

ПРОФИЛИ ИЗОТОПОВ, ОБРАЗОВАННЫХ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ А^{III}В^V ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ α -ЧАСТИЦАМИ

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
(Получена 9.07.1992. Принята к печати 14.07.1992)

Исследованы профили трансмутационных радионуклидов, созданных в арсениде галлия, фосфиде галлия и арсениде индия облучением α -частицами с энергией $E_0 = 20$ МэВ (поток $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, время облучения 1 ч). Профили определялись сошлифовыванием слоев (толщиной 2—10 мкм) и их радиометрией с использованием калиброванного гамма-спектрометра с Ge(Li)-детектором.

Исследовались радионуклиды ^{71}As , ^{72}As и ^{74}As в GaAs и GaP и ^{71}Br в GaAs и InAs. Глубина, на которой наблюдались радионуклиды, составляет ~ 30 мкм для ^{71}As и ^{71}Br и достигает 80—100 мкм для ^{72}As и ^{74}As . Профили одного и того же нуклида в разных матрицах по форме идентичны: профили ^{71}As и ^{71}Br являются монотонными кривыми, а профили ^{72}As и ^{74}As имеют пологий максимум. В GaP глубина профилей As больше, чем в GaAs, тогда как профили Br в GaAs и InAs различаются слабо.

Дана качественная интерпретация отмеченных особенностей профилей, основанная на учете зависимости сечения ядерных реакций, приводящих к образованию трансмутационных нуклидов, от локальной энергии α -частиц, а также на учете характера изменения этой энергии с глубиной.

С использованием профилей концентрации трансмутационных нуклидов определена энергетическая зависимость сечения ядерных реакций, приводящих к образованию этих нуклидов.

Облучение высокоэнергетичными заряженными частицами, в отличие от нейтронного облучения, обеспечивает возможность локального трансмутационного легирования полупроводниковых материалов. В работе [1] были определены профили радиоактивных примесей, созданных в арсениде галлия облучением высокоэнергетичными α -частицами. В настоящей работе сообщается об исследовании профилей таких примесей как в арсениде галлия, так и в родственных соединениях А^{III}В^V — фосфиде галлия и арсениде индия, и об использовании этих профилей для определения энергетической зависимости сечения ядерных реакций, приводящих к образованию трансмутационных примесей.

Образцы облучались α -частицами с энергией $E_0 = 20$ МэВ. Поток частиц $\Phi = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, время облучения 1 ч. Концентрационные профили $C(x)$ определялись путем сошлифовывания слоев (толщиной от 2 до 10 мкм) и их радиометрии с использованием калиброванного гамма-спектрометра с Ge(Li)-детектором.

При облучении GaAs, GaP и InAs α -частицами образуется целый ряд изотопов [2], из которых нами исследовались радиоактивные изотопы мышьяка ^{71}As , ^{72}As и ^{74}As , образующиеся в соединениях, содержащих галлий — GaAs и GaP, и брома ^{71}Br — в соединениях, содержащих мышьяк — GaAs и InAs (рис.1, а—с). Профили одного и того же изотопа в разных матрицах по своей форме идентичны. Так, профили изотопа ^{71}As в GaAs и GaP и ^{71}Br в GaAs и InAs являются монотонными кривыми, а профили ^{72}As и ^{74}As как в GaAs, так и в GaP имеют пологий максимум. В то же время наблюдаются количественные различия: в GaP глубина профилей больше, чем в GaAs. Отметим также, что в обоих этих соединениях профили изотопов ^{72}As и ^{74}As имеют большую глубину,

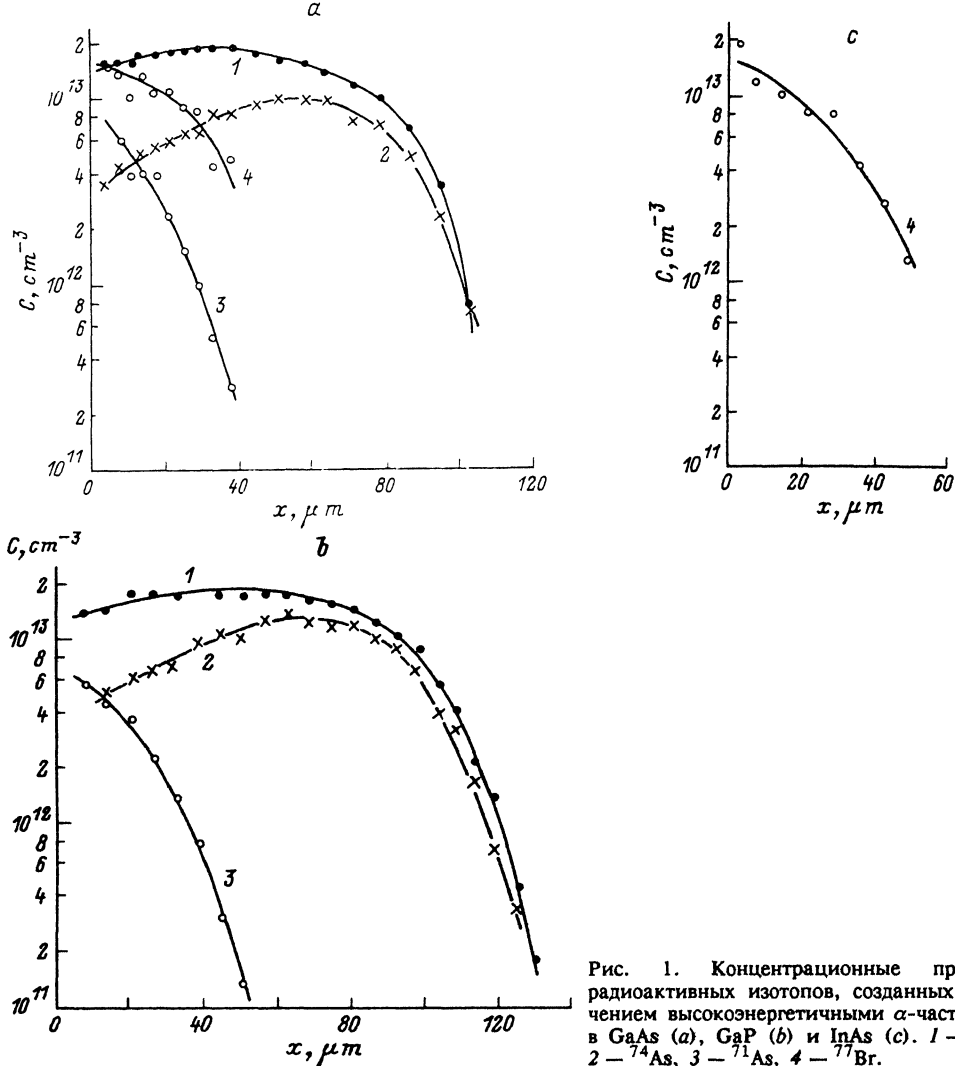


Рис. 1. Концентрационные профили радиоактивных изотопов, созданных облучением высокоэнергетичными α -частицами в GaAs (a), GaP (b) и InAs (c). 1 — ^{72}As , 2 — ^{74}As , 3 — ^{71}As , 4 — ^{77}Br .

чем профиль изотопа ^{71}As , однако профили брома в GaAs и InAs различаются незначительно.

Наблюдавшиеся нами особенности профилей обусловлены в основном характером зависимости сечения ядерной реакции σ от локальной энергии α -частиц E и характером изменения энергии E с координатой x . Кривая $E(x)$ монотонно спадает в глубь образца, тогда как кривая $\sigma(E)$ имеет максимум [3]. Если выполняется неравенство $E_0 < E_m$ (E_m — положение максимума), что имеет место в случае изотопов с большим порогом реакции E_{th} ($E_{th} = 16$ и 14.2 МэВ для ^{71}As и ^{77}Br соответственно [2]), то сечение реакции и соответственно концентрация изотопа монотонно уменьшаются с глубиной. Если же $E_0 > E_m$, что имеет место в случае изотопов с малым порогом реакции ($E_{th} = 7.1$ и 5.2 МэВ для ^{72}As и ^{74}As соответственно [2]), то сечение и концентрация сначала увеличиваются с глубиной, достигают максимума, а затем уменьшаются. Меньшей величиной порога реакции обусловлена, как нетрудно видеть, и большая глубина профиля для изотопов ^{72}As и ^{74}As по сравнению с ^{71}As и ^{77}Br .

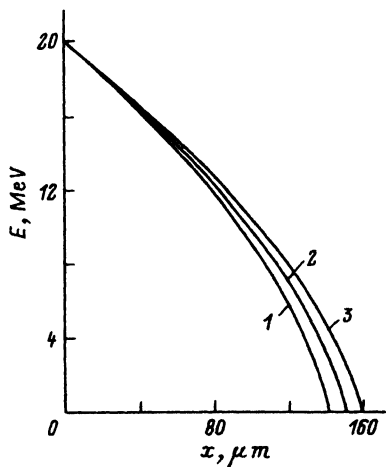


Рис. 2. Изменение энергии α -частиц с координатой. 1 — GaAs, 2 — InAs, 3 — GaP.

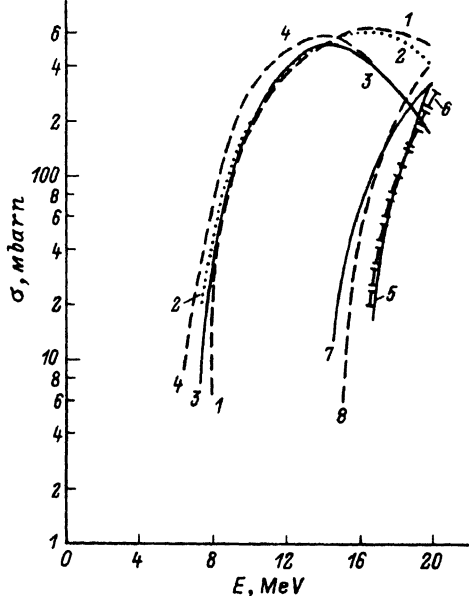


Рис. 3. Энергетическая зависимость сечения ядерных реакций, приводящих к образованию изотопов ^{72}As (1, 2), ^{74}As (3, 4), ^{76}As (5, 6) и ^{77}Br (7, 8) в GaAs (1, 4, 5, 7), GaP (2, 3, 6) и InAs (8).

Характер профилей одного и того же изотопа в разных матрицах определяется двумя факторами — поведением кривой $E(x)$ и концентрацией атомов матрицы. Как следует из расчета, выполненного нами с использованием данных [4] для тормозной способности α -частиц (рис. 2), кривая $E(x)$ в GaP лежит глубже, чем в GaAs. Помимо этого, концентрация атомов матрицы (галлия) в GaP больше, чем в GaAs ($2.47 \cdot 10^{22}$ и $2.2 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$ соответственно). Оба эти обстоятельства и обуславливают большую глубину профилей изотопов мышьяка в GaP по сравнению с GaAs. Что же касается профилей брома, то хотя в InAs кривая $E(x)$ лежит глубже, чем в GaAs, однако концентрация атомов матрицы (мышьяка) в InAs меньше, чем в GaAs ($1.79 \cdot 10^{22}$ и $2.2 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$ соответственно), вследствие чего профили брома в этих соединениях различаются мало.

Полученные нами профили концентрации трансмутационных изотопов позволили определить энергетическую зависимость сечения ядерных реакций, приводящих к образованию этих изотопов.¹ Для этой цели использовалось соотношение [6]

$$C = N\Phi\sigma\lambda^{-1}(1 - e^{-\lambda t})$$

(N — концентрация стабильного изотопа матрицы, Φ — поток α -частиц, λ — постоянная распада трансмутационного изотопа, t — длительность облучения). Пользуясь численными значениями величин N , Φ , λ и t , мы по известным кривым $C(x)$ построили кривые $\sigma(x)$, а затем с помощью кривых $E(x)$ определили зависимость сечения σ от локальной энергии α -частиц E (рис. 3). Полученные при этом кривые $\sigma(E)$ по своему характеру аналогичны кривым, приведенным в работе [3].

¹ В работе [5] профили были использованы для определения выхода радионуклидов при облучении материалов заряженными частицами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. А. Дидик, В. В. Козловский, Р. Ш. Малкович, Е. А. Скорятина, Б. А. Шустров. Письма ЖТФ, 15, 19 (1989).
- [2] L. F. Zakharenkov, V. V. Kozlovskii, B. A. Shustrov. Phys. St. Sol. (a), 117, 85 (1990).
- [3] H. Münzel, J. Lange. Uses of Cyclotrons in Chemistry, Metallurgy and Biology (ed. by C. B. Amphlett), 373. London (1969).
- [4] О. Ф. Немец, Ю. В. Гофман. Справочник по ядерной физике. Киев (1975).
- [5] И. О. Константинов, П. П. Дмитриев, В. И. Болотских. Атом. энергия, 58, 140 (1985).
- [6] К. Вандекастеле. Активационный анализ с использованием заряженных частиц, 33. М. (1991).

Редактор В. В. Чалдышев
