

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4—1976

УДК 621.383.52:546.28

А. И. АКИШИН, Г. М. ТРИГОРЬЕВА, Л. И. КОЛЫХАЛОВА, Л. Б. КРЕЙНИН,  
А. П. ЛАНДСМАН, В. Г. НАЗАРОВ

## ВОЗДЕЙСТВИЕ $\alpha$ -ЧАСТИЦ НА $p$ -КРЕМНИЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ $n$ - $p$ -ПЕРЕХОДОВ

Приведены экспериментальные данные по воздействию  $\alpha$ -частиц на  $p$ -кремний и кремниевые  $n$ - $p$ -переходы в диапазоне энергий от 0,4 до 25,2 МэВ. Произведено также сравнение с протонным воздействием.

Известно много работ о влиянии протонного облучения на фотоэлектрические параметры кремниевых  $n$ - $p$ -переходов [1—3]. Однако данных о воздействии на  $n$ - $p$ -переходы  $\alpha$ -частиц накоплено недостаточно [3], хотя известно, что солнечными вспышками генерируются частицы обоих типов [4—6].

В данной работе представлены некоторые результаты исследований повреждения  $p$ -кремния и  $n$ - $p$ -переходов, изготовленных на его основе, при облучении  $\alpha$ -частицами. Исследования проводились на кремниевых  $n$ - $p$ -переходах с удельным сопротивлением базы  $\sim 1$  Ом·см. Глубина залегания  $n$ - $p$ -перехода не превышала 2 мкм. Облучение производилось  $\alpha$ -частицами с энергиями 0,4; 1,35; 4,6; 12,8; 25,2 МэВ при дозах частиц от  $10^9$  до  $10^{13}$  част/см<sup>2</sup>.

Плотность потока частиц составляла в среднем  $10^8$ — $10^{10}$  част/см<sup>2</sup>·с. Температура нагрева образцов при облучении не превышала 50°C.

Полученные данные усреднялись по результатам измерений нескольких образцов. При измерении вольтамперных характеристик большинства образцов использовалась лампа с вольфрамовой нитью накала. Температура нити накала составляла 2800 К. В ряде случаев измерения проводились при освещении имитатором заатмосферного солнечного излучения С-1 [7]. Зависимости фотоэлектрических параметров  $n$ - $p$ -перехода, облученного  $\alpha$ -частицами различных энергий, представлены на рис. 1—5. Было установлено, что, как и при протонном облучении, при облучении  $n$ - $p$ -перехода  $\alpha$ -частицами наблюдается падение как тока короткого замыкания ( $I_{к.з.}$ ), так и фото-эдс  $U_{ф.э.}$ . Причем при облучении  $\alpha$ -частицами с энергиями 4,6; 12,8 и 25,2 МэВ эффективность повреждения растет с уменьшением энергии  $\alpha$ -частиц. Падение  $I_{к.з.}$  происходит быстрее, чем снижение  $U_{ф.э.}$ .

Такой характер изменения  $I_{к.з.}$  заметно отличается от поведения этого параметра при облучении  $n$ - $p$ -перехода  $\alpha$ -частицами с энергия-

ми 0,4 и 1,35 МэВ. В этом случае  $I_{к.з}$  менее чувствителен к радиационным воздействиям (рис. 1). Пробег  $\alpha$ -частиц с энергией 0,4 МэВ ( $\sim 1$  мкм) не превышает глубины залегания  $n-p$ -перехода и поэтому эти частицы вводят дефекты только в область высоколегированного слоя. В случае облучения  $\alpha$ -частицами с энергией 1,35 МэВ (пробег  $\sim 5,5$  мкм) [8] максимальная плотность дефектов наблюдается в об-

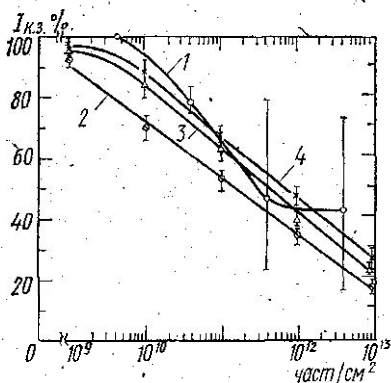


Рис. 1. Зависимость  $I_{к.з}$   $n-p$ -перехода от потоков  $\alpha$ -частиц: 1 — 1,35; 2 — 4,6, 3 — 12,8; 4 — 25,2 МэВ

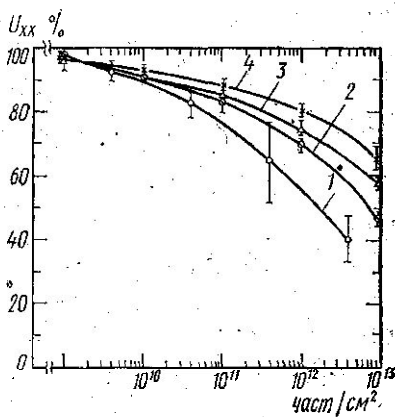


Рис. 2. Зависимость  $U_{ox}$   $n-p$ -перехода от потоков  $\alpha$ -частиц. Обозначения те же, что на рис. 1

ласти  $n-p$ -перехода и вблизи него. Это приводит к возрастанию обратных токов через переход и тем самым к значительному снижению  $U_{ox}$  (рис. 2).

При облучении образцов более высокими потоками  $\alpha$ -частиц малых энергий, создающих в базовой области тонкий дефектный слой, может происходить повышение фоточувствительности перехода в длинноволновой области спектра. По-видимому, этот эффект связан с компенсацией и расширением области пространственного заряда на дефектную область. В легированном слое, где концентрация примеси велика, компенсация не происходит, и коротковолновая чувствительность продолжает снижаться. В результате на дозовой зависимости  $I_{к.з}$  ( $\Phi$ ) появляется плато (кривая 1 на рис. 1), а иногда наблюдается даже рост  $I_{к.з}$ . При больших дозах облучения характерен большой разброс точек.

Спектральная чувствительность кремниевого  $n-p$ -перехода измерялась при длинах волн от 0,4 до 1,15 мкм до и после каждой дозы облучения.  $\alpha$ -частицы с энергией 0,4 и 1,35 МэВ снижают чувствительность главным образом в коротковолновой области, в то время как при облучении  $n-p$ -переходов  $\alpha$ -частицами с энергией 4,6 и 25,2 МэВ наблюдается преимущественное падение чувствительности в длинноволновой области (рис. 3, а и б).

Из сравнения фотоэлектрических характеристик кремниевых  $n-p$ -переходов, облученных  $\alpha$ -частицами данных энергий, видно, что с уменьшением энергии  $\alpha$ -частиц растет эффективность дефектообразования. Благодаря малой длине пробега все дефекты, образуемые  $\alpha$ -частицами с  $E=4,6$  МэВ ( $\sim 23$  мкм), вводятся в рабочую область базы, где свет генерирует основную часть электроннодырочных пар.  $\alpha$ -частицы с  $E=1,35$  МэВ образуют нарушения лишь в легированном слое и тонком

слое базы и поэтому, несмотря на высокую эффективность дефектообразования, их повреждающая способность ниже.

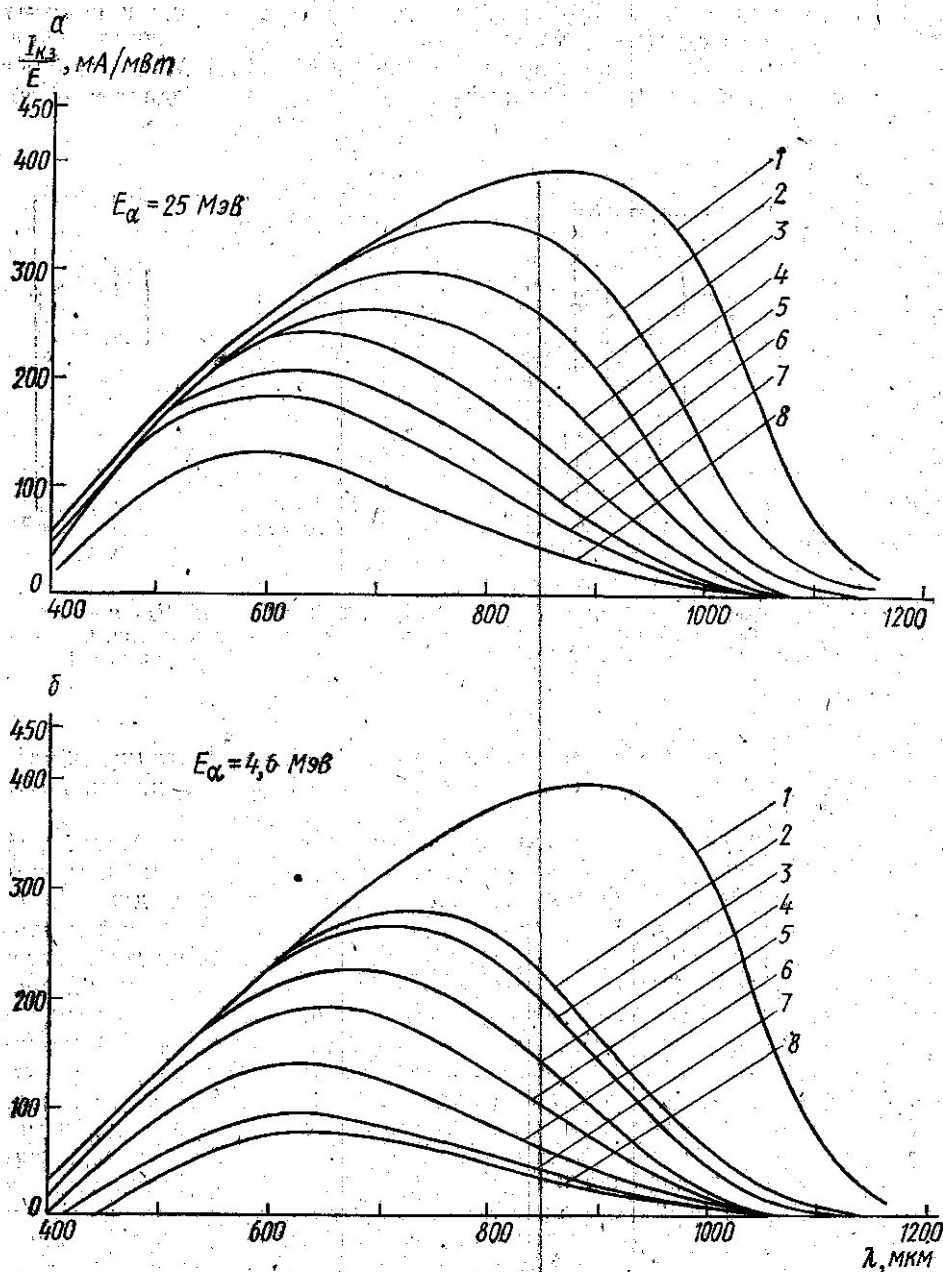


Рис. 3. Спектральная чувствительность  $n-p$ -перехода до и после облучения потоками  $\alpha$ -частиц: а: 1—до облучения, 2— $10^{10}$ , 3— $4 \cdot 10^{10}$ , 4— $10^{11}$ , 5— $4 \cdot 10^{11}$ , 6— $10^{12}$ , 7— $4 \cdot 10^{12}$ , 8— $1,4 \cdot 10^{13}$ ; б: 1—до облучения, 2— $10^{10}$ , 3— $3 \cdot 10^{10}$ , 4— $10^{11}$ , 5— $4 \cdot 10^{11}$ , 6— $1,4 \cdot 10^{12}$ , 7— $4,4 \cdot 10^{12}$ , 8— $1,4 \cdot 10^{13}$

Экспериментально полученные значения  $\Phi_b$  (для к.п.д.) представлены на рис. 4. Из этого рисунка видно, что минимумы обеих кривых находятся в области, где частицы имеют примерно одинаковый пробег.

Из сравнения кривых следует, что в диапазоне энергий 1—6,3 МэВ для протонов и 4—25,2 МэВ для  $\alpha$ -частиц эффективность повреждения  $n$ - $p$ -переходов протонами в несколько раз ниже, чем  $\alpha$ -частицами.

Рис. 4 следует воспринимать как качественную иллюстрацию соотношения эффективностей повреждения фотопреобразователей протонами и  $\alpha$ -частицами, ибо не обеспечивалась идентичность образцов по спектральному распределению фоточувствительности, использованных

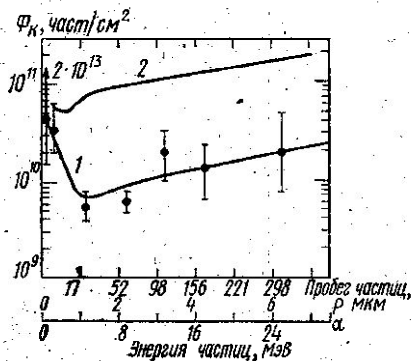


Рис. 4. Зависимость критического потока  $\Phi_k$  (для к. п. д. от энергии бомбардирующих  $n$ - $p$ -переход частиц: 1 —  $\alpha$ -частицы, 2 — протоны

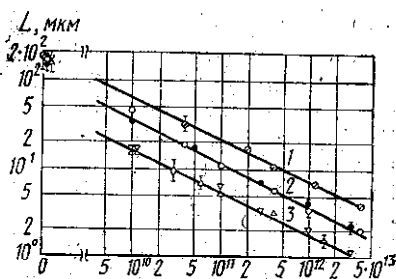


Рис. 5. Зависимость длины диффузии  $L_n$  от потоков  $\alpha$ -частиц и протонов: 1 —  $E_p = 6,3$  МэВ,  $K_p = 2 \cdot 10^{-6}$ , 2 —  $E_\alpha = 25$  МэВ,  $K_\alpha = 7,3 \cdot 10^{-6}$ , 3 —  $E_\alpha = 4,6$  МэВ,  $K_\alpha = 3,4 \cdot 10^{-5}$

в [3] и в настоящей работе. Кроме того, измерения проводились при освещении лампой накаливания с неконтролируемым спектром излучения. Более точные данные были получены в ходе специального эксперимента, для которого были отобраны одинаковые фотопреобразователи, изготовленные из одного монокристалла кремния. Образцы облучались протонами с  $E = 6,3$  МэВ и  $\alpha$ -частицами с  $E = 25,2$  и  $4,6$  МэВ. Измерения нагрузочных характеристик проводились при освещении имитатором заатмосферного солнечного излучения С-1. Энергетическая освещенность составляла  $\sim 136$  мВт/см<sup>2</sup>. Потоки названных частиц, приводящие к снижению тока фотопреобразователей на 30%, приведены в таблице.

Изменение фотозлектрических характеристик облучаемых фотопреобразователей (при не слишком высоких потоках) определяется уменьшением времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  и длины диффузии, связанной с ним соотношением  $L = \sqrt{D\tau}$ , где  $D$  — коэффициент диффузии.

В ходе многочисленных экспериментов [1, 3, 9—11] было установлено, что изменение  $L_n$  в базе фотопреобразователей, облученных электронами, протонами,  $\alpha$ -частицами и  $\gamma$ -лучами, описывается соотношением:

$$\frac{1}{L_n^2} - \frac{1}{L_{n_0}^2} = K\Phi, \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент повреждения,  $L_{n_0}$  и  $L_n$  — длины диффузии неосновных носителей до и после облучения потоком  $\Phi$ . Дозовые зависи-

мости  $L(\Phi)$  при облучении  $\alpha$ -частицами разных энергий и протонами показаны на рис. 5.

**Сравнительная эффективность радиационного повреждения  $p$ -кремния и кремниевых  $n/p$ -фотопреобразователей**

Параметр		$\alpha$ -частицы		Протоны $E=6,3$ МэВ
		$E=4,6$ МэВ	$E=25$ МэВ	
Поток частиц, снижающий I к. з на 30%	Абсолютное значение	$1,3 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$
	Относительное значение	0,02	0,24	1
Коэффициент повреждения	Абсолютное значение	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
	Относительное значение (эксп.)	17,2	3,7	1
	Относительное значение (при $E_d=20$ кэВ)	22,4	3,8	1
	Относительное значение (при $E_d=60$ кэВ)	23	4,0	1

Значения коэффициентов повреждения для  $\alpha$ -частиц и протонов представлены в таблице. Сопоставим с экспериментом расчетную относительную эффективность радиационного повреждения кремния  $\alpha$ -частицами и протонами. Выражение для коэффициента повреждения записывается следующим образом:

$$K = \eta \sigma_e v f (F_r - F_i), \quad (2)$$

в котором  $\sigma_e$  — сечение захвата носителя (электрона в  $p$ -кремнии),  $v$  — его тепловая скорость,  $f(F_r - F_i)$  — степень заполнения рекомбинационных центров. Эффективность введения  $\eta$  пропорциональна сечению образования рекомбинационных центров  $\sigma_d$ :

$$\eta \sim N_0 \sigma_d, \quad (3)$$

где  $N_0$  — число атомов в 1 см $^3$ . Если дефекты, образуемые разными частицами, одного сорта, то отношение коэффициентов повреждения окажется равным отношению сечений образования дефектов:

$$\frac{K_\alpha}{K_p} = \frac{\sigma_{d\alpha}}{\sigma_{dp}} \quad (4)$$

Как было показано в работе [11], при облучении протонами основную роль в рекомбинации играют области разупорядочения, пороговая энергия образования которых составляет от 20 до 60 кэВ.

По всей вероятности, групповые дефекты определяют радиационное повреждение  $p$ -кремния  $\alpha$ -частицами. С учетом этого были рассчитаны относительные эффективности радиационного повреждения  $p$ -кремния  $\alpha$ -частицами разных энергий. Расчеты проводились в предположении Резерфордского закона рассеяния при значениях пороговой энергии дефектообразования  $E_d=20$  и 60 кэВ (см. табл.).

Как следует из табл. и опубликованных ранее результатов [12, 13], относительная эффективность радиационного повреждения кремния и кремниевых фотопреобразователей  $\alpha$ -частицами с  $E \leq 25$  МэВ, а также протонами с  $E \leq 10$  МэВ хорошо описывается законом Резерфордского рассеяния частиц. Исключение составляет лишь область энергий, где пробег мал ( $\leq 15$  мкм) и на поведение облучаемого фотопреобразователя сказывается геометрическое соотношение глубины нарушенного слоя и длины диффузии неосновных носителей.

Расчетное отношение  $K_\alpha/K_p$  практически не зависит от выбранного значения  $E_d$  (по крайней мере при  $E_d \leq 60$  кэВ), и поэтому хорошее согласие расчета с экспериментом не может являться аргументом в пользу определенной модели древалирующих рекомбинационных центров, вводимых  $\alpha$ -частицами. Для выяснения природы дефектов необходимы дальнейшие исследования, в частности, эксперименты по термическому отжигу облученных образцов.

Авторы выражают благодарность Е. М. Герасимовой и Т. М. Головнер за проведение ряда измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wysocki J. J., Rappaport P., Davison E., Loferski J. J. — «IEEE Trans. Electr. Devices», 13, 4, 420, 1966.
2. Lodi E. A., Crowther D. L. — «Appl. Phys. Lett.», 2, 13, 1963.
3. Акишин А. И., Головнер Т. М. и др. — В кн.: Радиационная физика кристаллов и  $p$ - $n$ -переходов. Минск, 1972.
4. Околоземное космическое пространство. Справочные данные. М., 1966.
5. Дорман Л. И. — В кн.: Вариации космических лучей и исследование космоса. М., 1963.
6. Biswas S., Fichtel C. E. — «Phys. Rev.», 128, 2756, 1962.
7. Ковальский В. Я., Шкловер Д. А. — «Гельветехника», № 1, 35—42, 1967.
8. Loferski J. J. — «Nucl. Instr. meth.», 28, 109, 1964.
9. Rosenzweig W., Gummel H. H., Smits F. M. — BSTI, 42, 399, 1963.
10. Rosenzweig W., Smits F. M., Brown W. L. — «J. Appl. Phys.», 35, 2707, 1964.
11. Азимов К. С., Городецкий С. К. и др. — «Физика и техника полупроводников», 7, 1973.
12. Городецкий С. М., Григорьева Г. М. и др. — «Физика и техника полупроводников», 5, 1463, 1971.
13. Городецкий С. М., Крейнин Л. Б. — ДАН СССР, 181, 46, 1968.

Поступила в редакцию  
17.3 1975 г.

НИИЯФ