

## Профили трансмутационных изотопов, образованных в германии облучением протонами и ядрами гелия

© В.А. Дидик, В.В. Козловский\*, Р.Ш. Малкович, Е.А. Скорятина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: malkovich@mail.ioffe.ru

\* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: kozlovski@tuexph.stu.neva.ru

(Поступила в Редакцию 27 февраля 2003 г.)

Исследованы профили радиоактивных трансмутационных изотопов, образованных в результате ядерных реакций при облучении германия протонами и ядрами  $^4\text{He}$ . Профили использованы для определения энергетической зависимости сечения ядерных реакций, приводящих к образованию трансмутационных изотопов.

Настоящая работа посвящена исследованию формирования профилей трансмутационных изотопов в германии при облучении протонами и ядрами  $^4\text{He}$ , а также анализу этих профилей и их использованию для определения энергетической зависимости сечения ядерных реакций.

Ранее [1] нами исследовались профили трансмутационных изотопов, образованных при облучении протонами, дейтронами, ядрами гелия  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  в полупроводниковых монокристаллах  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  ( $\text{GaAs}$ ,  $\text{GaP}$ ,  $\text{InAs}$ ) и  $\text{CuInSe}_2$ , в керамических материалах ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и  $\text{PbZr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46}\text{O}_3$ ), а также в металлическом цирконии.

Образцы в виде плоскопараллельных пластин площадью  $\sim 2\text{ см}^2$  и толщиной  $1\text{ мм}$  прижимались к охлаждаемой водой латунной пластине и через диафрагму диаметром  $9\text{ мм}$  подвергались облучению в циклотроне [2]. Облучение проводилось протонами с энергией  $10\text{ MeV}$  и ядрами  $^4\text{He}$  с энергией  $20\text{ MeV}$ . Монохроматичность пучка была не хуже  $5\%$ . Поток частиц  $6 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (плотность тока  $0.1\text{ }\mu\text{A}/\text{см}^2$ ), время облучения  $30\text{ min}$ , доза облучения  $\sim 1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ . Профили трансмутационных радиоактивных изотопов определялись путем последовательного удаления плоскопараллельных слоев и измерения их гамма-активности. Слои толщиной  $1\text{--}5\text{ }\mu\text{м}$  при облучении ядрами  $^4\text{He}$  и  $\sim 10\text{ }\mu\text{м}$  при облучении протонами удалялись шлифованием; активность слоев анализировалась с помощью калиброванного гамма-спектрометра с  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором. Равномерность распределения изотопа по сечению образца контролировалась методом автордиографии.

В результате облучения протонами в матрице создавался ряд изотопов, из которых нами исследовались радиоактивные изотопы  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{71}\text{As}$ ,  $^{72}\text{As}$ ,  $^{74}\text{As}$  и  $^{76}\text{As}$  (рис. 1, *a*), образующиеся в результате ядерных реакций [3]  $^{70}\text{Ge}(p, \alpha)^{67}\text{Ga}$ ,  $^{70}\text{Ge}(p, \gamma)^{71}\text{As}$ ,  $^{72}\text{Ge}(p, n)^{72}\text{As}$ ,  $^{73}\text{Ge}(p, \gamma)^{74}\text{As}$ ,  $^{74}\text{Ge}(p, n)^{74}\text{As}$  и  $^{76}\text{Ge}(p, n)^{76}\text{As}$ . При указанных условиях облучения концентрация изотопов достигает  $\sim 1 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$  для изото-

пов  $^{72}\text{As}$  и  $^{74}\text{As}$  и не превышает  $1.5 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-3}$  для изотопа  $^{71}\text{As}$  (концентрация отнесена к моменту окончания облучения). Глубина профиля изменяется от  $\sim 240\text{ }\mu\text{м}$  для изотопа  $^{67}\text{Ga}$  до  $\sim 380\text{ }\mu\text{м}$  для изотопов  $^{71}\text{As}$ ,  $^{74}\text{As}$  и  $^{76}\text{As}$ . Все профили носят монотонный характер.

Из изотопов, созданных при облучении ядрами  $^4\text{He}$ , исследовались радиоактивные изотопы  $^{73}\text{As}$ ,  $^{73}\text{Se}$  и  $^{75}\text{Se}$  (рис. 1, *b*), образующиеся по реакциям  $^{70}\text{Ge}(^4\text{He}, p)^{73}\text{As}$ ,  $^{70}\text{Ge}(^4\text{He}, n)^{73}\text{Se}$ ,  $^{72}\text{Ge}(^4\text{He}, p)^{75}\text{Se}$  и  $^{73}\text{Ge}(^4\text{He}, 2n)^{75}\text{Se}$ . Концентрация исследованных изотопов достигает  $\sim 2 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$ , а глубина профиля не превышает  $100\text{ }\mu\text{м}$ .

Глубина профиля коррелирует с пробегом частиц: при облучении протонами профиль формируется на значительно большей глубине, чем при облучении ядрами  $^4\text{He}$ , в соответствии с тем, что пробег протонов намного превышает пробег ядер  $^4\text{He}$ . В то же время глубина профиля возрастает с уменьшением порога ядерной реакции, приводящей к образованию данного изотопа. Так, она составляет  $\sim 280\text{ }\mu\text{м}$  для изотопа  $^{72}\text{As}$  при пороге ядерной реакции  $5.1\text{ MeV}$  и достигает  $\sim 380\text{ }\mu\text{м}$  для изотопа  $^{76}\text{As}$  при пороге реакции  $1.7\text{ MeV}$  [3].

Профили трансмутационных изотопов были использованы нами для определения энергетической зависимости сечения ядерных реакций  $\sigma(E)$ , приводящих к образованию данных изотопов [1]. При этом сначала из соотношения [1]

$$c(x) = N\Phi\sigma(x)\lambda^{-1}(1 - \exp(-\lambda\tau))$$

где  $N$  — концентрация стабильного изотопа матрицы,  $\Phi$  — поток частиц,  $\sigma$  — сечение ядерной реакции,  $\lambda$  — постоянная распада изотопа,  $\tau$  — длительность облучения,  $x$  — координата (расстояние от поверхности образца); находилась функция  $\sigma(x)$ , а затем с использованием зависимости  $E(x)$  [4] определялась искомая зависимость  $\sigma(E)$ .

В настоящей работе были определены сечения ядерных реакций  $^{70}\text{Ge}(p, \alpha)^{67}\text{Ga}$ ,  $^{70}\text{Ge}(p, \gamma)^{71}\text{As}$ ,

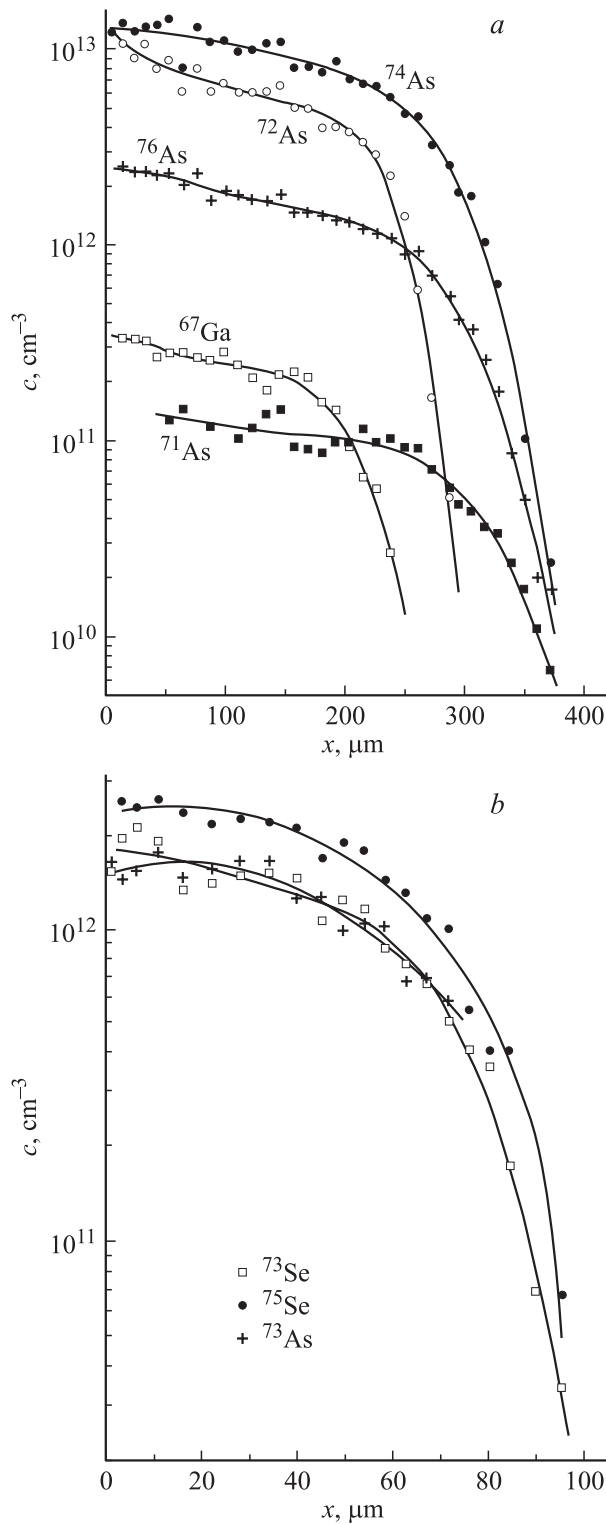


Рис. 1. Профили трансмутационных изотопов, образованных в германии при облучении протонами (a) и ядрами  $^4\text{He}$  (b).

$^{72}\text{Ge}(p, n)^{72}\text{As}$  и  $^{76}\text{Ge}(p, n)^{76}\text{As}$  (рис. 2, a), а также  $^{70}\text{Ge}(^4\text{He}, p)^{73}\text{As}$  и  $^{70}\text{Ge}(^4\text{He}, n)^{73}\text{Se}$  (рис. 2, b). Отметим, что для изотопов  $^{74}\text{As}$  и  $^{75}\text{Se}$  сечения ядерных реакций не определялись, поскольку эти изотопы образуются одновременно по двум ядерным реакциям:

$^{73}\text{Ge}(p, \gamma)^{74}\text{As}$ ,  $^{74}\text{Ge}(p, n)^{74}\text{As}$  и  $^{72}\text{Ge}(^4\text{He}, p)^{75}\text{Se}$ ,  $^{73}\text{Ge}(^4\text{He}, 2n)^{75}\text{Se}$  соответственно.

На рис. 2, a и b приведены также данные для сечений ядерных реакций из работ [5–8].

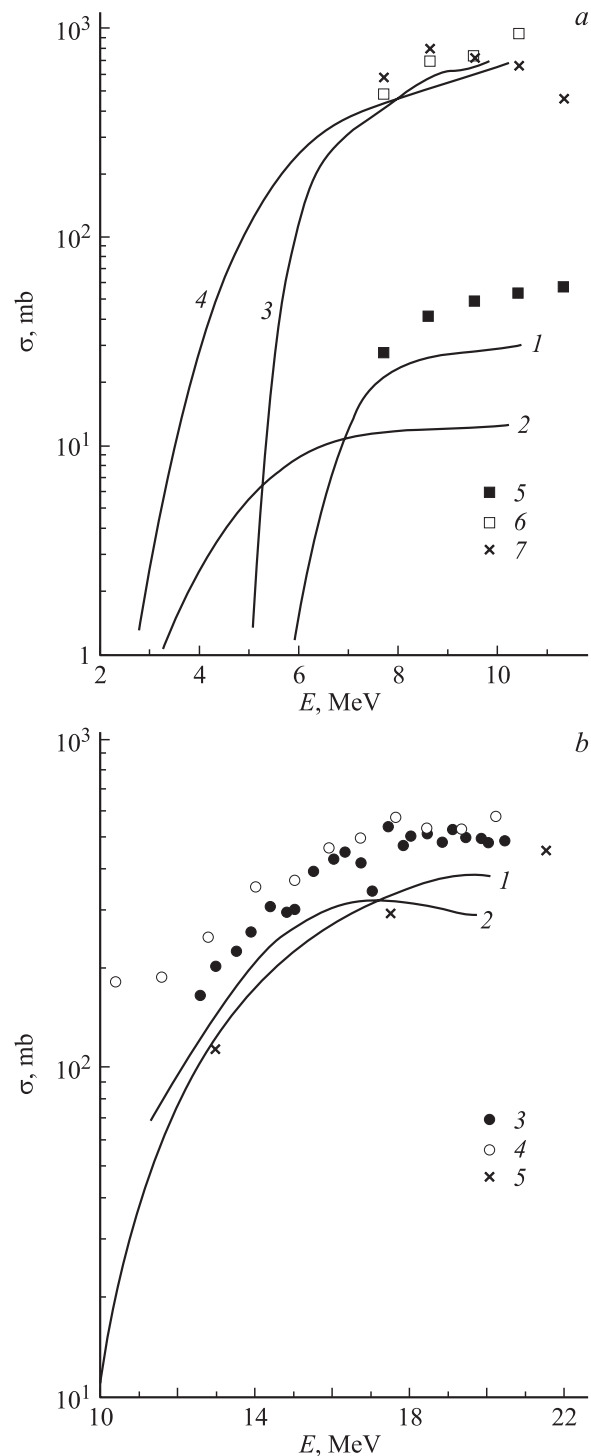


Рис. 2. Зависимость сечения ядерной реакции от энергии протонов (a) и ядер  $^4\text{He}$  (b). a) 1, 5 —  $^{70}\text{Ge}(p, \alpha)^{67}\text{Ga}$ , 2 —  $^{70}\text{Ge}(p, \gamma)^{71}\text{As}$ , 3, 6 —  $^{72}\text{Ge}(p, n)^{72}\text{As}$ , 4, 7 —  $^{76}\text{Ge}(p, n)^{76}\text{As}$ . 1–4 — данные настоящей работы, 5–7 — данные [6]. b) 1, 3–5 —  $^{70}\text{Ge}(^4\text{He}, n)^{73}\text{Se}$ , 2 —  $^{70}\text{Ge}(^4\text{He}, p)^{73}\text{As}$ . 1, 2 — данные настоящей работы, 3 — данные [6], 4 — [7], 5 — [8].

## Список литературы

- [1] V.A. Didik, R.Sh. Malkovich, E.A. Skoryatina, V.V. Kozlovski. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **160**, 387 (2000).
- [2] Б.П. Забродин, Л.Ф. Захаренков, В.В. Козловский. Вopr. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение **3**, 57, 87 (1991).
- [3] G. Marples, G. Goth, J. Cerny. Nucl. Data A **2**, 429 (1967).
- [4] О.Ф. Немец, Ю.Ф. Гофман. Справочник по ядерной физике. Наук. думка, Киев (1975). 416 с.
- [5] И.Н. Бобошин, А.В. Варламов, В.В. Варламов, Н.С. Марков, Д.С. Руденко, М.Е. Степанов, В.В. Чесноков. Базы научных данных по физике атомных ядер и ядерных реакций. Сб. докл. Второй Всерос. научн. конф. Протвино, Россия (2000). С. 39.
- [6] В.Н. Левковский. Сечения активации нуклидов средней массы ( $A = 40-100$ ) протонами и альфа-частицами средних энергий ( $E = 10-50$  МэВ). М. (1991).
- [7] A. Calboreanu, O. Salagean, C. Pencea, K.W. Zimmer, A. Ciocanel. Rev. Roum. Phys. **32**, 725 (1987).
- [8] M. Guillaume, R.M. Lambrecht, A.P. Wolf. Int. J. Appl. Rad. Isotop. **29**, 411 (1978).