

# ДОКЛАДЫ

## АКАДЕМИИ НАУК БССР

---

АВТОРСКИЙ ОТТИСК



32-Й ГОД ИЗДАНИЯ  
Том XXII, № 4

1988

УДК 539.211 : 539.188

И. С. ТАШЛЫКОВ

## ПОВРЕЖДЕНИЕ GaAs ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ С РАЗНОЙ ЭНЕРГИЕЙ

(Представлено академиком АН БССР В. А. Лабунковым)

Электрофизические свойства ионно-имплантированных полупроводников в значительной степени определяются не только видом и количеством вводимых добавок, но и формирующимися в них во время имплантации радиационными дефектами [1]. Поэтому актуальным представляется поиск оптимальных, с точки зрения формирования более простых нарушений и меньших их концентраций, режимов ионно-лучевого легирования полупроводниковых кристаллов.

В экспериментах и практическом применении ионной имплантации, как правило, задаются и выдерживаются такие параметры, как энергия, доза ионов, температура мишеней. В настоящей работе обсуждается влияние энергии ускоренных ионов на повреждение структуры монокристаллов GaAs. С этой целью кристаллы, ориентированные по плоскостям (100) и (111), облучались при  $T_{\text{комн}}$  ионами  $\text{Al}^+$ ,  $\text{P}^+$  и  $\text{Zn}^+$  с  $E=60$  и  $110$  кэВ в интервале доз от  $3 \cdot 10^{12}$  до  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Эксперименты по определению концентраций дефектов в ионно-имплантированном GaAs проводились с применением резерфордовского обратного рассеяния каналированных ионов гелия с  $E_0=1$  МэВ в условиях *in situ*.

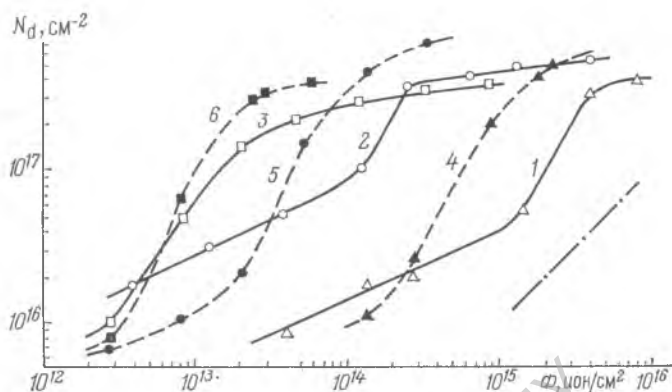
Для более полного понимания процессов, протекающих в GaAs при облучении, анализ повреждения структуры выполняли в рамках представлений о каскадах смещений, развивающихся в кристаллах при ионном внедрении [2]. Одной из наиболее информативных характеристик каскадных эффектов является плотность выделяемой в упругих столкновениях энергии ионов или, иначе говоря, средняя энергия атомов  $\theta$ . Расчет значений  $\theta$  для  $M_1$  от 27 до 65 и указанных выше энергий выполнен с учетом пространственного распределения потерь энергий иона вдоль трека, объемов индивидуальных и статистических каскадов, определенных вторыми моментами профиля выделенной энергии [3]. Полученные значения представлены в таблице. Обращает на себя внимание нелинейная зависимость  $\theta$  от энергии ионов. Например, при увеличении  $E$  в  $\sim 1,8$  раза средняя энергия, получаемая атомами мишени, уменьшается в 3—4 раза. Представляется полезным учитывать данный параметр каскадных процессов при оптимизации ионной имплантации в полупроводники.

Обсудим экспериментальные результаты о повреждении GaAs при

Плотность энергии, выделенной в индивидуальном каскаде при торможении ионов в арсениде галлия

Ион	$\text{Al}^+$		$\text{P}^+$		$\text{Zn}^+$	
$E$ , кэВ	60	110	60	110	60	110
$\theta$ , эВ/ат	0,008	0,002	0,01	0,003	0,3	0,1

имплантации ионов с разной энергией. Сравнивая дозовые зависимости слоевой концентрации дефектов ( $N_d$ ) (рисунок), отметим, что чем ниже  $\theta$ , тем при более высоких дозах ионов создаются сравнимые концентрации дефектов. Такая закономерность выдерживается для обеих рассматриваемых энергий ионов (кривые 1—3 и 4—6 на рисунке). Большое различие в положении по шкале доз кривых 1, 4 и 2, 5, хотя  $\theta$  при имплантации в GaAs ионов  $P^+$  и  $Al^+$  отличается только на 20—30%, связано с химической природой примеси (образование тройных соединений) в



Дозовая зависимость повреждения GaAs, имплантированного при  $T_{комн}$  ионами: 1 и 4 —  $Al^+$ , 2 и 5 —  $P^+$ , 3 и 6 —  $Zn^+$  с  $E=60$  и 110 кэВ соответственно. Штрихпунктирной линией обозначен наклон с  $m=1$

повреждении арсенида галлия [4]. Кроме того, следует отметить, что снижение значений  $\theta$  приводит к существенному уменьшению  $N_d$  в строго определенном для каждого иона интервале доз. Обе отмеченные закономерности можно объяснить более интенсивным при  $T_{комн}$  отжигом, а частично и перестройкой дефектов в процессе имплантации ионов, в условиях снижения плотности выделяемой в упругих столкновениях энергии.

Если энергия имплантируемых ионов 110 кэВ, то с увеличением дозы ионов и накоплением дефектов в слое большей толщины (заметим,  $R_{pd}$  составляет для ионов  $Al^+$ ,  $P^+$  и  $Zn^+$  с  $E=110$  кэВ 76,9; 66 и 34 нм, а с  $E=60$  кэВ 42,5; 36,5 и 20,5 нм соответственно [3]) слоевая концентрация смещенных атомов превышает соответствующие значения  $N_d$ , получаемые при энергии ионов 60 кэВ. Сигмаобразная форма кривых  $\log(N_d) \sim \Phi$  с наклоном на среднем участке  $m > 1$  свидетельствует о гомогенном механизме повреждения кристаллов [5]. Поэтому характер изменения кривых 1—6 на рисунке позволяет уверенно определить, по какому механизму происходит аморфизация GaAs, облучаемого ионами  $Al^+$ ,  $P^+$  и  $Zn^+$ .

На основании полученных результатов можно сделать вывод: если при имплантации ионов в GaAs значения  $\theta$  по крайней мере  $\leq 0,3$  эВ/ат, то аморфизация структуры кристаллов осуществляется по гомогенному механизму, т. е. через накопление относительно простых дефектов до критических концентраций, после чего структура коллапсирует в аморфную. Вместе с тем в отличие от внедрения ионов с  $E=60$  кэВ, когда вторая стадия на дозовых зависимостях повреждения начинается при  $N_d=10-15\%$  [4], фазовые превращения в слое, нарушенном внедрением ионов с  $E=110$  кэВ, начинаются при низких значениях  $N_d$ , составляющих всего 2,5—3%, близких к значениям критических концентраций точечных дефектов, полученным при машинном моделировании структурных превращений [6]. Основной причиной более высоких критических концентраций дефектов, при которых начинаются фазовые превращения в GaAs, облучаемом ионами с  $E=60$  кэВ, по-видимому, можно считать

близость к области развития каскадов столкновений поверхности, так как известно [1], что она, являясь стоком для первичных дефектов, способствует релаксации упругих напряжений и, таким образом, по нашему мнению, способствует затормаживанию процессов перестройки структуры. И наоборот, при внедрении ионов с  $E=110$  кэВ роль поверхности в процессах дефектообразования ослаблена. Так, например, в  $P^+$ , имплантированном GaAs, наблюдается не только «внешний» пик дефектов (на поверхности), но и «внутренний» на глубине  $R_{pd}$  [7].

Таким образом, для фазовой перестройки локальных объемов в аморфное состояние достаточно малых концентраций дефектов 2,5—3%. По мере накопления разупорядоченных объемов в узком интервале доз наступает аморфизация всего имплантированного слоя, что подтверждается приведенными в [7] профилями дефектов в аморфизованных кристаллах. Заметим, что аморфизация имплантированного слоя при энергии ионов 110 кэВ наступает при меньших, чем при  $E=60$  кэВ, дозах внедренных ионов.

Представленные в настоящей работе результаты исследования дефектообразования в GaAs, имплантированном ионами с  $M_1$  от 27 до 65 и  $E$  от 60 до 110 кэВ, показывают, что, варьируя плотностью выделяемой в упругих процессах энергии ионов, можно управлять концентрацией остаточных нарушений в арсениде галлия.

### Summary

The RBS-channelling technique was used to investigate the structural damage of GaAs crystals implanted with 60 and 110 keV  $Al^+$ ,  $P^+$ ,  $Zn^+$  at fluences of  $3 \cdot 10^{12}$  to  $10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>.

It is found that if the deposited energy density within individual cascade does not exceed 0.3 eV/at amorphization of ion-implanted GaAs follows the homogeneous mechanism.

### Литература

1. Легирование полупроводников ионным внедрением / Под ред. В. С. Вавилова, З. М. Гусева, М., 1971. 531 с.
2. Thompson D. A. // Rad. Effects. 1981. Vol. 56. P. 105—150.
3. Winterbon K. B. Ion implantation range and energy deposition distribution. New York, 1975. Vol. 2. 341 p.
4. Дэвис Дж., Ташлыкков И. С., Томпсон Д. А. // Физ. техн. полупр. 1982. Т. 16. С. 577—581.
5. Dennis J. R., Hale E. B. // Rad. Effects. 1976. Vol. 30. P. 219—225.
6. Sadana D. K. // Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. 1985. Vol. B7-8. P. 375—386.
7. Tashlykova I. S. // Nucl. Instr. Methods. 1982. Vol. 203. N 1-3. P. 523—526.

ИИИ прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко при БГУ  
им. В. И. Ленина

Поступило 02.02.87