

05;11;12

Пористый арсенид галлия с кластерами мышьяка

© Ю.Н. Бузынин, С.А. Гусев, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель

Институт физики микроструктур РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 30 марта 1999 г.)

Впервые показана возможность получения арсенида галлия с кластерами мышьяка при отжиге его пористых слоев, полученных методом электрохимического травления. Установлено, что кластеры сосредоточены в перегородках пористого слоя, их размер составляет 1–10 нм, а плотность достигает значения $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При отжиге в температурном интервале 400–600°C происходит улучшение структурного качества пористого слоя, а уменьшенный для него параметр решетки возрастает, приближаясь к значению, характерному для монокристалла. При использовании сильнолегированных подложек *n*-типа в поверхностном слое пористого слоя наблюдается инверсия типа проводимости, связанная с возникновением глубоких акцепторных центров. Термический отжиг приводит к сужению инверсного слоя и более однородному распределению электрически активных центров по толщине пористого слоя.

Арсенид галлия, содержащий кластеры As, недавно стал привлекать большое внимание исследователей благодаря своим уникальным электронным и оптическим свойствам [1]. Такой материал имеет высокое удельное сопротивление и аномально низкие времена жизни носителей заряда. Эти свойства делают его перспективным для создания буферных слоев при изготовлении интегральных схем и сверхбыстродействующих фотоприемников. До настоящего времени арсенид галлия с кластерами мышьяка получали методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низкой температуре роста или ионной имплантацией с последующим отжигом.

В настоящей работе впервые показана возможность создания арсенида галлия с кластерами мышьяка при термическом отжиге пористого арсенида галлия. Слои пористого арсенида галлия, содержащие избыток атомов мышьяка (до 10%), получали методом электрохимического травления на сильнолегированных подложках *n*-типа проводимости [2]. Затем образцы пористого арсенида галлия помещались "лицом к лицу" на монокристаллическую подложку арсенида галлия, чтобы снизить потерю мышьяка с поверхности слоя, и отжигались в потоке гелия в температурном интервале 400–700°C в течение 3–30 мин. Обработанные таким образом образцы исследовались методами электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, электрохимического *C–V*-профилирования и зондовым методами.

При изучении косых шлифов термообработанных образцов методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEM-2000 EX установлено, что слои пористого арсенида галлия содержат в столбиках-перегородках кластеры мышьяка (темные точки на рис. 1). Средний размер кластеров составляет 1–10 нм, а их плотность достигает значения $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Величина параметра решетки, а также структурное совершенство слоев пористого арсенида галлия оценивалось с помощью методов рентгеновской дифрактометрии по схеме двухкристального спектрометра с монохроматором (400) GaAs. На рис. 2 приведены кривые качания,

снятые для исходных образцов, а также после отжига при различных температурах. Кроме острого пика GaAs присутствует уширенный пик низкой интенсивности, соответствующий пористому слою. Смещение этого пика свидетельствует об изменении параметра решетки пористого слоя. Исходный слой имеет уменьшенный параметр решетки. Оценки показывают, что изменение величины параметра решетки по нормали к поверхности подложки составляет $\Delta\alpha/\alpha_{\perp} = -2.5 \cdot 10^{-4}$. Из приведенных данных следует, что дополнительный максимум, связанный с пористым слоем, вплоть до отжига при 600°C сужается и приближается к пику матрицы (400) GaAs. Затем пик снова уширяется и удаляется от (400) GaAs. Этот результат свидетельствует о том, что структурное качество пористого слоя в результате отжига в темпера-

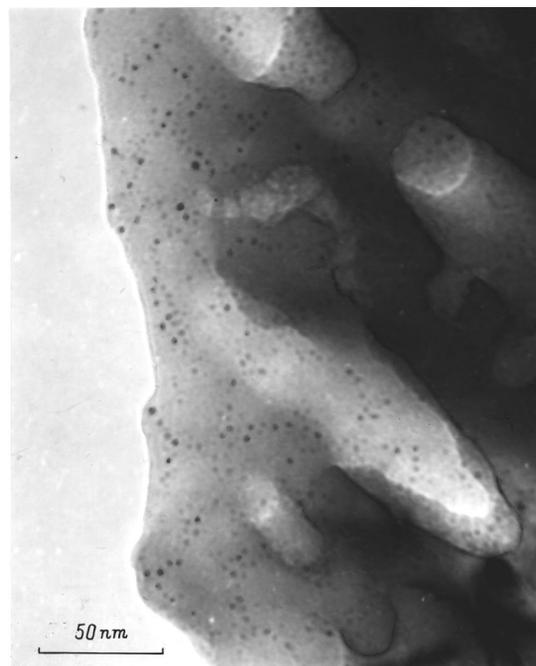


Рис. 1. Кластеры мышьяка в слое пористого арсенида галлия.

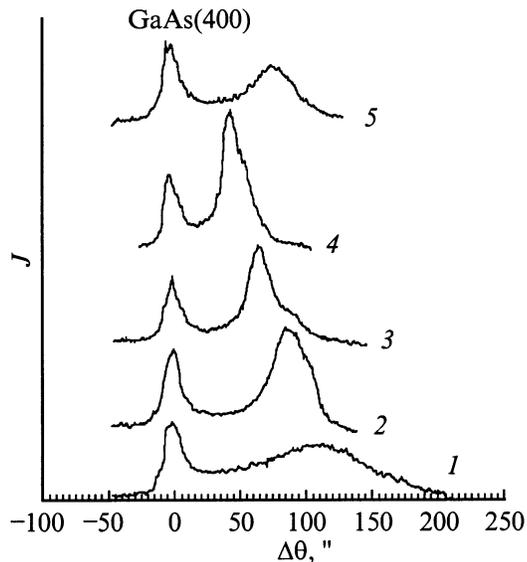


Рис. 2. Рентгенодифракционные кривые качания в окрестности (400) GaAs, снятые в исходном состоянии (1) и после отжигов при 400 (2), 500 (3), 600 (4), 700°C (5).

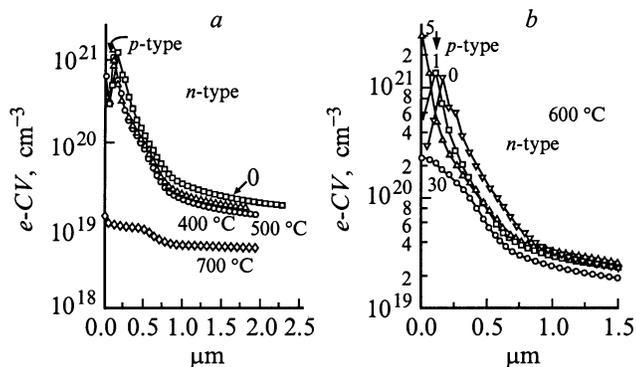


Рис. 3. Электрохимический $C-V$ -профиль слоев пористого арсенида галлия после высокотемпературной обработки: *a* — изохорный отжиг (время отжига 15 min), *b* — изотермический отжиг (цифры у кривых — время отжига в min).

турном интервале 400–600°C повышается, а величина сжатия по нормали к поверхности уменьшается. Можно предположить, что одной из причин уменьшенного параметра решетки исходных образцов пористого GaAs является сжатие столбиков-перегородок, ограниченных поверхностями с большой кривизной, за счет сил поверхностного натяжения. Такой эффект обнаружен недавно для пористого кремния [3]. Наблюдаемое при отжиге увеличение параметра решетки пористого GaAs может быть связано с переходом избыточного As с поверхности пор в тетраэдрические междоузлия, размер которых для GaAs меньше тетраэдрического радиуса мышьяка.

Распределение электрически активных дефектов по толщине слоя исследовалось с помощью метода электрохимического $C-V$ -профилирования. Данный метод

включает попеременное травление слоя с оценкой глубины по закону Фарадея и $C-V$ -измерений на обедненном слое границы полупроводник–электролит с последующей оценкой концентрации по известным формулам [4]. На рис. 3 приведены результаты такого профилирования для слоев пористого арсенида галлия на сильнолегированной монокристаллической подложке ($n = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Формальный расчет по формулам вольт-фарадного метода свидетельствует о наличии на поверхности слоя с высокой концентрацией акцепторов, которые, по всей вероятности, являются глубокими, так как наблюдается сильная частотная дисперсия емкости, а измерения проводимости не подтверждают высокой концентрации носителей заряда. На некоторой глубине происходит смена типа проводимости, что, по-видимому, означает выход на подложку, однако значение концентрации сильно завышено, что может быть связано также с чрезвычайно нарушенной структурой поверхности после стравливания слоя пористого арсенида галлия. Истинная толщина слоя пористого арсенида галлия должна отличаться от рассчитанной вследствие сильной неопределенности истинной площади контакта электролит–полупроводник из-за сильно развитой поверхности пористого материала. Однако, как показывает сравнение с измерениями на сколе образца в электронном микроскопе, для грубой оценки эти значения могут быть использованы. Температурный отжиг в интервале температур 400–700°C приводит к сужению инверсного слоя вплоть до полного его исчезновения и к выравниванию концентрации электрически активных центров по толщине слоя (рис. 3, *a*). С увеличением времени отжига пористого слоя однородность распределения по его толщине электрических активных дефектов также возрастает (рис. 3, *b*).

Оценки, проведенные с помощью зондовых измерений, показывают, что удельное сопротивление материала сильно возрастает при образовании пористого арсенида галлия и при последующем его термическом отжиге. Вероятно, это может быть связано с образованием обедненных областей на границах кластеров As и матрицы GaAs [5]. Точные измерения удельного сопротивления пористого GaAs затруднены из-за шунтирующей подложки.

Работа поддержана РФФИ (проект № 96-02-18843) и МНТП "Физика твердотельных наноструктур" (проект № 97-1070).

Список литературы

- [1] Берт Н.А., Вейнгер А.Н., Вилисова М.Д. и др. // ФТТ. 1993. Т. 35. Вып. 10. С. 2909–2925.
- [2] Vuzynin Yu., Gusev S., Drozdov Yu. et al. // ALT'95 Internat. Symp. SPIE. Vol. 2777. P. 43–52.
- [3] Копман М.Е., Кузьминов Е.Г., Кулик В.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. Вып. 10. С. 696–700.
- [4] Ирин И.В., Мурель А.В. // ПТЭ. 1993. № 6. С. 150.
- [5] Warren A.V., Woodal J.L. // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol. 57. P. 1331.