

## ТРАНСМУТАЦИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОНАМИ И АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

Афонин О. Ф., Викторов Б. В., Забродин Б. В.,  
Козловский В. В., Марущак Н. В., Шустров Б. А.

Проведен анализ формирования примесного состава арсенида галлия при его облучении протонами и альфа-частицами с энергиями 15–20 МэВ. По результатам анализа сделан вывод об эффективности введения донорных и акцепторных примесей при облучении. Показано, что наиболее эффективное ядерное легирование арсенида галлия осуществляется донорными примесями при использовании облучения альфа-частицами. Экспериментальная проверка процессов ядерного легирования на заряженных частицах проведена на малогабаритном циклотроне МГЦ-20. Получено хорошее согласие между концентрацией носителей заряда в ядерно легированных образцах и концентрацией введенных примесей.

Принципиальная возможность легирования полупроводниковых материалов примесями, возникающими в результате ядерных реакций на тепловых нейтронах, гамма-квантах, заряженных частицах, известна уже несколько десятилетий [1], однако до настоящего времени экспериментальные исследования проводились в основном только для нейтронного и фотоядерного легирования [2–4]. Известны лишь две работы, в которых сообщается о попытках провести легирование элементарного полупроводника — кремния путем облучения протонами и альфа-частицами [5, 6]. В настоящей работе выполнен анализ и проведена экспериментальная проверка возможности легирования сложного полупроводникового материала — арсенида галлия под действием протонов и альфа-частиц.

Как известно, под действием протонов и альфа-частиц достаточно большой энергии могут протекать ядерные реакции типа  $(p, \gamma)$ ,  $(p, n)$ ,  $(p, pn)$ ,  $(\alpha, \gamma)$ ,  $(\alpha, n)$ ,  $(\alpha, p)$ ,  $(\alpha, 2p)$ ,  $(\alpha, 2n)$  и др. Эти реакции во всех случаях, за исключением реакций радиационного захвата  $(p, \gamma)$ ,  $(\alpha, \gamma)$ , являются эндотермическими, причем величина энергетического барьера зависит от типа ядерной реакции, в частности от числа вылетающих вторичных частиц.

Химические элементы, образующиеся в материалах под действием протонов и альфа-частиц, в периодической таблице располагаются, как правило, справа от исходных элементов. Для выяснения элементного состава вводимых в GaAs примесей проведем анализ продуктов всех возможных ядерных реакций. В табл. 1 приведены для изотопов галлия и мышьяка значения энергетических порогов для различных каналов реакций с протонами и альфа-частицами и продукты этих реакций. Если ядро — продукт реакции — радиоактивно, то для него указаны период полураспада и конечное стабильное ядро.

Из табл. 1 видно, что основными элементами, вводимыми при облучении GaAs как протонами, так и альфа-частицами, являются германий и селен — примеси донорного типа для арсенида галлия [7, 8]. Однако ядерные реакции на протонах по конечным продуктам имеют некоторые отличия от реакций на альфа-частицах. Так, реакции типа  $(p, n)$  не приводят к образованию примесных атомов, поскольку продукты этих реакций, как правило, претерпевают  $\beta^+$ -распад, превращаясь в ядра матрицы. Распадающиеся по этому же типу продукты ядерных реакций типа  $(p, pn)$  приводят к образованию химических элементов, стоящих слева от исходных элементов. Реакция  $(p, pn)$ , например,

Т а б л и ц а 1

Характеристики основных типов ядерных реакций  
на арсениде галлия под действием протонов и альфа-частиц

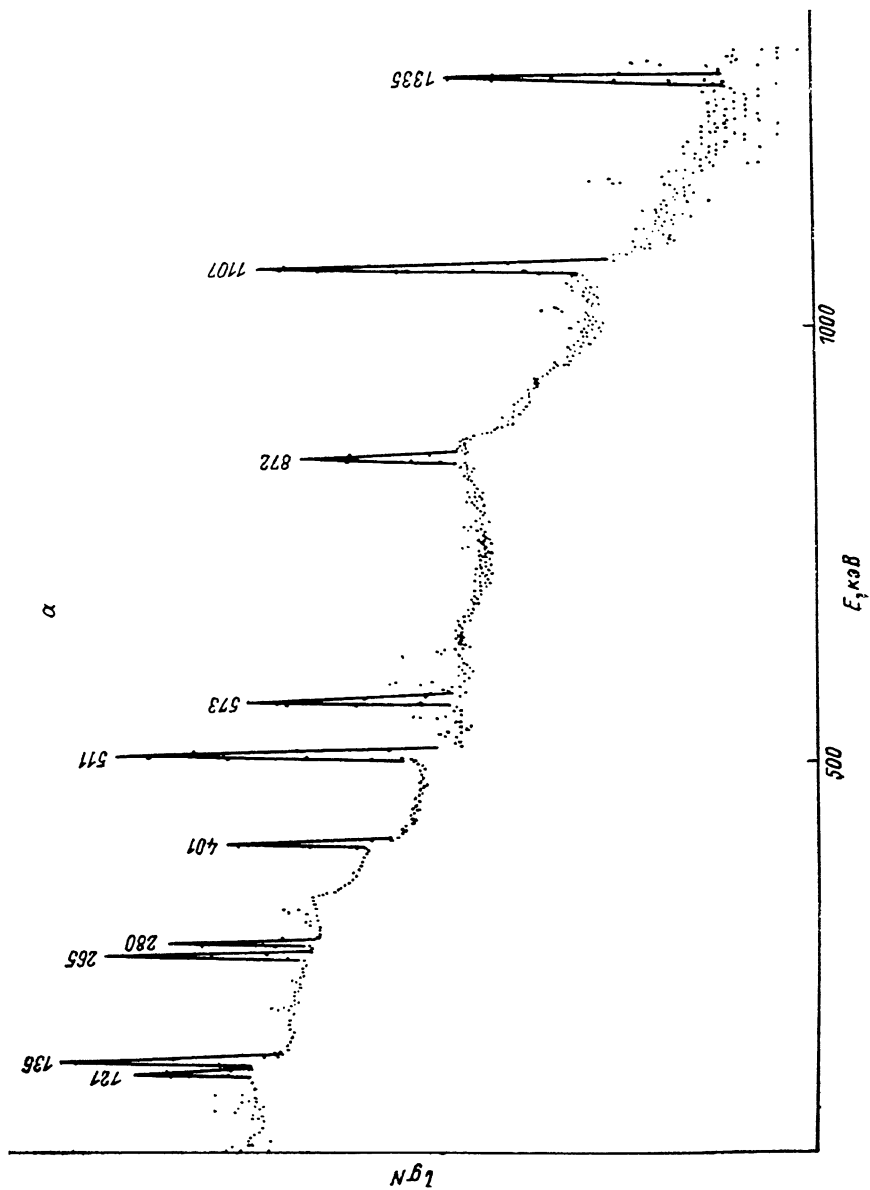
Элемент	Содержание, %	Реакция	Порог, МэВ	Продукт реакции	$T_{1/2}$	Конечный продукт		
$^{69}\text{Ga}$	60.7	$p, \gamma$	-8.6	$^{70}\text{Ge}$	Стаб	$^{70}\text{Ge}^*$		
		$p, n$	2.2	$^{69}\text{Ge}$	36 ч	$^{69}\text{Ga}$		
		$p, pn$	10.4	$^{68}\text{Ga}$	68 мин	$^{68}\text{Zn}$		
		$\alpha, p$	1.7	$^{72}\text{Ge}$	Стаб	$^{72}\text{Ge}$		
		$\alpha, n$	7.1	$^{72}\text{As}$	26 ч	$^{72}\text{Ge}$		
		$\alpha, 2p$	11.9	$^{71}\text{Ga}$	Стаб	$^{71}\text{Ga}$		
		$\alpha, 2n$	16.0	$^{71}\text{As}$	62 ч $\rightarrow$ $^{71}\text{Ge} \rightarrow$ 11 дн	$^{71}\text{Ga}$		
		$\alpha, pn$	13.1	$^{71}\text{Ge}$	11.4 дн	$^{71}\text{Ga}$		
		$\alpha, p2n$	20.9	$^{70}\text{Ge}$	Стаб	$^{70}\text{Ge}$		
		$\alpha, n2p$	21.8	$^{70}\text{Ga}$	21 мин	$^{70}\text{Ge}$		
		$\alpha, 3n$	28.3	$^{70}\text{As}$	52 мин	$^{70}\text{Ge}$		
		$^{71}\text{Ga}$	39.3	$p, \gamma$	-9.8	$^{72}\text{Ge}$	Стаб	$^{72}\text{Ge}$
				$p, n$	1.0	$^{71}\text{Ge}$	11.4 дн	$^{71}\text{Ga}$
				$p, pn$	9.4	$^{70}\text{Ga}$	21 мин	$^{70}\text{Ge}$
$\alpha, p$	3.9			$^{73}\text{Ge}$	Стаб	$^{73}\text{Ge}$		
$\alpha, n$	5.2			$^{74}\text{As}$	17.9 дн	{ $^{74}\text{Ge}$ (68 %) $^{74}\text{Se}$ (32 %)		
$\alpha, 2p$	13.2			$^{73}\text{Ga}$	4.9 ч	$^{73}\text{Ge}$		
$\alpha, 2n$	13.6			$^{73}\text{As}$	80.3 дн	$^{73}\text{Ge}$		
$\alpha, pn$	12.5			$^{73}\text{Ge}$	Стаб	$^{73}\text{Ge}$		
$\alpha, p2n$	19.7			$^{72}\text{Ge}$	Стаб	$^{72}\text{Ge}$		
$\alpha, n2p$	22.0			$^{72}\text{Ga}$	14.1 ч	$^{72}\text{Ge}$		
$\alpha, 3n$	25.4			$^{72}\text{As}$	26 ч	$^{72}\text{Ge}$		
$^{75}\text{As}$	100			$p, \gamma$	-9.6	$^{76}\text{Se}$	Стаб	$^{76}\text{Se}^*$
				$p, n$	1.6	$^{75}\text{Se}$	120 дн	$^{75}\text{As}$
				$p, pn$	10.3	$^{74}\text{As}$	17.9 дн	{ $^{74}\text{Se}$ (32 %) $^{74}\text{Ge}$ (68 %)
		$\alpha, p$	0.92	$^{78}\text{Se}$	Стаб	$^{78}\text{Se}$		
		$\alpha, n$	5.5	$^{78}\text{Br}$	6.5 мин	$^{78}\text{Se}$		
		$\alpha, 2p$	11.8	$^{77}\text{As}$	38.7 ч	$^{77}\text{Se}$		
		$\alpha, 2n$	14.2	$^{77}\text{Br}$	57 ч	$^{77}\text{Se}$		
		$\alpha, pn$	12.1	$^{77}\text{Se}$	Стаб	$^{77}\text{Se}$		
		$\alpha, p2n$	19.8	$^{76}\text{Se}$	Стаб	$^{76}\text{Se}$		
		$\alpha, n2p$	22.0	$^{76}\text{As}$	26 ч	$^{76}\text{Se}$		
		$\alpha, 3n$	25.4	$^{76}\text{Br}$	16.1 ч	$^{76}\text{Se}$		

Примечание. \* Несмотря на экзотермичность реакций ( $p, \gamma$ ), ( $\alpha, \gamma$ ), для их осуществления налетающая частица должна иметь начальную энергию, превышающую энергию электростатического отталкивания взаимодействующих частиц (кулоновский барьер).

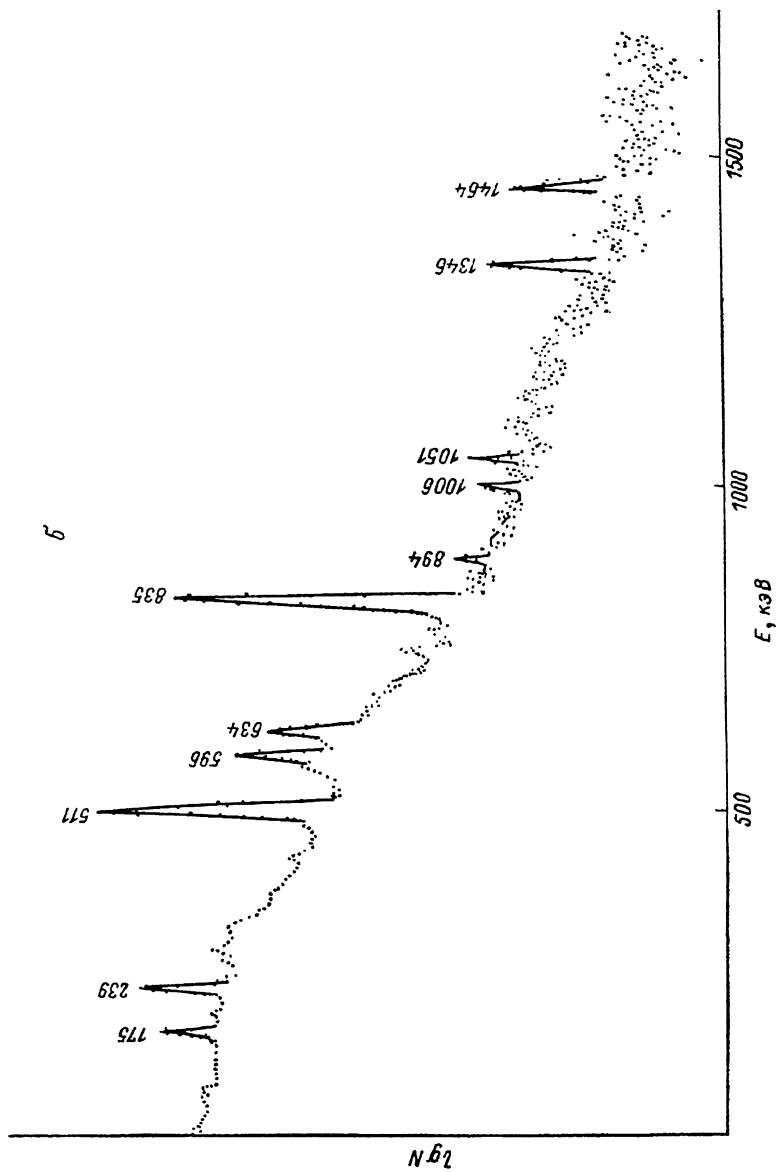
на ядрах  $^{69}\text{Ga}$  приводит к образованию ядер  $^{68}\text{Zn}$ . Это единственный канал ядерной реакции, когда в GaAs может образовываться примесь акцепторного типа.

Экспериментальная проверка эффективности образования примесных атомов в арсениде галлия под действием протонного и альфа-облучения проводилась на малогабаритном циклотроне типа МГЦ-20. Образцы облучались протонами с энергией 15 МэВ или альфа-частицами с энергией 20 МэВ при одинаковом флюенсе, равном  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Облучение проводилось через диафрагму площадью  $1 \text{ см}^2$ . Опыты выполнялись на пластинах GaAs толщиной 250 мкм с исходной концентрацией носителей заряда  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , которая определялась либо с помощью эффекта Холла, либо вольтфарадным методом. Количество примесей, образующихся из радиоактивных продуктов ядерных реакций, определялось путем измерения гамма-активности образцов.

На рисунке, а, б представлены примеры полученных спектров для случая облучения GaAs протонами и альфа-частицами соответственно. Наиболее интенсивные линии, присутствующие в спектре рисунка, а, соответствуют изотопам  $^{73}\text{Se}$ ,  $^{74}\text{As}$ ,  $^{69}\text{Ge}$ , а в спектре рисунка, б —  $^{71}\text{As}$ ,  $^{72}\text{As}$ ,  $^{74}\text{As}$ ,  $^{77}\text{Br}$ ,  $^{89}\text{Br}$ . Из экспериментальных спектров мы определили общее количество вводимых



Энергетический спектр радиоактивных атомов примесей в арсениде галлия, облученном протонами с энергией 15 МэВ (а) и альфа-частицами с энергией 20 МэВ (б).



(Продолжение рисунка)

легирующих примесей за счет основных ядерных реакций и оценили коэффициент трансмутации ( $k_{тр}$ ):

$$k_{тр} = \frac{N_{пр}}{D} \frac{A}{(1 - e^{-\lambda t_{обл}}) e^{-\lambda t_{ост}} \Phi},$$

где  $N_{пр}$  — количество примесных атомов, образованных в образце при облучении его заряженными частицами интегральной дозой  $D$  [9],  $A$  — активность образца,  $\lambda$  — постоянная распада радиоактивного изотопа,  $t_{обл}$  — время облучения,  $t_{ост}$  — время «остывания» (время выдержки образца после облучения),  $\Phi$  — плотность потока бомбардирующих частиц.

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициентов трансмутационного образования легирующих примесей при облучении GaAs альфа-частицами с энергией 20 МэВ

Ядерная реакция	Вводимая примесь	$k_{тр}$
$^{69}\text{Ga} (\alpha, n)^{72}\text{As}$	$^{72}\text{Ge}$	$4 \cdot 10^{-5}$
$^{71}\text{Ga} (\alpha, n)^{74}\text{As}$	$^{74}\text{Ge}, ^{74}\text{Se}$	$2 \cdot 10^{-5}$
$^{71}\text{Ga} (\alpha, 2p)^{73}\text{Ga}$	$^{73}\text{Ge}$	$1 \cdot 10^{-5}$
$^{71}\text{Ga} (\alpha, 2n)^{73}\text{As}$	$^{73}\text{Ge}$	$1 \cdot 10^{-5}$
$^{75}\text{As} (\alpha, n)^{78}\text{Br}$	$^{78}\text{Se}$	$6 \cdot 10^{-6}$
$^{75}\text{As} (\alpha, 2p)^{77}\text{As}$	$^{77}\text{Se}$	$9 \cdot 10^{-6}$
$^{75}\text{As} (\alpha, 2n)^{77}\text{Br}$	$^{77}\text{Se}$	$2 \cdot 10^{-5}$

В табл. 2 приведены полученные данные для коэффициентов трансмутации для основных ядерных реакций, радиоактивные продукты которых распадаются в ядра элементов — примесей. Как видно из табл. 2, в большинстве случаев значения  $k_{тр}$  лежат в диапазоне величины  $10^{-4} \div 10^{-6}$ . Можно считать, что близкие значения  $k_{тр}$  будут давать и другие аналогичные ядерные реакции, приведенные в табл. 1, продуктами которых являются непосредственно стабильные ядра атомов примесей. В результате протонного облучения в арсенид галлия вводятся как донорные примеси (селен, германий), так и акцепторная примесь (цинк), причем эффективности введения малы ( $k_{тр} \sim 10^{-6}$ ); соответственно и разностная концентрация этих примесей, определяющая эффективное легирование донорными или акцепторными примесями, незначительна.

Облучение арсенида галлия альфа-частицами в отличие от протонного приводит к образованию примесей только донорного типа (селен, германий), причем число таких ядерных реакций (при энергии альфа-частиц, равной 20 МэВ) около 15.

По нашим измерениям, при облучении GaAs альфа-частицами с энергией 20 МэВ дозой  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  в полупроводник вводится  $(4 \pm 1) \cdot 10^{12}$  атомов донорной примеси (селен, германий), а суммарный коэффициент трансмутации для введения донорных примесей в этих условиях составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ . Так как реальная глубина полупроводника, на которой происходит образование примесных атомов при облучении GaAs альфа-частицами с энергией 20 МэВ, составляет  $\sim 100 \text{ мкм}$  [10], то концентрации легирующих примесей при облучении дозами  $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  составляют  $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

В образцах, легированных методом ядерной трансмутации, нами была измерена концентрация носителей заряда. Образцы предварительно выдерживались в течение 2 месяцев для устранения наведенной активности, а затем для удаления радиационных дефектов, внесенных облучением, образцы отжигались при температуре  $750^\circ\text{C}$  в течение 30 мин в атмосфере чистого аргона. Концентрация электронов в приповерхностном слое арсенида галлия возросла в результате ядерного легирования на 3 порядка и составила  $(2.5 \pm 0.5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , что хорошо согласуется с определенной по радиоактивности концентрацией введенной примеси.

Необходимо отметить, что концентрация донорной примеси, измеренная по величине радиоактивности и усредненная по части пробега альфа-частицы, на котором происходит образование легирующих примесей, может отличаться от концентрации носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника не только из-за неравномерности генерации легирующих примесей по глубине образца, но и вследствие радиационно-стимулированной диффузии примесей, имеющей место при отжиге радиационных дефектов [11, 12].

В заключение авторы выражают благодарность В. К. Ярмаркину за полезное обсуждение результатов работы.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Ларк-Горовиц К. Бомбардировка полупроводников нуклонами. — В кн.: Полупроводниковые материалы / Пер. с англ. под ред. В. М. Тучкевича. М., 1954, с. 62—94.
- [2] Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников / Под ред. Дж. Миза. М., 1982. 264 с.
- [3] Заблочкий В. В., Иванов Н. А., Космач В. Ф., Леонов Н. Н., Остроумов В. И. Легирование полупроводников с помощью фотоядерных реакций. — ФТП, 1986, т. 20, в. 4, с. 625—629.
- [4] Легирование полупроводников методом ядерных реакций / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1981. 183 с.
- [5] Долголенко А. П., Шаховцов В. И. Создание  $p-n$ -перехода в  $p$ -кремнии под действием  $\alpha$ -частиц. — В кн.: Радиационная физика неметаллических кристаллов. Минск, 1970, с. 191—194.
- [6] Гайдар Г. П., Дмитриенко Н. Н., Дубар Л. В., Курило П. М., Павленко А. А., Стрюк Ю. С., Токаревский В. В. Возможность трансмутационного легирования кремния посредством протонного облучения. — ФТП, 1986, т. 20, в. 5, с. 960—962.
- [7] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 562 с.
- [8] Мирчанашвили Ш. М., Нанобашвили Д. И. О возможности трансмутационного легирования арсенида галлия. — ФТП, 1970, т. 4, в. 10, с. 1879—1883.
- [9] Кузнецов Р. А. Активационный анализ. М., 1974. 250 с.
- [10] Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев, 1975. 416 с.
- [11] Козловский В. В., Ломасов В. Н. Радиационно-стимулированная диффузия примесей в полупроводниках. — Обзоры по электрон. техн., сер. 7, 1985, в. 9, с. 1109.
- [12] Козловский В. В., Ломасов В. Н., Марущак Н. В. Диффузия примесей замещения в облученном ионами кристалле. — ЖТФ, 1985, т. 55, в. 11, с. 2175—2178.

Получена 2.01.1987  
Принята к печати 30.04.1987