

## ДВОЙНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО GaAs ИЗОВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСЬЮ — ВИСМУТОМ И АКЦЕПТОРНОЙ ПРИМЕСЬЮ — ЦИНКОМ

Бирюлин Ю. Ф., Воробьева В. В., Новиков С. В., Шелковников Д. Н.

В настоящее время широко изучены вопросы традиционного легирования GaAs электрически активными примесями и заложены основы изовалентного легирования. Представляет интерес сочетание этих двух способов, различающихся тем, что при традиционном легировании примеси II, IV, VI групп дают донорные или акцепторные уровни в запрещенной зоне, а изовалентные примеси (ИВП) III или V группы не создают в запрещенной зоне прямозонных  $A^{III}V^V$  примесных уровней, а воздействуют на ансамбль точечных дефектов матрицы [1, 2]. Целенаправленный подбор таких примесных пар способствует тонкому управлению свойствами бинарных соединений. Например, известна работа [3], в которой изучались свойства эпитаксиального GaAs при двойном легировании ИВП — висмутом и амфотерной примесью IV группы — германием.

Как было установлено ранее [2], ИВП — Вi в условиях жидкофазной эпитаксии смещает стехиометрию растущего кристалла GaAs в пользу вакансий галлия. В то же время типичная акцепторная примесь для GaAs — цинк встраивается в подрешетку на места вакансий галлия. Целью данной работы являлось исследование эпитаксиальных слоев GaAs, легированных одновременно ИВП — висмутом и акцепторной примесью — цинком.

Исследовавшиеся пленки GaAs выращивались методом ЖФЭ из галлиевого, висмутового и смешанных растворов-расплавов в условиях принудительного охлаждения в потоке очищенного водорода. Начальная температура роста составляла  $\approx 875^\circ\text{C}$ , интервал охлаждения  $20^\circ\text{C}$ , скорость охлаждения  $0.4$  град/мин. В качестве подложек использовались пластины полужолирующего арсенида галлия (АГП) трех ориентаций (100), (111) А, (111) В. Количество цинка в шихте во всех случаях было постоянным и составляло  $\approx 7$  вес%. Толщины полученных слоев находились в пределах от 3 до 29 мкм в зависимости от состава раствора-расплава и ориентации подложки и обладали проводимостью  $p$ -типа.

Для исследования слоев использовались методики гальваномангнитных измерений (ГМИ) по способу Ван-дер-По и фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре.

При исследовании сколов получаемых структур наблюдалось наличие двух границ: подложки — пленки и второй границы в подложке на глубине нескольких микрометров. Эта вторая граница обусловлена диффузией цинка в подложку и характерна для ЖФЭ эпитаксиальных слоев GaAs, легированных Zn [4, 5].

Для исследования процессов диффузии Zn в подложку при ЖФЭ арсенида галлия были проведены дополнительные опыты. Слои GaAs : Zn выращивались на части подложки, в то время как другая ее часть оставалась открытой в течение всего процесса роста. Результаты исследования свободных от эпитаксиального слоя участков подложки представлены на рис. 1 в виде зависимости усредненной по объему диффузионного слоя концентрации свободных носителей заряда от состава растворителя.

Видно, что данные ФЛ и ГМИ хорошо согласуются между собой. Концентрация свободных дырок в подложке максимальна при содержании Вi в составе растворителя  $\approx 90\%$ . Поскольку концентрация свободных дырок зависит от содержания продиффузировавшего в подложку цинка, становится очевидным тот факт, что наличие Вi в растворе-расплаве способствует диффузии Zn в подложку. Этот эффект носит аномальный характер, причем концентрации свободных дырок в диффузионном слое на подложках АГП при использовании смешанных растворов-расплавов в 5—15 раз превышают аналогичный параметр в случае галлиевого растворителя.

Поскольку все условия опытов были неизменными, единственной причиной аномального характера кривых на рис. 1 является наличие Вi в жидкой фазе раствора-расплава. Из этого можно сделать вывод о существенном увеличении равновесного давления паров Zn при использовании висмутового растворителя. При этом максимальное давление паров Zn существует, по-видимому, при содержании Вi в растворителе  $\approx 90\%$ . Как показано нами ранее [2], эта область концентраций Вi в составе раствора-расплава характеризуется значительным изменением физических параметров жидкой фазы и кристаллизующегося из нее эпитаксиального слоя.

Ввиду наличия шунтирующего проводящего канала подложки интерпретация результатов гальваномагнитных измерений параметров эпитаксиальных слоев существенно затруднена. Поэтому на рис. 2 приведены зависимости концентрации свободных дырок от состава растворителя в слоях GaAs по да-

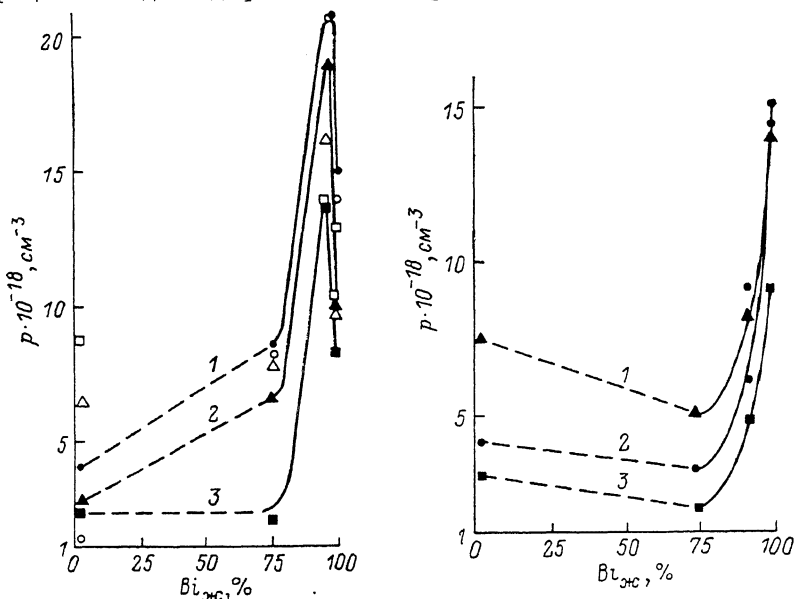


Рис. 1. Зависимости усредненной по объему диффузионного слоя цинка концентрации свободных дырок в подложках GaAs от состава растворителя.

Ориентация подложек: 1 — (111) В, 2 — (111) А, 3 — (100). Темные точки — данные ФЛ, светлые — данные ГМИ.  $T=300$  К.

Рис. 2. Зависимости концентрации свободных дырок от состава растворителя в эпитаксиальных слоях GaAs:Zn по данным ФЛ.

Ориентации подложек: 1 — (111) А, 2 — (111) В, 3 — (100).  $T=300$  К.

ным ФЛ. Видно, что зависимости носят качественно иной характер по сравнению с приведенными на рис. 1. Максимальные значения концентрации свободных дырок достигаются в чисто висмутовом растворе-расплаве.

Параллельное смещение трех зависимостей, приведенных на рис. 2, в сторону уменьшения концентрации свободных дырок, обусловленное ориентацией подложек в последовательности (111) А, (111) В и, наконец, (100), определяется ростовой ситуацией на трех различных кристаллографических гранях и, кстати, в целом повторяет аналогичные зависимости для толщин полученных эпитаксиальных слоев. Различие скоростей роста и эффективности захвата цинка в твердую фазу и является, по-видимому, причиной наблюдаемой картины.

Максимальные концентрации свободных дырок в эпитаксиальных слоях, полученные для чисто висмутовых растворов-расплавов при неизменном содержании цинка в жидкой фазе для всех серий экспериментов, подтверждают высказанные исходные предположения. Действительно, наличие ИВП — висмута в жидкой фазе, как было установлено ранее [2], смещает стехиометрию арсенида галлия в пользу вакансий галлия. Это обстоятельство благоприятствует вхож-

дению цинка в твердую фазу, что соответствует увеличению эффективного коэффициента распределения цинка. Это приводит в итоге к повышению в несколько раз концентрации свободных носителей заряда в пленках GaAs <Bi>: Zn по сравнению с эпитаксиальными слоями GaAs <Ga>: Zn, полученными из галлиевых растворов-расплавов при тех же технологических условиях.

Таким образом, можно заключить, что применение двойного легирования, заключающееся в сочетании ИВП и электрически активных примесей, позволяет тонко и целенаправленно менять свойства материала. При этом следует учитывать, что ИВП, влияя на ансамбль точечных дефектов кристалла, может способствовать или, напротив, препятствовать вхождению той или иной традиционной примеси в кристалл. Более того, даже для одной выбранной пары примесей может иметь место эффект того или иного знака в зависимости от состава жидкой фазы.

#### Список литературы

- [1] Акчурия Р. Х., Бирюлин Ю. Ф., Ле Динь Као, Фистуль В. Н. и др. // Электрон. техн. Материалы. 1984. № 11. С. 22—27.
- [2] Бирюлин Ю. Ф., Воробьева В. В., Голубев В. Г. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 12. С. 2201—2209.
- [3] Якушева Н. А., Спирская Г. В., Созинов В. Н. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1985. Т. 21. В. 4. С. 534—535.
- [4] Джафаров Т. Д. Дефекты и диффузия в эпитаксиальных структурах М., 1978. 400 с.
- [5] Ettenberg M., Nuese C. J. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 8. P. 3500—3508.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 31.07.1990  
Принято к печати 17.08.1990

ФТП, том 24, вып. 12, 1990

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ GaAsSb, ЛЕГИРОВАННОГО АМФОТЕРНОЙ ПРИМЕСЬЮ — ГЕРМАНИЕМ

Бирюлин Ю. Ф., Каряев В. Н., Крещук А. М., Писаревская В. А.

Электрофизические свойства GaAs, легированного традиционными, электрически активными примесями, широко изучены. Определенный практический интерес представляет поведение амфотерных примесей, например Ge в GaAs. Особенность примесей, проявляющих амфотерность свойств, заключается в том, что они могут встраиваться как на места вакансий галлия, так и на места вакансий мышьяка. С другой стороны, изовалентные примеси (ИВП) не создают локальных уровней в запрещенной зоне прямозонных полупроводников  $A^{III}B^V$ , а воздействуют на ансамбль точечных дефектов матрицы. В частности, введение той или иной ИВП позволяет смещать стехиометрию кристалла в пользу вакансий элемента III или V группы [1, 2]. Это обстоятельство должно отразиться на поведении амфотерной примеси и электрофизических свойствах GaAs <Sb>.

Целью данной работы явилось исследование электрофизических параметров как разбавленных (область изовалентного легирования), так и концентрированных твердых растворов GaAsSb, легированных амфотерной примесью — германием.

Пленки GaAs <Sb>: Ge были выращены методом жидкофазной эпитаксии с принудительным охлаждением на подложках полужизолирующего GaAs. Состав твердого раствора GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> изменялся в пределах  $0.012 \leq x \leq 0.17$ . Концентрация амфотерной легирующей примеси Ge в жидкой фазе варьировалась от 0.4 до 16 ат%. Гальваномангнитные измерения проводились по методу Вандер-По при температуре 300 К. Все легированные германием слои обладали проводимостью *p*-типа. Для образцов с содержанием сурьмы  $x \leq 0.03$  иссле-