

AlGaN/GaN dHEMT: ECV-профилирование и расчет встроенных пьезополей

Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Методом ECV-профилирования исследованы GaN транзисторы с высокой подвижностью электронов работающие в режиме обеднения (dHEMT). Измерены вольт-фарадные характеристики, получены профили распределения концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктур, определено пространственное расположение и уровни заполнения квантовых ям носителями заряда. Изучены факторы влияющие на плотность носителей заряда в канале и рабочие характеристики GaN dHEMT. Показана эффективность метода ECV для контроля качества активных и буферных слоев GaN dHEMT гетероструктур. С учетом пьезоэлектрических полей проведен расчет плотности двумерного электронного газа для различных технологических параметров интерфейса $Al_xGa_{1-x}N/GaN$.

Ключевые слова: электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, HEMT, GaN, пьезоэлектрическая поляризация

1. Введение

Нитрид галлия и твердые растворы на его основе обладают совокупностью свойств, позволяющих получать полупроводниковые приборы, превосходящие по параметрам приборы на классических полупроводниках [1]. Именно с массовым внедрением GaN в настоящее время связывается прорыв в СВЧ- и силовой электронике. Однако, разработка и совершенствование таких приборов неуклонно приводит к ужесточению требований к точности воспроизводства последовательности слоев, состава и степени легирования, лежащих в их основе полупроводниковых гетероструктур. Так, применительно к гетероструктурам GaN транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT), особенно важно проводить исследования и контроль не только активных, но и буферных слоев гетероструктур поскольку исходное наличие достаточно большого количества различного рода дефектов приводит к появлению ловушек захвата [2] и эффекту коллапса тока, ухудшающих частотные и мощностные свойства прибора. Поэтому отработка механизмов борьбы с данными негативными явлениями, а также проведение мер по оптимизации параметров гетероструктур для увеличения крутизны вольт-амперной характеристики (ВАХ), рабочих частот и мощности конечного прибора наиболее продуктивны в случае наличия и эффективного использования соответствующей диагностической базы для качественной и достоверной верификации параметров получаемых структур.

Таким образом, целью данной работы являлось прецизионное измерение профилей распределения концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) по глубине, расчет плотности двумерного электронного газа (ДЭГ) на интерфейсе $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ при различных технологических параметрах, а также выработка рекомендаций по оптимизации параметров исследуемых приборных структур.

2. Исследуемые образцы

В работе исследовался набор «нормально-открытых», т.е. работающих в режиме обеднения (D-mode) GaN dHEMT гетероструктур двух типов: *I* – без дополнительного легирования, *II* – с дополнительным легированием донорного слоя (рисунок 1).

Квантовая яма в таких структурах образуется за счет разрыва зон на интерфейсе AlGaN/GaN. Поверхность гетероструктур I типа пассивировалась пленкой SiN_x. Тонкие (1-2 нм) выглаживающие слои GaN и AlN в обоих типах гетероструктур необходимы для улучшения структурных свойств и шероховатости, в частности, наличие слоя AlN приводит к улучшению качества интерфейса GaN/AlGaN, заметному увеличению подвижности электронов в ДЭГ, а также способствует уменьшению порогового напряжения и эффектов короткого канала [3].

SiN _x пассивирующий слой	20Å	GaN выглаживающий слой	20Å
AlGaN барьерный слой	240Å	Al _{0.33} Ga _{0.67} N барьерный слой	120Å
AlN выглаживающий слой	10Å	Al _{0.33} Ga _{0.67} N донорный слой	100Å
GaN каналный слой	3 мкм	Al _{0.33} Ga _{0.67} N спейсерный слой	20Å
AlGaN/AlN буферный слой		AlN выглаживающий слой	10Å
SiC подложка		GaN каналный/буферный слой	3 мкм
	Тип I		Тип II

Рисунок 1. Последовательность слоев исследуемых GaN dHEMT гетероструктур.

3. Результаты расчета GaN dHEMT гетероструктур

Подробное описание использованной модели расчета встроенного электрического поля на интерфейсе Al_xGa_{1-x}N/GaN с учетом поляризационных эффектов изложено в [4]. При различных составах и в зависимости от угла ориентации слоя Al_xGa_{1-x}N относительно подложки (0001), рассчитаны нормальная к слою GaN компонента вектора пьезоэлектрической поляризации P и величина скачка поляризации ΔP на интерфейсе AlGaN/GaN (рисунок 2). Здесь и далее на рисунках штрихами обозначена кривая, соответствующая твердому раствору Al_{0.33}Ga_{0.67}N (образцы I и II типа). Видно, что поляризация имеет нулевое значение не только при неполярной ориентации (угол 90°), но и при угле 43°, когда вектор поляризации меняет свое направление.

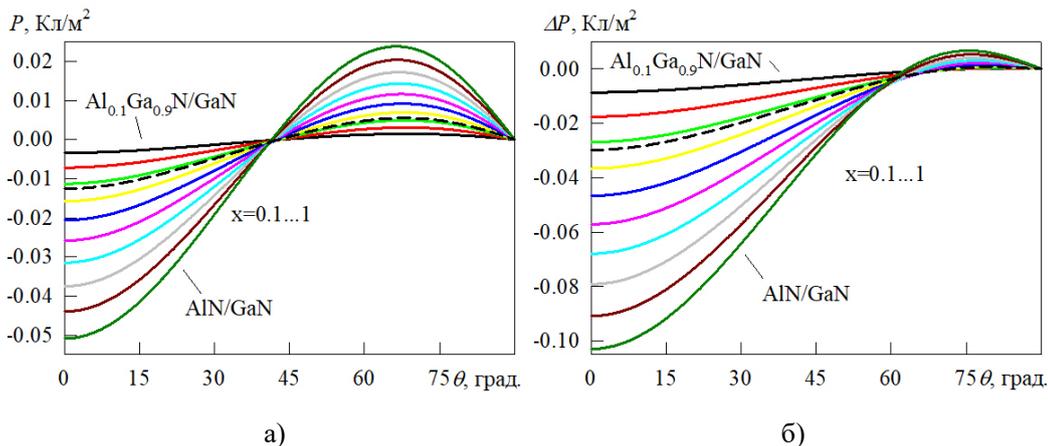


Рисунок 2. Результаты расчета на гетероинтерфейсе Al_xGa_{1-x}N/GaN: а) нормальная к слою GaN компонента вектора пьезоэлектрической поляризации P ; б) величина скачка поляризации ΔP

Рассчитанная величина индуцированного поляризацией электрического поля на границе раздела AlGaN/GaN в зависимости от состава и угла ориентации слоя Al_{0.33}Ga_{0.67}N относительно плоскости (0001) приведена на рисунке 3а.

Максимальное значение напряженности электрического поля на гетерогранице AlGaN/GaN достигается при нулевом угле ориентации слоя Al_xGa_{1-x}N относительно

плоскости (0001). Расчет заряда на границе раздела $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ показывает, что плотность ДЭГ в канале GaN dHEMT растет с увеличением доли алюминия в твердом растворе (рисунок 3б), причем наиболее значительный рост наблюдается при составах x до ~ 0.35 . Можно поэтому считать, что образец *I* типа представляет собой удачный компромисс между большой величиной встроенного заряда и еще не очень высоким рассогласованием параметров решеток гетерослоев. Расчетная величина заряда ДЭГ для этого образца составила $1.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что хорошо соотносится с экспериментально определенной методом ECV величиной $2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

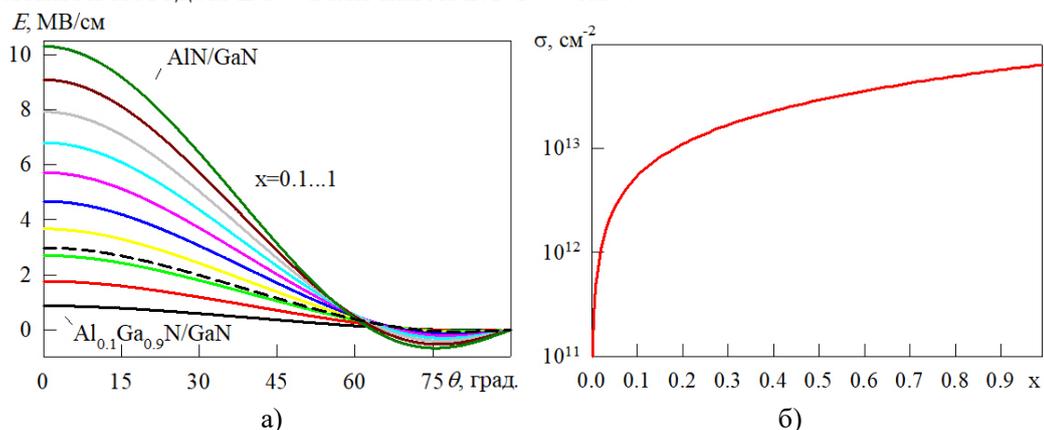


Рисунок 3. Результаты расчета на гетероинтерфейсе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$: а) напряженность индуцированного поляризации электрического поля; б) Плотность ДЭГ в зависимости от состава твердого раствора при угле ориентации слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ относительно плоскости (0001), равном 0°

Природа высокой плотности заряда в GaN dHEMT проистекает от присущей этому материалу встроенной поляризации, скорее чем от внешнего легирования. Поэтому известные передовые разработки таких HEMT, выращенных на других, нежели (0001), плоскостях даже с использованием δ -легирования, позволяют достичь концентрации в канале всего $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [5]. С этой точки зрения для GaN HEMT приборов не имеет значения проблема выбора роста гетероструктур на полярных и неполярных гранях, актуальная для светодиодных GaN структур.

4. Результаты ECV-профилирования GaN dHEMT гетероструктур

Для верификации рассчитанных значений плотности ДЭГ в GaN dHEMT образцах был применен метод электрохимического вольт-фарадного (ECV) профилирования. Методика проведения ECV-измерений подробно рассмотрена нами в работе [6]. В качестве электролита выбран раствор $0.2\text{M H}_2\text{SO}_4$, травление осуществлялось в импульсном режиме с шагом 1 нм. Для контроля глубины и качества травления использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) Solver NEXT компании NT-MDT.

Измеренные ВАХ и ВФХ образца *I* типа представлены на рисунке 4. Как видно из ВАХ, для напряжения менее -4 В обратный ток выходит в насыщение и имеет значение $\sim -0.2 \text{ мА}$, что подтверждает хорошую эффективность перекрытия канала транзистора. Гистерезис ВФХ не наблюдался, что говорит об отсутствии потерь, связанных с перезарядкой электрически активных глубоких центров. Это важно, поскольку их наличие лимитирует частотные свойства прибора, и при больших обратных смещениях приводит к туннелированию через глубокие центры барьерного слоя.

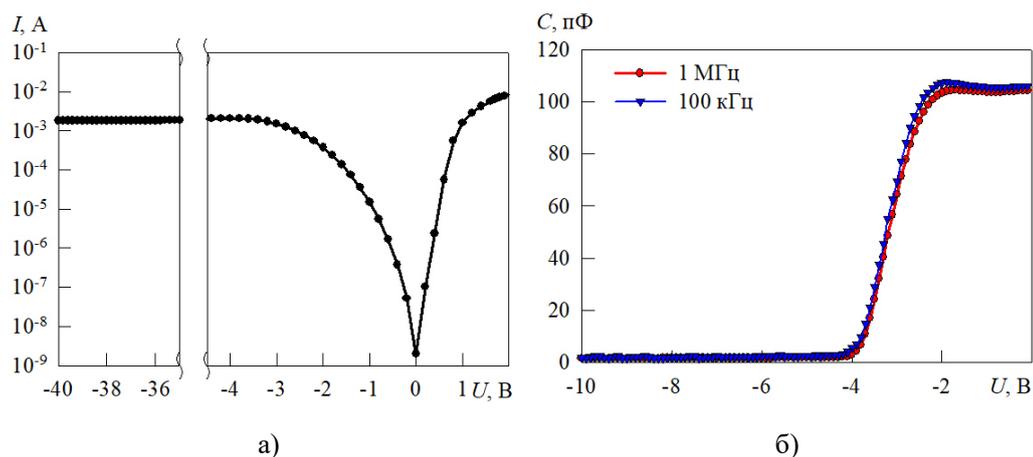


Рисунок 4. Результаты измерений образца *I* типа: а) ВАХ; б) ВФХ

Полученный из ВФХ профиль распределения концентрации ОНЗ образца *I* типа представлен на рисунке 5а. Концентрационный пик расположен на глубине 24 нм, что хорошо совпадает с положением треугольной КЯ AlGaN/GaN. При этом, из-за поляризационных эффектов, а также большего разрыва зоны проводимости, концентрационный пик имеет достаточно большую амплитуду ($2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Таким образом, даже без дополнительного легирования GaN НЕМТ позволяют достигнуть плотностей ДЭГ в канале более 10^{13} см^{-2} .

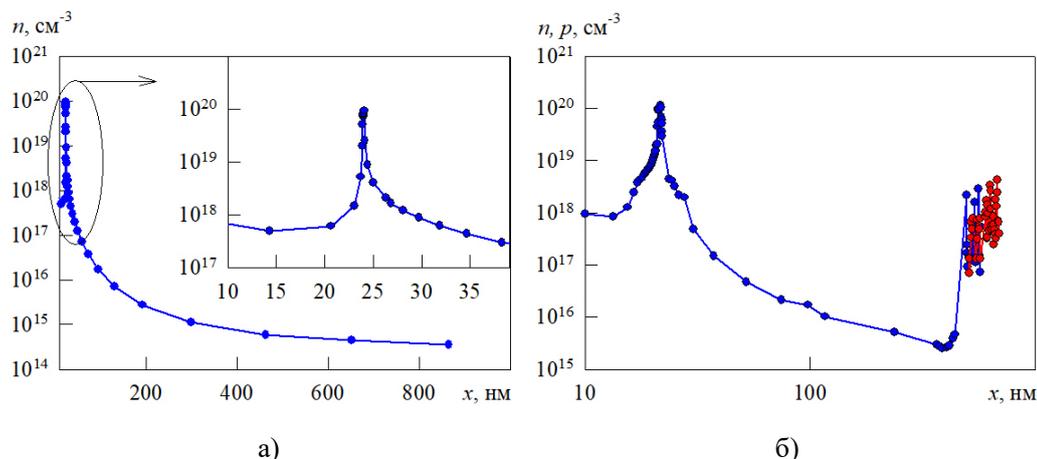


Рисунок 5. Наблюдаемый профиль распределения концентрации ОНЗ по глубине: а) образец *I* типа; б) образец *II* типа

Общепринятым механизмом увеличения крутизны ВАХ в НЕМТ приборах является уменьшение толщины верхних (донорных) слоев [7], в нашем случае (образец *II* типа) – слоя AlGaN. При этом, с уменьшением толщины слоя уменьшается и величина индуцированного поля, а следовательно количество носителей заряда в канале, поэтому для сохранения рабочих характеристик прибора необходимо скомпенсировать величину потерянного заряда. Эта задача решается за счет дополнительного легирования слоя AlGaN.

На рисунке 5б представлен наблюдаемый в ECV-эксперименте концентрационный профиль образца *II* типа. Максимум распределения концентрации ОНЗ равный $1.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ($2.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) расположен на глубине 22 нм, что хорошо согласуется со спецификацией. Отметим, что за счет дополнительного легирования удается увеличить плотность ДЭГ в канале не более чем на 20%, так как в основном все определяется большим встроенным поляризационным полем. Это подтверждается

измерениями - пиковая концентрация в нелегированном GaN dHEMT (*I* тип) равна $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ против $1.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в структуре с дополнительным легированием (*II* тип).

На профиле распределения концентрации образца *II* типа также видно, что начиная с глубины ~ 450 нм происходит резкий рост концентрации. Мы связываем это с глубокими акцепторами, вводимыми для компенсации фоновой концентрации электронов в буферном материале. При чрезмерной компенсации глубокие акцепторы ведут себя как электронные ловушки, поэтому ключевым технологическим решением для этого типа ловушек является оптимизация процесса компенсации. В ECV-измерениях таких структур мы наблюдали спонтанную смену типа проводимости с *n*- на *p*-тип, что является свидетельством высокой степени компенсации основной примеси глубокими акцепторами.

5. Заключение

В работе методом ECV исследовался набор GaN dHEMT гетероструктур. Измерены наблюдаемые профили распределения концентрации ОНЗ по глубине. Рассмотрена природа образования ДЭГ в канале GaN dHEMT, связанная со спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией, а также факторы влияющие на плотность носителей заряда в канале и рабочие характеристики GaN dHEMT гетероструктур. Показано, что метод ECV-профилирования может быть эффективно использован для контроля качества как активных так и буферных слоев GaN dHEMT гетероструктур, а именно: положения гетерограницы AlGa_xN/GaN, плотности ДЭГ в КЯ, изолирующих свойств буферного слоя, наличия или отсутствия паразитного канала проводимости. Выполнен расчет величины встроенного поля, учитывающий спонтанную и пьезоэлектрическую поляризацию для различных составов Al_xGa_{1-x}N. Расчет показал возможность изменения встроенного электрического поля в диапазоне от 0 до 10 МВ/см при нулевом угле ориентации слоя Al_xGa_{1-x}N относительно плоскости (0001). Экспериментально определенная плотность ДЭГ составила $1.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что в пределах погрешности континуального приближения теории упругости близко соответствует эксперименту ($2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$).

Список литературы

1. Pejovic M.M. Different types of field-effect transistors – Theory and Appl. Rijeka: InTech, 2017.
2. Zubkov V.I. et al. Nondestructive diagnostics of nanoheterostructures with InGa_xN/GaN multiple quantum wells by thermal admittance spectroscopy // Inorganic Materials. – 2011. – Т. 47. – №. 14. – С. 1574–1578.
3. Deen D.A. et al. Impact of barrier thickness on transistor performance in AlN/GaN high electron mobility transistors grown on free-standing GaN substrates // Appl. Phys. Lett. – 2014. – Т. 105. – №. 18. – С. 093503.
4. Romanov A.E. et al. Strain-induced polarization in wurtzite III-nitride semipolar layers // J. Appl. Phys. – 2006. – Т. 100. – №. 2. – С. 023522–023522-10.
5. Fujiwara T. et al. Si delta-doped m-Plane AlGa_xN/GaN heterojunction field-effect transistors // J. Appl. Phys. Exp. – 2009. – Т. 2. – №. 6. – С. 061003.
6. Яколев Г.Е. и др. Диагностика полупроводниковых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87. – №. 1. – С. 023522–023522
7. Chikhaoui W. et. al. Deep traps analysis in AlGa_xN/GaN heterostructure transistors // Phys. Status Solidi C. – 2010. – Т. 7. – №. 1. – С. 92–95.