон и т. д. Меньше 50 микрон сортировку проводить через сита в настоящее время практически невозможно. В то же время может оказаться, что для параметров варисторов может понадобиться малая зернистость. С другой стороны известно, что зерна карборунда, попавшие в одну и ту же группу, могут иметь разное значение удельного сопротивления, а следовательно, изготовленные из них сопротивления будут иметь разные параметры. Действительно, электропроводность карбида кремния как и любого другого полупроводникового материала зависит от ряда таких

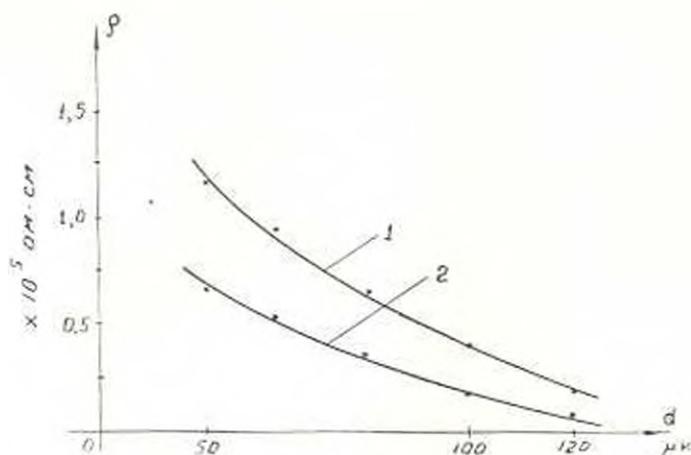


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления порошка карборунда от средней зернистости при  $P = 1000 \text{ кг/см}^2$ :  
1 — при  $E = 150 \text{ в.с.м.}$ , 2 — при  $E = 300 \text{ в.с.м.}$

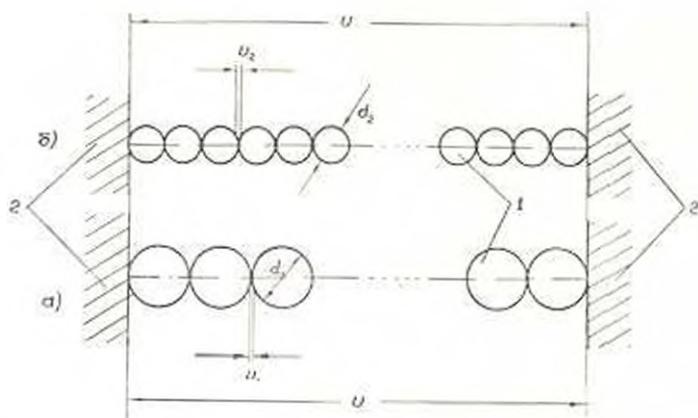


Рис. 3. Модель цепочки зерен и варистора: а) крупная фракция, б) мелкая фракция. 1 — зерна карбида кремния, 2 — омические контакты.  $u_1, u_2$  — напряжения на контактах зерен,  $d_1, d_2$  — диаметры зерен.  $u > u_1$ , так как  $d_1 > d_2$

факторов, как степень легирования, несовершенства, наличие примесей и др. Экспериментально установлено, что пропуская порошок, примерно одной зернистости, в сильном электрическом поле наблюдается поляризация зерен и в результате действия сил поля они получают соответствующее отклонение (рис. 4). Сортируемый таким образом порошок имел градиент в удельном сопротивлении. Причем, по краям насыпи порошки отличались по  $\rho$  в 2–3 раза. Отсюда следует, что сортировка порошка только по зернистости не может обеспечить с большой точностью попадание в требуемые параметры. Поэтому возникает необходимость после просева проводить дополнительную сортировку порошка по удельному сопротивлению (удельной электропроводности). Это бывает, особенно, необходимо для изго-

товления сопротивлений из зерен менее 50 микрон, когда практически невозможно сортировать по зернистости.

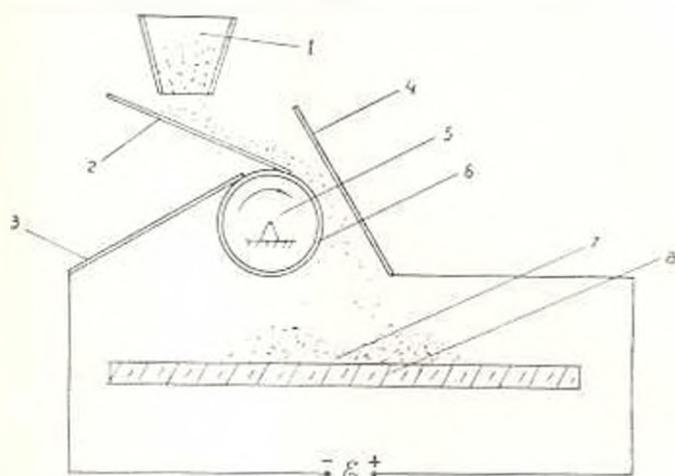


Рис. 4. Отклонение зерен  $SiC$  в электростатическом поле ( $U = 7 - 10$  кВ) в зависимости от величины удельного сопротивления: 1 — бункер, 2 — направляющая, 3 — прижимной контакт, 4 — первый электрод (плоскость), 5 — изоляционный цилиндр, 6 — второй электрод (оплетка цилиндра), 7 — насыпь отклоненного порошка, 8 — подставка.

В табл. 1 приведены некоторые значения такой сортировки для разных смесей порошков при удельном давлении на порошок порядка  $1000 \text{ кг/см}^2$ .

Предварительно экспериментальным путем необходимо установить, какой granulометрии и смеси порошков, а также какому удельному сопротивлению соответствует требуемый типонминал изделия (НПС), после чего проводить сортировку по  $\rho$ . Практически удобно перейти от определения величины удельного сопротивления к токам, по значениям которых и сортировать порошки. На рис. 5 приведена схема для определения  $\rho$ . Прессформа для загрузки порошка взята цилиндрической формы с внутренним диаметром  $d$ .

Величину тока можно вычислить по соотношению

$$I = E \cdot \frac{S}{\rho}, \quad (3)$$

где  $S$  — сечение порошка в прессформе;  $E$  — напряженность поля.

В табл. 1 приведены значения токов, полученные при внутреннем диаметре прессформы  $d = 21$  мм. При этом показание монументра должно быть

$$U_1 = \frac{I}{S_1}, \quad (4)$$

Таблица 1

Зернистость	Удельное сопротивление $\cdot 10^4$ Ом·см		Величины $l$ , мм	
	$E=309$ в.с.м.	$E=150$ в.с.м.	300 в.с.м.	150 в.с.м.
20-63 мк-40° <sub>н</sub> , ниже 50 мк-60° <sub>н</sub>	0,8-1,2	1,8-2,2	8,6-13,0	2,1-2,9
50-63 мк-35° <sub>н</sub> , ниже 50 мк-65° <sub>н</sub>	1,2-1,6	2,2-2,6	6,5-8,7	2,0-2,4
50-63 мк-10° <sub>н</sub> , ниже 50 мк-90° <sub>н</sub>	3,0-3,5	6,0-6,5	3,0-3,5	0,7-0,8
50-63 мк-2° <sub>н</sub> , ниже 50 мк-100° <sub>н</sub>	4,2-4,6	7,5-8,2	2,3-2,5	0,5-0,7
50-61 мк-42° <sub>н</sub> , ниже 50 мк-57° <sub>н</sub>	1,0-1,5	2,0-2,0	7,0-10,4	2,0-2,6
50-63 мк-17° <sub>н</sub> , ниже 50 мк-57° <sub>н</sub>	2,2-2,8	4-4,5	3,7-4,7	1,1-1,3
50-63 мк-8° <sub>н</sub> , ниже 50 мк-92° <sub>н</sub>	3,2-4,2	7,0-7,5	2,5-3,3	0,7-0,8
80-125 мк-100° <sub>н</sub>	0,1-0,3	0,2-0,5		

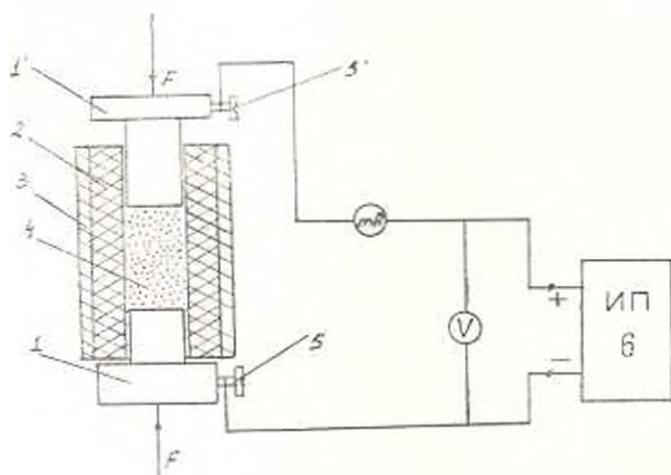


Рис. 5. Схема определения удельного сопротивления карбида кремния: *ИП* — источник питания, *1-1'* — нижний и верхний электроды, *2* — текстолитовая игулка, *3* — цилиндрическая обтяжка, *4* — порошок *SiC* в прессформе, *5-5'* — зажимные винты.

$$F = p \frac{\pi d^2}{4} S_1$$

$S_1$  — площадь поперечного сечения поршня гидропресса. В данном случае  $S_1 = 94$  см<sup>2</sup>, а величина подаваемого на прессформу напряжения:

$$U = EI, \quad (5)$$

где  $l$  — толщина слоя порошка.

В ряде случаев может оказаться, что порошок не обеспечивает требуемого тока, т. е. удельного сопротивления. В этом случае необходимо предварительно обработать порошок. Если зернистость большая, порошок необходимо домолоть. Лучшие условия помола по однородности выхода обеспечивают вибрационные шаровые мельницы сухого помола, менее удачными являются валковые шаровые мельницы вследствие широкой градации выхода по зернистости. Помол производится при помощи фарфоровых или карборундовых шаров, при этом количество применяемых шаров обратно пропорционально кубу их диаметров. На качестве помола сказывается соотношение между шарами и измельченным материалом, а также степень заполнения ими мельницы.

Желательно брать степень заполнения 0,6—0,8, при этом соотношение объемов шаров и порошка карборунда равно 4:1. Для получения на вибромельнице тонины порядка 50 мк необходимо обеспечить частоту колебаний около 50 герц.

Иногда может оказаться, что коэффициент нелинейности  $\beta$  слишком занижен ( $\beta < 3$ ). Это может быть из-за излишнее большого количества примесей железа (более 0,5% в пересчете на  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). В этом случае карборунд подлежит химической обработке кислотами ( $\text{HF}$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Железо шунтирует кристаллики, уменьшая нелинейность. Серная кислота окисляет железо, а плавиковая — растворяет. Применя-

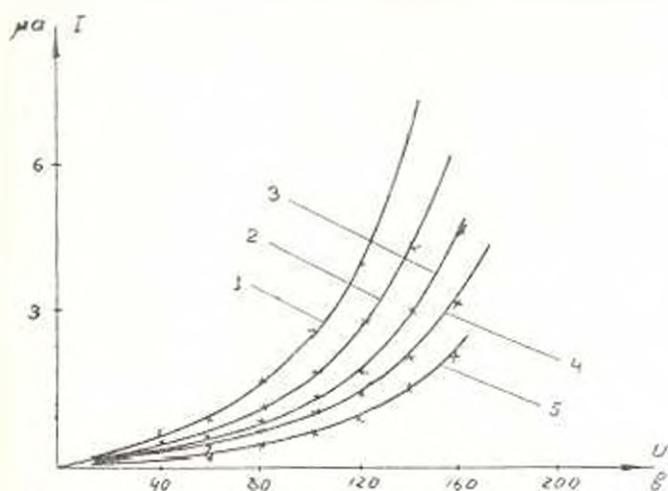


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики с прессованных порошков  $\text{SiC}$  ( $P = 1000 \text{ кг/см}^2$ ) одинаковой зернистости, обработанных кислотами: 1 —  $\text{HF}$ , 2 — необработанный, 3 —  $\text{H}_2\text{SO}_4$  — 5%, 4 —  $\text{H}_2\text{SO}_4$  — 15%, 5 —  $\text{H}_2\text{SO}_4$  — конц.

ние одной только кислоты ( $\text{HF}$  или  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) не обеспечивает должной очистки. Так серная кислота создает дополнительный слой оксида  $\text{SiO}_2$  на кристаллах  $\text{SiC}$ , что увеличивает величину  $\rho$ . Этот слой может быть снят только плавиковой кислотой. С другой стороны кислота

$\text{HF}$  не обеспечит должного окисления и очистки от примесей будет не качественной.

На рис. 6 показано воздействие каждой из кислот. Операция химического обогащения может быть не проведена, если исходный электротехнический карбид кремния удовлетворяет составу:  $\text{SiC}$  не менее 94%,  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  не более 3%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0,5%,  $\text{C}$ —0,5%.

Карбид кремния черного цвета р-типа проводимости. Избыточное содержание свободного кремния ( $\text{Si}$ ) меняет тип проводимости. Порошок по цвету приближается к зеленому. Избыток кремния окисляется и удаляется кислотами, а свободного углерода — промывкой в керосине.

Несмотря на свою простоту, метод сортировки карбида кремния по  $\rho$  имеет и недостатки (технически трудно проводить точные замеры параметров порошка  $\text{SiC}$ , находящегося под давлением; прессформа иногда заедает и создает неудобства в работе; порошок должен быть однородным по составу и зрнкости). Несмотря на это, приведенный метод может найти практическое применение.

Ереванский политехнический институт  
им. К. Маркса

Поступило 15.III.1967.

Ա. Ա. ԳՐԻԳՐԻԱՆ

ՍԵԼԵԿՏԻՐԵԻ ԿԱՐԲԻԴԻ ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԿՈՄՍԻՏԻՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ  
ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՎԱՐԻՄՏՐՈՒՆԵՐԻ ԱՆՇՐԱԺԵՇՏ ԿՈՄՔԵՆԱԿՆԵՐԻ ՄՏԱՅՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Տ

Հոդվածում տրված է  $\text{SiC}$ -ի փոշին բառ հատկավորության տեսակավորման մեթոդիկան և հաշվարկը՝ մեխանիկական ու էլեկտրական բեռնավորումների տակ նրա տեսակարար դիմադրության որոշման հիման վրա: Բերված է փոշու էլեկտրատատկական տեսակավորման մեթոդիկան: Ներկայացված են փոշիները թիուներով նախնական մշակման ենթարկելու պայմանները նրանց ոչ-դժայնության պարձակիցը մեծացնելու նպատակով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Пастыков В. В., Савельев Г. А., Чиркин А. К. Нелинейные полупроводниковые сопротивления и их применение. М., 1962.
2. Зогородицкий И. И., Пастыков В. В., Радомыргина, М., 1965.