

06

## **Формирование структур с нанокластерными слоями Al, внедренными в матрицу GaAs в процессе металлорганической газофазной эпитаксии**

© Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов,  
Д.А. Прякин, В.И. Шашкин, И.Ю. Шулешова

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород  
E-mail: [vostokov@ipm.sci-nnov.ru](mailto:vostokov@ipm.sci-nnov.ru)

Поступило в Редакцию 5 октября 2006 г.

Исследованы закономерности формирования методом металлорганической газофазной эпитаксии полупроводниковых структур, представляющих собой матрицу монокристаллического GaAs с внедренными слоями нанокластеров Al. Предложен и реализован новый режим зарастивания нанокластерных слоев Al арсенидом галлия, обеспечивающий планаризацию поверхности полупроводникового слоя при его толщине, сравнимой с высотой нанокластеров.

PACS: 61.46.Nk

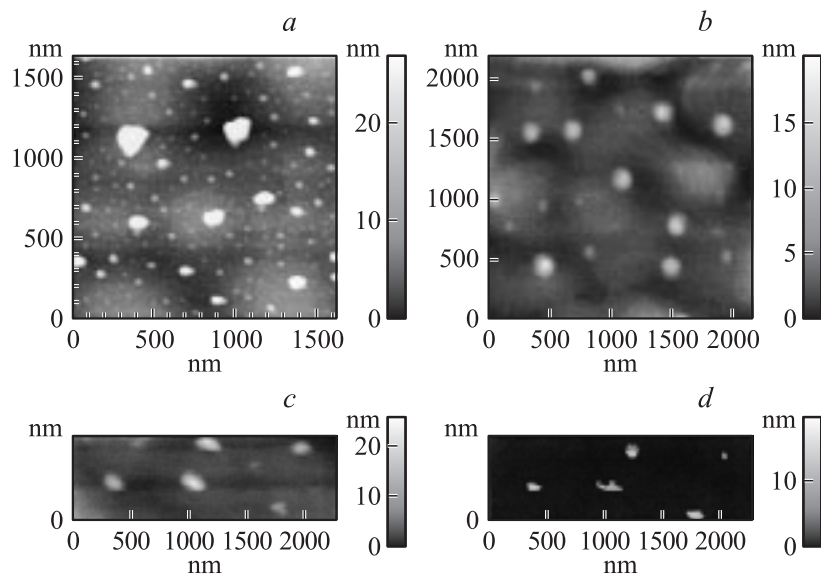
Полупроводниковые материалы с металлическими наноразмерными включениями вызывают интерес исследователей в качестве искусственной нелинейной среды, перспективной для различных приложений. Однако создание такой среды без нарушения кристаллической матрицы полупроводника представляет собой сложную задачу. Одним из примеров такого материала является эпитаксиальный GaAs, выращенный методом молекулярно-пучковой эпитаксии при пониженной температуре и имеющий самосформированные нанокластеры полуметалла мышьяка с размерами несколько нанометров [1]. В последнее время интерес исследователей вызывают структуры на основе GaAs с внедренными полуметаллическими наночастицами ErAs [2]. Другая возможность формирования искусственной среды, представляющей собой матрицу монокристаллического GaAs с внедренными слоями нанокластеров Al, реализуемая методом металлорганической газофазной эпитак-

сии (МОГФЭ), была продемонстрирована в работах [3,4]. Настоящая работа посвящена поиску новых оптимальных условий формирования и изучению закономерностей роста таких структур с алюминиевыми нанокластерными слоями.

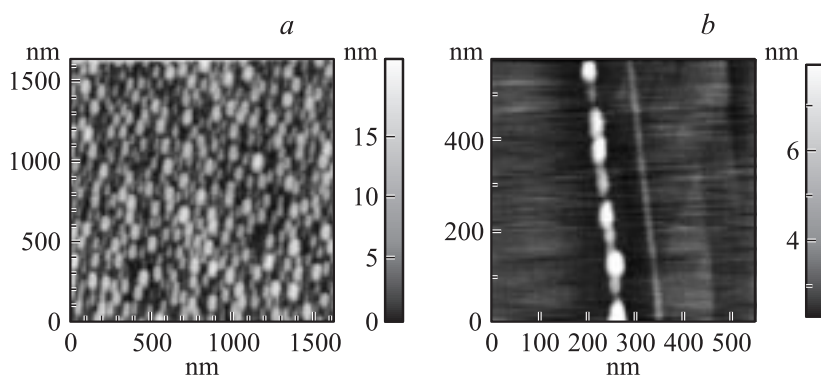
Эпитаксиальные слои GaAs выращивались методом МОГФЭ на подложках GaAs (100) в горизонтальном реакторе с пониженным давлением. Источниками Ga, As, Al служили  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$  — триметилгаллий,  $\text{AsH}_3$  — арсин и  $\text{AlH}_3(\text{CH}_3)_2(\text{C}_2\text{H}_5)$  — диметилэтиламиналан. Газоносителем являлся водород. Формирование слоев Al осуществлялось *in situ* в едином процессе роста. Для анализа получаемых структур использовались: атомно-силовой микроскоп (АСМ) „Solver-P4“ (NT-MDT, Зеленоград) и рентгеновский дифрактометр ДРОН-4.

Особенности формирования слоев Al в процессе МОГФЭ на начальных стадиях роста были изучены в работах [3–5]. Сначала происходит послойный рост Al. При превышении толщины слоя алюминия некоторой величины, равной нескольким монослоям, происходит формирование алюминиевых нанокластеров. На рис. 1, *a* показано АСМ-изображение поверхности структуры с Al-слоем на этой стадии роста. При увеличении количества осаждаемого Al размеры нанокластеров также растут. На рис. 2, *a* приведено АСМ-изображение поверхности Al-слоя с количеством алюминия в 6 раз большим, чем в структуре, изображенной на рис. 1, *a*.

Ранее, в работе [3] нами исследовался процесс зарождения алюминиевых нанокластеров слоем GaAs. Было показано, что эпитаксиальный рост арсенида галлия над алюминиевым слоем происходил по механизму Фольмера–Вебера. Рост начинался с образования зародышей, которые в дальнейшем срастались между собой. За счет этого планаризация поверхности зарождающего слоя GaAs происходила при толщине  $\sim 100$  nm, что на порядок больше высоты нанокластеров. Такой механизм роста GaAs поверх нанокластеров был связан, по-видимому, с особенностями режима формирования структур. Рост алюминиевого нанокластерного слоя производился при температуре  $500^\circ\text{C}$ , затем температура поднималась до  $600^\circ\text{C}$ , и начинался рост GaAs. Известно, что во время прерывания роста, необходимого для подъема температуры, может происходить адсорбция на ростовую поверхность различных примесей, содержащихся в элементах конструкции реактора и газе-носителе [6]. Во время прерывания роста адсорбция кислорода приводила к окислению поверхности алюминиевого слоя,



**Рис. 1.** АСМ-изображения нанокластерного слоя Al (*a*) и аналогичного слоя после зарастивания низкотемпературным GaAs (*b*). Участок поверхности той же структуры, которая показана на *b* (*c*), и карта токов растекания того же участка (*d*).

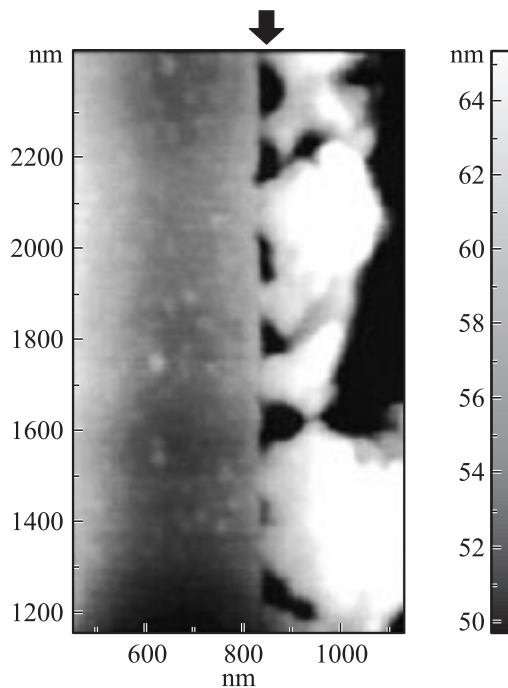


**Рис. 2.** АСМ-изображения нанокластерного слоя Al (*a*) и скола структуры с внедренным аналогичным нанокластерным слоем (*b*).

срыву послойного роста арсенида галлия и реализации механизма роста Фольмера–Вебера. Выбор температур роста металла и полупроводника не случаен, а обусловлен рядом причин: хорошо известно, что GaAs, выращенный при температурах ниже 600°C, обладает большим количеством углерода и примесей; увеличение температуры роста Al может привести к деградации нижележащего слоя арсенида галлия из-за ухода мышьяка, так как во время роста алюминиевого слоя выключена подача в реактор арсина [7].

В настоящей работе мы использовали новый двухступенчатый метод наращивания нанокластерных алюминиевых слоев. Сразу после формирования нанокластерного слоя при температуре 500°C производился рост тонкого (10–20 nm) слоя GaAs при той же температуре. Этот низкотемпературный покрывающий слой полупроводника необходим для предохранения поверхности алюминия от окисления. После этого температура поднималась до 600°C, при которой и происходило дальнейшее наращивание. На рис. 1, *b* приведено АСМ-изображение поверхности структуры, аналогичной изображенной на рис. 1, *a*, но в данном случае нанокластеры заростили тонким низкотемпературным слоем GaAs. Как видно из рисунка, происходил послойный рост арсенида галлия — на поверхности присутствуют характерные ростовые ступени. Над крупными кластерами сохранились возвышенности. Дальнейшее высокотемпературное наращивание приводило к быстрой планаризации поверхности. На рис. 1, *c* показано АСМ-изображение участка поверхности той же структуры, которая изображена на рис. 1, *b*, а на рис. 1, *d* — карта токов растекания того же участка, полученная с помощью проводящего зонда АСМ. Участки протекания тока (они светлые) расположены над крупными кластерами, что свидетельствует о присутствии в этих местах металлических объектов под поверхностью.

Описанный метод наращивания был применен для формирования структур, содержащих металлические слои в полупроводниковой матрице, с количеством алюминия во много раз большим, чем на стадии зарождения нанокластеров. На рис. 2, *b* приведено АСМ-изображение скола структуры с внедренным в арсенид галлия алюминиевым нанокластерным слоем, аналогичным изображенному на рис. 2, *a*. В процессе наращивания алюминиевого слоя арсенидом галлия в структуре был выращен тонкий слой AlAs, который виден на АСМ-изображении скола правее слоя нанокластеров. Как видно из рисунка, слой AlAs плоский, что свидетельствует о планарности ростового фронта при наращивании. На рис. 3 показано АСМ-изображение скола другой структуры с



**Рис. 3.** АСМ-изображение скола структуры с внедренным нанокластерным слоем Al. Проведено селективное травление алюминия. Стрелка показывает на нанокластерный слой.

внедренным металлическим слоем. Данная структура была выращена с целью определения того количества Al, при котором произойдет срыв эпитаксиального роста зарращивающего GaAs. Количество алюминия в слое было в 6 раз больше, чем у структуры с рис. 2, *b*. Скол структуры был подвергнут травлению в селективном травителе (0.5%-ный раствор KOH), который удаляет Al без затрагивания GaAs. В результате алюминиевые кластеры вытравились, и на их месте остались ямки, которые видны на АСМ-изображении. Как видно из рисунка, рост GaAs при зарращивании начинается в пространствах между кластерами, за счет этого дальний порядок кристаллической решетки передается в зарращивающий слой полупроводника. Высота

кластеров в алюминиевом слое составляла 50–80 nm, что в несколько раз больше толщины низкотемпературного слоя GaAs. По этой причине Al-кластеры, вероятно, не были полностью закрыты арсенидом галлия на этапе низкотемпературного наращивания, в результате над вершинами кластеров эпитаксиальный рост был подавлен. Вследствие этого полупроводниковый слой над вершинами кластеров содержит большое количество пустот (рис. 3).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при наращивании алюминиевого нанокластерного слоя арсенидом галлия может реализоваться как послыйный рост полупроводника, так и механизм роста Фольмера–Вебера в зависимости от условий процесса МОГФЭ. Найден новый режим наращивания, благодаря которому формирование GaAs после слоя нанокластеров Al происходит по послыйному механизму роста. В этом случае планаризация поверхности наращиваемого слоя GaAs происходит при его толщине, сравнимой с высотой нанокластеров. Метод применен для формирования структур, содержащих толстые алюминиевые слои в матрице GaAs.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-16474.

## Список литературы

- [1] Gregory I.S., Baker C., Tribe W.R., Evans M.J., Beere H.E., Linfield E.H., Davies A.G., Missous M. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 4199.
- [2] Bjarnason J.E., Chan T.L.J., Lee A.W.M., Brown E.R., Driscoll D.C., Hanson M., Gossard A.C., Muller R.E. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 3983.
- [3] Востоков Н.В., Данильцев В.М., Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Мурель А.В., Шашкин В.И. // Изв. АН. Сер. Физ. 2004. Т. 68. № 1. С. 55.
- [4] Востоков Н.В., Гусев С.А., Данильцев В.М., Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Корытин А.И., Мурель А.В., Шашкин В.И. // ФТП. 2005. Т. 39. В. 1. С. 92.
- [5] Shashkin V., Rushworth S., Daniltsev V., Murel A., Drozdov Yu., Gusev S., Khrykin O., Vostokov N. // Journal of Electronic Materials. 2001. V. 30. N 8. P. 980.
- [6] Данильцев В.М., Востоков Н.В., Гапонова Д.М., Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Мурель А.В., Пряхин Д.А., Хрыкин О.И., Шашкин В.И. // Материалы симпозиума „Нанопизика и наноэлектроника“. 25–29 марта, 2005 г. Нижний Новгород. С. 118.
- [7] Быков Ю.В., Еремеев А.Г., Жарова Н.А., Плотников И.В., Рыбаков К.И., Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Скупов В.Д. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. XLVL. № 8–9. С. 836.