

Гетероструктуры с двумерным электронным газом на основе GaN с InAlN/AlGaN-барьером

© Д.С. Артеев¹, А.В. Сахаров¹, А.Е. Николаев¹, Н.А. Черкашин², А.Ф. Цацульников³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² CEMES-CNRS and Université de Toulouse, 29 rue Jeanne Marvig, BP 94347, CEDEX 4, F-31055 Toulouse, France

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ArteevDS@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 4 мая 2024 г.

В окончательной редакции 9 октября 2024 г.

Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Экспериментально продемонстрирована возможность получения гетероструктур на основе GaN с композитным InAlN/AlGaN-барьером со значением слоевого сопротивления $\sim 220\text{--}230$ Ом/квadrat при комнатной температуре методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, что сопоставимо с коммерческими структурами с InAlN-барьерами. На основе численных расчетов показано, что серьезный вклад в снижение подвижности двумерного электронного газа дает рассеяние на сплавном потенциале твердого раствора в слое AlGaN.

Ключевые слова: нитрид галлия, транзистор, InAlN.

DOI: 10.61011/FTP.2024.10.59386.6627A

1. Введение

Полевые транзисторы на основе соединений III-N представляют большой интерес для высокоомощных и высокочастотных применений. В настоящее время подобные транзисторы преимущественно изготавливают на основе гетероструктур AlGaN/GaN с мольной долей алюминия, обычно не превышающей 30%. В таких структурах за счет разницы спонтанной и пьезоэлектрической поляризации между слоями AlGaN и GaN на гетерогранице возникает двумерный электронный газ (ДЭГ) с концентрацией $N_{2D} \sim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью $\mu_{2D} \sim 2000 \text{ см}^2/(\text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1})$. Типичные значения слоевого сопротивления R_S таких структур обычно не превышают 300 Ом/квadrat. Увеличение мольной доли алюминия в барьерном слое позволяет получить концентрации ДЭГ до $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для чистого AlN [1]. Однако сильные механические напряжения, возникающие из-за разницы параметров кристаллической решетки GaN и AlN, сильно ограничивают критическую толщину барьерного AlN-слоя, а также негативно влияют на надежность конечного устройства. К тому же рост чистого AlN методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ), являющимся основным промышленным методом выращивания III-N структур, практически невозможен из-за непреднамеренного встраивания атомов Ga [2].

Альтернативным материалом барьерного слоя может служить InAlN, позволяющий получать ДЭГ с концентрацией $\sim (2.0\text{--}3.5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ [3]. Однако InAlN требует роста при существенно пониженных температу-

рах, что негативно сказывается на его кристаллическом совершенстве и качестве гетерограницы, что вкуче с большим значением потенциала сплавного рассеяния приводит к невысоким значениям подвижности, так что итоговое значение R_S оказывается сопоставимым или даже большим, чем в стандартных AlGaN/GaN-структурах. Использование тонкого 1–2 нм AlN-слоя между InAlN и GaN обычно позволяет увеличить подвижность, несмотря на то что проблемы увеличения шероховатости гетерограницы и непреднамеренного встраивания атомов Ga при росте МОГФЭ при этом остаются.

Интересным подходом видится использование гетероструктур с тонким композитным InAlN/AlGaN-барьерным слоем, которые теоретически могут иметь концентрации ДЭГ, сопоставимые со структурами с InAlN-барьером, и подвижности, сопоставимые со структурами с AlGaN-барьерами. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований и моделирования подобных гетероструктур.

2. Структуры и методика эксперимента

Исследуемые структуры были выращены МОГФЭ на установке Dragon-125 на сапфировых подложках. Структуры состояли из GaN:Fe-буферного слоя и нелегированного канального слоя толщиной ~ 1 мкм [4,5], поверх которого выращивались барьерные слои — 1 нм номинально чистый AlN, 1–2 нм AlGaN-спейсер и InAlN-барьер различной толщины. Исследования электрофизи-

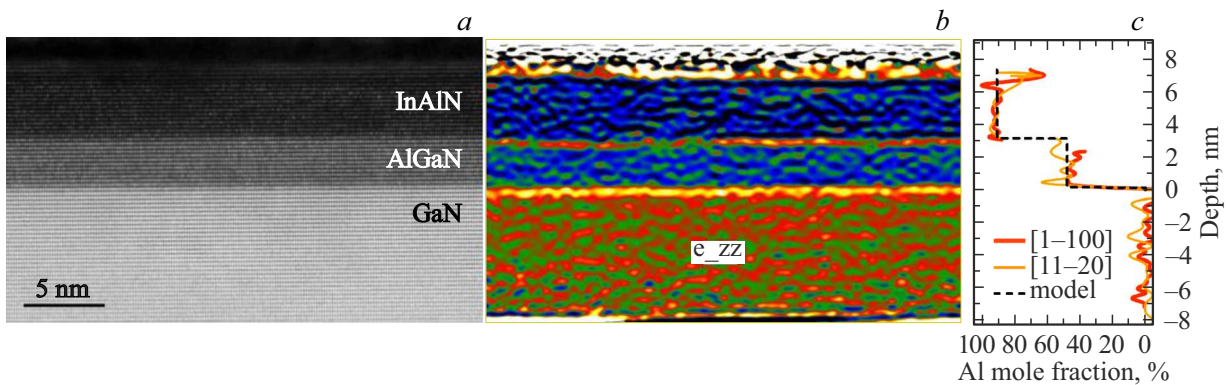


Рис. 1. *a* — изображение структуры, полученное методом STEM-NAADF; *b* — карта деформаций кристаллической решетки по отношению к ненапряженному слою GaN; *c* — распределение мольной доли алюминия по глубине структуры.

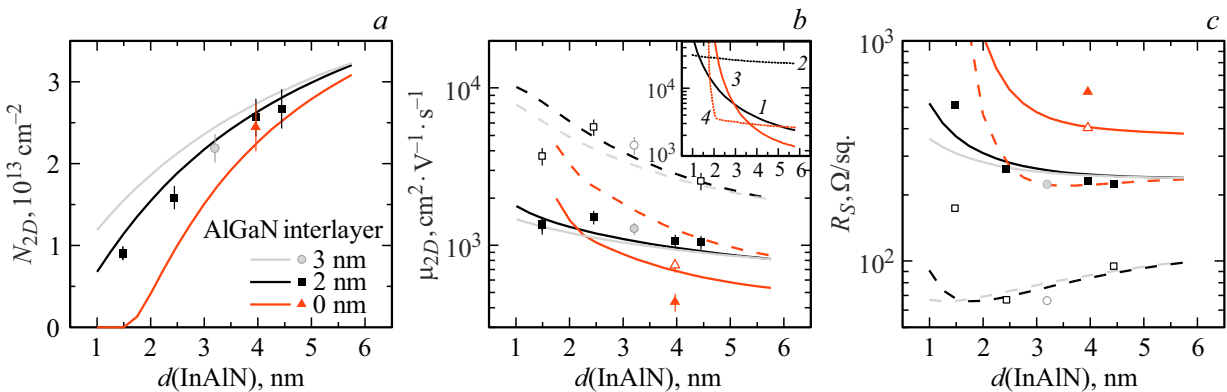


Рис. 2. Зависимости концентрации (*a*), подвижности (*b*) и слоевого сопротивления (*c*) от толщины слоя InAlN. Линии — расчет, символы — эксперимент. Сплошные линии и закрашенные символы соответствуют комнатной температуре; пунктирные линии и незакрашенные символы — 77 К. На вставке: 1, 2 — подвижности, ограниченными рассеянием на сплавном потенциале и шероховатостях интерфейса в структуре с 2-нанометровым AlGaIn-спейсером; 3, 4 — они же в структуре без AlGaIn-спейсера.

зических свойств проводились с помощью измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау.

3. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены результаты исследования структуры с AlN/AlGaIn/InAlN 1/2/4 нм барьером методом просвечивающей электронной микроскопии с высокоугловым кольцевым темнопольным детектором (STEM-NAADF). На рис. 1, *a* можно отчетливо видеть слои GaN, AlGaIn и InAlN с достаточно гладкими гетерограницами между ними; при этом выраженного номинально чистого слоя AlN не наблюдается. На поверхности образца также можно видеть ~ 1 нм оксидный слой. Подобный слой также наблюдался на as-deposited образце в работе [6], что говорит о предпочтительности нанесения *in situ* пассивирующих слоев, таких как Si₃N₄. На графиках распределения мольной доли алюминия в слоях (рис. 1, *c*), полученных из карт деформаций кристаллической решетки (рис. 1, *b*) также не наблюдается

слоя AlN, что говорит о непреднамеренном встраивании атомов Ga.

Измеренные значения концентрации, подвижности и слоевого сопротивления ДЭГ в зависимости от толщины InAlN показаны символами на рис. 2. Видно, что увеличение толщины барьерного слоя приводит к росту концентрации ДЭГ. При этом наблюдается падение подвижности ДЭГ, и значение слоевого сопротивления при комнатной температуре (295 К) уменьшается до ~ 220–230 Ом/квadrat при увеличении толщины InAlN до ~ 3 нм и остается постоянным при дальнейшем увеличении толщины. Значение R_S при низкой температуре имеет минимальное значение ~ 67 Ом/квadrat при толщине InAlN 2.5 нм и более высокие значения для более тонких и более толстых барьерных слоев. Для сравнения также была выращена структура без AlGaIn-спейсера с барьерным слоем InAlN 4 нм (обозначена символом треугольника на рис. 2). Концентрация ДЭГ в такой структуре лишь немногим ниже, чем в аналогичных структурах с AlGaIn-спейсером, а вот подвижность катастрофически уменьшилась до 435 и

745 см² · В⁻¹ · с⁻¹) при 295 и 77 К, с соответствующими значениями R_S 587 и 400 Ом/квадрат.

Для анализа зависимостей были проведены численные расчеты. Зависимость концентрации от толщины InAlN была рассчитана путем самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера [7], а для расчета подвижности были использованы выражения для рассеяния на акустических и оптических фононах, дислокациях, шероховатостях гетерограницы и флуктуациях состава твердого раствора из работ [3,8]. Ключевым в данном расчете является выбор значения потенциала сплавного рассеяния. В работе [9] на основе расчетов из первых принципов было показано, что значение сплавного потенциала рассеяния U_0 для твердого раствора AlGaIn заданного состава хорошо совпадает с $\partial E_c / \partial x$, где E_c — энергия края зоны проводимости. В нашей работе было принято значение разрыва зон $\Delta E_c / \Delta E_v = 0.7/0.3$ для AlGaIn и InAlN во всем диапазоне составов, из чего была рассчитана зависимость $E_c(x)$. Кроме того, параметр прогиба зависимости ширины запрещенной зоны InAlN, в отличие от AlGaIn, сам сильно зависит от состава [10], что также было учтено. Таким образом, использованные значения U_0 равны 1.782 и 6.305 эВ для AlGaIn и InAlN соответственно. В качестве среднеквадратичной шероховатости интерфейса в соответствии с экспериментальными данными из работы [3] были выбраны усредненные значения 0.3 и 0.9 нм для AlGaIn/GaN и InAlN/GaN соответственно. В расчетах было принято типичное для GaN на сапфире значение плотности дислокаций $N_{\text{disl}} = 10^9$ см⁻² с фактором заполнения $f = 1$ [5,11].

Полученные зависимости N_{2D} , μ_{2D} и R_S представлены на рис. 2 в виде линий. Так как используемые для расчета темпов рассеяния выражения справедливы лишь для вырожденного ДЭГ, из расчетов μ_{2D} и R_S были исключены структуры без AlGaIn-спейсера с толщиной InAlN < 1.75 нм. Видно, что модель в целом неплохо описывает наблюдаемые зависимости для структур с AlGaIn-спейсером. Значения подвижностей, ограниченных рассеянием на сплавном потенциале и шероховатостях интерфейса для структур с AlGaIn-спейсером и без него показаны на вставке рис. 2, *b*. Видно, что вклад рассеяния на сплавном потенциале в структуре без AlGaIn-спейсера при толщинах барьера > 3 нм сильно выше, чем в структуре со спейсером. При этом темп рассеяния на шероховатостях интерфейса в структуре без спейсера по своему вкладу сравним с рассеянием на сплавном потенциале. Несоответствие расчетных и экспериментальных значений для структуры без AlGaIn-спейсера может быть связано с упрощениями данной модели при расчете темпов рассеяния (все электроны считаются принадлежащими основному состоянию в квантовой яме), непреднамеренным встраиванием галлия в барьерный слой (что приводит к более сильному рассеянию на флуктуациях состава твердого раствора) или еще большей шероховатостью интерфейса. Однако для соответствия расчетных значений экспериментальным требуется значение шероховатости > 1.5 нм,

что представляется нам несколько завышенным. Также нельзя исключать и комбинации приведенных выше факторов, и для однозначных выводов требуются дополнительные исследования, как экспериментальные, так и теоретические.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе экспериментально продемонстрирована возможность получения гетероструктур на основе GaN с композитным InAlN/AlGaIn-барьером со значением слоевого сопротивления ~ 220 – 230 Ом/квадрат при комнатной температуре методом МОГФЭ, что сопоставимо с коммерческими структурами с InAlN-барьерами [12]. Показано, что серьезный вклад в снижение подвижности ДЭГ дает рассеяние на сплавном потенциале твердого раствора в слое AlGaIn.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Cao, D. Jena. Appl. Phys. Lett., **90**, 182112 (2007). DOI: 10.1063/1.2736207
- [2] B. Mazumder, S.W. Kaun, J. Lu, S. Keller, U.K. Mishra, J.S. Speck. Appl. Phys. Lett., **102**, 111603 (2013). DOI: 10.1063/1.4798249
- [3] D.S. Arteev, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, D.A. Zakheim, E.E. Zavarin, A.F. Tsatsulnikov. J. Phys.: Conf. Ser., **1400**, 077009 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077009
- [4] D.S. Arteev, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, A.F. Tsatsulnikov, M.I. Gindina, P.N. Brunkov. J. Phys.: Conf. Ser., **1697**, 012206 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012206
- [5] D.S. Arteev, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, A.E. Nikolaev, A.F. Tsatsulnikov, V.M. Ustinov. Materials, **15**, 8945 (2022). DOI: 10.3390/ma15248945
- [6] A.M. Thron, J. Gao, B. Ercan, M.A. Laurent, S. Chowdhury, K. Van Benthem. Phys. Status Solidi A, **218**, 2100304 (2021). DOI: 10.1002/pssa.202100304
- [7] D.S. Arteev, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, A.F. Tsatsulnikov. J. Phys.: Conf. Ser., **2103**, 012202 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012202
- [8] C.E.C. Wood, D. Jena. *Polarization Effects in Semiconductors: From Ab Initio Theory to Device Applications* (Springer, N.Y.–London, 2008).
- [9] N. Pant, Z. Deng, E. Kioupakis. Appl. Phys. Lett., **117**, 242105 (2020). DOI: 10.1063/5.0027802
- [10] S.N. Alam, V.Z. Zubialevich, B. Ghafary, P.J. Parbrook. Sci. Rep., **10**, 16205 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-73160-7
- [11] N.G. Weimann, L.F. Eastman, D. Doppalapudi, H.M. Ng, T.D. Moustakas. J. Appl. Phys., **83** (7), 3656 (1998). DOI: 10.1063/1.366585
- [12] *sweGaN*. Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://swegan.se/fe-doped/>

Редактор Г.А. Оганесян

Heterostructures with two-dimensional electron gas based on GaN with InAlN/AlGaN barrier

*D.S. Arteev¹, A.V. Sakharov¹, A.E. Nikolaev¹,
N.A. Cherkashin², A.F. Tsatsulnikov³*

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² CEMES-CNRS and Université de Toulouse,
29 rue Jeanne Marvig, BP 94347, CEDEX 4,
F-31055 Toulouse, France

³ Submicron Heterostructures for Microelectronics,
Research & Engineering Center,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The possibility of obtaining GaN-based heterostructures with composite InAlN/AlGaN barrier with a layer resistance value of $\sim 220\text{--}230\ \Omega/\text{sq.}$ at room temperature by gas-phase epitaxy from organometallic compounds, which is comparable to commercial structures with InAlN barriers, has been experimentally demonstrated. On the basis of numerical calculations, it was shown that a significant reduction of 2DEG mobility is due to scattering at the alloy disorder potential in the AlGaN layer.