

07

## Влияние конструкции метаморфного буферного слоя на сохраняемость параметров метаморфного транзистора InGaAs/GaAs с высокой подвижностью электронов

© Е.В. Никитина<sup>1,2</sup>, А.А. Лазаренко<sup>1,¶</sup>, Е.В. Пирогов<sup>1</sup>,  
М.С. Соболев<sup>1</sup>, Т.Н. Березовская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет РАН

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский научный центр РАН

¶ E-mail: alexashpigun@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2016 г.

Исследуется влияние конструкции метаморфного буферного слоя на изменения с течением времени электрофизических характеристик метаморфных транзисторов InGaAs/GaAs с высокой подвижностью электронов. С помощью Холловских измерений показано, что транзисторная гетероструктура с метаморфным буфером на основе сверхрешеток In(Al)GaAs/InAlAs обладает наибольшими значениями концентрации и подвижности электронов в канале и наименее подвержена деградации с течением времени.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.18.45039.16643

Технология метаморфного буфера (ММБ) в настоящий момент широко применяется для эпитаксиального выращивания транзисторных гетероструктур [1]. Первые работы по использованию ММБ относятся к концу 80-х годов XX века [2,3]. Идея ММБ состоит в плавном или резком (ступенчатом) переходе от постоянной решетки одного слоя (чаще всего подложки) к постоянной решетки, необходимой для роста слоев активной области. Конструкция и параметры эпитаксиального роста ММБ выбираются таким образом, чтобы получить гладкие интерфейсы и предотвратить распространение („удержать“) дислокаций, возникающих из-за разницы в постоянных решетки, в пределах

метаморфных слоев и не допустить их появления в активных слоях гетероструктур [4].

Достиженные результаты по метаморфному росту гетероструктур свидетельствуют о перспективности использования данного подхода при производстве транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) [5], лазеров [6] и солнечных преобразователей энергии [7]. Однако для массового применения метаморфного роста в приборах необходимо исследовать сохраняемость с течением времени таких параметров, как концентрации и подвижности электронов в каналах метаморфных НЕМТ. В настоящей работе исследуется сохраняемость этих параметров в транзисторных структурах, выращенных на ММБ различных конструкций.

Образцы выращивались на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber 49 (Франция). В транзисторных наногетероструктурах использовались различные конструкции ММБ, а параметры переходного слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  и транзисторных слоев были одинаковыми.

В образце № 1 в качестве ММБ выступал слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с градиентным изменением состава от  $x = 0$  до 0.52 толщиной  $1 \mu\text{m}$ . В образце № 2 использовался трехслойный ММБ  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  со ступенчатым изменением состава  $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{As}$  и  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  в каждом из слоев толщиной 330 nm. Образец № 3 включал в себя три сверхрешетки  $\text{In}(\text{Al})\text{GaAs}/\text{InAlAs}$  различной толщины и состава (подробно состав и последовательность слоев ММБ представлены в патенте на полезную модель № 139673). При общей толщине этого ММБ  $1 \mu\text{m}$  средний параметр его кристаллической решетки ступенчато возрастал в сверхрешетках  $\text{In}(\text{Al})\text{GaAs}/\text{InAlAs}$ .

Во всех образцах ММБ выращивался при пониженной температуре подложки (643 К). Осаждение буферного слоя при низкой температуре подложки ( $\leq 673$  К) способствует релаксации кристаллической решетки и препятствует переходу к трехмерному режиму роста в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии [2,3].

В качестве контрольного (реперного) образца была изготовлена транзисторная гетероструктура на подложке InP (образец № 4), транзисторные слои которой совпадали с транзисторными слоями метаморфных гетероструктур на подложках GaAs.

Электрофизические характеристики носителей заряда в каналах транзисторных гетероструктур (холловские подвижности  $\mu_e$  и концен-

Электрофизические параметры исследуемых образцов

Номер образца	Концентрация носителей заряда в канале $n_s$ , $\text{cm}^{-2}$		Подвижность носителей заряда $\mu$ , $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	
	$T = 300 \text{ K}$	$T = 77 \text{ K}$	$T = 300 \text{ K}$	$T = 77 \text{ K}$
1	$2.41 \cdot 10^{12}$	$2.08 \cdot 10^{12}$	5200	15 200
2	$3.07 \cdot 10^{12}$	$2.87 \cdot 10^{12}$	7470	23 200
3	$3.15 \cdot 10^{12}$	$3.12 \cdot 10^{12}$	8880	26 400
4	$3.28 \cdot 10^{12}$	$3.11 \cdot 10^{12}$	9670	32 100

трации  $n$  носителей заряда) определялись на установке для измерения эффекта Холла HMS-3000 Есоріа при  $T = 300$  и  $77 \text{ K}$ . Результаты этих измерений представлены в таблице.

Исследования на сохраняемость образцов проводились методом длительного хранения согласно п.2.2 ГОСТ 21493-76 и при следующих условиях: температура окружающего воздуха от  $15$  до  $35^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха не более  $80\%$  при  $25^\circ\text{C}$ . В этих исследованиях контролировалась стабильность параметров-критериев годности путем их измерения через определенные интервалы времени (каждые полгода) в течение определенного срока (2 года) с целью сравнения с исходными значениями.

Уровень легирования, состав и условия роста транзисторных слоев изучаемых гетероструктур идентичны, и влияние на концентрацию и подвижность носителей заряда в канале оказывают только буферные слои, так как остаточные дислокации из ММБ проникают в активные слои гетероструктуры.

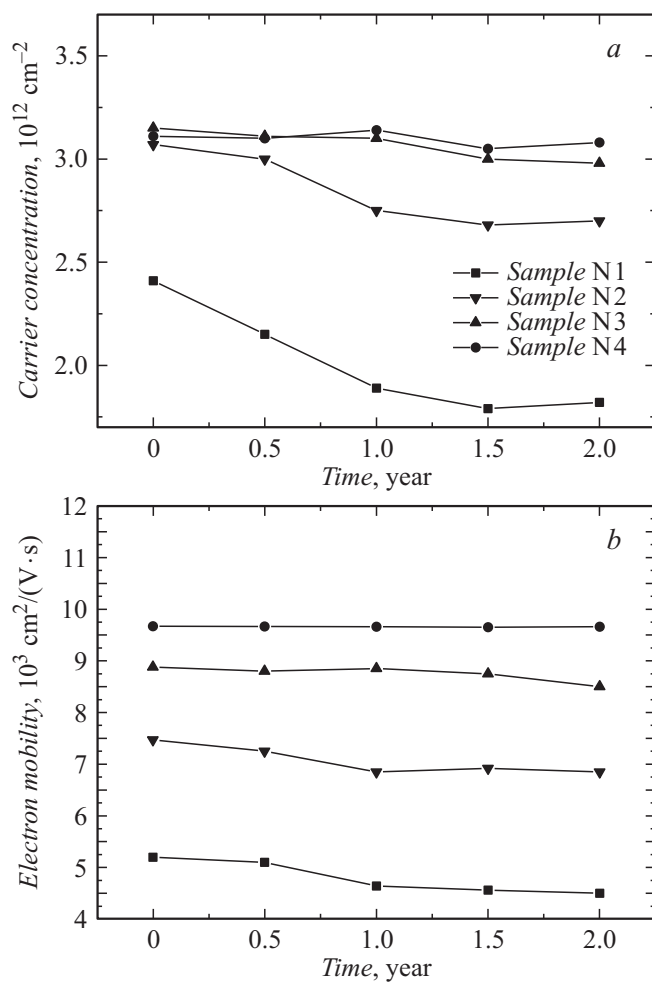
Из данных таблицы видно, что при близкой концентрации носителей в канале для трех образцов (образцы № 2–4) самая низкая подвижность электронов в канале наблюдается для образца № 2, что указывает на большую дефектность этой структуры. Это связано как с большим количеством прорастающих дислокаций, так и с большей шероховатостью интерфейсов, что приводит к рассеянию носителей в канале. Образец № 1 также показал относительно низкие значения концентрации носителей в канале, что свидетельствует о захвате носителей глубокими центрами из-за высокой концентрации прорастающих дислокаций в активных слоях этой гетероструктуры. Лучшие значения

электрофизических параметров, близкие к параметрам контрольной транзисторной гетероструктуры (образец № 4), были обнаружены при использовании в качестве ММБ сверхрешеток  $\text{In}(\text{Al})\text{GaAs}/\text{InAlAs}$  (образец № 3). Следовательно, можно предположить, что конструкция такого ММБ приводит к появлению наименьшего числа прорастающих дислокаций в транзисторных слоях.

В процессе работы приборов происходит нагрев гетероструктур с ММБ, что может вести к „прорастанию“ дислокаций из ММБ в активные слои структуры с неизбежной последующей деградацией приборов. Кроме того, с течением времени возможна ускоренная деградация приборов с ММБ (по сравнению с гетероструктурами без ММБ).

На рисунке, *a* представлены изменения концентраций носителей заряда в каналах транзисторных гетероструктур с различной конструкцией ММБ (образцы № 1–3) и контрольной транзисторной гетероструктуры на подложке  $\text{InP}$  (образец № 4) во время их хранения при комнатной температуре. Концентрация носителей заряда в канале для образца № 1, в котором в качестве ММБ выступал слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с градиентным изменением состава, значительно уменьшалась в течение первого года измерений, а затем была постоянной, что указывает на релаксацию оставшихся напряжений в структуре. Для образца № 2, где в качестве ММБ использовались слои  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  со ступенчатым изменением состава, концентрация носителей заряда в канале уменьшилась за время хранения на 10%, что свидетельствует об остаточных напряжениях в структуре, приводящих со временем к увеличению прорастающих дислокаций. Наилучшую сохраняемость концентрации носителей заряда, не превышающую точность измерений и сравнимую с сохраняемостью контрольной транзисторной гетероструктуры, продемонстрировал образец № 3 с конструкцией ММБ со сверхрешетками. Это указывает на то, что данный тип ММБ подавляет прорастание дислокаций в активные слои структуры при хранении гетероструктуры при комнатной температуре.

Из рисунка, *b* видно, что при хранении приборов при комнатной температуре значения подвижностей носителей заряда в каналах транзисторных гетероструктур в образцах № 1, 2 уменьшились на 13 и 7% соответственно, что свидетельствует о появлении со временем дополнительной шероховатости образцов из-за релаксации остаточных напряжений в ММБ. И лишь образцы № 3, 4 продемонстрировали неизменные в пределах погрешности измерений значения подвижности



Зависимость концентрации (*a*) и подвижности (*b*) носителей заряда при комнатной температуре в канале транзисторных гетероструктур образцов № 1–4 от срока хранения образцов.

носителей заряда в канале транзисторных гетероструктур в течение всего срока исследований.

Таким образом, значения концентрации и подвижности носителей заряда в канале транзисторной гетероструктуры с ММБ на основе сверхрешеток In(Al)GaAs/InAlAs (образец № 3) во время всего срока исследования на сохраняемость остались в пределах погрешности измерений, при этом они сравнимы со значениями для транзисторной гетероструктуры, выращенной на подложке InP.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН „Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий“.

## Список литературы

- [1] *Heyn C., Mendach S., Lohr S., Beyer S., Hansen W.* // J. Cryst. Growth. 2003. V. 251. P. 832.
- [2] *Horikawa H., Ogawa Y., Kawai Y., Sakuta M.* // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. P. 397.
- [3] *Kaminska M., Liliental Weber Z., Weber E.R., George T.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 1881.
- [4] *Лазаренко А.А., Никитина Е.В., Пирогов Е.В., Соболев М.С., Егоров А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 6. С. 14.
- [5] *Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Галиев Р.Р., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Федоров Ю.В., Мальцев П.П.* // ФТП. 2014. Т. 48. В. 1. С. 73.
- [6] *Kirch J., Garrod T., Kim S., Park J.H., Shin J.C., Mawst L.J., Kuech T.F., Song X., Babcock S.E., Vurgaftman I., Meyer J.R., Kuan T.S.* // J. Cryst. Growth. 2010. V. 312. P. 1165.
- [7] *Jones R.K., Hebert P., Pien P., King R.R., Bhusari D., Brandt R., Al Taher O., Fetzer C., Ermer J., Boca A., Larrabee D., Liu X.Q., Karam N.* // 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. 2010. P. 000189.