

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ПОВЕРХНОСТЬ
ФИЗИКА, ХИМИЯ, МЕХАНИКА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

8

МОСКВА · 1984

УДК 621.315.592

ИЗУЧЕНИЕ ТИПОВ РАДИАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ В ИМПЛАНТИРОВАННОМ АЛЮМИНИЕМ АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Ташлыков И. С.

Имплантация ионов Al в GaAs интересна в связи с возможностями синтеза соединений, излучающих в видимой области света [1, 2], а также для получения стабильных диэлектрических слоев на GaAs путем окисления Al_xAs_{1-x} , образующегося в имплантированных кристаллах [3]. Известно, что свойства имплантированных слоев в значительной мере зависят от дефектов, которые образовались в них при облучении и последующей термообработке, поэтому в настоящей работе изучали радиационные нарушения, формирующиеся в GaAs при имплантации ионов Al при различной температуре.

Новые результаты о типах радиационных дефектов, о их пространственном распределении раскрывают отмеченные ранее [2, 4] особенности повреждения кристаллов GaAs ионами Al, в частности большая глубина и сложный характер нарушения структуры GaAs при высокотемпературном облучении.

Методы исследования

Монокристаллы GaAs, поверхность которых имеет ориентацию (100) и (111), имплантировали ионами Al⁺ с энергией 50 и 60 кэВ и интегральными потоками от $3,4 \cdot 10^{13}$ до $1,2 \cdot 10^{17}$ ион./см². Внедрение ионов проводили в кристаллы при температуре 40, 300, 320, 370 и 650 К.

Исследование выполняли с применением метода резерфордского обратного рассеяния каналированных ионов (РОРКИ) в условиях изменяемой начальной энергии E_0 . Метод основан на различной функциональной зависимости деканалирования анализирующих ионов от их энергии E_0 в кристаллах с дефектами или дефектными образованиями различных типов. В частности, как предсказано теоретически и подтверждено экспериментально, сечение деканалирования σ_d на дислокациях, когда в структуре имплантированных слоев преобладают эффекты ее искажения, имеет зависимость $E_0^{1/2}$ [5,6]. Для дефектов упаковки и дефектных образований типа пор, пузырьков газов, образовавшихся при имплантации, σ_d не зависит от энергии ионов [7, 8]. В случае преобладания эффектов блокировки анализирующих ионов в имплантированных слоях, которые реализуются при наличии в последних междоузельных атомов или кластеров междоузельных атомов, σ_d уменьшается с ростом энергии ионов [6, 7].

Имплантация кристаллов и их исследования выполняли последовательно в одной мишенной камере. Для исследования использовали ионы гелия, ускоренные до энергий 0,6, 1,0, 1,4 и 2,0 МэВ. Обратное рассеянные ионы He⁺ регистрировали поверхностнобарьерным детектором с энергетическим разрешением 15 кэВ.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны экспериментальные спектры обратно рассеянных ионов гелия от кристаллов (100) GaAs, имплантированных при комнатной и повышенной температурах. Осевые спектры обратного рассеяния кристаллов, облученных ионами Al при 300 К, имеют характерный пик нарушений (спектры 1 на рис. 1), тогда как при повышенной температуре внедрения (370 и 650 К) Al в GaAs при достаточно высоком уровне деканалирования анализирующих ионов пик нарушений или отсутствует, или едва проявляется (соответственно кривые 3 и 2 на рис. 1).

В экспериментах с использованием метода РОРКИ для анализа ра-

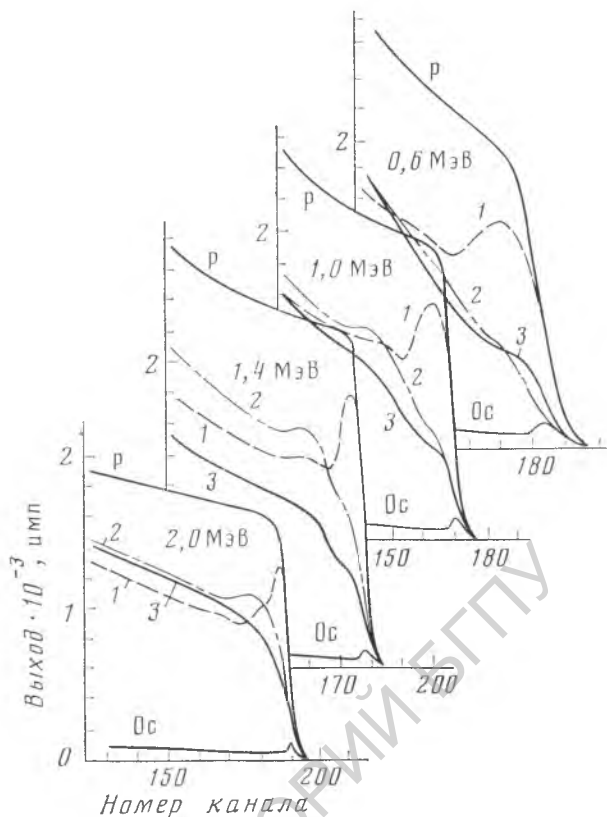


Рис. 1. Энергетические спектры обратного рассеяния ионов гелия с $E=0,6, 1,0, 1,4$ и $2,0$ МэВ от кристаллов GaAs. P и Oс — рандомные и (100)-осевые спектры исходных кристаллов соответственно. Осевые спектры обратного рассеяния имплантированных ионами Al с $E=50$ кэВ кристаллов GaAs при: 1 — 300 К, $\Phi=8 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$; 2 — 370 К, $\Phi=8 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$; 3 — 650 К, $\Phi=1,2 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$

дифракционных нарушений повреждение, получаемое из осевых спектров обратного рассеяния, описывается нормированной величиной осевого выхода X_D на глубине t [9]:

$$X_D = X_R + (1 - X_R) \frac{n_D}{N}, \quad (1)$$

где X_R — относительный вклад от деканалирования осевого пучка на глубине t ; n_D — плотность дефектов; N — концентрация атомов кристалла.

Вклад в осевой выход от деканалирования анализирующих ионов определяется величиной сечения дефектов деканаллирующего типа следующим образом:

$$X_R = X_V + (1 - X_V) [1 - \exp(-\sigma_d N_D)]. \quad (2)$$

Здесь X_V — осевой выход исходного кристалла на глубине t ; N_D — полное число дефектов в слое от поверхности до глубины t .

Если на осевых спектрах обратного рассеяния имеются пики нарушений, что реализуется при исследовании имплантированного GaAs при 40, 300 и 320 К, то построение профилей дефектов выполняется по методике, впервые предложенной в работе [9]. В частности, нами применено выражение (1) в приближении линейного деканалирования. Некоторые из полученных профилей представлены на рис. 2 (кривые 1 и 4).

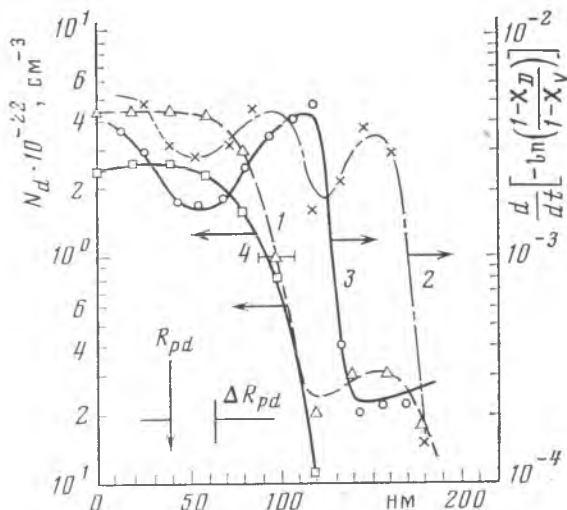


Рис. 2. Профили распределения нарушений в GaAs, имплантированном Al с $E=50$ кэВ, $\Phi=8 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ при: 1 - 300 К; 2 - 370 К; 3 - 650 К, $\Phi=1,2 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$; 4 - 40 К, $E=60$ кэВ, $\Phi=3,4 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$. Расчетные значения R_{pd} и ΔR_{pd} показаны для $E_{Al}=50$ кэВ [10]

Отметим, что в случае имплантации Al в GaAs при 40 К глубина максимума в распределении дефектов согласуется в пределах точности эксперимента с положением максимума профиля выделенной энергии, определяемого теоретически (с учетом асимметрии профиля). В то же время экспериментально определяемый страгглинг профиля дефектов более чем в 1,4 раза превышает теоретически оцениваемый ($R_{pd}=42,5$ нм, $\Delta R_{pd}=26,6$ нм, $S_d=0,55$ [10]). Последнее, а также высокая концентрация дефектов непосредственно на поверхности неоспоримо, на наш взгляд, свидетельствуют о миграции радиационных дефектов к поверхности и в глубь кристалла в процессе ионной имплантации полупроводников даже при 40 К.

Имплантация алюминия в GaAs с $E=50$ кэВ при 300 К и высоких интегральных потоках ионов приводит к аморфизации поверхностного слоя [4]. Толщина аморфизованного слоя, как следует из кривой 1 на рис. 2, составляет $R_{pd}+\Delta R_{pd}$. При этом в распределении нарушений наблюдается «хвост», распространяющийся до глубины ~ 180 нм. Наличие «хвоста» на профиле дефектов связывается также с миграцией нарушений и алюминия при имплантации вглубь. Аргументом в пользу такого предположения служит соответствие профилей дефектов и внедренного алюминия при 300 К. Последний получен в независимых опытах с применением резонансной ядерной реакции $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ [11].

При анализе радиационных нарушений с использованием метода РОРКИ, когда на спектрах обратного рассеяния отсутствуют пики дефектов, например кривые 2 и 3 на рис. 1, необходимо, как уже отмечено, получение энергетической зависимости деканалирования анализирующих ионов. В этих случаях справедливо $X_D \approx X_R$, и тогда после преобразования выражения (2) получаем

$$(1-X_D)/(1-X_V) = \exp(-\sigma_d/N_D). \quad (3)$$

Для нахождения из формулы (3) среднего сечения деканалирования анализирующих ионов теми или иными дефектами требуется знать концентрацию дефектов того или иного типа N_D (она может быть получена

из дополнительных экспериментов). Для определения типа нарушений, сформировавшихся, например, в поверхностных слоях имплантированных кристаллов, достаточно получить энергетическую зависимость σ_d , так как N_D — величина, постоянная для конкретной мишени.

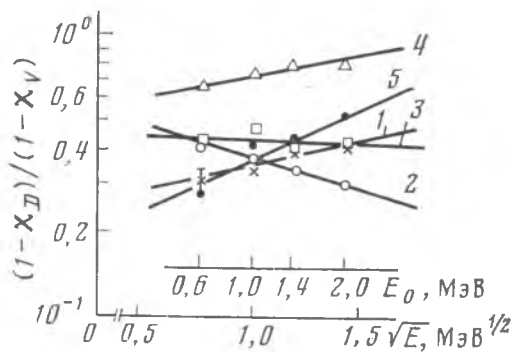


Рис. 3. Энергетическая зависимость параметра деканалирования анализирующих ионов, рассеянных от кристаллов GaAs, имплантированных Al. Обозначения, как на рис. 2. Кривая 5 соответствует параметрам имплантации $E=60$ кэВ, $T=320$ К, $\Phi=3,8 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$

имплантации ионами Al при различной температуре. Анализ проведен на глубине 150 нм. Таким образом, получена информация о типах нарушений, сформировавшихся в приповерхностном поврежденном слое толщиной 150 нм.

По наклону кривых 4, 1 и 5 (рис. 3) можно судить о том, что радиационные дефекты в GaAs имплантированных как при 40 и 300 К, так и при слабом подогреве до 320 К кристаллов представляют собой дефекты типа междоузельных атомов или их скоплений. При этом абсолютные значения параметра деканалирования отражают уровень повреждения. В частности, кривая 4 соответствует меньшему уровню повреждения кристаллов, чем, например, кривые 1 или 5, что согласуется с ходом профилей дефектов 1 и 4 на рис. 2.

Повышение температуры кристаллов GaAs при внедрении ионов фосфора и алюминия до 370 К и более (в изученном температурном интервале), как показывают настоящие и полученные ранее [2, 12] результаты, оказывается эффективным средством получения имплантированных кристаллов со сравнительно совершенной структурой поверхностных слоев. Более того, результаты настоящей работы позволяют определить типы дефектов, формирующихся в GaAs при повышенной температуре имплантации. Так, ход кривой 2 на рис. 3 свидетельствует об образовании в имплантированных при 370 К слоях GaAs преимущественно протяженных дефектов типа дислокаций. Пространственное распределение дислокаций, полученное дифференцированием логарифма параметра деканалирования по глубине, представлено кривой 2 на рис. 2. Кривая распределения имеет три пика: на поверхности, на глубине 90–110 нм и с несколько меньшей концентрацией на глубине 150–160 нм. Промежуточный максимум лежит на глубине, разграничивающей слой с содержанием по $x=0,3-0,32$ и $x=0,1-0,12$. Третий пик также расположен в области изменения содержания Al с $x=0,1-0,12$ до значений $x=0,02-0,03$. Значения концентрации по x взяты из работы [11]. Первая область с меньшим содержанием дефектов образуется непосредственно в результате внедрения, так как ее толщина согласуется с теоретически оцениваемыми значениями $R_p + \Delta R_p = 80$ нм для $E_{Al} = 50$ кэВ, а последующие — вследствие миграции атомов алюминия в процессе внедрения. Разница в концентрации внедренной примеси на разной глубине, по-видимому, и вызывает

Таким образом, определив экспериментально X_D и X_V при разных значениях энергии анализирующих ионов и построив зависимость величины параметра деканалирования $(1-X_D)/(1-X_V)$ от энергии, можно получить информацию о типах радиационных дефектов и нарушений структуры.

На рис. 3 представлены экспериментально полученные энергетические зависимости параметра деканалирования анализирующих ионов, рассеиваемых от кристаллов GaAs после

формирование слоев с повышенным содержанием дефектов на границах этих слоев. Данное предположение не противоречит результатам исследования распределения дислокаций в Si, имплантированном As с $E=80$ кэВ и отожженном затем при 1220 К [13]. Авторами этой работы показано, что сетка дислокаций формируется на глубине 0,2 мкм в слое толщиной 50 нм на «хвосте» распределения мышьяка.

Как отмечено выше, при увеличении температуры имплантации (в интервале температур до 770 К) повышается качество структуры поверхности имплантированных кристаллов GaAs. Например, на рис. 1 спектры 3 практически по всей глубине лежат ниже спектров 2, несмотря на то что при 650 К в GaAs внедрено в 1,5 раза больше ионов Al, чем при 370 К. Выполненные исследования также показывают, что наряду со снижением уровня поврежденности при повышении температуры мишени до 650 К в GaAs формируются уже не дислокации, а протяженные дефекты другого типа. Так, установлено, что параметр деканалирования практически не зависит от E анализирующих ионов (рис. 3, кривая 3). Однако известно [8], что энергетическая зависимость сечения деканалирования σ_d характерна в полупроводниках для нарушений типа дефектов упаковки.

На рис. 2 кривой 3 показан экспериментальный профиль распределения повреждений в GaAs, облученном Al при 650 К. В глубинном распределении дефектов упаковки имеется два максимума: на поверхности и на глубине 100–120 нм. Первый пик отражает наличие на поверхности большего, чем в объеме имплантированного слоя, числа смещенных атомных цепочек, что вызвано превышением здесь в 1,5–1,8 раза примеси алюминия [11]. Второй максимум концентрации дефектов упаковки лежит на границе между слоем тройного соединения с постоянным содержанием алюминия ($x=0,4-0,45$, кривая 3 на рис. 1 в работе [11]) и матрицей, поэтому можно уверенно считать, что при внедрении в GaAs при 650 К ионов Al с высокими интегральными дозами в нем синтезируются эпитаксиально матрице слои тройного соединения толщиной $(1,2-1,5) \cdot (R_p + \Delta R_p)$ с повышенным содержанием дефектов упаковки на поверхности и на границе слоя с матрицей.

Проведенные исследования кристаллов GaAs, имплантированных в широком температурном интервале ионами алюминия, позволили установить, при каких условиях имплантации в арсениде галлия формируются радиационные нарушения различных типов. При этом изучено пространственное распределение междоузельных атомов и их скоплений, дислокаций, дефектов упаковки в имплантированных кристаллах арсенида галлия при низких, комнатных и повышенных температурах. Выполненные исследования показали эффективность и возможности развития метода РОРКИ в условиях изменяемой начальной энергии анализирующих ионов.

В заключение автор выражает признательность Дж. Дэвису и Д. Томпсону за помощь и содействие в выполнении ряда экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белый И. М., Гуманский Г. А., Карась В. И., Ломако В. М., Ташлыков И. С., Тишков В. С. Физ. и техн. полупроводн., 1975, т. 9, № 10, с. 2027.
2. Кузнецов О. Н., Лежейко Л. В., Любопытова Е. В., Сафронов Л. Н. Физ. и техн. полупроводн., 1977, т. 11, № 8, с. 1449.
3. Ashley T. J. J. Vac. Sci. Technol., 1982, v. 20, № 3, p. 751.
4. Дэвис Дж., Ташлыков И. С., Томпсон Д. А. Физ. и техн. полупроводн., 1982, т. 16, № 4, с. 577.
5. Quere Y. Phys. Stat. Sol., 1968, v. 30, p. 713.
6. Picraux S. T., Rimini E., Foti G., Campisano S. U. Phys. Rev. B, 1978, v. 18, № 5, p. 2078.
7. Agrawal M. K., Sood D. K. Nucl. Instr. Meth., 1978, v. 149, № 1–3, p. 425.
8. Campisano S. U., Foti G., Rimini E., Picraux S. T. В кн.: Тр. VII Междунар. конф. по атомным столкновениям в твердых телах. Т. 2. М.: Изд-во МГУ, 1980, с. 251.
9. Bøgh E. Canad. J. Phys., 1968, v. 46, p. 653.

10. Winterbon K. B. Ion Implantation Range and Energy Depositions. V. 2: Low Incident Ion Energy. N. Y.: IFI/Plenum, 1975.
11. Дэвис Дж., Ташлыков И. С., Хау Л. Атомная энергия, 1982, т. 52, № 5, с. 330.
12. Комаров Ф. Ф., Ташлыков И. С. Физ. и техн. полупроводн., 1977, т. 11, № 10, с. 1976.
13. Götz G., Gruska B. Nucl. Instr. Meth., 1982, v. 194, p. 199.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
Белорусского государственного
университета, Минск

Поступила в редакцию
18.II.1983

THE STUDY OF THE RADIATION DAMAGE TYPES IN ALUMINIUM-IMPLANTED GALLIUM ARSENIDE

Tashlykov I. S.

The radiation damage types are studied in GaAs crystals with aluminium ions implanted at 40, 300, 320, 370 and 650 K ($E=50$ and 60 keV). The investigation is performed using the method of back scattering of channelled ions combined with a varying energy of analysing ions. Aluminium ion implantation at 40, 300 and 320 K leads to the generation of interstitial atoms and clusters in GaAs. As the implantation temperature increases dislocations (370 K) and stacking faults (650 K) are formed in GaAs. The investigation of analysing ions dechanneling has made it possible to obtain a depth distribution of sizable defects. The results from the study are presented.

РЕПОЗИТОРИЙ БГУИР