

05;11;12

Монокристаллические слои GaAs, AlGaAs и InGaAs, полученные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках пористого арсенида галлия

© Ю.Н. Бузынин, С.А. Гусев, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов,
Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

Поступило в Редакцию 23 сентября 1998 г.
В окончательной редакции 15 ноября 1999 г.

Определены условия и получены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений монокристаллические слои GaAs, AlGaAs и InGaAs на подложках пористого арсенида галлия. Приведены результаты сравнительного изучения морфологии, структуры и электрической однородности эпитаксиальных слоев, выращенных на пористых и монокристаллических подложках. Установлено, что использование пористой подложки влияет на скорость роста, морфологию слоев, а также на концентрацию и распределение электрически активных дефектов по толщине эпитаксиальной структуры.

Пористые подложки являются перспективным материалом для получения гомо- и гетероэпитаксиальных слоев повышенного структурного совершенства. Так, сообщалось [1], что при использовании в качестве подложек пористого кремния методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены бездефектные слои кремния. Несмотря на большое различие постоянных решеток и температурных коэффициентов расширения, на пористом кремнии получены совершенные слои сульфида свинца [2] и теллурида свинца [3], пригодные для изготовления оптоэлектронных приборов.

В настоящей работе приводятся результаты исследования свойств монокристаллических слоев GaAs, AlGaAs и InGaAs, впервые полученных на пористом арсениде галлия методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и арсина. В качестве подложек ис-

пользовались пластины монокристаллического GaAs ориентации (100), легированные теллуром до концентрации $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. На одной части пластины методом электрохимического травления был сформирован слой пористого GaAs [4], в то время как другая часть была от него свободна. Это позволяло проводить сравнительное исследование слоев, полученных на пористой и монокристаллической частях одной и той же подложки при одинаковых условиях роста. В качестве исходных продуктов применялись триметилгаллий, триметилалюминий, триметилиндий и арсин. Рост слоев проводился в вертикальном реакторе с индукционным нагревом при атмосферном давлении. Газом-носителем служил водород, очищенный через палладиевый фильтр. Выращивание слоев GaAs, InGaAs и AlGaAs проводилось при температурах 620, 550 и 700°C соответственно. Полученные слои исследовались методами электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, вторичной ионной масс-спектрографии и электрохимического C-V-профилирования.

Установлено, что в результате предэпитаксиального отжига свойства пористого GaAs, имеющего уменьшенный в сравнении с исходным монокристаллическим арсенидом галлия параметр решетки ($\Delta\alpha/\alpha_{\perp} = -2.5 \cdot 10^{-4}$) и содержащего избыток атомов As, претерпевают некоторые изменения. Параметр решетки увеличивается, приближаясь к значению, характерному для монокристаллического GaAs, а избыток As приводит к формированию кластеров размером 1–10 nm при плотности, достигающей значений $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Слой пористого GaAs сохраняет при этом монокристаллическую структуру исходной подложки и зеркально-гладкую поверхность, пригодную для эпитаксии.

Морфология поверхности и вид поперечных сколов эпитаксиальных слоев GaAs, AlGaAs и InGaAs на монокристаллической и пористой подложках исследовались методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JEM-2000 EX. Результаты исследований показали, что, как правило, слои на пористой подложке имели более гладкую и однородную поверхность и содержали меньшую плотность ростовых дефектов. На рис. 1 показан типичный вид морфологии поверхности эпитаксиальных слоев AlGaAs, полученных на монокристаллической и пористой арсениде. Характерным для поверхности эпитаксиальных слоев на пористом GaAs является наличие эшелонных ступеней, свидетельствующих о слоевом механизме их роста. При исследовании поперечных сколов эпитаксиальных структур, полученных на пористой подложке (рис. 1, *c, d*),

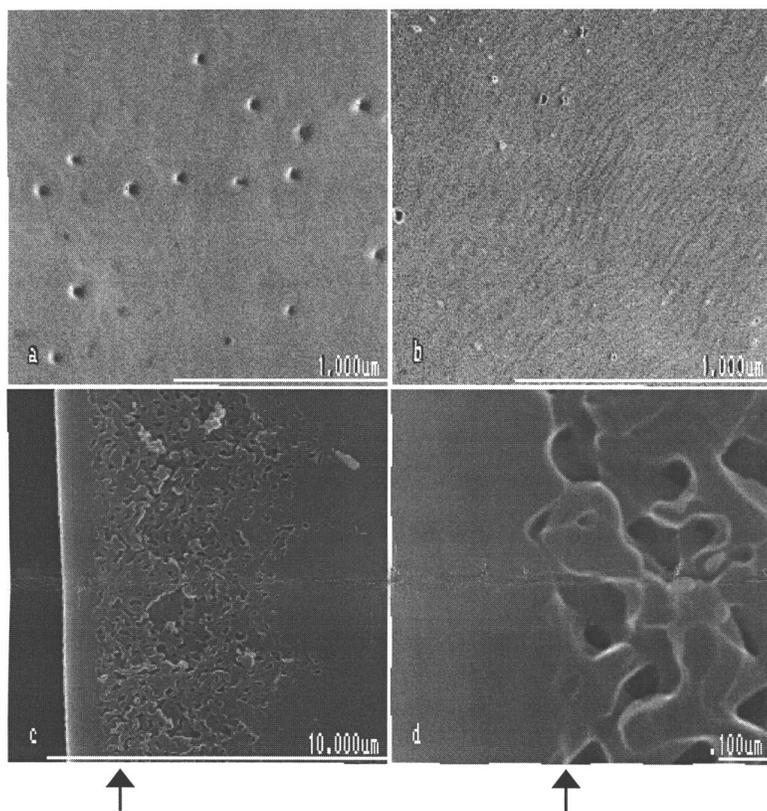


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности и скола эпитаксиальной структуры AlGaAs на монокристаллическом и пористом арсениде галлия: *a* — морфология поверхности слоя AlGaAs на монокристаллической подложке, *b* — морфология и *c, d* — вид скола структуры AlGaAs на пористом арсениде галлия. Стрелочкой показана граница эпитаксиальный слой–пористая подложка.

отчетливо выявляется слой пористого GaAs, скелетная основа которого представлена системой пор и перегородок.

Структура эпитаксиальных слоев исследовалась методом рентгеновской дифрактометрии. Съемка проводилась в схеме 2-кристального

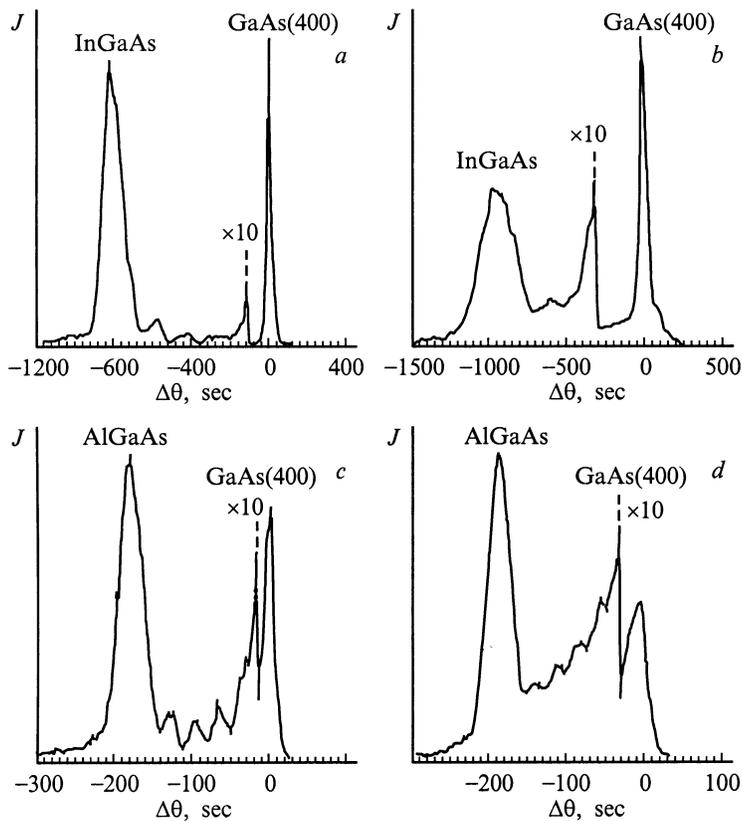


Рис. 2. Рентгенодифракционные кривые качания монокристаллических слоев InGaAs и AlGaAs в окрестности GaAs (400). *a, c* — слои на монокристаллической подложке, *b, d* — слои на пористом арсениде галлия.

спектрометра с монохроматором GaAs (100), излучение $\text{CuK}\alpha 1$. Установлено, что слои GaAs, AlGaAs и InGaAs на монокристаллической подложке имеют монокристаллическую структуру и обладают высоким структурным совершенством. Кривые качания в окрестностях (400) GaAs для монокристаллических слоев AlGaAs и InGaAs, полученных на пористой и монокристаллической подложках, приведены на рис. 2.

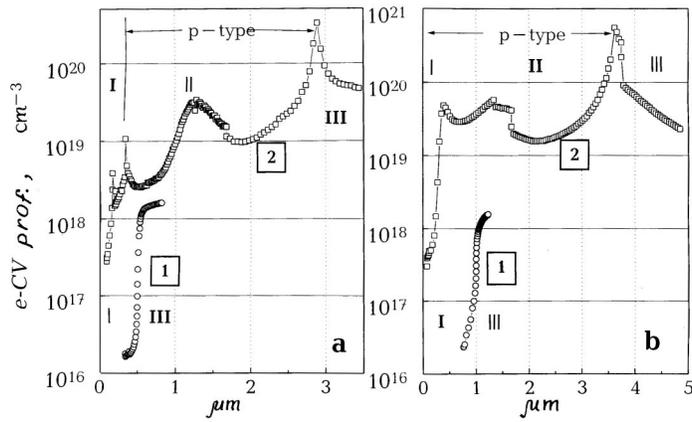


Рис. 3. Электрохимический C–V-профиль эпитаксиальных структур, выращенных на подложках монокристаллического (1) и пористого (2) арсенида галлия. *a*: I — слой GaAs, II — пористый GaAs, III — подложка; *b*: I — слой AlGaAs, II — пористый GaAs, III — подложка.

Видны большие пики от подложки, пики от эпитаксиального слоя и побочные максимумы толщинного контраста. Наличие этих максимумов говорит о когерентности кристаллической решетки по всей толщине слоя и об однородности толщины на облученном участке ($0.2 \cdot 0.5 \text{ mm}^2$). Это подтверждается и малым значением ширины кривой качания: она близка к теоретической для данной толщины слоя.

Исследование распределения In по толщине структуры InGaAs с помощью метода вторичной ионной масс-спектропии обнаружило значительное размытие профиля In на границе эпитаксиальный слой–пористый арсенид галлия по сравнению со слоями на монокристаллической подложке. Причиной этого может служить вхождение In в поры на начальных стадиях осаждения.

Полученные эпитаксиальные слои исследовались методом электрохимического C–V-профилеирования [5]. На рис. 3 приведены типичные примеры полученных этим методом C–V-профилей, измеренных на частоте 10 kHz. Из рис. 3, *a* видно, что эпитаксиальный слой GaAs на монокристаллической подложке имел толщину 0.5 μm с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. На другой части образца, содержащей слой

пористого GaAs, обнаруживается эпитаксиальный слой приблизительно такой же толщины (обл. I), имеющий некоторую неоднородность в электрических характеристиках. За слоем следует обл. II, принадлежащая пористому GaAs ($2.5 \mu\text{m}$), характеризующаяся высокой плотностью глубоких акцепторно-подобных уровней, в распределении которых по толщине также имеется неоднородность. И наконец, на глубине $3 \mu\text{m}$ наблюдается переход к монокристаллической подложке (обл. III).

Аналогичные результаты получены для нелегированных эпитаксиальных слоев AlGaAs, выращенных на монокристаллической и пористом GaAs (рис. 3, b). На монокристаллической подложке слой AlGaAs толщиной $1 \mu\text{m}$ имеет малую концентрацию носителей, что приводит к его полному обеднению. На пористом GaAs выращенный слой AlGaAs, по-видимому так же, как и пористый материал, содержит достаточное количество глубоких уровней акцепторного типа, что подтверждается результатами C–V-измерений.

В работе показано, что использование подложек пористого арсенида галлия позволяет получать методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений структурно-совершенные слои GaAs, AlGaAs и InGaAs, имеющие зеркально-гладкую поверхность. Наблюдаемые отличия свойств слоев на пористой и монокристаллической подложках, вероятно, связаны с особенностями строения и состояния поверхности пористого GaAs, которые влияют на механизм роста и кинетику протекания ростовых процессов при эпитаксии.

Работа поддержана РФФИ, проект № 98–02–16624 и МНТП "Физика твердотельных наноструктур".

Список литературы

- [1] *Unagami T., Masashiro S.J.* // Electrochemical Soc. 1979. V. 125. P. 1339.
- [2] *Бондаренко В.П., Воронов Н.Н., Дикарева В.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 10. С. 5.
- [3] *Беляков Л.П., Захарова И.Б., Зубкова Т.И.* // ФизТП. 1997. Т. 31. № 1. С. 93–95.
- [4] *Vuzynin Yu., Gusev S., Drozdov Yu. et al.* // ALT'95 Internat. Symp. SPIE. V. 2777. P. 43–52.
- [5] *Ирин И.В., Мурель А.В.* // Приборы и техника эксперимента. 1993. № 6. С. 150.