

Исследование влияния напряженных сверхрешеток, введенных в метаморфный буфер, на электрофизические свойства и атомное строение МНЕМТ наногетероструктур $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$

© Г.Б. Галиев*, С.С. Пушкарев**†, И.С. Васильевский+, О.М. Жигалина*,
Е.А. Климов*, В.Г. Жигалина*, Р.М. Имамов*

* Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

† Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия

• Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской академии наук,
119333 Москва, Россия

(Получена 18 июня 2012 г. Принята к печати 25 июня 2012 г.)

Представлены результаты исследования влияния напряженных сверхрешеток, введенных в метаморфный буфер, на электрофизические свойства и атомное строение $\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}/\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}/\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}$ МНЕМТ-наногетероструктур на подложке GaAs. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены два типа МНЕМТ-структур — один с линейным увеличением x в метаморфном буфере $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, а второй — с двумя рассогласованными сверхрешетками, внедренными внутрь метаморфного буфера. Методами Ван-дер-Пау, просвечивающей электронной микроскопии (в том числе растровой и высокоразрешающей), атомно-силовой микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследованы электрофизические и структурные параметры выращенных образцов. Выявлено, что введение сверхрешеток в метаморфном буфере существенно улучшает электрофизические и структурные характеристики МНЕМТ-структур.

1. Введение

В настоящее время метаморфные НЕМТ (МНЕМТ) наногетероструктуры $\text{InAsAs}/\text{InGaAs}$ на подложках GaAs являются одними из наиболее перспективных материалов для СВЧ электроники. Хотя они по быстродействию уступают НЕМТ и псевдоморфным НЕМТ (РНЕМТ) наногетероструктурам на подложках InP, но благодаря большей технологичности и прочности успешно с ними конкурируют [1–3]. Относительно высокая стоимость подложек InP по сравнению с GaAs, их меньшая технологичность, обусловленная в основном хрупкостью, а также меньший размер подложек делает МНЕМТ-наногетероструктуры на GaAs достаточно привлекательными для использования в СВЧ электронике [4].

Суть метаморфной технологии заключается в выращивании между подложкой и активной областью относительно толстого переходного слоя — метаморфного буфера (ММБ) $\text{In}_x(\text{Al,Ga})_{1-x}\text{As}$ — с изменяющимся в зависимости от толщины химическим составом, благодаря чему достигается согласование параметров подложки с параметрами слоев требуемого состава путем постепенной релаксации возникающих механических напряжений.

Наногетероструктуры с ММБ и МНЕМТ используются в различных областях, например в PIN-диодах [5], устройствах для спинтроники [6] и в СВЧ электронике для изготовления транзисторов, маломощных усилителей и монолитных интегральных схем [7,8], а также для лазерных систем [9].

При эпитаксиальном росте ММБ в большинстве случаев сохраняется двумерный рост эпитаксиальных слоев с требуемым структурным совершенством, однако поверхность выращенной гетероструктуры приобретает волнообразный поперечно-полосатый рельеф (cross-hatch). Такой рельеф возникает из-за полей деформации, создаваемых сетью образующихся дислокаций несоответствия (misfit dislocations) [10]. Шероховатость поверхности наногетероструктуры одновременно с электрофизическими параметрами наногетероструктуры (подвижностью μ_e и слоевой концентрацией электронов проводимости n_s) влияют на свойства гетероструктурных электронных приборов. Поэтому получение достаточно совершенной поверхности метаморфной наногетероструктуры на подложке GaAs с требуемым составом активной области и со значениями μ_e и n_s , сравнимыми с полученными на подложках InP, является, безусловно, актуальной задачей.

Известно, что и структурные, и электрофизические характеристики выращенной наногетероструктуры сильно зависят как от технологических условий роста, так и от конструкции ММБ. Под последней мы понимаем характер изменения химического состава ММБ в зависимости от толщины ММБ. Например, ММБ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ может быть выращен с линейным увеличением содержания In (x) с толщиной [11], либо линейно с двумя разными градиентами [12], либо со ступенчатым увеличением содержания In на $\Delta x = 0.10$ через каждые 100 нм [13].

Из литературных данных известно, что ММБ выращивается как при разных значениях температуры и скорости роста [14], так и при разных значениях давления мышьяка [15], а также с разным содержанием индия в слое $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ [16]. Поэтому сравнение параметров

† E-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

a

Layers	Thickness, nm	Growth temperature, °C
In _{0.76} Ga _{0.24} As (protecting layer)	7.3	470
In _{0.70} Al _{0.30} As (barrier)	22.0	470
δ-Si	—	470
In _{0.70} Al _{0.30} As (spacer)	6.4	470
In _{0.76} Ga _{0.24} As (channel)	16.4	470
In _{0.70} Al _{0.30} As	160.6	400
In _{0.75} Al _{0.25} As → In _{0.70} Al _{0.30} As (inverse step)	46.0	400
In _{0.05} Al _{0.95} As → In _{0.75} Al _{0.25} As (ММБ)	1190	400
SL1{Al _{0.52} Ga _{0.48} As/GaAs} × 5	19	590
GaAs (buffer)	34	590
GaAs (substrate)	—	—

b

Layers	Thickness, nm	Growth temperature, °C
In _{0.76} Al _{0.24} As (protecting layer)	7.3	470
In _{0.70} Al _{0.30} As (barrier)	22.0	470
δ-Si	—	470
In _{0.70} Al _{0.30} As (spacer)	6.4	470
In _{0.76} Ga _{0.24} As (channel)	16.4	470
In _{0.70} Al _{0.30} As	160.6	400
In _{0.75} Al _{0.25} As → In _{0.70} Al _{0.30} As (inverse step)	46.0	400
In _{0.70} Al _{0.30} As → In _{0.75} Al _{0.25} As (ММБ)	80	400
SL3{In _{0.60} Ga _{0.40} As/In _{0.75} Al _{0.25} As} × 5	48	400
In _{0.45} Al _{0.55} As → In _{0.70} Al _{0.30} As (ММБ)	430	400
SL2{In _{0.35} Ga _{0.65} As/In _{0.50} Al _{0.50} As} × 5	37	400
In _{0.05} Al _{0.95} As → In _{0.455} Al _{0.55} As (ММБ)	680	400
SL1{Al _{0.52} Ga _{0.48} As/GaAs} × 5	19	590
GaAs (buffer)	34	590
GaAs (substrate)	—	—

Рис. 1. Схемы образцов: *a* — 1, *b* — 2.

наногетероструктур, приведенных в литературе, становится довольно затруднительным.

Более того, в литературе отсутствуют также данные об использовании напряженных сверхрешеток внутри ММБ, хотя они могли бы способствовать как релаксации механических напряжений, так и уменьшению проникновения прорастающих дислокаций в активную область наногетероструктуры.

Цель данной работы состоит в исследовании влияния введения в ММБ механически напряженных сверхрешеток на структурные и электрофизические характеристики МНЕМТ наногетероструктур InAlAs/InGaAs.

2. Образцы и методы исследования

Для достижения поставленной цели методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) ± 0.1° (фирма Wafer Technology LTD) были выращены метаморфные НЕМТ-наногетероструктуры In_{0.70}Al_{0.30}As/

In_{0.76}Ga_{0.24}As/In_{0.70}Al_{0.30}As с двумя типами конструкций метаморфного буфера. ММБ образца 1 представляет собой слой In_xAl_{1-x}As толщиной 1.08 мкм, где *x* линейно увеличивается в зависимости от толщины. ММБ образца 2 отличается от ММБ образца 1 тем, что внутрь него были введены две напряженные пятипериодные сверхрешетки InGaAs/InAlAs, рассогласованные относительно текущего состава ММБ. Толщина ММБ образца 2 при этом за счет сверхрешеток отличалась от толщины ММБ образца 1 и составляла 1.16 мкм. Цель данной конструкции ММБ заключалась в создании короткопериодных локальных полей упругой деформации с чередующимися знаками, компенсирующих друг друга и поэтому не вносящих дополнительного напряжения в ММБ. На наш взгляд, такие поля могли бы способствовать изгибанию вбок прорастающих дислокаций, что могло бы привести к увеличению подвижности электронов.

На рис. 1, *a*, *b* представлены схематические изображения поперечного сечения образцов 1 и 2 соответственно. Здесь же, кроме толщин слоев, указаны температуры

роста слоев. Парциальное давление мышьяка As_4 в зоне роста установки МЛЭ оставалось неизменным и составляло $P_{As} \approx 6.3 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Как видно из рис. 1, *a, b*, активная область исследуемых образцов, начиная от инверсной ступени и выше, а также буфер GaAs и сверхрешетка SL1 $Al_{0.52}Ga_{0.48}As/GaAs$ были одинаковые. Носители заряда в канале создавались с помощью δ -легирования кремнием барьерного слоя $In_{0.70}Al_{0.30}As$ с концентрацией $N_{Si} = 2.15 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Сверхрешетка SL1, также присутствующая в обоих образцах, была введена с целью подавления возможной сегрегации случайных примесей с подложки в вышележащие слои, а также для уменьшения дефектов кристаллической структуры растущего эпитаксиального слоя.

Электрофизические характеристики образцов (μ_e и n_s) были измерены на образцах квадратной формы размером 5×5 мм с помощью эффекта Холла четырехконтактным методом Ван дер Пау при двух температурах: 300 и 77 К. Образец, закрепленный на измерительном стенде, мог подсвечиваться зеленым светодиодом с длиной волны 530 нм. Это позволяло изменить концентрацию электронов в канале и исследовать зависимости подвижности электронов μ_e от их концентрации n_s .

Для визуализации полученных гетероструктур использована просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), просвечивающая растровая электронная микроскопия (ПРЭМ) и электронная микроскопия высокого разрешения (ВРЭМ), линии концентрационного профиля для поперечных сечений образцов получены с использованием рентгеноспектрального микроанализа (EDX). Образцы поперечных срезов гетероструктур для исследования в просвечивающем электронном микроскопе были приготовлены с помощью механического утонения до толщин 30–40 мкм предварительно склеенных заготовок с помощью специальных порошков и паст. На следующей стадии осуществлялось утонение ионами Ag^+ с энергией 4–5 кэВ и углом падения по отношению к поверхности образца $3\text{--}5^\circ$ в установке ионного травления GATAN 691 PIPs. На завершающей стадии утонения угол падения ионов Ag^+ уменьшали до 2° .

Исследование полученных таким образом поперечных срезов проводили с помощью приборов FEI Tecnai G²30 ST и FEI Tita 80-300 при ускоряющем напряжении 300 кВ. Для формирования изображений с Z-контрастом в ПРЭМ-режиме вводили широкоугольной кольцевой детектор темного поля (HAADF).

Морфология поверхности образцов была исследована методом атомно-силовой микроскопии на микроскопе Femtoscan (МГУ, Россия).

3. Обсуждение результатов

На рис. 2, *a* представлено изображение поперечного среза образца 1. По всему сечению образца, начиная от толщины ~ 0.05 мкм, наблюдается характерный светлый

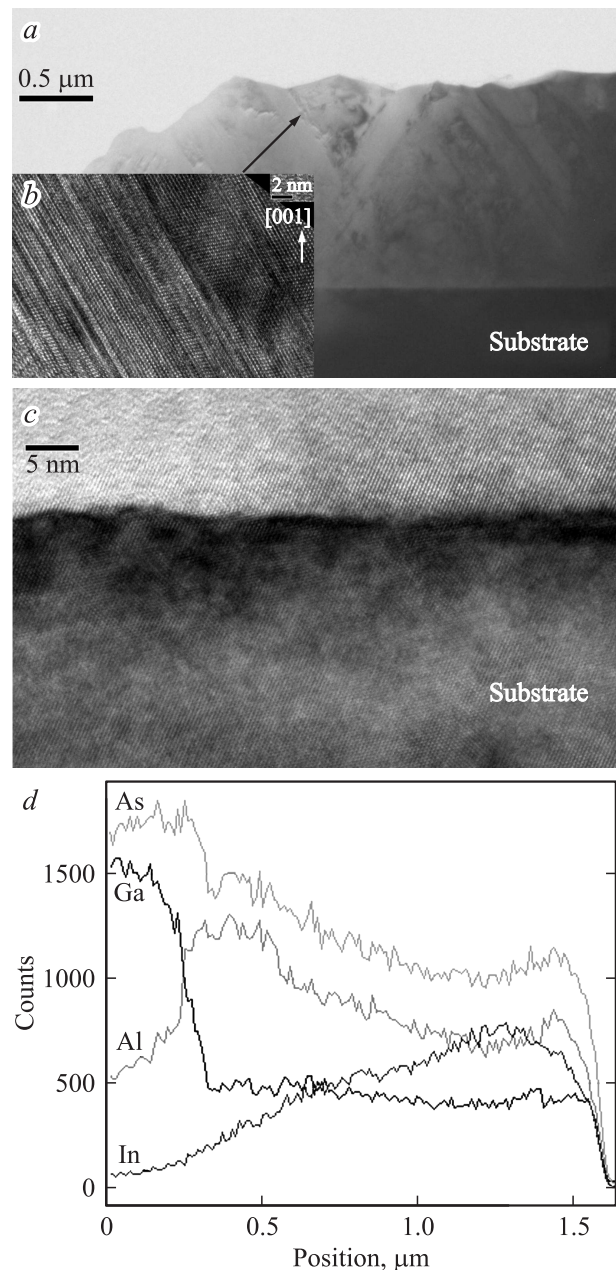


Рис. 2. Структура поперечного среза образца 1: *a* — ПЭМ-изображение при малом увеличении; *b* — ВРЭМ-изображение участка-двойника; *c* — ВРЭМ-изображение участка образца, включающего границу между подложкой и буфером GaAs; *d* — линии концентрационного профиля химических элементов в сечении гетероструктуры.

контраст в виде полос шириной до 300 нм, расположенных под углом $\sim 36^\circ$ к направлению, перпендикулярному поверхности подложки. Анализ изображений с атомным разрешением (рис. 2, *b*) показывает, что светлые полосы являются дефектами кристаллической структуры — двойниками различной ширины, проросшими на всю толщину эпитаксиального слоя, начиная с ~ 0.05 мкм от подложки. На рис. 2, *c* показано, что буфер GaAs непосредственно над подложкой свободен

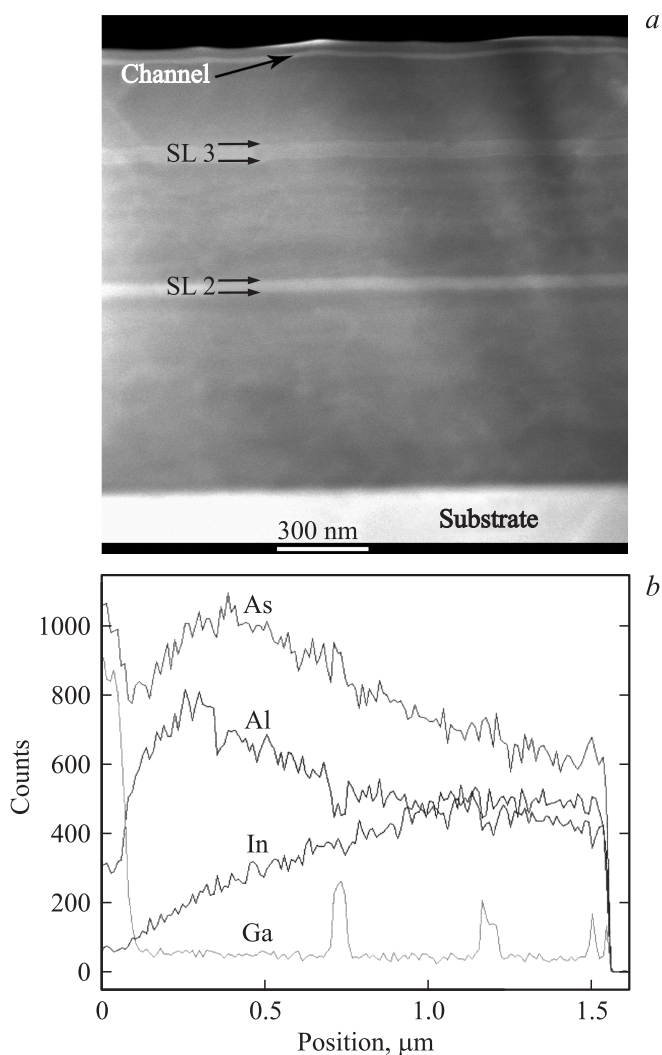


Рис. 3. Структура поперечного среза образца 2: *a* — ПРЭМ-изображение в темном поле с Z-контрастом; *b* — линии концентрационного профиля химических элементов в сечении гетероструктуры (SL — сверхрешетка).

от каких-либо дефектов, тем самым подтверждая, что двойники зарождаются в ММБ выше. На рис. 2, *d* представлено распределение химических элементов по глубине наногетероструктуры, полученное методом EDX. Как видно из рис. 2, *d*, в образце 1 ход изменения концентрации атомов In по толщине примерно соответствует линейному, но отсутствуют ярко выраженные слои, формирующие наногетероструктуру. По-видимому, это связано с тем, что при данных технологических режимах роста МНЕМТ-структуры плотность дислокаций и дефектов при некоторой толщине достигает такого значения, что начинается образование двойников. Согласно [17,18], двойникование наряду с образованием дислокаций является способом релаксации упругодеформированной кристаллической структуры эпитаксиальных слоев. Двойникование происходит при нарушении кристаллографической ориентации некоторых участков

растущего кристалла из-за нарушения порядка чередования растущих атомных монослоев. Это может быть следствием неоптимального технологического режима роста эпитаксиального слоя. Двойники являются довольно распространенным типом дефектов в полупроводниковых структурах, и одной из главных причин двойникования является большая плотность дислокаций и сильные механические напряжения. В работе [18] наблюдалось смещение баланса релаксации в сторону образования двойников в случаях использования линейного ММБ или увеличения угла разориентации используемых для эпитаксиального роста подложек.

Совершенно другая ситуация наблюдается для образца 2, где внутрь ММБ были введены две напряженные сверхрешетки: SL2 и SL3. На рис. 3, *a, b* представлены ПРЭМ изображения в темном поле с Z-контрастом и профили содержания химических элементов в сечении наногетероструктуры 2. Как видно из рис. 3, *a*, на ПРЭМ изображениях поперечного среза образца 2 двойники не проявляются, а соответствующие темнопольные изображения с Z-контрастом выявляют светлый контраст от подложки и слоев наногетероструктуры, содержащих Ga, который является элементом с большим атомным номером по сравнению с Al (на изображении видны сверхрешетки SL2 и SL3, канал и защитный слой).

Линии профиля распределения химических элементов в образце 2 (рис. 3, *b*) показывают, что в данном

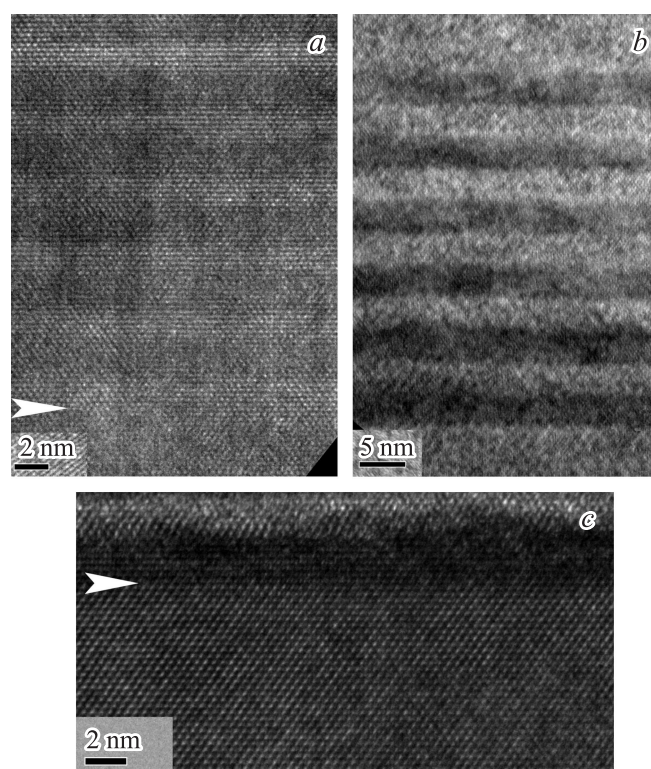


Рис. 4. ВРЭМ-изображение различных областей образца 2: *a* — SL1; *b* — SL2; *c* — участок, включающий границу между барьерным и защитным слоями (SL — сверхрешетка).

случае особенно четко проявляется распределение Ga по глубине. Так, отчетливо видны SL2 $\{\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{In}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}\} \times 5$, SL3 $\{\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}\} \times 5$, канал и защитный слой $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}$.

На рис. 4, *a*, *b*, *c* представлены ВРЭМ изображения SL1, SL2 и участка наногетероструктуры 2, содержащего границу между барьерным (внизу) и защитным (вверху) слоями. Видно, что кристаллическая структура данных областей достаточно совершенна, границы между слоями, как правило, ровные и четкие, а дефекты кристаллической структуры (дислокации, дефекты упаковки) отсутствуют.

Эти рассуждения подтверждаются исследованиями поверхности с помощью АСМ. На рис. 5 представлены АСМ изображения поверхности образцов. Видно, что морфология поверхности образцов различается. Для образца 1 наблюдается сильно развитый изотропный рельеф поверхности со среднеквадратичной шероховатостью

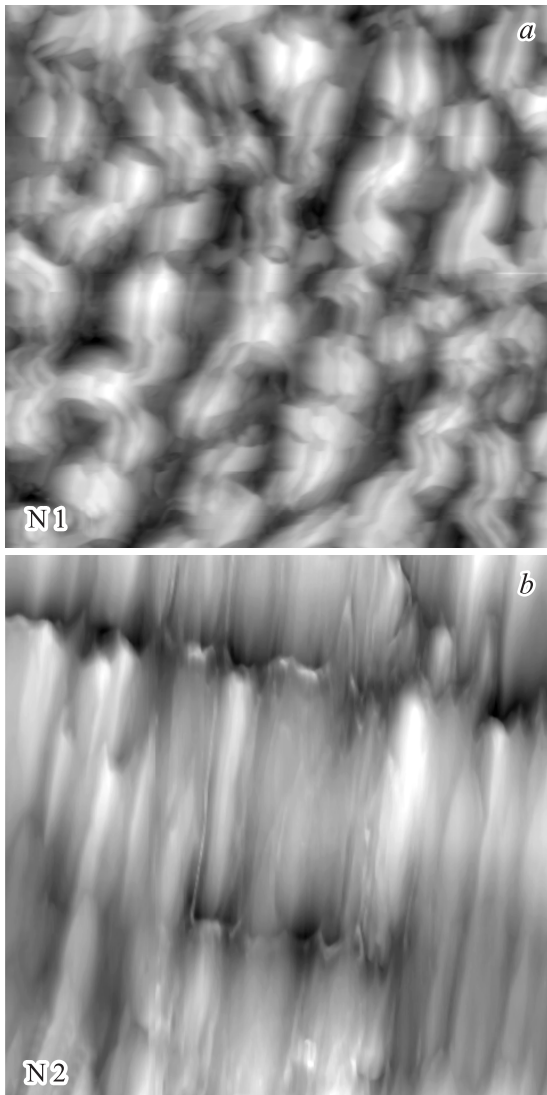


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ исследуемых образцов 1 (*a*) и 2 (*b*).

Электрофизические параметры исследуемых образцов (μ_e — подвижность электронов, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, n_s — двумерная концентрация электронов, см^{-2})

№	300 К				77 К			
	Нет освещения		Освещение		Нет освещения		Освещение	
	n_s	μ_e	n_s	μ_e	n_s	μ_e	n_s	μ_e
1	1.29	1550	1.31	1600	1.23	1930	1.66	3120
2	1.41	10550	1.42	10480	1.36	33900	1.83	33930

поверхности 23 нм, в то время как образец 2 обладает характерным для МНЕМТ-структур поперечно-полосатым рельефом поверхности со среднеквадратичной шероховатостью 7 нм.

Структурные характеристики исследованных образцов хорошо согласуются с данными измерений слоевой концентрации электронов и их холловской подвижности, которые представлены в таблице. Эти данные подтверждают кардинальное улучшение кристаллической структуры образца 2 по сравнению с образцом 1, что выражается в высоких значениях холловской подвижности электронов как при температуре 300 К, так и при 77 К.

4. Заключение

В работе впервые исследовано влияние внедрения рассогласованных механически напряженных сверхрешеток $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}$ и $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ в метаморфный буфер наногетероструктуры $\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}/\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}/\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}$ на ее структурные и электрофизические параметры. На примере линейного метаморфного буфера показано, что внедрение в метаморфный буфер рассогласованных сверхрешеток позволяет возникающим упругим деформациям релаксировать не через двойникование, а с возможным образованием дислокаций несоответствия. Полученные значения концентрации и подвижности электронов подтверждают, что введение рассогласованных сверхрешеток является эффективным способом улучшения электрофизических и структурных характеристик МНЕМТ-структур.

Работа выполнена в рамках госконтрактов № 14.740.11.0869, № 16.513.11.3113 и № 16.426.11.0046 по заказу Министерства образования и науки и гранта РФФИ 11-07-00050. Исследования структуры частично выполнены на приборах ЦКП ИК РАН.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук А.Л. Васильеву за предоставленную возможность использования микроскопа Titan 80-300.

Список литературы

- [1] D.-H. Kim, J.A. del Alamo. IEEE Electron. Dev. Lett., **31** (8), 806 (2010).

- [2] D.-H. Kim, J.A. del Alamo. IEEE Trans. Electron. Dev., **57** (7), 1501 (2010).
- [3] S.-J. Yu, W.-C. Hsu, Y.-J. Chen, C.-L. Wu. Sol. St. Electron., **50** 291 (2006).
- [4] W.E. Hoke, P.J. Lemonias, J.J. Mosca, P.S. Lyman, A. Torabi, P.F. Marsh, R.A. McTaggart, S.M. Lardizabal, K. Hetzler. J. Vac. Sci. Technol. B, **17** (3), 1131 (1999).
- [5] W.E. Hoke, T.D. Kennedy, A. Torabi, C.S. Whelan, P.F. Marsh, R.E. Leoni, S.M. Lardizabal, Y. Zhang, J.H. Jang, I. Adesida, C. Xu, K.C. Hsieh. J. Cryst. Growth, **251**, 804 (2003).
- [6] K.S. Joo, S.H. Chun, J.Y. Lim, J.D. Song, J.Y. Chang. Physica E, **40**, 2874 (2008).
- [7] M.-S. Son, B.-H. Lee, M.-R. Kim, S.-D. Kim, J.-K. Rhee. J. Korean Phys. Soc., **44** (2), 408 (2004).
- [8] C.-S. Lee, C.-H. Liao. J. Appl. Phys., **102**, 114 502 (2007).
- [9] S. Suomalainen, A. Vainionpaa, O. Tengvall, T. Hakulinen, S. Karirinne. Appl. Phys. Lett., **87**, 121 106 (2005).
- [10] O. Yastrubchak, T. Wosinski, T. Figielski, E. Lusakowska, B. Peez, A.L. Toth. Physica E, **17**, 561 (2001).
- [11] S. Bollaert, Y. Cordier, M. Zaknounge, H. Happy, V. Hoel, S. Lepilliet, D. Theron, A. Cappy. Sol. St. Electron., **44**, 1021 (2000).
- [12] F. Capotondi, G. Biasiol, D. Ercolani, V. Grillo, E. Carlino, F. Romanato, L. Sorba. Thin Sol. Films, **484**, 400 (2005).
- [13] S. Mendach, C.M. Hu, Ch. Heyn, S. Schnull, H.P. Oepen, R. Anton, W. Hansen. Physica E, **13**, 1204 (2002).
- [14] S.G. Tavakoli, O. Hulko, D.A. Tompson. J. Appl. Phys., **103**, 103 527 (2008).
- [15] Y. Cordier, P. Lorenzini, J.-M. Chauveau, D. Ferre, Y. Androussi, J. Dipersio, D. Vignaut, J.-L. Cordon. J. Cryst. Growth, **251**, 822 (2003).
- [16] Yvon Cordier, Sylvain Bollaert, Mohammed Zaknounge, Jean Dipersio, Denise Ferre. Jpn. J. Appl. Phys., **38**, pt 1, N 2B, 1164 (1999).
- [17] И.А. Случинская. *Основы материаловедения и технологии полупроводников* (М., 2002) с. 113, 244.
- [18] M. Gutierrez, D. Gonzalez, G. Aragon, M. Hopkinson, R. Garcia. Mater. Sci. Engin. B, **80**, 27 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of influence of strained superlattices inserted into metamorphic buffer on electrophysical and structural properties of InAlAs/InGaAs MHEMT nanoheterostructures

G.B. Galiev*, S.S. Pushkarev*+, I.S. Vasil'evskii+, O.M. Zhigalina*, E.A. Klimov*, V.G. Zhigalina*, R.M. Imamov*

* Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105, Moscow, Russia

+ National Nuclear Research University „MEPH“, 115409 Moscow, Russia

• Shubnikov Institute of Crystallography, Russian Academy of Sciences, 119333 Moscow, Russia

Abstract The results of the investigation of the effect of two strained superlattices inserted into metamorphic buffer for $\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}/\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}/\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}$ MHEMT nanoheterostructures on GaAs substrate are reported. A solid source molecular beam epitaxy was used to grow MHEMT nanoheterostructures with two designs of $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ metamorphic buffer: the first with linear In grading and the second with two strained superlattices inserted into linear graded metamorphic buffer. Electrophysical and structural properties of grown structures were researched by means of Van der Pauw method, transmission electron microscopy, atomic force microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. The employment of strained superlattices is shown to enhance the electrophysical and structural properties of MHEMT nanoheterostructures.