

# Гетероструктуры на основе GaN в СВЧ-электронике: обзор работ

А. Туркин, к. ф. - м. н.<sup>1</sup>

УДК 621.382 | ВАК 05.27.01

Полупроводниковые приборы на основе нитридов элементов III группы Периодической системы все шире применяются в электронике. Гетероструктуры на базе нитрида галлия (GaN) и его твердых растворов обладают физическими свойствами, которые обеспечивают приборам на их основе оптические, мощностные и частотные характеристики, позволяющие использовать их в разных областях, в числе наиболее перспективных – оптоэлектроника, силовая электроника и сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника. В настоящей статье приводится обзор работ по применению GaN-гетероструктур и приборов на их основе в СВЧ-электронике.

**О** GaN как об одном из самых перспективных оптоэлектронных материалов заговорили приблизительно в середине 90-х годов XX века. Сначала его рассматривали как основу для полупроводниковой оптоэлектроники, а именно для разработки светодиодов сине-зеленой области видимого диапазона и ближнего ультрафиолетового диапазона, активных сред лазерных диодов и др. [1]. В 2014 году японским ученым была присуждена Нобелевская премии за светодиодные исследования [2]. Затем структуры на основе GaN и его твердых растворов стали использовать для разработки компонентной базы силовой и СВЧ-электроники – диодов Шоттки и транзисторов. В последние годы наблюдается смещение акцента к применению GaN именно в этих областях. Данная тенденция прослеживается и на многих конференциях по GaN. По светодиодному направлению большое количество докладов представляли до 2015 года, затем их стали вытеснять выступления, посвященные СВЧ-направлению.

Транзисторы на основе GaN-гетероструктур перспективны для применения в передающих СВЧ-устройствах, что обусловлено рядом преимуществ широкозонных структур на основе GaN перед структурами на основе узкозонных полупроводниковых материалов [3]. Основное достоинство транзисторов на базе GaN – высокая удельная мощность [3], благодаря чему можно существенно упростить топологию интегральных схем усилителя мощности, повысить КПД, уменьшить массу и габариты. Развитие данной технологии на основе GaN в последние несколько лет привело к практическим результатам и освоению мощных СВЧ-транзисторов,

монолитных интегральных схем в промышленном производстве [4], что актуально в свете концепции импортозамещения в российской экономике в целом и электронике в частности.

В связи с этим развитие исследований GaN-структур для применения в СВЧ-электронике и разработка устройств на их основе идут в России весьма активно. Об этом свидетельствует и достаточно большое число конференций по данной тематике, организованных в последнее время. Рассмотрим работы по применению нитридных структур в СВЧ-электронике, представленные на 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», которая проводилась 1–3 февраля 2017 года в Москве на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова.

Коллектив авторов из Института физики Национальной академии наук Беларуси (г. Минск) исследовал возможность улучшения зародышевого слоя с помощью применения маски из нитрида кремния в гетероструктурах с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), выращенных на новой установке молекулярно-лучевой эпитаксии. Исследования проводились на двух НЕМТ-гетероструктурах, активная область которых состояла из слоя GaN толщиной 150 нм и барьерного слоя  $Al_{0.33}Ga_{0.67}N$  толщиной 25 нм. НЕМТ-гетероструктуры различались условиями роста зародышевого слоя: для первой структуры высокотемпературный зародышевый слой выращивался непосредственно на сапфировой подложке, для второй – на предварительно осажденном слое нитрида кремния, который служил маской, частично закрывающей поверхность подложки.

Результаты исследований спектров фотолюминесценции позволяют авторам сделать вывод об ослаблении упругих напряжений сжатия в слое GaN-структуры, выращенной с использованием маски нитрида кремния,

<sup>1</sup> Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент; ПРОСОФТ, руководитель группы бренд-менеджеров, turkin@prochip.ru.

по сравнению со спектром структуры, выращенной без маски [5]. Вместе с тем для структуры, выращенной с маской, наблюдается незначительное понижение интенсивности фотолюминесценции, что свидетельствует о возможности оптимизации параметров осаждения слоя нитрида кремния.

Таким образом, с использованием установки аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии выращены структуры, которые демонстрируют высокий потенциал как ее самой, так и метода роста, поскольку являются фактически первыми калибровочными образцами, полученными на установке. Также авторами [5] показана возможность осаждения слоя нитрида кремния с использованием легирующего источника кремния для формирования маски на поверхности подложки в целях повышения качества эпитаксиальных слоев.

Теперь остановимся на результатах работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» [6, 7], где создана уникальная для России инфраструктура, позволяющая взяться за решение актуальных научно-технологических задач современной нитридной СВЧ-электроники [6]. Основные тренды развития в нитридной СВЧ-электронике – это повышение рабочих частот, увеличение удельных мощностей и понижение шумов транзисторов в интегральных схемах. Следует подчеркнуть, что сочетание различных ростовых технологий, современного парка оборудования для создания микроэлектронных устройств, а также широкого спектра аналитического оборудования позволит за один-два года разработать не имеющую аналогов в России технологическую платформу для создания монолитных СВЧ интегральных схем, рассчитанных на частотный диапазон до 100 ГГц и выше.

К настоящему времени в НИЦ «Курчатовский институт» разработана уникальная для России технология роста нитридных гетероструктур приборного качества с ультратонкими барьерными слоями до 3–5 нм, необходимых для создания СВЧ монолитных интегральных схем, рассчитанных на диапазон до 100 ГГц и выше. Также там создана технология получения дорасшиваемых контактов к двумерному электронному газу, достигнуты значения удельного сопротивления контактов  $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$  [6]. Кроме того, разработана оригинальная технология, позволяющая создавать транзисторы с расстоянием исток-сток менее 1 мкм. Работы ведутся на основе подложек из сапфира, карбида кремния собственного производства и отечественных эпитаксиальных структур AlGaN / GaN, которые планируется использовать для создания кристаллов усилителей, работающих в частотном диапазоне 92–96 ГГц, для спутниковых систем связи [6].

В работе [7] авторы сообщают о разработанных подходах к выращиванию гетероструктур для GaN HEMT методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии

и о достигнутых с их помощью результатах. Поскольку рост нитридов осуществляется на сильно рассогласованных по параметру решетки и коэффициенту температурного расширения подложках, в структурах возникает высокая плотность дефектов, которые оказывают негативное влияние на электрофизические характеристики двумерного электронного газа. Последнее особенно актуально для тонких барьерных слоев. Таким образом, особенно важно предложить технологические приемы, позволяющие бороться с распространением дефектов и развитием морфологии на всех этапах роста гетероструктур для HEMT. Представленный в работе [7] подход к росту начальных слоев на первом этапе формирования HEMT-гетероструктур заключается в применении специфических условий нитридации и формировании двухслойной пленки AlN с использованием различных ростовых температур. В качестве результата данной работы стоит отметить, что уже была продемонстрирована возможность применения полученных образцов структур в СВЧ-усилителях, рассчитанных на частоты до 100 ГГц [7].

В работе [8], представленной коллективом авторов из НИИ «Полупроводниковых приборов» (г. Томск), исследовались частотные зависимости минимальных значений коэффициента шума, шумового сопротивления и малосигнального коэффициента усиления по мощности гетероэпитаксиальных HEMT-транзисторов на полуизолирующей подложке из карбида кремния (SiC). Результаты исследований шумовых характеристик 5-ваттных AlGaIn / GaN HEMT-транзисторов с Z-затвором Шоттки в частотном диапазоне 1–9 ГГц позволили определить малозумящие режимы работы транзистора [8], а также объяснить аномальное поведение частотной зависимости коэффициента шума, которое заключается в частотной зависимости дополнительного сопротивления, вносимого инжектированными в буферный слой 2D-электронами [8].

Рассмотрим также несколько работ сотрудников НПП «Пульсар» [9, 10]. В [9] представлены результаты измерения теплового сопротивления GaN HEMT по температурной зависимости его вольтамперной характеристики (ВАХ). Исследователи применили весьма простой метод определения статического теплового сопротивления по анализу статических ВАХ GaN HEMT, измеренных при разных температурах. Предложенный подход основан на экспериментально установленном факте: в области насыщения ток стока GaN HEMT линейно зависит от температуры окружающей среды, а также от температуры канала. Измеренное значение теплового сопротивления исследуемого в работе [9] GaN HEMT практически не зависело от напряжения стока. Данный результат имеет достаточно большую практическую важность для разработки HEMT.

Цель работы [10] – проведение комплекса исследований частотных зависимостей вольт-фарадных характеристик (ВФХ) как исходных гетероструктур AlGaN / GaN на подложках SiC, так и кристаллов НЕМТ на их основе для выяснения причин наблюдаемой нестабильности емкости при измерении на низких частотах. Полученные данные сравнивались с результатами исследований методом вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС) [10]. Была показана возможность возникновения отрицательно заряженного слоя в барьерном слое нитридных гетероструктур, появление которого может увеличивать емкость при измерении при низких частотах. Однако, как утверждают авторы [10], эта проблема требует проведения дальнейших исследований, которые могут дать более детальную и точную картину. Предложенная методика подходит для контроля кристаллов в процессе производства НЕМТ.

Не менее интересна работа [11], цель которой заключалась в исследовании влияния облучения  $\gamma$ -квантами на электрические параметры как самих гетероструктур AlGaN / GaN, так и некоторых элементов мощных СВЧ-транзисторов, сформированных на таких гетероструктурах. В работе рассматривались также возможные взаимодействия внесенных облучением изменений с имеющимися несовершенствами гетероструктур. Полученные экспериментальные результаты показывают, что формирование дефектов, образующихся при взаимодействии радиационных дефектов с несовершенствами исходных гетероструктур, может стабилизировать емкостные характеристики при малых дозах гамма-облучения и увеличивать их нестабильность при больших дозах облучения [11].

Результаты более фундаментальных исследований были представлены сотрудниками ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН в работе [12], где приведены экспериментальные данные о влиянии предполагаемой ранее фрактальной природы наноматериала AlGaN / GaN НЕМТ структур [12] на радиационную стойкость и надежность транзисторов. Исследования проводились на НЕМТ-структурах, выращенных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, и транзисторах, собранных из этих структур в ЗАО «Светлана-Электронприбор». Облучение выполнялось протонами, ускоренными на циклотроне ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Образцы НЕМТ-структур и небольшие партии транзисторов из этих же структур облучались протонами с разными дозами [12]. На основе анализа экспериментальных результатов авторы делают вывод, что наблюдается неоднородное дефектообразование. Можно ожидать, что оно происходит, прежде всего, в скоплениях дислокаций и на различных дефектах, содержащих по всей глубине НЕМТ-структуры слабо связанные атомы (как азота, так и галлия), и может сопровождаться изменением внутренней организации наноматериала, механических напряжений на границах

сросшихся доменов, а также проводящих свойств перколяционных каналов, локализованных в протяженных дефектах и неоднородностях состава. При этом свойства отдельных локальных областей могут как ухудшаться, так и улучшаться, что выявляется при исследовании транзисторов после облучения протонами. По мере наращивания дозы увеличивается процент транзисторов, переставших функционировать, а на оставшихся транзисторах при малых смещениях значительно уменьшается разброс токов затвора, что указывает на снижение проводимости перколяционных каналов. На основе этого авторы сделали вывод о том, что фрактальная природа наноматериала НЕМТ-структур – один из существенных факторов, влияющих на надежность и радиационную стойкость транзисторов [12]. Данные результаты значимы с точки зрения перспективы применения НЕМТ в стратегически важных областях.

Подводя итоги представленного обзора работ по применению GaN-гетероструктур и приборов на их основе в СВЧ-электронике можно сделать вывод, что исследования, которые достаточно активно ведутся в настоящее время, носят как фундаментально-научный, так и прикладной характер. СВЧ-транзисторы на основе GaN, предоставляющие ряд преимуществ для сантиметрового и миллиметрового диапазонов, важны для решения стратегических задач, в частности для создания радиолокаторов в оборонной технике.

Всероссийская конференция по GaN всегда способствовала взаимодействию академических и университетских лабораторий с отечественными промышленными организациями. Результаты 2017 года показывают, что тенденция сохраняется, и в дальнейшем ее необходимо укреплять.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Туркин А. Н.** Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. 2011. № 5. С. 6–10.
2. **Туркин А. Н., Юнович А. Э.** Лауреаты Нобелевской Премии 2014 года: по физике – И. Акасаки, Х. Амано, С. Накамура // Природа. 2015. № 1. С. 75–81.
3. **Федоров Ю.** Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2011. № 2. С. 92–107.
4. **Кищинский А. А.** Твердотельные СВЧ усилители на нитриде галлия – состояние и перспективы развития // Материалы 19-й Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2009.
5. **Луценко Е. В., Ржеуцкий Н. В., Войнилович А. Г. и др.** Эпитаксиальный рост слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и НЕМТ-структур на установке аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии STE3N2 и их характеристика // Тезисы докладов 11-й

Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 44–45.

6. **Занавескин М.Л., Грищенко Ю.В., Езубченко И.С. и др.** Разработка новых технологических решений для создания СВЧ монолитных интегральных схем на основе нитридных гетероструктур диапазона до 100 ГГц и выше в НИЦ «Курчатовский институт» // Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 108–109.
7. **Майборода И.О., Грищенко Ю.В., Езубченко И.С., Занавескин М.Л.** Формирование гетероструктур для GaN НЕМТ миллиметрового диапазона в НИЦ «Курчатовский институт» // Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 110–111.
8. **Торхов Н.А., Бабак Л.И.** Шумовые характеристики СВЧ AlGaIn / GaN НЕМТ L- и S-диапазонов // Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 112–113.
9. **Дорофеев А.А., Гладышева Н.Б., Кондратьев Е.С. и др.** Измерение теплового сопротивления GaN НЕМТ по температурной зависимости его вольтамперной характеристики // Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 118–119.
10. **Енишерлова К.Л., Горячев В.Г., Сарайкин В.В., Капилин С.А.** Диагностика гетероструктур AlGaIn / GaN и НЕМТ-транзисторов на их основе методом анализа вольт-фарадных характеристик // Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 128–129.
11. **Горячев В.Г., Енишерлова К.Л., Колковский Ю.В.** Влияние  $\gamma$ -облучения на емкостные параметры AlGaIn / GaN гетероструктур и СВЧ-транзисторов на их основе // Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 142–143.
12. **Шабунина Е.И., Шмидт Н.М., Емцев В.В. и др.** Проблемы надежности и радиационной стойкости AlGaIn / GaN НЕМТ структур // Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», г. Москва, 1–3 февраля 2017 года. С. 140–141.