

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ПРОФИЛИ ИЗОТОПОВ, СОЗДАНЫХ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ α -ЧАСТИЦ С ЭНЕРГИЕЙ 12, 16 И 20 МЭВ

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
(Получено 24.03.1992. Принято к печати 14.07.1992)

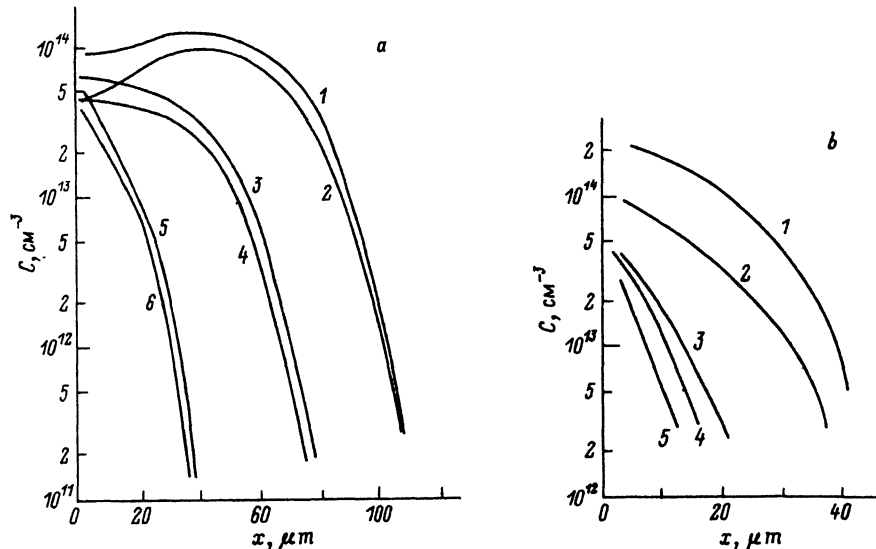
1. Исследование возможностей легирования полупроводников путем облучения высокоэнергетичными заряженными частицами обусловило необходимость получения и анализа концентрационных профилей примесей, создаваемых трансмутационным превращением ядер полупроводниковой матрицы. В предыдущей работе [1] были получены профили радиоактивных изотопов, образованных в арсениде галлия при облучении α -частицами с энергией $E_0 = 20$ МэВ. Было установлено, что профили этих изотопов простираются до весьма больших глубин, ~ 100 мкм. При этом был обнаружен максимум профиля изотопа ^{74}As , интерпретированный как следствие энергетической зависимости сечения ядерной реакции, приводящей к образованию данного изотопа.

В настоящей работе исследовано поведение профилей трансмутационных изотопов в арсениде галлия при изменении энергии α -частиц. С этой целью облучение проводилось при трех фиксированных энергиях: $E_0 = 20, 16$ и 12 МэВ. Методика исследования описана в работе [1]. Для всех трех энергий поток частиц составлял величину $1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а доза — $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Диаметр пучка 1.1 см. Абсолютные значения концентрации трансмутационных примесей определялись по гамма-активности снятых слоев, измеренной с помощью детектора $\text{Ge}(\text{Li})$ с известной эффективностью регистрации.

2. Как показывают полученные результаты (см. рисунок, *a* и *b*), образование радиоактивных изотопов существенным образом зависит от энергии облучения: так, если изотопы ^{72}As и ^{74}As образуются при всех трех энергиях α -частиц, а изотопы ^{73}As и ^{77}Br при 16 и 20 МэВ, то изотоп ^{71}As лишь при 20 МэВ.

Глубина легирования возрастает с увеличением энергии α -частиц. При этом меняется и форма концентрационных кривых для изотопов ^{72}As и ^{74}As : при 12 и 16 МэВ эти кривые монотонно изменяются с глубиной, а при 20 МэВ они имеют максимум. При одной и той же энергии α -частиц глубина легирования для изотопов ^{72}As и ^{74}As существенно больше, чем для изотопов ^{73}As , ^{77}Br и ^{71}As .

3. Наблюдавшееся нами влияние энергии облучения на образование изотопов непосредственно связано с порогами ядерных реакций, приводящих к образованию этих изотопов. Так, порог реакции E_r для изотопов ^{71}As , ^{77}Br и ^{73}As равен $16, 14.2$ и 13.6 МэВ соответственно [2], вследствие чего изотопы ^{77}Br и ^{73}As могут образовываться только при энергиях 16 и 20 МэВ, а ^{71}As — только при 20 МэВ, что и наблюдается на опыте. В то же время для изотопов ^{72}As и ^{74}As порог реакции составляет всего лишь 7.1 и 5.2 МэВ соответственно, благодаря чему оба эти изотопа образуются при всех трех энергиях α -частиц. Малая величина



Концентрационные профили изотопов. а) 1, 3, 5 — ^{72}As ; 2, 4, 6 — ^{74}As . E_0 , Мэв: 1, 2 — 20; 3, 4 — 16; 5, 6 — 12. б) 1, 4 — ^{73}As ; 2, 5 — ^{77}Br ; 3 — ^{71}As . E_0 , Мэв: 1—3 — 20; 4, 5 — 16.

порога реакции, как видно, определяет для этих изотопов и большую глубину легирования при одной и той же начальной энергии α -частиц.

Концентрация $C(x)$ изотопа, образовавшегося в результате ядерной реакции, при прочих равных условиях пропорциональна потоку α -частиц Φ и сечению ядерной реакции σ : $C(x) \propto \Phi(x)\sigma(x)$. Поскольку поток частиц в области легирования можно считать постоянной величиной, то наблюдаемое поведение концентрационных профилей $C(x)$ должно быть связано с поведением кривых $\sigma(x)$, определяемым зависимостью сечения ядерной реакции от локальной энергии α -частиц E , $\sigma = \sigma(E)$, которая в свою очередь зависит от координаты, т. е. $E = E(x)$. Кривая $E(x)$ монотонно спадает с глубиной, тогда как кривая $\sigma(E)$ для реакций (α, n) и $(\alpha, 2n)$, по которым образуются исследуемые изотопы [2], характеризуется наличием максимума [3]. Следует выделить два случая, различающиеся поведением сечения ядерной реакции и соответственно характером изменения концентрации изотопа с уменьшением энергии α -частиц по мере проникновения их в глубь полупроводника. Если $E_0 < E_0 \leq E_m$, где E_m — положение максимума кривой $\sigma(E)$, то сечение и соответственно концентрация монотонно уменьшаются с глубиной. Если же $E_0 > E_m$, то сечение и концентрация увеличиваются с глубиной, достигают максимума, а затем уменьшаются.

Следует отметить, что для реакций (α, n) и $(\alpha, 2n)$ максимум обычно располагается при энергиях, превышающих порог приблизительно на одну и ту же величину ΔE [3]: $E_m = E_t + \Delta E$, где $\Delta E \approx \text{const} = 11$ МэВ. Нетрудно видеть, что в случае изотопов с большими значениями порога реакции (^{71}As , ^{77}Br , ^{73}As) даже наибольшая начальная энергия α -частиц в наших экспериментах, $E_0 = 20$ МэВ, оказывается меньше энергии, соответствующей максимуму кривой $\sigma(E)$: $E_m \approx 25$ МэВ. Поэтому профили концентрации $C(x)$ этих изотопов должны быть монотонно спадающими кривыми, что и наблюдается на опыте. Напротив, для изотопов с малыми значениями порога реакции (^{72}As и ^{74}As) при начальной энергии α -частиц $E_0 = 20$ МэВ имеет место неравенство $E_0 > E_m$ ($E_m \approx 18$ и 16 МэВ соответственно), поэтому на кривых $C(x)$ этих изотопов и появляется максимум. При энергиях $E_0 = 16$ и 12 МэВ справедливо неравенство $E_0 < E_m$, вследствие чего профили $C(x)$ носят монотонный характер.

Таким образом, концентрация изотопа в конечном счете определяется локальной энергией α -частиц. По мере возрастания начальной энергии координата, соответствующая заданной локальной энергии α -частиц, увеличивается, что в результате проявляется в сдвиге кривой $C(x)$ в глубь образца, т. е. в увеличении глубины легирования. Величина сдвига должна быть при этом одинаковой для различных изотопов, что, как следует из рисунка *a* и *b*, и наблюдалось в выполненных нами, экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. А. Дидик, В. В. Козловский, Р. Ш. Малкович, Е. А. Скорятина, Б. А. Шустров. Письма ЖТФ, 15, 19 (1989).
- [2] О. Ф. Афонин, Б. В. Викторов, Б. В. Забродин, В. В. Козловский, Н. В. Марущак, Б. А. Шустров. ФТП, 22, 56 (1988).
- [3] H. Münzel, I. Lange. Uses of Cyclotrons in Chemistry, Metallurgy and Biology (ed. by C. V. Amphlett), 373. London (1969).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 27, вып. 2, 1993

КОМПЕНСАЦИЯ ПРОВОДИМОСТИ n -GaAs(Yb) РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

В. В. Козловский, Л. Ф. Захаренков

Санкт-Петербургский технический университет, 195251, Санкт-Петербург, Россия
(Получено 8.05.1992. Принято к печати 14.07.1992)

В последнее время резко возрос интерес к изучению свойств полупроводниковых материалов, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ). Применительно к соединениям $A^{III}B^V$ эти вопросы недавно были рассмотрены в обзоре [1]. В нем отмечалось, в частности, что в отличие от кремния, легированного РЗЭ [2], начиная с середины 60-х годов интенсивно изучается радиационное дефектообразование (РД), для $A^{III}B^V$ это направление практически не исследовано и сообщений о влиянии РЗЭ на изменение свойств $A^{III}B^V$ при облучении не имеется.

Целью настоящей работы является исследование влияния иттербия на компенсацию проводимости n -GaAs при электронном облучении в диапазоне температур от комнатной до 250 °С.

Объектом исследования служили эпитаксиальные слои GaAs, выращенные на подложках арсенида галлия марки АГЧО. Слои получены жидкофазной эпитаксией с легированием иттербием в количестве 0.003—0.05 мас% в расплаве.

Энергия электронов при облучении составляла 1 МэВ.

Результаты экспериментов показали, что облучение при $Q < 100$ °С вызывает примерно одинаковую скорость удаления носителей заряда (0.5 см^{-1}) в образцах GaAs, содержащих и не содержащих Yb, так что величина $\eta = \frac{(\partial n / \partial \Phi)_{Yb}}{\partial n / \partial \Phi}$ близка

к единице. Эта часть согласуется с ранее опубликованными результатами по изучению влияния РЗЭ на $\partial n / \partial \Phi$.

На рисунке результаты экспериментов представлены как отношение (η) скорости удаления носителей заряда $\partial n / \partial \Phi$ в образцах, содержащих иттербий в количестве 0.05 мас% (кривая 1) и 0.003 мас% (кривая 2), к скорости удаления