

## НАРУШЕНИЯ СТЕХИОМЕТРИИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ИОНОВ В GaAs.

Д.И. Пискунов

УДК 539.216.2

*Методами электронной микроскопии исследованы ионно-легированные слои GaAs. Предложена гипотеза о двух стадиях процесса нарушения стехиометрии состава кристаллов  $A^{III}B^{IV}$  при внедрении ионов примеси. Показано, что повышение температуры мишени приводит к уменьшению нарушений стехиометрии.*

В литературе описаны два типа нарушений стехиометрии, возникающих при внедрении ионов в материалы  $A^{III}B^{IV}$ : общие /1, 2/ и локальные /3/. Общая нестехиометрия вызывается преимущественным распылением компонента, принадлежащего к пятой группе, что, по-видимому, связано с большей упругостью паров этих элементов /4/. В случае GaAs она приводит к дефициту мышьяка для всего облучаемого объекта. Экспериментально общая нестехиометрия продемонстрирована для InSb при внедрении в него ионов средних масс и дозах  $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$  /1, 2/. Локальная нестехиометрия обусловлена различиями в сечениях захвата для атомов разных типов, что приводит к различным потокам атомов отдачи /3/. Для GaAs она сопровождается формированием приповерхностного слоя с дефицитом Ga и глубинного — с его избытком. Локальная нестехиометрия продемонстрирована для слоев GaAs, облученных последовательно ионами  $Ag^+$  с энергией 750 кэВ и дозой  $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , и  $Si^+$  с энергией 200 кэВ. В /5/ она была выявлена при исследованиях доли электрически активной примеси, в /3/ — при изучении состава методом рентгенофлуоресцентного анализа с возбуждением протонами.

Однако представления о том, что при внедрении ионов в арсенид галлия доминируют процессы, приводящие к локальной нестехиометрии, не объясняют всех экспериментальных данных, в частности, почему для доз  $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$   $Zn^+$  повышение доли электрически активной примеси достигается в результате совместного внедрения равных доз ионов  $Zn^+$  и  $As^+$  /6/.

Из сопоставления электрофизических данных и результатов структурных исследований, относящихся к слоям GaAs, имплантированных углеро-

дом и инертными газами  $\text{Ne}^+$  или  $\text{Ar}^+$ , а также при совместном облучении ионами  $\text{C}^+$  и  $\text{Ne}^+$  или  $\text{Ar}^+$ , следует, что результаты исследований можно объяснить только в предположении о возникновении общих нарушений стехиометрии /7/. Углерод электрически активен, когда он занимает позиции в подрешетке мышьяка, где он является акцепторной примесью /8/. При индивидуальном внедрении  $\text{C}^+$  эта примесь равновероятно распределяется между подрешетками Ga и As, что, возможно, обусловлено тем, что вследствие малости атомного веса углерода уровень вызываемых им радиационных нарушений мал. Атомы углерода, локализованные в разных подрешетках, формируют электрически нейтральные комплексы, поэтому электрическая активность имплантированного углерода чрезвычайно низка по сравнению с другими амфотерными примесями (кремнием и германием) и при возрастании дозы  $\text{C}^+$  до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  падает до  $10^{-3}$ .

Независимо от дозы имплантированного  $\text{C}^+$  совместное внедрение инертных газов  $\text{Ne}^+$  и  $\text{Ar}^+$  при дозах последних  $< 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  к возрастанию электрической активности примеси не приводит. Однако активация происходит при дозах инертных газов  $5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При совместном внедрении  $\text{C}^+$  и  $\text{Ar}^+$  возрастание электрической активности с увеличением дозы  $\text{Ar}^+$  происходит быстрее, чем при совместном внедрении  $\text{C}^+$  и  $\text{Ne}^+$ . Зависимости активации примеси от дозы сопутствующего облучения инертными газами имеют вид кривых с максимумами. При внедрении  $\text{Ar}^+$  максимальная активация наблюдается при дозе  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ , при облучении  $\text{Ne}^+$  максимальный эффект наблюдается при дозе  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Положение максимума практически не зависит от дозы  $\text{C}^+$ .

При облучении GaAs инертными газами и последующем отжиге в ионно-легированных слоях возникают дилатационные центры, отождествленные в /7/ с преципитатами фазы, содержащей избыточные атомы Ga. При совместном внедрении инертных газов и ионов  $\text{C}^+$  преципитация подавляется.

Таким образом, результаты структурных и электрофизических исследований ионно-легированных слоев свидетельствуют, что при повышенных дозах облучения наблюдаются общие нарушения стехиометрии, вакансии накапливаются в подрешетке мышьяка, и примесные атомы углерода перераспределяются в эту подрешетку. В результате происходит: а) возрастание электрической активности примеси, б) компенсация нестехиометрии и подавление преципитации избыточных атомов Ga.

Сопоставляя результаты работы /7/ с результатами /3/, можно выдвинуть гипотезу о двух стадиях процесса нарушений стехиометрии при внедрении ионов в материалы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ . На первой стадии доминируют локальные нарушения стехиометрии, на второй — общие. В соответствии с /1, 2/ переход

ко второй стадии связан с накоплением пороговой концентрации радиационных нарушений, поэтому ускорение диффузионных процессов его подавляет. Это подтверждают результаты исследований дефектной структуры, формирующейся в InSb в результате имплантации при различных температурах мишени. Внедрение при комнатной температуре сопровождается интенсивными нарушениями стехиометрии общего типа, которые сопровождаются аномальным набуханием [8], формированием пор, преципитацией избыточного In на поверхности пор; дислокационная структура в слое ниже уровня пор возникает в результате призматического выдавливания.

При имплантации при 623 К признаки разложения подавляются, поры не формируются, а формирование дислокационной структуры происходит за счет агломерации точечных несовершенств, что типично для процесса формирования дислокационной структуры в арсениде галлия. Таким образом, повышение температуры имплантации ионов замедляет переход ко второй стадии процесса нарушения стехиометрии, что подтверждает выдвинутую выше гипотезу.

Московский институт электронной техники      Поступила в редакцию 9 июля 1985 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Веселов В.Ф. и др. Письма в ЖТФ, 8, 754 (1982).
2. Maksimov S.K. et al. Phys. Stat. Sol. (a), 73, K 283 (1982).
3. Bhattacharya R.S., Appl. Phys. Lett., 44, 195 (1984).
4. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. Под ред. А.В. Новоселовой, В.В. Лазарева, М., Наука, 1979, с. 339.
5. Liu S.G. Appl. Phys. Lett., 41, 72 (1982).
6. Kasahara J. Jap. J. Appl. Phys., 22, 373 (1984).
7. Пискунов Д.И. и др. Препринт ИФТТ АН СССР, Черногловка, 1985, с. 30.
8. Павлов П.В., Данилов Ю.А., Туловчиков В.С. ДАН СССР, 248, 1111 (1979).