

Краткие сообщения

0000

Электрофизические характеристики композитных нелинейных резисторов на основе полимера и кремния

© Ш.М. Гасанли, А.Я. Иманова

Институт физики НАН Азербайджана,
AZ-1143 Баку, Азербайджан
e-mail: Hasanli_sh@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 2 февраля 2010 г. В окончательной редакции 29 июня 2010 г.)

Приведены результаты исследований вольт-амперной характеристики ВАХ, удельного сопротивления композитных резисторов (варисторов) на основе неполярного пропилена и монокристаллического кремния (Si). Обнаружено влияние содержания компонентов композита на ВАХ и на величины удельного сопротивления.

В настоящее время для защиты аппаратуры микроэлектроники и в связи с переходом ее на нанотехнологии потребность в низковольтных ограничителях перенапряжений будет возрастать. Поэтому разработка низковольтных нелинейных резисторов — варисторов с различными сочетаниями композитных материалов носит актуальный характер [1–2].

Как известно, структура полимеров является основным фактором, определяющим их физические и химические свойства. Развитие физикохимии и технологии композитных материалов, являющихся в большинстве случаев наполненными линейными и сетчатыми полимерами, требует уточнения наших представлений о характере их ближней упорядоченности и об их надмолекулярном порядке.

Настоящая работа посвящена изучению влияния объемного содержания наполнителя на вольт-амперные характеристики (ВАХ) и на величину удельного сопротивления (при фиксированном напряжении) композитных нелинейных резисторов (варисторов) на основе неполярного полимера (ПП) и монокристаллического кремния.

Экспериментальная методика

В качестве компонентов были использованы полупроводниковый монокристаллический кремний (*p*-Si) и ПП в виде порошка. Для получения резисторов монокристаллический кремний предварительно был измельчен в шаровой мельнице с фарфоровыми шарами до размеров гранул 60 мкм и менее. Резисторы получены из однородной смеси компонентов путем горячего прессования при температуре 180°C и давлении 15 МПа. Содержание компонентов варьировалось в широком диапазоне (1–60% Si и 99.99–40% ПП соответственно). Толщина образцов составляла 150 мкм.

На всех образцах были исследованы ВАХ и удельное сопротивление в зависимости от объемного содержания наполнителя (Si). Измерения проведены при $T = 293$ К.

Экспериментальные результаты приведены на рис. 1–2. Из рис. 1 видно, что зависимость величины тока резистора от приложенного напряжения для всех

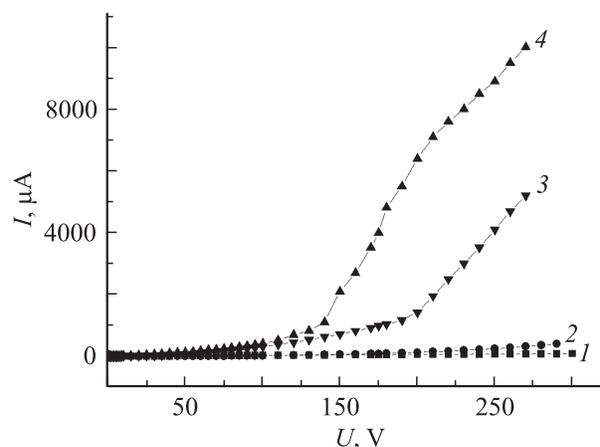


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики композитов с различным содержанием кремния: 1 — 100% ПП; 2 — 40% Si + 60% ПП; 3 — 50% Si + 50% ПП; 4 — 60% Si + 40% ПП.

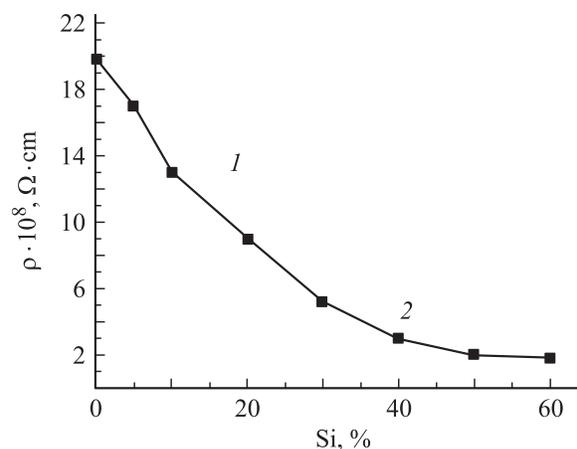


Рис. 2. Зависимость электропроводности композита от содержания кремния (при 60 В).

образцов, за исключением случая содержания ПП 100%, носит нелинейный характер. Величина тока через варистор растет и изменяется на 2–3 порядка, т. е. ВАХ имеет варисторный характер. Кроме того, в зависимости от процентного содержания наполнителя изменяется напряжение открывания.

Зависимость удельного сопротивления от процентного содержания наполнителя (Si) условно можно разбить на два участка (рис. 2): на начальном участке величина удельного сопротивления ρ большая и определяется в основном сопротивлением полимера, с ростом процентного содержания наполнителя величина ρ экспоненциально уменьшается с последующим выходом на постоянную величину при содержании Si $\geq 40\%$.

Обсуждение экспериментальных результатов

Согласно работам [3–6], проводимость композиции представляет собой функцию среднего числа контактов, приходящихся на одну частицу. Кроме того, согласно теории электрических контактов, электрический ток между двумя проводниками может протекать не только при их непосредственном соприкосновении, но и при наличии тонкой прослойки диэлектрика между ними. В таком случае проводимость может быть осуществлена путем туннелирования носителей заряда через потенциальные барьеры [3].

Согласно работам [7–9] высота потенциального барьера на границе раздела фаз определяется следующей формулой:

$$\varphi = \frac{e^2 n_d b^2}{2\epsilon_k \epsilon_0}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, n_d — концентрация доноров, b — ширина полимерных слоев между соседними частицами наполнителя (ширина потенциального барьера), ϵ_k — диэлектрическая проницаемость композита.

Согласно работе [8], расстояние между частицами кремния в полимере (толщина прослойки полимера) может быть рассчитано по формуле

$$b = d \left(\left(\frac{\pi(1+c)}{6c} \right)^{1/3} - 1 \right), \quad (2)$$

где c — объемная доля наполнителя в полимере, d — диаметр частиц наполнителя ($d = 40 \mu\text{m}$).

Принимая во внимание формулы (1) и (2), представляется, что зависимость удельного сопротивления от процентного содержания наполнителя (Si) (рис. 2) можно объяснить следующим образом: при малом содержании наполнителя за счет большой толщины полимерных прослоек между частицами наполнителя (см. таблицу) величина потенциального барьера велика (1). В свою очередь, из-за экспоненциальной зависимости туннельного сопротивления R

$$R \propto \exp\left(\frac{\varphi}{kT}\right) \quad (3)$$

Зависимости диэлектрической проницаемости и расстояния между частицами кремния от процентного содержания наполнителя

	ϵ (при $f = 100 \text{ Hz}$)	$b, \mu\text{m}$
10% Si+90% ПП	8	32
15% Si+85% ПП	9,5	24
20% Si+80% ПП	11	17
25% Si+75% ПП	12	15
30% Si+70% ПП	13	13
35% Si+65% ПП	19	11
40% Si+60% ПП	26	9
45% Si+55% ПП	30	8
50% Si+50% ПП	33	6

от величины потенциального барьера вероятность туннелирования носителей заряда через толстый барьер мала и вклад туннельной проводимости будет незначительным (рис. 2, 1). Следовательно, сопротивление композита будет определяться в основном сопротивлением полимера. На этом участке проводимость носит прыжковый характер. При дальнейшем увеличении процентного содержания наполнителя уменьшается толщина полимерных прослоек между частицами наполнителя (см. таблицу), и тем самым среднее число контактов между частицами увеличивается. Как следствие, уменьшаются величины потенциального барьера φ и туннельного сопротивления R (3). В результате увеличивается проводимость и соответственно уменьшается удельное сопротивление композита (рис. 2, 2). При дальнейшем увеличении содержания наполнителя частицы кремния начинают образовывать непрерывные цепочки, и потому проводимость композита в основном будет определяться проводимостью частиц кремния.

Заключение

Разработаны определенные аспекты технологии получения композитных варисторов на основе монокристаллического кремния и полимерного материала полипропилена, которые в будущем позволят создать различные низковольтные малоэнергетические дешевые композитные варисторы для использования в микроэлектронике и других областях. Анализ полученных экспериментальных результатов еще раз подтверждает, что смесь полимера и наполнителя не является полностью механической, между ними существует межфазное взаимодействие.

Список литературы

- [1] Souza F.I., Gomes J.W., Bueno P.R. et al. // Mater. Chem. Phys. 2003. Vol. 80. P. 512.
- [2] Hashimov A.M., Hasanli Sh.M., Mehtizadeh R.N., Bayramov Kh.B., Azizova Sh.M. // Phys. Status. Solidi. C. 2006. Vol. 3. N 8. P. 2871–2875.

- [3] *Kostic P., Milosevic O., Uskokovic D., Pistic M.M.* // *Physica B+C*. 1988. Vol. 150. N 1–2. P. 175–178.
- [4] *Aharoni S.M.* // *J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 43. N 5. P. 2463.
- [5] *Лунатов Ю.С.* Физикохимия наполненных полимеров. Киев: Наук. Думка, 1967. 232 с.
- [6] *Джейл Ф.Х.* Полимерные монокристаллы. Л.: Химия, 1968. 551 с.
- [7] *Валеев Х.С., Квасков В.Б.* Нелинейные металлооксидные полупроводники. М.: Энергоиздат, 1983. 160 с.
- [8] *Лосото Л.П., Усиченко В.М., Будницкий Ю.М.* и др. // *ДАН СССР*. 1984. Т. 27. № 6. С. 1410.
- [9] *Каргин В.А., Соголова Т.И., Рапопорт Н.Я.* // *Высокомол. соед.* 1965. № 7. С. 576.