

Метаморфные модулированно-легированные гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InAlAs с высокой подвижностью электронов на подложках GaAs

© Е.С. Семенова¹, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, С.С. Михрин, А.Р. Ковш,
В.М. Устинов, Ю.Г. Мусихин, С.А. Блохин, А.Г. Гладышев, Н.Н. Леденцов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 февраля 2003 г. Принята к печати 4 февраля 2003 г.)

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs созданы метаморфные модулированно-легированные гетероструктуры в системе материалов InGaAs/InAlAs. Проведена оптимизация условий выращивания градиентного буферного слоя при низкой температуре осаждения, позволяющая резко снизить количество структурных дефектов в рабочих слоях структуры. Подвижность электронов в двумерном канале метаморфных структур, выращенных в оптимизированных условиях, ($8100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 300 К) значительно превосходит значения, достижимые в напряженных гетероструктурах InGaAs/AlGaAs на подложках GaAs.

Модулированно-легированные гетероструктуры (МЛГС) InGaAs/InAlAs, эпитаксиально выращиваемые на подложках InP, широко применяются в микроэлектронике для создания низкошумящих, быстродействующих транзисторов [1]. Преимуществами данной системы материалов по сравнению с InGaAs/AlGaAs на подложках GaAs является возможность использовать слои с более высоким содержанием индия (типично $\sim 50\%$ в случае подложки InP против $\sim 20\%$ в случае подложки GaAs) и, как следствие, больший разрыв зоны проводимости на гетерогранице канал-барьер, а также меньшая эффективная масса электронов. В МЛГС это позволяет получать более высокую плотность ($> 2 \cdot 10^{12}$ против $\sim 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и большую подвижность ($> 10\,000$ против $\sim 6000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) электронов в двумерном газе, образующемся вблизи гетерограницы. Однако подложки InP по сравнению с GaAs обладают существенными недостатками, такими как меньший размер коммерчески доступных пластин, высокая хрупкость и высокая цена, что затрудняет производство приборов на их основе. В связи с этим возрос интерес к так называемым метаморфным структурам на подложках GaAs, в которых использование специфических технологических режимов выращивания буферного слоя In(Ga)AlAs позволяет перейти от постоянной решетки GaAs к постоянной решетке InP таким образом, что большинство дислокаций не будет распространяться в направлении роста, но будет содержаться лишь внутри переходного слоя [2–6]. В то же время реализация метаморфных структур на GaAs, транспортные и структурные характеристики которых не уступали бы характеристикам МЛГС на InP, затруднена не полным подавлением прорастания дислокаций в активные слои структуры и возникновением микрорельефа поверхности [5].

В настоящей работе проводится оптимизация режимов выращивания МЛГС на основе метаморфных структур InAlAs/InGaAs/InAlAs на подложке GaAs, направ-

ленная на снижение количества дефектов и получения высоких значений подвижности носителей заряда.

Структуры были выращены на установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber 32P. Наблюдение картин дифракции быстрых электронов (ДБЭ) позволяло контролировать характер роста непосредственно во время процесса осаждения слоев. Состав и структурное качество слоев исследовались методом высокоразрешающей рентгеновской дифракции. Концентрация и подвижность носителей заряда измерялись методом Ван-дер-Пау на установке BioRad при температурах 77 и 300 К. Также полученные структуры исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для определения морфологии поверхности и степени релаксации слоев структуры.

Значительное различие постоянных решетки InP и GaAs ($\sim 3.5\%$) приводит к невозможности прямого эпитаксиального выращивания на подложках GaAs сравнительно толстых структурно совершенных слоев, постоянная решетки которых совпадала бы с постоянной решетки InP, так как в этом случае релаксация упругих напряжений сопровождается формированием дислокаций, прорастающих на всю толщину эпитаксиального слоя. В качестве примера на рис. 1, а приведено ПЭМ-изображение скола слоя InGaAs (с содержанием In $\sim 30\%$) на GaAs. В данной работе в качестве переходного слоя используется InAlAs, содержание индия в котором линейно изменяется от 10 до 58%. Исследуемые структуры представляют собой следующий набор слоев: на полуизолирующей подложке GaAs осаждается переходный слой InAlAs толщиной 0.9 мкм; далее осаждается слой $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 0.4 мкм, на котором формируется структура с двумерным электронным газом, состоящая из канала $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 40 нм, спейсерного $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 5 нм, легированного барьерного слоя $n\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 10 нм, подзатворного слоя $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 15 нм и контактного слоя $n\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 7 нм.

¹ E-mail: esemenova@mail.ioffe.ru

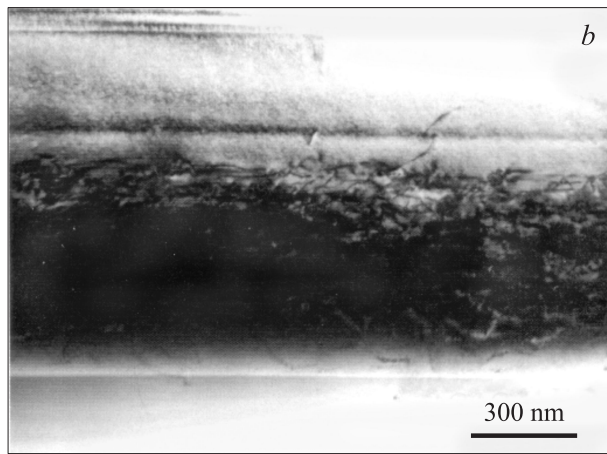
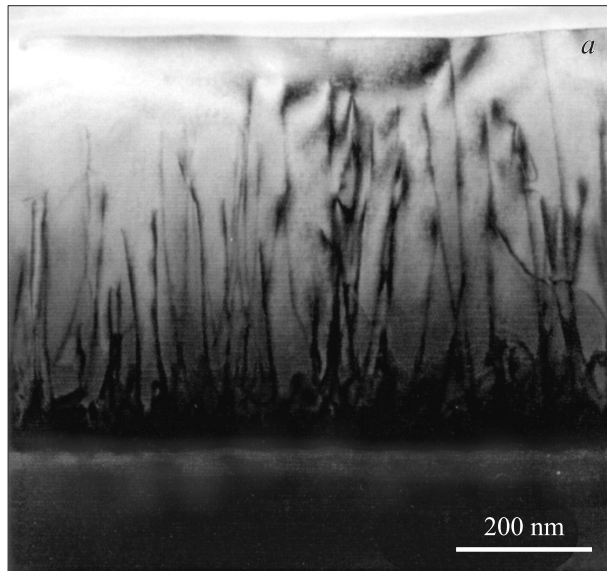


Рис. 1. ПЭМ-микротографии структур на подложках GaAs: *a* — слой $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$; *b* — МЛГС $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ на подложке GaAs с метаморфным градиентным слоем.

Мы обнаружили, что использование достаточно низких температур осаждения буферного слоя ($\leq 400^\circ\text{C}$) позволяет „удержать“ большинство дислокаций в буферном слое и предотвратить их распространение в верхние слои, что хорошо можно видеть на фотографии скола, полученной с помощью ПЭМ (рис. 1, *b*). Необходимо отметить, что морфология растущей поверхности в значительной степени зависти от температуры подложки при осаждении переходного буфера. Мы обнаружили, что при слишком низких температурах, $\sim 350^\circ\text{C}$, имеет место трехмерный характер роста, о чем свидетельствует точечная картина дифракции. Однако при повышении температуры до 400°C картина значительно изменяется. Сразу после начала осаждения градиентного буферного слоя наблюдается реконструкция поверхности (1×1), однако тяжи имеют выраженные утолщения, что свидетельствует о проявлении трехмерного характера роста. По мере низкотемпературного выращивания

$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ картина ДБЭ изменялась а именно — утолщения постепенно исчезали. Во время дальнейшего роста и после остановки роста для поднятия температуры подложки наблюдалась полосатая картина дифракции реконструкции поверхности (4×1).

Таким образом, использование оптимизированных условий роста позволяет как подавить прораствание дислокаций, так и получить атомно-гладкие интерфейсы, необходимые для снижения рассеяния на шероховатостях гетерограницы, что способствует повышению подвижности носителей заряда двумерного электронного газа. В то же время не до конца решенной остается проблема образования дефектов упаковки в процесс выращивания буферного слоя (рис. 2, *a*). Обусловленные наличием большого числа дислокаций на начальном этапе роста, такие дефекты, в отличие от самих дислокаций, не удерживаются внутри буферного слоя, а прорастают на всю толщину структуры, образуя на поверхности

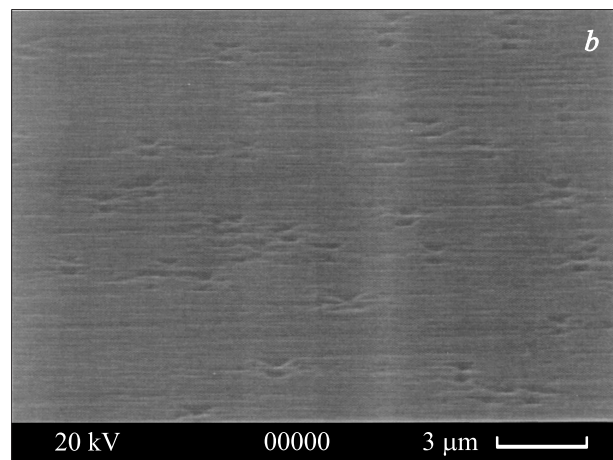
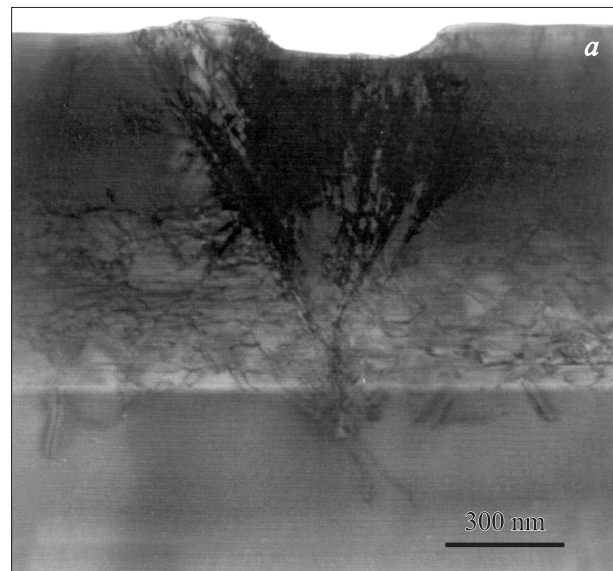


Рис. 2. МЛГС $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ на подложке GaAs с метаморфным градиентным слоем: *a* — ПЭМ-микротография скола структуры с дефектом упаковки; *b* — СЭМ-микротография поверхности структуры.

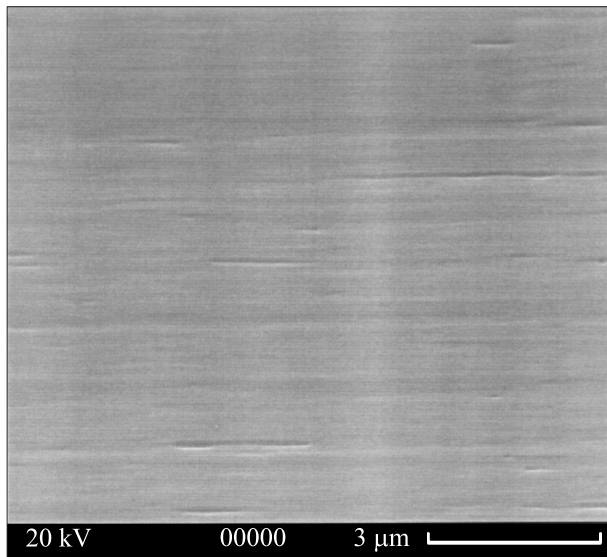


Рис. 3. СЭМ-микрофотография поверхности МЛГС InAlAs/InGaAs/InAlAs, выращенной на подложке GaAs при оптимизированных условиях осаждения.

характерные морфологические особенности (рис. 2, *b*). Образование подобного рода дефектов может значительно влиять на транспортные свойства структуры, снижая подвижность носителей заряда за счет дополнительного рассеяния. Методы, позволяющие подавить образование подобных дефектов, продолжают оставаться не до конца изученными. В качестве первого шага нами было исследовано влияние давления мышьяка на плотность дефектов упаковки в структуре. Использование стандартных условий осаждения, когда поток As в 2–4 раза превышает суммарный поток элементов III группы, приводит к образованию гофрированной поверхности и возникновению большого количества дефектов упаковки, как было показано на рис. 2, *b*. Однако было обнаружено, что по мере снижения потока мышьяка поверхность становится все более планарной и наблюдается уменьшение плотности дефектов упаковки. Наилучший результат был достигнут при использовании режима осаждения, когда поток мышьяка соответствовал суммарному потоку металлов (рис. 3). В оптимизированной структуре подвижность электронов составила $8100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации электронов $1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при 300 К. При 77 К подвижность составила $33\,100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. В аналогичной структуре, выращенной на подложке InP, (переходный слой отсутствует) подвижность электронов составила $11\,050 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации электронов $1.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при 300 К, а при 77 К подвижность составила $51\,670 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Очевидно, что повышенное количество дефектов в структуре с метаморфным буфером приводит к снижению подвижности носителей заряда, однако, несмотря на это, достигнутые параметры превосходят значения, получаемые в структуре на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs.

Итак, в ходе работы проведена оптимизация конструкции метаморфного градиентного буфера МЛГС на подложках GaAs, позволившая предотвратить проникновение дислокаций в рабочие слои структуры. Проведена оптимизация режимов выращивания структуры, что дало возможность подавить образование дефектов упаковки в таких структурах. В результате удалось создать МЛГС InAlAs/InGaAs/InAlAs, решеточно согласованные с InP на подложках GaAs, с такими электрическими характеристиками (подвижность $8100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, концентрация электронов $1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при 300 К), которые сопоставимы с характеристиками аналогичных структур на подложках InP и превосходят характеристики структур на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs. Мы считаем, что дальнейшая оптимизация конструкции метаморфных модулированно-легированных гетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs, решеточно согласованных с InP, позволит значительно улучшить транспортные характеристики структур на подложках GaAs.

Авторы статьи благодарят В.М. Бусова за измерения с помощью сканирующего электронного микроскопа и М.В. Байдакову за исследования методом высокоразрешающей рентгеновской дифракции.

Работа выполнена при поддержке программы „Физика твердотельных наноструктур“, РФФИ и совместной научной программы ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и Nanosemiconductors GmbH, Германия.

Список литературы

- [1] L.D. Nguyen, L.E. Larson, U.K. Mishra. Proc. IEEE, **80**, 494 (1992).
- [2] W.E. Hoke, P.J. Lemonias, J.J. Mosca. J. Vac. Sci. Technol. B, **17** (3), 1131 (1999).
- [3] M. Zaknounge, B. Bonte, C. Gaquiere. IEEE Electron. Dev. Lett., **19** (9), 345 (1998).
- [4] G. Wang, Y. Chen, W.J. Scha. IEEE Trans. Electron. Dev., **35** (7), 818 (1988).
- [5] M. Behet, K. Van der Zanden, G. Borghs. Appl. Phys. Lett., **73**, 2760 (1998).
- [6] T. Mishima, K. Higuchi, M. Mori. J. Cryst. Growth, **150**, 1230 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Metamorphic modulation-doped InAlAs/InGaAs/InAlAs heterostructures with high electron mobility grown on GaAs substrates

*E.S. Semenova, A.P. Vasilev, A.E. Zhukov, S.S. Mikhlin,
A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, Yu.G. Musikhin, S.A. Blokhin,
A.G. Gladyshev, N.N. Ledentsov*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Modulation-doped heterostructures have been grown by molecular beam epitaxy in InGaAs/InAlAs metamorphic material systems. Optimization of low-temperature compositionally-graded buffer layer makes it possible to improve structural perfection of the active layers. Electron mobility in 2D channel of metamorphic structure grown under optimum conditions ($8100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ at 300 K) noticeably exceeds typical values achieved in GaAs-based strained InGaAs/AlGaAs heterostructures.