

07

## Влияние конструкции переходного слоя $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ на транспортные характеристики метаморфного транзистора с высокой подвижностью электронов

© А.А. Лазаренко<sup>1</sup>, Е.В. Никитина<sup>1</sup>, Е.В. Пирогов<sup>1</sup>,  
М.С. Соболев<sup>1</sup>, А.Ю. Егоров<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

E-mail: lazarenko@spbau.ru

Поступило в Редакцию 17 августа 2015 г.

Исследовано влияние толщины переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  на подвижность электронов в канале  $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  НЕМТ-транзистора с метаморфным буфером. Исследования проводились методами атомно-силовой микроскопии и методом Холла. Оптимальная конструкция буфера способствует подавлению прорастания дислокаций несоответствия в верхние слои гетероструктуры и препятствует развитию микрорельефа поверхности.

Монолитные интегральные схемы и устройства на основе фосфида индия (InP) представляют собой весьма перспективное решение для высокочастотных применений [1]. Устройства, выполненные на подложках этого типа, демонстрируют отличные характеристики и идеально подходят для телекоммуникационных приложений. НЕМТ-транзисторы (high electron mobility transistor) на основе InP имеют низкий коэффициент шума, высокую выходную мощность, малое рабочее напряжение, высокий КПД и очень высокое быстродействие из-за высокой дрейфовой скорости носителей в канале. Дрейфовая скорость носителей заряда у фосфида индия в 1.5 раза больше, чем у арсенида галлия. В канале  $\text{InGaAs}$  НЕМТ-транзистора на основе InP электроны

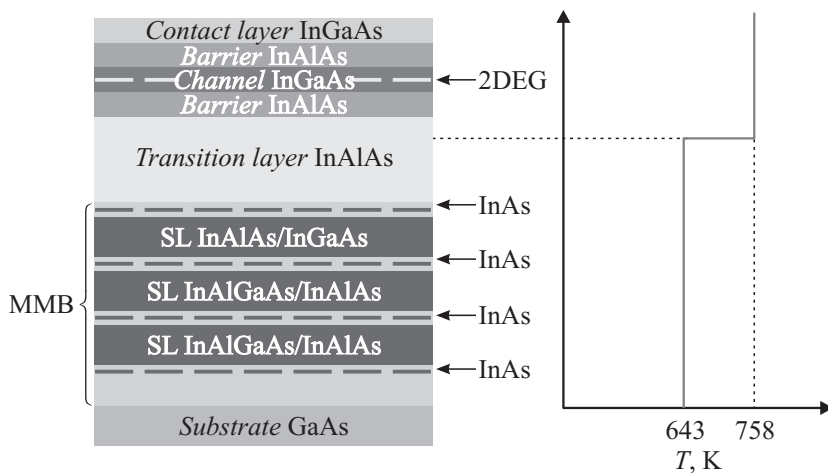
достигают подвижности  $10\,000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  при высокой плотности заряда в слое двумерного электронного газа  $(3\text{--}4.5)\cdot 10^{12}\text{ cm}^{-2}$  [2]. Типичные значения подвижности и концентрации электронов в канале транзисторных гетероструктур AlGaAs/InGaAs на подложках GaAs лежат в диапазоне  $5000\text{--}6500\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  и  $(2.0\text{--}3.6)\cdot 10^{12}\text{ cm}^{-2}$  при комнатной температуре [3,4].

Однако подложки InP по сравнению с подложками 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 существует интерес к так называемым метаморфным транзисторным гетероструктурам (МНЕМТ) на подложках GaAs, в которых использование специфических технологических режимов выращивания метаморфного буфера (ММБ) позволяет перейти от постоянной решетки GaAs к большей постоянной решетке в структуре (вплоть до постоянной решетки, соответствующей InP подложки и более). Используются различные материалы для ММБ на подложке GaAs, такие как InGaAs [5], InAlAs [6], InGaP [7], AlGaInAs [8] и AlGaAsSb [9]. Среди этих материалов широкозонный InAlAs обладает несколькими преимуществами, например, слой, содержащий Al, имеет меньший ток утечки, чем слой InGaAs, наличие Al улучшает изоляционные свойства.

Большинство дислокаций, возникающих в процессе эпитаксиального роста из-за рассогласования постоянных решеток, остается в ММБ, однако для препятствия их распространения в направлении роста и попадания в активные слои транзисторной структуры создается толстый ненапряженный переходный слой  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  между ММБ и транзисторными слоями гетероструктуры.

В данной работе исследуется влияние толщины переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  на подвижность электронов в канале метаморфного НЕМТ. Исследуемые образцы выращивались на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Ribier 49 (Франция). Транзисторные наногетероструктуры состояли из ММБ, переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  и транзисторных слоев. Исследуемые образцы отличались только толщиной переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{Al}$ . Схема расположения слоев гетероструктур представлена на рисунке.

ММБ включает в себя три сверхрешетки In(Al)GaAs/InAlAs различной толщины и состава (подробно состав и последовательность



Схематичное расположение слоев гетероструктур и температуры эпитаксиального роста.

слоев ММБ представлены в патенте на полезную модель № 139 673). Средний параметр кристаллической решетки ММБ возрастает ступенчато в сверхрешетках In(Al)GaAs/InAlAs. ММБ выращивался при пониженной температуре подложки (643 К). Осаждение буферного слоя при достаточно низкой температуре ( $\leq 673$  К) дает возможность ограничить большинство дислокаций в пределах буферного слоя и препятствовать их распространению в верхние слои. Для предотвращения возникновения напряжений в переходном слое средний параметр кристаллической решетки верхней части ММБ (300 nm) совпадает с параметром кристаллической решетки переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ .

После ММБ выращивался ненапряженный переходный слой  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  в два этапа: первая часть переходного слоя выращивалась при пониженной температуре подложки (643 К) толщиной 500 nm (образец 1) или 1000 nm (образцы 2 и 3); затем температура поднималась и выращивалась вторая часть переходного слоя при температуре подложки 758 К толщиной 200 nm (образцы 1 и 2) или 1100 nm (образец 3) (см. рисунок).

Сверху переходного слоя выращивалась транзисторная структура при температуре подложки 758 К, состоящая из канала  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}$  толщиной 12 нм, в котором образуется двумерный электронный газ, двух барьерных областей  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ , легированных кремнием, и  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  контактного слоя. Легированные барьеры  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  были пространственно отделены от канального слоя нелегированными областями  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  для предотвращения рассеяния электронов на примесях.

Высокая температура подложки при осаждении транзисторных слоев гетероструктур необходима для получения материала высокого структурного качества. Однако при увеличении температуры подложки с 643 до 758 К возникают напряжения в ММБ, которые могут привести к прорастанию дислокаций в транзисторные слои, повышению шероховатости гетерограниц и поверхности гетероструктуры. Дислокации приводят к резкому снижению подвижности носителей двумерного электронного газа, а высокое значение шероховатости гетерограниц приводит к рассеянию носителей заряда и уменьшению подвижности носителей заряда двумерного электронного газа канала транзисторной гетероструктуры, что пагубно влияет на рабочие параметры будущего прибора.

Для сохранения высокого структурного качества транзисторных слоев структуры, с одной стороны, и для препятствия прорастания дислокаций из ММБ в верхние слои структуры, с другой стороны, необходимо подобрать оптимальные толщины и температурные режимы выращивания переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ .

Исследование электрофизических параметров образцов (подвижность  $\mu_e$  и концентрация  $n$  носителей заряда) проводилось на установке для измерения эффекта Холла HMS-3000, Escoria при  $T = 300$  К и  $T = 77$  К.

Измерения среднеквадратичной шероховатости поверхности ( $R_q$ ) образцов производились на сканирующем зондовом атомно-силовом микроскопе Dimension 3100 фирмы Veeco Instruments (США). Размер кадра сканирования составлял  $25 \times 25 \mu\text{m}$ . Результаты измерений представлены в таблице.

Из данных таблицы видно, что при одинаковой концентрации носителей в канале для трех исследуемых образцов самая низкая подвижность электронов в канале для образца 1, что указывает на высокую дефектность структуры. Это может быть связано с недостаточно

## Электрофизические параметры образцов и значения шероховатости

Образцы	Концентрация носителей заряда в канале $n_s, \text{cm}^{-2}$		Подвижность носителей заряда $\mu, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$		Среднеквадратичная шероховатость поверхности ( $R_q$ ), nm
	$T = 300 \text{ K}$	$T = 77 \text{ K}$	$T = 300 \text{ K}$	$T = 77 \text{ K}$	
1	$3.10 \cdot 10^{12}$	$2.72 \cdot 10^{12}$	7200	22500	12.1
2	$3.15 \cdot 10^{12}$	$3.12 \cdot 10^{12}$	8880	26400	11.2
3	$3.03 \cdot 10^{12}$	$2.78 \cdot 10^{12}$	7790	24600	24.0

толстым переходным слоем  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  (700 nm). Однако образец 1 не демонстрирует большую величину среднеквадратичной шероховатости поверхности (12.1 nm).

Увеличение толщины переходного слоя за счет увеличения слоя, выращенного при пониженной температуре (образец 2), приводит к незначительному уменьшению шероховатости поверхности и значительному увеличению подвижности электронов в канале. Такое сильное увеличение подвижности электронов в канале говорит о меньшей плотности прорастающих дислокаций в канале транзисторной структуры по сравнению с образцом 1. Необходимость роста транзисторных слоев при достаточно высокой температуре приводит к прорастанию дислокаций из ММБ в верхние слои структуры. Использование толстого (более 1000 nm, выращенного при пониженной температуре) переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  позволяет вырастить верхние транзисторные слои высокого кристаллического качества.

Увеличение толщины переходного слоя до 2100 nm (образец 3) за счет увеличения слоя, выращенного при температуре 758 K, значительно ухудшает морфологию поверхности и транспортные свойства канала. Это может быть связано с тем, что при пониженной температуре (643 K) дислокации удерживались внутри ММБ, однако при повышении температуры и эпитаксиальном росте слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  толщиной 1100 nm при температуре 758 K дислокации начали распространяться в верхние слои гетероструктуры и проникать в транзисторные слои, ухудшая транспорт носителей.

При понижении температуры с 300 до 77 K для образцов 1 и 3 концентрация носителей заряда значительно уменьшается. Это может

быть связано с наличием глубоких донорных уровней и подавлением процессов термоэмиссии заряда с места локализации при низкой температуре. В то же время концентрация носителей заряда в канале образца 2 практически не меняется при понижении температуры. Это свидетельствует о малом количестве глубоких уровней и высоком структурном совершенстве образца 2.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что конструкция переходного слоя  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  имеет значительное влияние на морфологию поверхности и электрофизические параметры транзисторной гетероструктуры.

Образец 2 обладает оптимальной конструкцией переходного слоя  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ . Такая конструкция позволяет подавлять прорастание дислокаций несоответствия в верхние слои гетероструктуры и препятствует развитию микрорельефа поверхности гетероструктуры. Шероховатость поверхности составила 11.2 nm. Такая величина шероховатости не приводит к катастрофическому уменьшению подвижности электронов в канале и позволяет достичь высоких значений подвижности.

## Список литературы

- [1] *Kastalski A., Keihl R.A.* // *IPCS*. 1985. N 79. P. 535.
- [2] *Sato Y., Kita T., Gozu S., Yamada S.* // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. P. 8017.
- [3] *Хабибуллин Р.А., Васильевский И.С., Галиев Г.Б.* и др. // *ФТП*. 2011. Т. 45. В. 5. С. 666.
- [4] *Егоров А.Ю., Гладышев А.Г., Никитина Е.В.* и др. // *ФТП*. 2010. Т. 44. В. 7. С. 950.
- [5] *Yuan K., Radhakrishnan K., Zheng H.Q.* et al. // *Mat. Sci. Semicond. Proc.* 2001. V. 4. P. 637.
- [6] *Chang J.C.P., Chen J., Fernandez J.M.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1992. V. 60. P. 1129.
- [7] *Behet M., Van der Zanden K., Borghs G.* // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. P. 2760.
- [8] *Cordier Y., Ferre D.* // *J. Cryst. Growth*. 1999. V. 201/202. P. 263.
- [9] *Zaknoute M., Bonte B., Gaquiere C.* // *IEEE Electron Device Lett.* 1998. V. 9 (9). P. 345.