

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

**Ф И З И К А**  
**И**  
**Т Е Х Н И К А**  
**ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

**Т О М 11**

**Отдельный выпуск**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»**  
**ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**  
**ЛЕНИНГРАД · 1977**

УДК 621.315.592

## ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ФОСФОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ф. Ф. Комаров, И. С. Ташлыков

Используя метод обратного рассеяния, изучено образование дефектов в GaAs при имплантации ионов фосфора с энергией 30 кэВ. В процессе имплантации кристаллы подогревались до температур от комнатной до 400°С. Получена температурная зависимость радиационной поврежденности. Установлено влияние температуры имплантации на профили распределения дефектов.

В связи с применением имплантации ионов P<sup>+</sup> и Al<sup>+</sup> в GaAs с целью синтеза тройных соединений, излучающих в видимой области спектра [1-4], исследования изменений физических свойств кристаллов при ионнолучевом легировании представляются актуальными.

Общеизвестно, что излучающие свойства изучаемых структур в значительной мере определяются остаточной дефектностью материала. Поэтому целью нашего исследования было выяснение влияния температуры кристаллов GaAs на дефектообразование в них при внедрении ионов P<sup>+</sup>.

Монокристаллы GaAs *n*-типа, разрезанные вдоль плоскости (111), механически, а затем химически полированные, облучались ионами P<sup>+</sup> с энергией 30 кэВ. Внедрение проводилось в кристаллы, находящиеся при комнатной температуре, и в подогреваемые до температур 300, 350 и 400°С. Плотность тока ионов составляла 5—8 мкА/см<sup>2</sup>. Интегральный поток ионов был 7·10<sup>16</sup>, 8,2·10<sup>16</sup>, 3,3·10<sup>16</sup> и 2·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> соответственно для каждой из указанных выше температур.

Исследование имплантированных кристаллов выполнялось неразрушающим методом обратного рассеяния (ОР) с помощью ускоренных до энергии 1,4 МэВ ионов гелия. Рассеянные на угол 160° ионы гелия регистрировались полупроводниковым детектором с разрешением  $\Delta E = 15$  кэВ. Снимались энергетические спектры рассеянных ионов гелия в случае неориентированной мишени — «случайные» спектры и (111) — «осевые» спектры. При построении шкалы глубин использовались значения потерь энергии ионов гелия в GaAs из работы [5]. Экспериментально получены спектры ОР ионов He<sup>+</sup> от исходного и имплантированных при различных температурах кристаллов GaAs представлены на рис. 1.

Из приведенных на рис. 1 спектров следует, что аморфизация поверхностного слоя GaAs при имплантации ионов P<sup>+</sup> ( $E = 30$  кэВ) наступает в случае легирования только при комнатной температуре. Толщина аморфизованного слоя составляет  $\sim 300 \div 400$  Å, что превышает теоретически оцененный [6, 7] средний проецируемый пробег ионов P<sup>+</sup> в GaAs ( $\bar{R}_p \approx 250$  Å). Вместе с тем профиль пространственного распределения дефектов в случае имплантации при всех четырех температурах распространяется до еще более значительных глубин ( $\sim 4000$  Å). Такое различие теоретически рассчитываемой и экспериментально наблюдаемой глубин залегания дефектов для внедрения некоторых ионов в GaAs уже известно [8, 9], однако причины не вполне ясны. При «горячем» легировании это отчасти можно связать с ориентационными эффектами, так как

большая часть генерируемых в приповерхностной области дефектов отжигается в процессе имплантации и захватываемые в каналы ионы фосфора могут иметь больший пробег, чем рассчитанный для случайного направления по теории ЛШШ. Так, выполненный нами расчет максимального пробега хорошо каналированных ионов  $P^+$  [ $^{10}$ ] дает  $R_{\max} \approx 1.15$  мкм при  $E = 30$  кэВ. Залегание пика дефектов в легированных при повышенной температуре кристаллах на глубине только 1200—1300 Å (кривые 4 и 5 на рис. 1) вызвано тем, что доля хорошо каналированных ионов все же незначительна. Итак, с достаточной достоверностью можно считать, что

создание условий для каналирования внедряемых ионов  $P^+$  при «горячем» легировании является основной причиной различия глубин расположения пика дефектов на «осевых» спектрах (рис. 1, кривые 3—5).

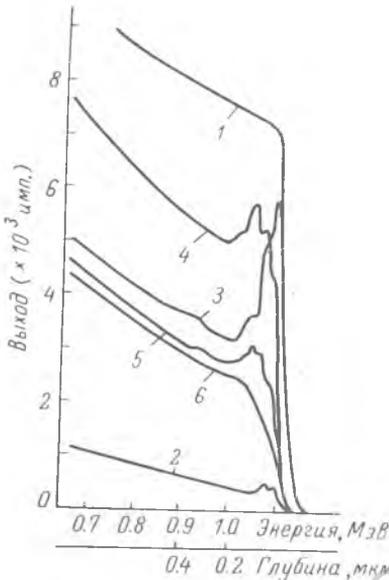


Рис. 1. Энергетические спектры обратно рассеянных ионов  $He^+$  от кристаллов GaAs.

$E_0(He^+) = 1.4$  МэВ. Спектры исходного кристалла: 1 — неориентированного, 2 — при ориентации пучка ионов гелия вдоль оси (111). Осевые спектры 3—6, имплантированные ионами  $P^+$  при температурах соответственно 20, 300, 350 и 400°С интегральными потоками  $7 \cdot 10^{16}$ ,  $8.2 \cdot 10^{16}$ ,  $3.3 \times 10^{18}$  и  $2 \cdot 10^{18}$  см $^{-2}$ .

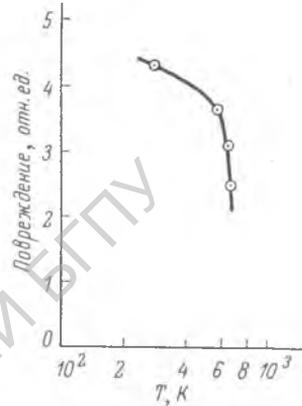


Рис. 2. Температурная зависимость степени повреждения GaAs, имплантированного ионами  $P^+$ .

При имплантации ионов  $P^+$  в GaAs в условиях комнатных температур и больших доз влияние ориентационных эффектов на увеличение глубины

залегания дефектов по известным причинам должно быть практически исключено. Поэтому при объяснении наблюдаемых больших глубин распределения «хвостов» профилей дефектов, на наш взгляд, основным эффектом следует считать ускоренную диффузию дефектов в кристалл в процессе имплантации, особенно в условиях повышенной температуры легирования. Несомненно также, что значительная диффузия дефектов связана с распределением внедренного в GaAs фосфора, так как он является изоэлектронной примесью в GaAs. В этой связи следует, по-видимому, ожидать похожего распределения дефектов при имплантации фосфора в другие кристаллы типа  $A^{III}B^V$ , например InSb. Уже имеются некоторые результаты [11], которые не противоречат данному мнению.

Интересными представляются изменения в спектрах ОР при повышении температуры имплантации. При увеличении температуры легирования от комнатной до 300°С наблюдается заметное уменьшение выхода ОР ионов гелия в области пика дефектов ( $\chi_{\max} = 0.75$ ). Еще более существенные изменения происходят при повышении температуры имплантации до 350 и 400°С. Пик дефектов при температуре легирования 350°С только отмечается и сдвинут на несколько большую глубину, чем при  $t = 300$ °С ( $t_{\max} \approx 1250$  Å). При легировании ионов  $P^+$  в GaAs при температуре 400°С пик дефектов практически отсутствует.

Учитывая тот факт, что величина площади под пиком дефектов может служить оценкой степени интегральной поврежденности кристалла, мы рассчитали ее для всех температур имплантации. Результаты температурной зависимости степени поврежденности GaAs (в расчете на единицу дозы) при имплантации в него больших интегральных потоков ионов  $P^+$  представлены на рис. 2. Степень повреждения снижается при увеличении температуры имплантации. После имплантации при температуре  $400^\circ C$  она составляет величину 0.6 от степени повреждения, получаемой при легировании без подогрева.

Наблюдаемое уменьшение поврежденности с ростом температуры легирования происходит в основном за счет отжига приповерхностных дефектов (рис. 1). Кристаллы GaAs имплантированные ионами  $P^+$  при повышенных температурах, характеризуются достаточно совершенной структурой поверхности, что подтверждается также электронографическими исследованиями. Вместе с тем изменение  $\chi_{\min}$  (отношение величины выхода «случайного» спектра в области за пиком дефектов) при варьировании температуры мишени во время имплантации имеет более сложный характер, чем поврежденность в приповерхностных слоях. Пока еще трудно адекватно это объяснить, но можно, пожалуй, считать, что это связано с сортом внедряемых в GaAs ионов, так как именно при внедрении фосфора, а также алюминия в GaAs возможна суперпозиция нескольких трудно разделимых процессов, каждый из которых дает вклад в увеличение выхода ОР. Например, частично это может быть вызвано распределением на большую глубину внедренных при высокой температуре ионов  $P^+$ , являющихся при этом дополнительными центрами рассеяния для анализирующих ионов  $He^+$ . Проведенные эксперименты показывают, что повышение температуры мишени до  $400^\circ C$  при внедрении больших интегральных потоков ионов  $P^+$  в GaAs является эффективным средством для получения имплантированных кристаллов с совершенной структурой приповерхностных слоев. При этом на энергетических спектрах ОР ионов  $He^+$  пик дефектов, смещаясь на большую глубину ( $\sim 5\bar{R}_p$ ), почти исчезает, но в распределении дефектов наблюдаются глубинные «хвосты», образование которых объясняется ускоренной диффузией дефектов, вызванной облучением. Основным аргументом в пользу этого предположения может служить тот факт, что глубины залегания «хвостов» на профилях дефектов при «холодном» и «горячем» легировании различаются незначительно.

Анализ температурной зависимости степени поврежденности имплантированных кристаллов и изменение хода осевых спектров свидетельствуют о сложном характере процессов дефектообразования при имплантации в GaAs ионов  $P^+$ , что несомненно связано с сортом внедряемых ионов.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] РЖ Электроника и ее применение, 5Б276 (1971).
- [2] R. G. Hunsperger, O. J. Marsh. J. Appl. Phys. Lett., 19, 327 (1971).
- [3] L. H. Skolnik, W. G. Spitzer, A. Kahan, R. G. Hunsperger. J. Appl. Phys., 42, 5223 (1971).
- [4] И. М. Белый, Г. А. Гуманский, В. И. Карась, В. М. Ломако, И. С. Ташлыков, В. С. Тишков. ФТП, 9, 2027 (1975).
- [5] K. Gärtner, K. Hehl. Wiss. Ztsch. Friedrich-Schiller Univ., Jena, Mat. Nat. R., 22, 257 (1973).
- [6] М. А. Кумахов, В. А. Муралев, Е. Г. Аверьянов, В. А. Симонов, Л. Г. Хавкин. Ст. деп. ВИНТИ, № 700-75 (1975).
- [7] D. K. Brice. SC-RR-71, 0599 (1971).
- [8] K. Aoki, K. Gamo, K. Masuda, S. Namba. Japan. J. Appl. Phys., 15, 405 (1976).
- [9] А. А. Гаврилов, В. М. Зелевинская, Г. А. Качурин, Н. Б. Придачин, Л. С. Смирнов. ФТП, 9, 2208 (1975); Междунар. раб. совещ. по ионному легированию полупроводников. Будапешт (1975).
- [10] F. F. Komarov, M. A. Khamakhov. Phys. St. Sol. (b), 58, 389 (1973).
- [11] M. A. Wilkins, G. Dearnley. Europen Conf. Implantation (1970).

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем при БГУ  
им. В. И. Ленина  
Минск

Поступило в Редакцию  
16 февраля 1977 г.  
В окончательной редакции  
17 мая 1977 г.