УДК 621.315.592

Г. Е. Яковлев, В. И. Зубков
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

# Электрохимическое вольт-фарадное профилирование арсенид- и нитридгаллиевых HEMT-гетероструктур

*Дан краткий обзор принципа работы и особенностей возникновения двумерного электронного газа (2DEG) в арсенид- и нитридгаллиевых транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT). Приведены основные области применения современных HEMT. Представлена краткая история создания и основные разновидности структур, лежащих в основе таких приборов. Особое внимание уделяется объяснению возникновения проводящего канала вследствие поляризационных эффектов, имеющих место в нитридных структурах. Также приведено описание современного эффективного метода диагностики концентрации основных носителей заряда в HEMT-структурах – электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV). Методом ECV исследовались полупроводниковые HEMT-гетероструктуры на базе AlGaAs/InGaAs/GaAs и AlGaN/GaN. Определены профили концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктур, плотность двумерного электронного газа в квантовой яме (КЯ). Проведен анализ и сравнение заполнения КЯ носителями заряда в зависимости от типа легирования эмиттерного слоя и механизма образования 2DEG-канала.*

**Электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, pHEMT, дельта-легирование, HEMT, GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs, GaN, GaN/AlGaN, 2DEG**

В настоящее время транзисторы HEMT (High Electron Mobility Transistor) относятся к самым быстродействующим активным элементам микро- и наноэлектроники. Регулярно публикуются сведения о все новых рекордных результатах, связанных с совершенствованием технологии и использованием новых материалов рабочей области, таких как GaN и InP [1]. Постоянно расширяется круг областей использования таких приборов, сегодня это уже не только широкополосная связь и приборы специального назначения [2]. Так, например, было замечено, что 2DEG-канал, расположенный вблизи поверхности структуры, очень чувствителен к адсорбированию химических веществ. Это привело к разработке различных HEMT-датчиков с высокой избирательностью и чувствительностью [3]. В частности, AlGaN/GaN HEMT с затвором, выполненным из золота, могут быть использованы в качестве детектора молекул ДНК. Ток стока-истока таких HEMT уменьшается на 115 мкА при появлении на поверхности ДНК, совпадающей с искомой [4]. Похожий принцип используется и для детектирования различных белков, однако в этом случае ток изменяется на 4 мкА [4]. В последнее время набирает популярность идея использования HEMT с $Sc_2O_3$ в качестве подзатворного диэлектрика. Такие HEMT показывают линейное изменение тока значением 37 мкА/pH в диапазоне pH = 3…10 с разрешением <0.1 pH. Результаты показывают, что HEMT могут применяться для мониторинга изменения pH раствора между 7 и 8, представляющего особый интерес для анализа крови [3].

Полупроводниковые гетероструктуры для современных HEMT-приборов представляют собой набор эпитаксиальных слоев из неоднородно легированных материалов различного состава. Совершенствование таких приборов с целью увеличения рабочих частот и токов неуклонно приводит к ужесточению требований к точности воспроизводства последовательности слоев, их состава и степени легирования. Кроме того, для

удовлетворения определенных приборных требований возникает необходимость создания резких скачков концентрации примеси, в т. ч. за счет использования дельта-легирования. Наряду с этим в HEMT особенно важно соблюдать баланс между концентрацией примеси в эмиттерном слое, определяющем концентрацию двумерного электронного газа (2DEG) в канале, и толщиной нелегированного слоя, определяющего подвижность носителей заряда и быстродействие прибора [5]. В противном случае существует вероятность шунтирования канала. Все это требует тщательного контроля параметров гетероструктур на различных стадиях технологического процесса. С этой точки зрения особенно важно контролировать распределение примеси и основных носителей заряда (ОНЗ) [6].

Метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV) позволяет получить информацию как о распределении примеси, так и о концентрации свободных носителей заряда. Метод ECV входит в стандарты Международной ассоциации поставщиков полупроводниковой промышленности SEMI и успешно применяется для исследования различных полупроводниковых гетероструктур. Измерение однородно легированных полупроводниковых структур ECV-методом хорошо отработано и представляет собой достаточно рутинную задачу. В то же время при ECV-измерениях современных многослойных HEMT-структур, в т. ч. с дельта-слоями, оказывается необходим тщательный подбор параметров травления и выбор рабочей точки измерения [7], [8].

Основной целью работы являлось изучение особенностей пространственного распределения ОНЗ арсенид- и нитридгаллиевых HEMT-гетероструктур в зависимости от типа легирования и механизма образования 2DEG-канала.

**Принцип работы и особенности GaAs и GaN HEMT.** Изобретение HEMT приписывается Такаши Мимуре из компании «Fujitsu», однако не менее важной для создания такого класса приборов послужила работа Раймонда Дингла с модуляционно-легированными гетероструктурами для уменьшения рассеяния на ионизирующих примесях [9]. Мимура был впечатлен достижениями Дингла и его коллег, связанными с аккумуляцией носителей заряда в нелегированных GaAs потенциальных ямах. Вскоре он придумал идею использования односторонне легированного AlGaAs/GaAs-гетероперехода для полевого управления накоплением электронов на границе раздела. Мимура возглавил группу ученых, которая впервые выпустила работающий HEMT-прибор в конце 1980 г. [10]. На рис. 1 представлено схематическое изображение зонной диаграммы первого HEMT [11]. Вскоре в ведущих лабораториях по всему миру стали появляться различные модификации таких приборов [12]–[14].

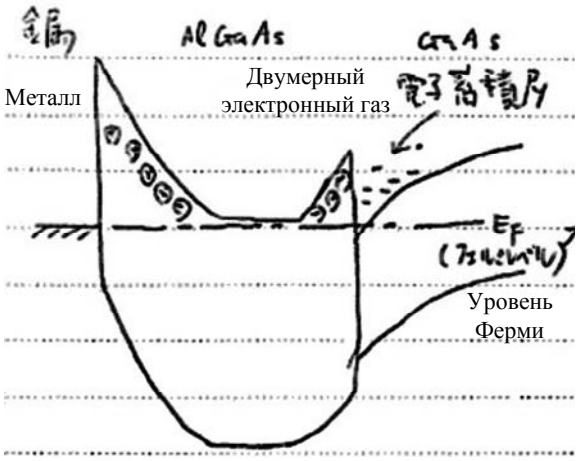



*Рис. 1*

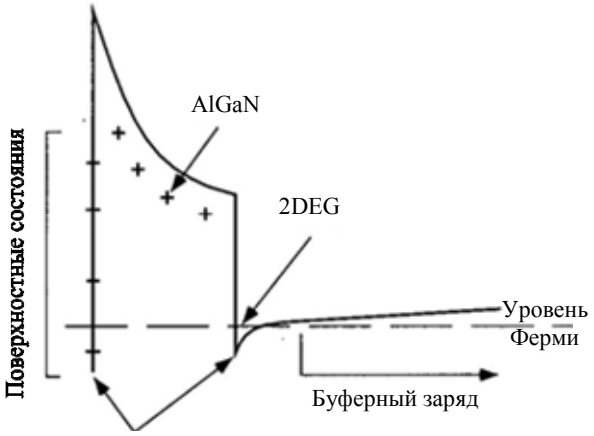
За почти 40 лет произошло существенное усложнение дизайна HEMT-структур, однако принцип действия не претерпел изменений. Как видно из рис. 1, HEMT-прибор представляет собой, по существу, гетеропереход, образованный полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны. При образовании гетероперехода зона проводимости и валентная зона всей структуры изгибаются, образуя непрерывный уровень. Из-за легирования атомами-донорами (или из-за поляризационного заряда в GaN HEMT) широкозонный материал имеет избыточные электроны в зоне проводимости. При этом узкозонный материал имеет свободные состояния с более низкой энергией, поэтому электроны будут диффундировать из широкозонного в соседний узкозонный материал. Таким образом, из-за движения электронов возникнет изгиб потенциала, при этом между двумя материалами будет индуцировано электрическое поле. Индуцированное электрическое поле, в свою очередь, обеспечит дрейф электронов обратно в зону проводимости широкозонного материала. Процессы дрейфа и диффузии будут продолжаться, пока не уравновесят друг друга.

Следует отметить, что полупроводник с меньшей шириной запрещенной зоны не легирован, т. е. не имеет атомов-доноров, вызывающих рассеяние, и, следовательно, обеспечивает высокую подвижность носителей заряда (2DEG) вдоль образованного на гетерогранице GaAs/AlGaAs-канала.

Для уменьшения кулоновского рассеяния в качестве спейсерного слоя используется тонкий слой нелегированного AlGaAs. В настоящее время из-за больших значений ширины запрещенной зоны почти всегда используется гетеропереход AlGaAs/InGaAs. Слой InGaAs при этом является напряженным, что привело к созданию нового направления – псевдоморфных HEMT или pHEMT [15].

С недавнего времени HEMT начинают заполнять еще и нишу высокотемпературных и высокомощных приборов. В этом режиме большее значение ширины запрещенной зоны и более высокое напряжение пробоя имеют приоритет над высоким значением подвижности носителей [16]. Твердые растворы на основе нитрида галлия позволяют достичь большей мощности на единицу длины из-за более высокой плотности 2DEG-носителей. Нитрид галлия обладает более высоким импедансом по сравнению с арсенидом галлия, что упрощает согласование HEMT с другими участками схемы. А высокое значение напряжение пробоя, в свою очередь, исключает необходимость преобразования напряжения, что обычно требуется при использовании HEMT на основе GaAs в коммерческих системах, таких как беспроводные базовые станции [17]. К тому же большое значение ширины запрещенной зоны позволяет работать с высокой температурой и снижает стоимость систем охлаждения.

Принцип работы GaN HEMT идентичен GaAs HEMT, однако имеет другую природу образования проводящего канала, связанную со спонтанной поляризацией GaN [2]. Индуцированный поляризацией заряд на гетерогранице AlGaN/GaN позволяет достигнуть чрезвычайно высоких плотностей электронов (~(1…2) $10^{13}$ см$^{-2}$) без каких-либо негативных эффектов [18], другими словами, GaN HEMT не требует дополнительного легирования. На рис. 2 показана зонная диаграмма обобщенной GaN HEMT-структуры с резкой гетерограницей и гранью [0001] на свободной поверхности. Величина 2DEG является функцией величины поверхностного барьера, толщины слоя AlGaN, а также величины связанного положительного заряда на границе раздела. Все составляющие пространственного заряда GaN HEMT, а именно отрицательный заряд, обусловленный электронами в двумерном электронном газе ($-n_S q$); поляризационный заряд ($\pm\sigma_{AlGaN}$ и $\pm\sigma_{GaN}$); интегральный двумерный заряд ионизованных доноров в AlGaN, в случае дополнительного легирования ($+\sigma_{dop}$); заряд ионизованных поверхностных состояний ($+\sigma_S$) и буферный заряд ($\sigma_{buf}$), приведены на рис. 3 [19]. Отметим, что здесь не делается различий между пьезоэлектрическими (связанными с деформацией) и спонтанными (связанными с составом) компонентами поляризационного заряда. Эти две составляющие сравнимы в случае когерентно-напряженного AlGaN и могут быть просто сложены друг с другом [20].




Поляризационные заряды

*Рис. 2*

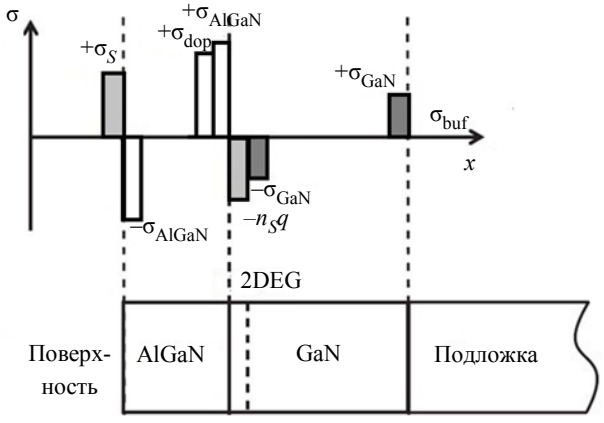



*Рис. 3*

Из условия электронейтральности структуры в отсутствие внешнего поля, дипольной природы поляризационных зарядов и предположений, что буферный заряд в хорошо спроектированном полевом транзисторе должен быть минимален и что уровень Ферми расположен вблизи края зоны проводимости GaN, можно получить следующее уравнение баланса:

$$\sigma_S + \sigma_{dop} - n_S q = 0. \qquad (1)$$

В (1) указывается, что число электронов в 2DEG равно числу ионизованных доноров в AlGaN плюс (минус) число ионизованных донорных (акцепторных) состояний на поверхности.

Для действительно нелегированного барьерного слоя следует, что любые 2DEG-электроны обусловлены донороподобными поверхностными состояниями. Следует также отметить, что положительный поляризационный заряд на границе раздела AlGaN/GaN непосредственно не отвечает за образование 2DEG, только за аккумуляцию электронов в этой области.

**Исследуемые образцы HEMT-гетероструктур.** В работе авторами исследовался набор трех типов HEMT-гетероструктур, выращенных методом МПЭ в АО «Светлана-Рост». Послоевая структура исследованных образцов представлена на рис. 4. Образцы № 1 (рис. 4, *а*) и 2 (рис. 4, *б*) представляют собой односторонне легированные GaAs pHEMT-гетероструктуры. Образцы различаются типом эмиттерного слоя (образец № 1) имеет классический объемно легированный эмиттер, в образце № 2 используется дельта-легирующий слой. Несимметричная квантовая яма (КЯ) $Al_{0.22}Ga_{0.78}As/In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$ этих образцов имела ширину 14 нм и располагалась на глубине 39 и 31.5 нм соответственно. При этом образец № 1 имел достаточно толстый эмиттерный слой. Образец № 3 имел стандартную для GaN HEMT-приборов конфигурацию слоев (рис. 4, *в*). Квантовая яма в таких структурах образуется за счет разрыва зон на границе раздела AlGaN/GaN, при этом 2DEG-канал располагается со стороны слоя GaN. Поверхностный эмиттерный слой AlGaN имел толщину 22 нм. По обеим сторонам эмиттерного слоя располагались тонкие (1…2 нм) слои GaN и AlN, необходимые для улучшения структурных свойств и шероховатости. В частности, наличие слоя AlN приводит к улучшению качества интерфейса GaN/AlGaN и заметному увеличению подвижности 2DEG соответственно.

**Методика ECV-измерений.** Классический метод вольт-фарадного профилирования широко используется для характеризации полупроводниковых материалов и структур. В CV-методе для построения профиля концентрации необходимо измерять емкость в диапазоне напряжений смещения. В электрохимическом вольт-фарадном профилировании концентрационный профиль регистрируется за счет смещения границы раздела «электролит–полупроводник» в процессе травления, при этом напряжение смещения остается постоянным [21]. В ECV, как и в CV-методе, концентрация свободных носителей заряда рассчитывается из производной измеренной емкости по напряжению:

$$n(x_d) = -\frac{C^3}{q\varepsilon\varepsilon_0 S^2}\left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1}, \qquad (2)$$

где $q$ – элементарный заряд; $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_0$ – электрическая постоянная; $S$ – площадь контакта «электролит–образец». Геометрическое положение границы области объемного заряда, на которой измеряется концентрация, определяется как

$$x_d = \varepsilon\varepsilon_0 S^2 / C. \qquad (3)$$

В случае электрохимического вольт-фарадного профилирования $dC/dV$ обычно измеряется модуляционным методом, в котором тестовый сигнал небольшой амплитуды накладывается на низкочастотный сигнал, задающий напряжение смещения образца (в большинстве случаев это напряжение остается фиксированным на протяжении всего измерения). В обычных CV-измерениях эта производная рассчитывается путем численного дифференцирования измеренной вольт-фарадной характеристики (ВФХ).

Глубина травления в ECV-методе определяется по количеству удаленного вещества, полученного из электрохимического закона Фарадея:

$$x_r = \frac{M}{zF\rho A}\int_0^{t_0} i(t)\,dt, \qquad (4)$$

где $M$ – молярная масса; $z$ – валентное число ионов вещества (число электронов, необходимое для растворения одной молекулы); $F$ – постоянная Фарадея; $\rho$ – удельная плотность материала.

| GaAs контактный слой |
|---|
| $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ стопорный слой |
| GaAs выглаживающий слой |
| $Al_{0.22}Ga_{0.78}As$ эмиттерный слой |
| $In_{0.22}Ga_{0.78}As$ КЯ |
| GaAs буферный слой |
| GaAs-подложка |

*а*

| GaAs контактный слой |
|---|
| $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ стопорный слой |
| GaAs выглаживающий слой |
| δ-$Al_{0.22}Ga_{0.78}As$ эмиттерный слой |
| $In_{0.22}Ga_{0.78}As$ КЯ |
| GaAs буферный слой |
| GaAs-подложка |

*б*

| GaN выглаживающий слой |
|---|
| $Al_{0.33}Ga_{0.67}N$ эмиттерный слой |
| AlN выглаживающий слой |
| GaN канальный слой |
| GaN буферный слой |
| $Al_2O_3$-подложка |

*в*

*Рис. 4*

Концентрация ОНЗ по глубине структуры измерялась при комнатной температуре с использованием установки электрохимического профилирования ECVPro (Nanometrics). Для исследования арсенидгаллиевых структур в качестве электролита был выбран раствор 0.1M Tiron [22], для нитридгаллиевых структур использовался раствор 0.2M $H_2SO_4$ [23]. Площадь электролитического выпрямляющего контакта составляла 0.1 см$^2$. Ток травления поддерживался на уровне 0.5 мА/см$^2$. Шаг травления составлял 1 нм, травление GaN HEMT осуществлялось в импульсном режиме [24]. Напряжение смещения $V$ в ECV-измерениях выбиралось на линейном участке ВФХ в координатах Мотта–Шотки ($1/C^2$ от $V$) и составляло −0.2 В для GaAs-структур и 0.3 В – для GaN-структур. Следует заметить, что смещения указаны относительно платинового электрода и использование электролита другой концентрации приведет к изменению оптимальных параметров измерений. Частота зондирующего сигнала, используемого для измерения емкости $C$, для арсенидных и нитридных структур составляла 300 и 100 Гц соответственно. В ряде экспериментов для измерения ВФХ использовался *LCR*-измеритель Agilent E4980A, который подключался к электрохимической ячейке установки ECVPro через блок реле [25].

Послоевая структура HEMT состоит из множества слоев различных материалов, электрохимическое травление которых происходит с разной скоростью. Поэтому в процессе ECV-травления важно проверять количество стравленного материала на разных этапах измерения. Использование атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver NEXT (NT-MDT) для контроля глубины и качества травления [26] обеспечило в работе выбор оптимальных параметров измерений.

**Экспериментальные результаты и обсуждение.** ***Исследование GaAs HEMT.*** В данной части работы представлены результаты измерения профилей распределения основных носителей заряда по глубине арсенидгаллиевых HEMT-структур. На рис. 5 приведен измеренный в нескольких точках (4 кривые на рис. 5) профиль распределения концентрации ОНЗ образца № 1 с объемным легированием КЯ. Как видно из рисунка, полученные данные показывают высокую воспроизводимость. На измеренном профиле имеется два концентрационных пика. Первый пик, расположенный на глубине 30 нм, соответствует сильнолегированной (эмиттерной) области, второй на глубине 44 нм – отклику от КЯ. Концентрация ОНЗ эмиттерного слоя ровна $1.5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, концентрация в КЯ – $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, что соответствует концентрации двумерного электронного газа $1.6 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$. Полученные результаты достаточно хорошо коррелируют с данными холловских измерений, а положение пиков соответствует областям локализации носителей заряда, указанным в спецификации структур. При этом наблюдается легкое рассогласование (менее 5 нм) относительно положения концентрационного пика, связанного с КЯ, что объясняется ее перекосом [27]. Погрешность определения концентрации составляет единицы нанометров. Важно отметить, что пик, соответствующий эмиттерному слою, в подобных структурах удается зарегистрировать только методом ECV. При измерениях классическим CV-методом наблюдается только один пик на концентрационном профиле, аттрибутируемый области КЯ (2DEG-канала) [28]. Наличие двух пиков объясняется меньшей величиной барьера Шотки в случае электролитического контакта [29].

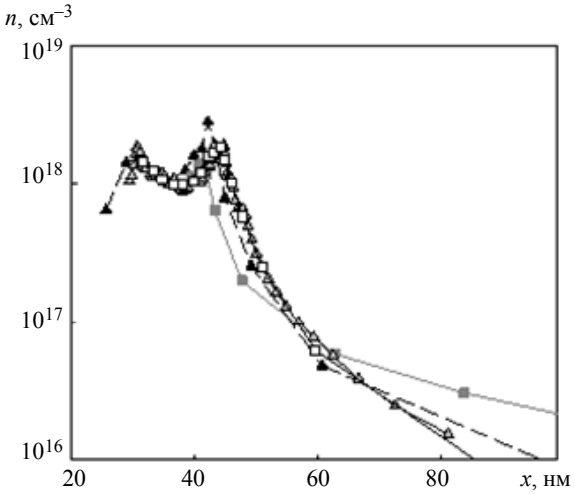



*Рис. 5*

На рис. 6 приведен измеренный в нескольких точках профиль распределения концентрации основных носителей заряда образца № 2 с дельта-легированием КЯ. Как и в предыдущем случае, на концентрационном профиле имеется два пика, соответствующих в данном случае дельта-слою (29 нм) и квантовой яме (37 нм). Пиковая концентрация ОНЗ в дельта-слое имеет значение $3 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, концентрация в КЯ – $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ ($1.6 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$).

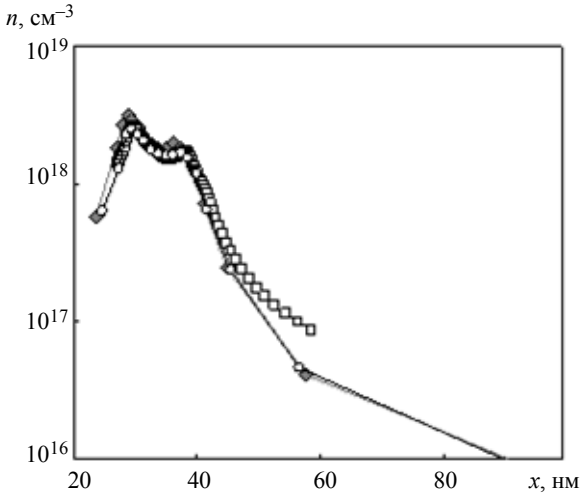



*Рис. 6*

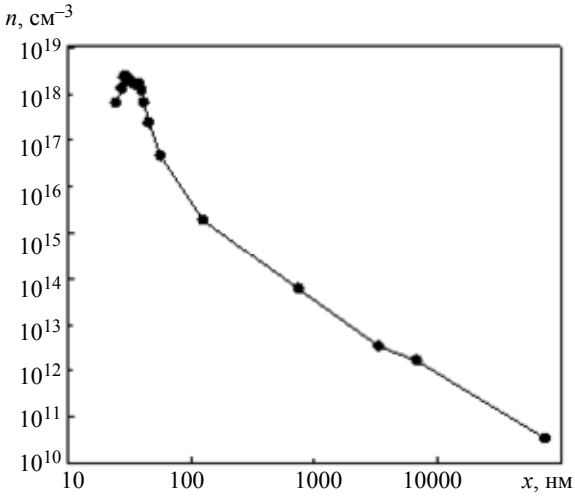



*Рис. 7*

Сравнивая наблюдаемые профили распределения концентрации ОНЗ образцов № 1 и 2, можно заметить, что для рассматриваемой конфигурации слоев и уровней легирования с точки зрения вида полученных профилей и уровня концентрации носителей в КЯ (канале) нет явного преимущества использования дельта-легированного эмиттера. Измерения данных образцов методом Холла также показывают одинаковую концентрацию двумерных носителей заряда. Однако меньшая толщина верхних слоев в случае дизайна структуры с дельта-слоем позволяет получить большее значение крутизны и, соответственно, лучшую управляемость конечного прибора при тех же значениях рабочего тока и мощности. Это также способствует уменьшению напряжения отсечки.

Измеренный профиль концентрации ОНЗ образца № 2 в более широком диапазоне по координате (до 100 мкм) представлен на рис. 7. Как видно из рисунка, после отклика от КЯ наблюдаемое значение концентрации монотонно убывает согласно дебаевскому размытию [30] при переходе к полуизолирующей подложке с концентрацией по данным метода ECV на уровне ~$10^{10}$ см$^{-3}$. Отметим, что эти измерения являются рекордным достижением по измерению минимальной концентрации ОНЗ в полупроводнике.

***Исследование GaN HEMT.*** На рис. 8 приведен измеренный в нескольких точках профиль распределения концентрации основных носителей заряда образца № 3. Данный образец представляет собой GaN HEMT-структуру и не предусматривает наличия областей дополнительного легирования, как ранее было упомянуто в разделе, посвященном описанию принципа работы таких приборов. Поэтому в отличие от предыдущих образцов можно наблюдать лишь один пик на концентрационном профиле. При этом из-за поляризационных эффектов, а также большего разрыва зоны проводимости по сравнению с GaAs пик на концентрационном профиле имеет существенно большую амплитуду. Так, максимум в 1.2 · $10^{20}$ см$^{-3}$ (2 · $10^{13}$ см$^{-2}$) располагается на глубине 22 нм. Таким образом, даже без использования легирования GaN HEMT позволяют достигнуть плотностей 2DEG более $10^{13}$ см$^{-2}$, демонстрируя при этом как уникальные частотные, так и мощностные показатели.

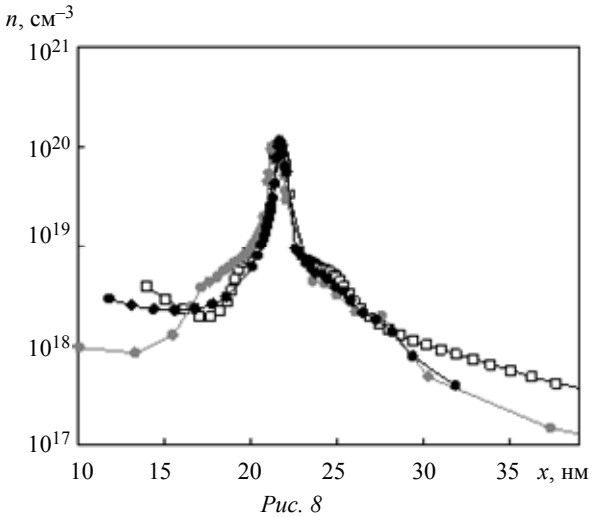



*Рис. 8*

Для увеличения крутизны нитридных HEMT-приборов используют аналогичный GaAs HEMT-подход, а именно уменьшение толщин верхних (эмиттерных) слоев, в данном случае – слоя AlGaN. При этом с уменьшением толщины слоя уменьшается и величина индуцированного поля, а следовательно количество носителей заряда в канале. В этом случае для сохранения рабочих характеристик прибора необходимо скомпенсиро-

вать величину потерянного из-за уменьшения толщины слоя заряда. Эта задача решается посредством искусственного ввода дополнительного заряда, т. е. за счет дополнительного легирования слоя AlGaN примесью кремния. Таким образом, общий принцип работы, а также подход к решению проблемы оптимизации рабочих характеристик GaAs и GAN HEMT схож, а различие данных приборов, по существу, обусловлено лишь природой образования 2DEG-канала. Сравнение плотностей двумерного электронного газа измеренных образцов приведены в таблице.

| Параметр | Образец | | |
|---|---|---|---|
| | № 1 | № 2 | № 3 |
| Пиковое значение концентрационного пика от эмиттерного слоя, $см^{-3}$ | $1.5 \cdot 10^{18}$ | $3 \cdot 10^{18}$ | – |
| Пиковое значение концентрационного пика от КЯ, $см^{-3}$ | $2 \cdot 10^{18}$ | $2 \cdot 10^{18}$ | $1.2 \cdot 10^{20}$ |
| Плотность 2DEG в канале, $см^{-2}$ | $1.6 \cdot 10^{12}$ | $1.6 \cdot 10^{12}$ | $2 \cdot 10^{13}$ |

Методом ECV измерен набор GaAs- и GaN-гетероструктур. Получены профили распределения свободных носителей заряда, оценены положение сильно легированного эмиттерного слоя и концентрация ОНЗ в КЯ (2DEG-канале). Полученные данные показывают высокую повторяемость и хорошо коррелируют с измерениями концентрации 2DEG в канале методом Холла.

Сравнение наблюдаемых профилей распределения концентрации ОНЗ GaAs pHEMT-структур с различным типом легирования эмиттерного слоя (объемное и дельта-легирование) показало идентичные уровни заполнения КЯ носителями заряда. Несмотря на кажущееся отсутствие преимущества использования дельта-легирования эмиттера, меньшая толщина верхних слоев в этом случае позволяет получить большее значение крутизны и, соответственно, лучшую управляемость конечного прибора при тех же значениях рабочего тока и мощности. Это также способствует уменьшению напряжения отсечки. Для одной из структур зафиксировано рекордное значение минимально измеренной концентрации ОНЗ в полупроводнике, она составила $10^{10}$ $см^{-3}$ (полуизолирующая подложка).

GaN HEMT-структуры не предусматривают наличия областей дополнительного легирования. Несмотря на это, из-за поляризационных эффектов, а также большего разрыва зоны проводимости по сравнению с GaAs измеренная плотность 2DEG в канале на порядок превосходит аналогичный показатель GaAs pHEMT и составляет $2 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$.

Работа выполнена в Ресурсном центре физики твердого тела СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при финансовой поддержке проекта «Организация и проведение конкурса научно-исследовательских проектов студентов, аспирантов и молодых научно-педагогических работников» Мероприятия М.5.1.2 «Повышение публикационной активности научных и научно-педагогических работников» Программы повышения конкурентоспособности СПбГЭТУ «ЛЭТИ» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pejovic Momcilo M., Pejovic Milic M. Different Types of Field-Effect Transistors – Theory and Applications. Rijeka: InTech, 2017. 190 p.

2. Xiao-Guang H., De-Gang Z., De-Sheng J. Formation of two-dimensional electron gas at AlGaN/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression // Chin. Phys. B. 2015. Vol. 24, № 6. P. 067301-1-5.

3. Serra P. Biosensors for Health, Environment and Biosecurity. Rijeka: InTech, 2011. 550 p.

4. Kang B. S. Fabrication and Characterization of Compound Semiconductor Sensors for Pressure, Gas, Chemical, And Biomaterial Sensing: Doctoral dissertation. ... University of Florida, 2005. 152 p.

5. Si-delta doping and spacer thickness effects on the electronic properties in Si-delta-doped AlGaAs/GaAs HEMT structures / M. Daoudi, I. Dhifallah, A. Ouerghi, R. Chtourou // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 51, № 4. P. 497–505.

6. Зубков В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: Элмор, 2007. 162 с.

7. Simulation and characterization of AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT structures with quantum wells for SHF integrated circuits / A. Dudin, I. Kogan, G. Yakovlev, M. Mironova, I. Schukov, D. Frolov, V. Zubkov, G. Glinskii // Proc. of the 11th Intern. Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo). St. Petersburg: IEEE, 2017. P. 108–111.

8. Yakovlev G., Frolov D., Zubkov V. Investigation of delta-doped pHEMT InGaAs/GaAs/AlGaAs structures by the electrochemical capacitance-voltage technique // J. Phys. Conf. Ser. 2016. № 690. P. 012015–1-4.

9. Dingle R. New high-speed III-V devices for integrated circuits // IEEE Trans. Electron. Devices. 1994. Vol. 31, № 11. P. 1662–1667.

10. A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/AlGaAs heterojunctions / T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, K. Nanbu // Jpn. J. Appl. Phys. 1980. № 19. P. L225–L227.

11. Mimura T. Development of High Electron Mobility Transistor // Jpn. J. Appl. Phys. 2005 Vol. 44, № 12. P. 8263–8268.

12. Low noise normally on and normally off two-dimensional electron gas field-effect transistors / M. Laviron, D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, J. Chaplart, N. T. Linh // Appl. Phys. Lett. 1982. № 40. P. 530–532.

13. Modulation-doped (Al,Ga)As/GaAs FETs with high transconductance and electron velocity / S. L. Su, R. Fischer, T. J. Drummond, W. G. Lyons, R. E. Thorne, W. Kopp, H. Morkoc // Electron. Lett. 1982. № 18. P. 794–796.

14. Material and device considerations for selectively doped heterojunction transistors / J. V. DiLorenzo, R. Dingle, M. Feuer, A. C. Gossard, R. Hendel, J. C. M. Hwang, A. Kastalsky, V. G. Keramidas, R. A. Kiehl, P. o'Connor // IEEE IEDM Tech. Dig. 1982. № 82. P. 578–581.

15. High transconductance InGaAs/AlGaAs pseudomorphic modulation-doped field-effect transistors / A. Ketterson, M. Moloney, W. T. Masselink, C. K. Peng, J. Klem, R. Fischer, W. Kopp, H. Morkoc // IEEE Electron. Device Lett. 1985. № 6. P. 628–630.

16. Breakdown Voltage Enhancement of AlGaN/GaN High-Electron-Mobility Transistors via Selective-Area Growth for Ohmic Contacts over Ion Implantation / L. Pang, H. C. Seo, P. Chapman, I. Adesida, K. Kim // J. Electron. Mater. 2010. № 39. P. 499–503.

17. Mishira U. K., Parikh P., Wu Y. F. AlGaN/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications // Proc. of the IEEE. 2002. № 90. P. 1022–1031.

18. Electron mobility in modulation-doped AlGaN–GaN heterostructures / R. Gaska, M. S. Shur, A. D. Bykhovski, A. O. Orlov, G. L. Snider // Appl. Phys. Lett. 1999. № 74. P. 287–289.

19. Polarization effects, surface states and the source of electrons in AlGaN/GaN heterostructure field effect transistors / J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, U. K. Mishra // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77, № 2. P. 250–252.

20. Bernardini F., Fiorentini V., Vanderbilt D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides // Phys. Rev. B. 1997. № 56. P. R10024–R10027.

21. Ambridge T., Faktor M. An automatic carrier concentration profile plotter using an electrochemical technique // J. Appl. Electrochem. 1975. № 5. P. 319–328.

22. Shestakova L., Yakovlev G., Zubkov V. Electrochemical capacitance–voltage measurements and modeling of GaAs nanostructures with delta-doped layers // J. Phys. Conf. Ser. 2017. № 816. P. 012022–1-4.

23. Nonuniformity of electron density in In-rich InGaN films deduced from electrolyte capacitance-voltage profiling / A. Knübel, V. M. Polyakov, L. Kirste, R. Aidam // Appl. Phys. Lett. 2010. № 96. P. 082106–1-3.

24. Wolff T., Rapp M., Rotter T. Electrochemical Etching and CV-Profiling of GaN // Phys. Status Solidi A. 2004. № 201. P. 2067–2075.

25. Frolov D. S., Zubkov V. I. Frequency dispersion of capacitance–voltage characteristics in wide bandgap semiconductor-electrolyte junctions // Semicond. Sci. Technol. 2016. № 31. P. 125013–1-6.

26. Диагностика морфологии и электронного спектра pHEMT-гетероструктур / Д. С. Фролов, Г. Е. Яковлев, В. И. Зубков, А. Л. Дудин, А. В. Соломникова, Е. С. Кунашик // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 2. С. 6–11.

27. Электрофизические и структурные свойства двусторонне delta-легированных pHEMT-гетероструктур на основе AlGaAs/InGaAs/AlGaAs / И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, Е. А. Климов, В. Г. Мокеров, С. С. Широков, Р. М. Имамов, И. А. Субботин // ФТП. 2008. № 42. С. 1102–1109.

28. Теоретические и экспериментальные исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик HEMT-структур и полевых транзисторов / Е. А. Тарасова, Е. С. Оболенская, А. В. Хананова, С. В. Оболенский, В. Е. Земляков, В. И. Егоркин, А. В. Неженцев, А. В. Сахаров, А. Ф. Цацульников, В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, Г. В. Медведев // ФТП. 2016. № 50. С. 1599–1604.

29. Исследование pHEMT-структур с квантовыми ямами AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией / А. Л. Дудин, М. С. Миронова, Г. Е. Яковлев, Д. С. Фролов, И. В. Коган, И. В. Шуков, В. И. Зубков, Г. Ф. Глинский // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 78–84.

30. Исследование ионно-имплантированных фоточувствительных кремниевых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования / Г. Е. Яковлев, Д. С. Фролов, А. В. Зубкова, Е. Е. Левина, В. И. Зубков, А. В. Соломонов, О. К. Стерлядкин, С. А. Сорокин // ФТП. 2016. № 50. С 324–330.

G. E. Yakovlev, V. I. Zubkov
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

## ELECTROCHEMICAL CAPACITANCE-VOLTAGE PROFILING OF GALLIUM ARSENIDE AND GALLIUM NITRIDE HEMT HETEROSTRUCTURES

*A brief review of the operation principle and features of 2D electron gas (2DEG) appearance in arsenide- and nitride gallium high electron mobility transistors (HEMT) is given. The main application fields of modern HEMT are shown. A brief history of development and the main types of structures underlying such devices are presented. Particular attention is paid to the explanation of the conducting channel origin due to the polarization effects taking place in the nitride structures. A modern effective method of diagnostic the concentration of free charge carriers in HEMT structures (electrochemical capacitance-voltage (ECV) profiling) is also described. AlGaAs/InGaAs/GaAs and AlGaN/GaN HEMT heterostructures were investigated by means of ECV technique. The free charge carriers depth profiles and 2DEG density in quantum wells (QW) were obtained. The analysis and comparison of QW filling in case of different doping mechanism of emitter and 2DEG origin were done.*

**Electrochemical capacitance-voltage profiling, ECV, pHEMT, delta-doping, HEMT, GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs, GaN, GaN/AlGaN, 2DEG**