

УДК 548.736.15

## ТРАНСМУТАЦИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АЛМАЗА АКЦЕПТОРНОЙ ПРИМЕСЬЮ БОРА

В. С. Вавилов, В. В. Заблоцкий, Н. А. Иванов, В. В. Калашников,  
В. В. Петренко, В. Ф. Сергиенко, М. В. Чукичев

*В работе представлены данные о свойствах алмаза, подвергнутого трансмутационному легированию акцепторной примесью бора и высокотемпературному отжигу.*

Полупроводниковый алмаз представляет собой перспективный материал для специальных приборов твердотельной электроники [1]. Известно, что бору, замещающему атом углерода в узле решетки алмаза, соответствует акцепторный центр с уровнем  $E_v + 0,37 \text{ эВ}$  [2, 3]. Введение бора в камеры высокого давления, в которых выращивают монокристаллы алмаза при высокой температуре [2], приводит к неравномерному распределению этой примеси по объему кристаллов алмаза. Н. А. Ивановым, В. Ф. Космачем и В. В. Петренко был предложен способ трансмутационного легирования алмаза, который должен приводить к практически однородному по объему кристалла уровню легирования.

В качестве такого способа может быть использован способ легирования с помощью ядерных реакций под действием гамма-квантов. Принципиальная возможность гамма-легирувания алмаза обусловлена тем, что при энергиях квантов до  $32 \text{ МэВ}$  происходят, в основном, фотоядерные реакции с вылетом только одного нуклона: нейтрона —  $(\gamma, n)$  или протона —  $(\gamma, p)$  и образуются остаточные ядра, массовые числа которых на единицу меньше массовых чисел исходных ядер. В работе [4] отмечалось, что в результате таких реакций в монокристаллах с порядковым атомным номером меньшим 18 может создаваться примесь только акцепторного типа.

В таблице 1 приведены энергетические пороги, периоды полураспада нестабильных ядер и стабильные ядра, образующиеся в фотоядерных реакциях на углероде при энергиях гамма-квантов до  $32 \text{ МэВ}$ . Из таблицы следует, что атомы бора образуются из атомов углерода в результате реакций с вылетом одного или двух нуклонов (нейтрона

или протона) из ядер основного изотопа  $C^{12}$ , а также реакций с вылетом двух нуклонов из ядер изотопа  $C^{13}$ .

Т а б л и ц а 1

## Характеристики фотоядерных реакций

Исходный изотоп	Распространенность, %	Реакция	Порог, МэВ	Остаточное ядро	Период полураспада	Конечное ядро
$C^{12}$	98.8	$\gamma, p$	15.96	$B^{11}$	стабильное	$B^{11}$
		$\gamma, n$	18.72	$C^{11}$	20.3 мин	$B^{11}$
		$\gamma, np$	27.4	$B^{10}$	стабильное	$B^{10}$
		$\gamma, 2p$	27.2	$Be^{10}$	$10^6$ лет	$B^{10}$
		$\gamma, 2n$	31.85	$C^{10}$	19.5 с	$B^{10}$
		$\gamma, H^2$	25.2	$B^{10}$	стабильное	$B^{10}$
		$\gamma, H^3$	27.4	$2He^4 + p$		$2He^4 + p$
		$\gamma, He^3$	26.3	$Be^9$	стабильное	$Be^9$
$C^{13}$	1.1	$\gamma, p$	17.53	$B^{12}$	0.02 с	$C^{12}$
		$\gamma, n$	4.95	$C^{12}$	стабильное	$C^{12}$
		$\gamma, np$	20.9	$B^{11}$	стабильное	$B^{11}$
		$\gamma, H^2$	18.7	$B^{11}$	стабильное	$B^{11}$
		$\gamma, 2p$	31.6	$Be^{11}$	14 с	$B^{11}$
		$\gamma, 2n$	23.7	$C^{11}$	20.3 мин	$B^{11}$
		$\gamma, H^3$	24.0	$B^{10}$	стабильное	$B^{10}$
		$\gamma, He^3$	24.4	$Be^{10}$	$10^6$ лет	$B^{10}$
	10.6	$Be^9$	стабильное	$Be^9$		

Ядерное легирование полупроводников под действием гамма-квантов можно осуществлять с использованием пучков тормозного излучения, которое создается с помощью ускорителей электронов на энергии 30 – 40 МэВ. Возможность практической реализации метода гамма-легирования на базе ускорителей определяется, в первую очередь, скоростью введения атомов бора, равной концентрации атомов бора, создаваемой в облучаемом кристалле в единицу времени. От этой скорости зависит продолжительность облучения, требуемая для образования в алмазе заданной концентрации примеси.

Облученные гамма-квантами беззотные (изолирующие) алмазы непосредственно после облучения были непрозрачными, однако, по данным анализа спектров комбинационного рассеяния света, снятых Н. Н. Мельником (ФИАН), сохранили алмазную структуру кристаллической решетки. После высокотемпературного отжига (2 часа при  $1450^{\circ}\text{C}$ ) кристаллы стали прозрачными и приобрели слабо-зеленую окраску. Это согласуется с известными данными о восстановлении алмазной решетки [3, 5]. Облученные гамма-квантами образцы обнаружили интенсивную катодолюминесценцию. Данные анализа спектров будут опубликованы отдельно. Удельное сопротивление облученных гамма-квантами и отожженных образцов оставалось высоким (более  $10^{10}$  Ом·см). Весьма вероятно, что в ходе отжига возникали комплексы дефектов друг с другом или дефектов с примесями, имеющие глубокие энергетические уровни, компенсирующие электрическую активность возникающих в результате ядерных реакций акцепторных центров. Подобные явления "самокомпенсации", как известно, имеют место не только в алмазе, но и во многих широкозонных полупроводниках, подвергнутых ионной имплантации электрически активными примесями [6]. В последнее время становится очевидным, что в определенной мере это явление удастся минимизировать.

Авторы выражают благодарность К. Е. Соколову и Н. Н. Леонову, принявшим участие в проведении экспериментов, и персоналу ускорителя "Факел".

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алмаз в электронной технике. Сборник под ред. В. Б. Кваскова, М., Энергоатомиздат, 1990.
- [2] The Properties of Natural and Synthetic Diamonds. Ed. J. Field, Academic Press, London, 1992.
- [3] В а в и л о в В. С., Г и п п и у с А. А., К о н о р о в а Е. А. Электронные и оптические процессы в алмазе. М., Наука, 1985.
- [4] З а б л о ц к и й В. В., И в а н о в Н. А., К о с м а ч В. Ф. и др. ФТП, **20**, вып. 4, 625 (1986).
- [5] P r i n s J. Mat. Sciences Reports, **7**, no. 7-8, 272 (1992).
- [6] В а в и л о в В. С. Особенности физики широкозонных полупроводников. УФН, 1994, в печати.

Поступила в редакцию 9 февраля 1994 г.