

# СТАНДАРТИЗОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ГЕТЕРОСТРУКТУР III-N ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

Д.Красовицкий<sup>1</sup>, А.Алексеев<sup>2</sup>, С.Петров<sup>2</sup>, В.Чалый<sup>1</sup>  
kurnosova@semiteq.ru

Полевые транзисторы на нитридных гетероструктурах (ГС) AlGaIn/GaN по совокупности параметров уникальны в ряду СВЧ-приборов. Основная особенность таких ГС – образование за счет пьезолегирувания на гетерогранице двумерного электронного газа (ДЭГ) со слоевой концентрацией электронов порядка  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , подвижность которых зависит от степени совершенства ГС и при 300К может достигать от 1000 до 2000  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  [1]. За счет высокой проводимости ДЭГ в таких полевых транзисторах плотность тока достигает более 1 А/мм при внешней крутизне вольт-амперной характеристики (ВАХ) 120–200 мкм/мм, что в сочетании с высокими пробивными полями позволяет достичь плотности мощности на порядок большей, чем в приборах на основе GaAs.

Подобные преимущества послужили стимулом для активных разработок компонентной базы для гражданских и военных применений [2] (рис.1). В мире уже созданы нитридные транзисторы в виде дискретных приборов [3] и в составе усилителей [4], демонстрирующие суммарные мощности свыше 150 Вт на частотах 2–4 ГГц и плотности мощности до 32 Вт/мм.

Технология роста гетероструктур на основе нитридов металлов III группы (III-N) и производство из них СВЧ-приборов имеют ряд "узких мест", к которым относятся, в первую очередь, отсутствие "универсальной" подложки для эпитаксии гетерострук-

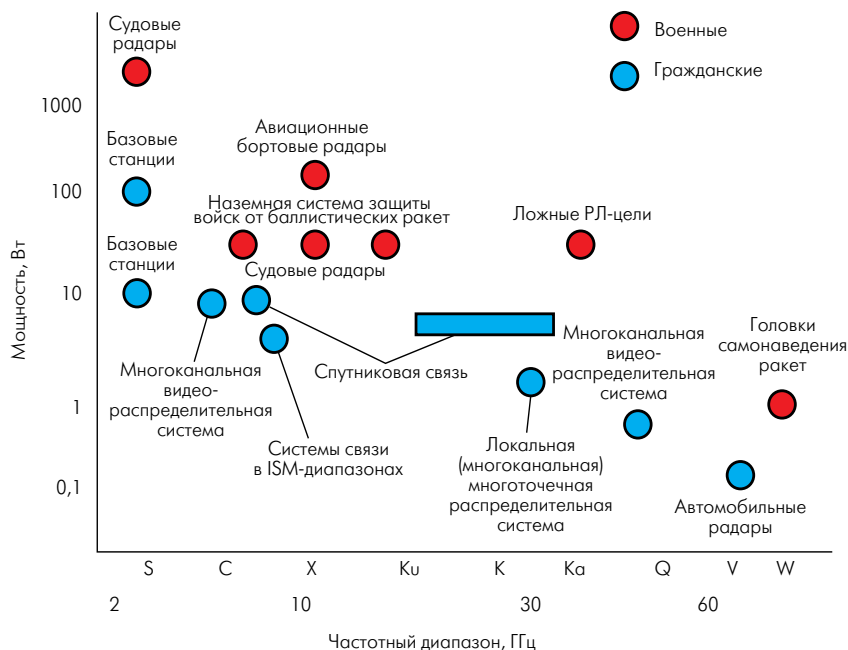


Рис.1. Области применения СВЧ-электроники

<sup>1</sup> "Светлана-Рост", С.-Петербург.

<sup>2</sup> "НТО", С.-Петербург.



тур, а также высокочастотная и долговременная нестабильность рабочих параметров транзисторов.

### **Выбор подложки для эпитаксии III-N гетероструктур**

Технологические трудности получения объемных кристаллов III-N являются причиной того, что массовое производство подложек из этих материалов отсутствует. Практически все ранние прикладные разработки нитридных приборов основаны на использовании чужеродных подложек, в той или иной мере рассогласованных с III-N по параметру решетки и коэффициенту термического расширения. Наиболее распространенный и коммерчески оправданный для массового производства вариант – использование подложек сапфира, обеспечивающих приемлемое качество структур при относительно невысо-

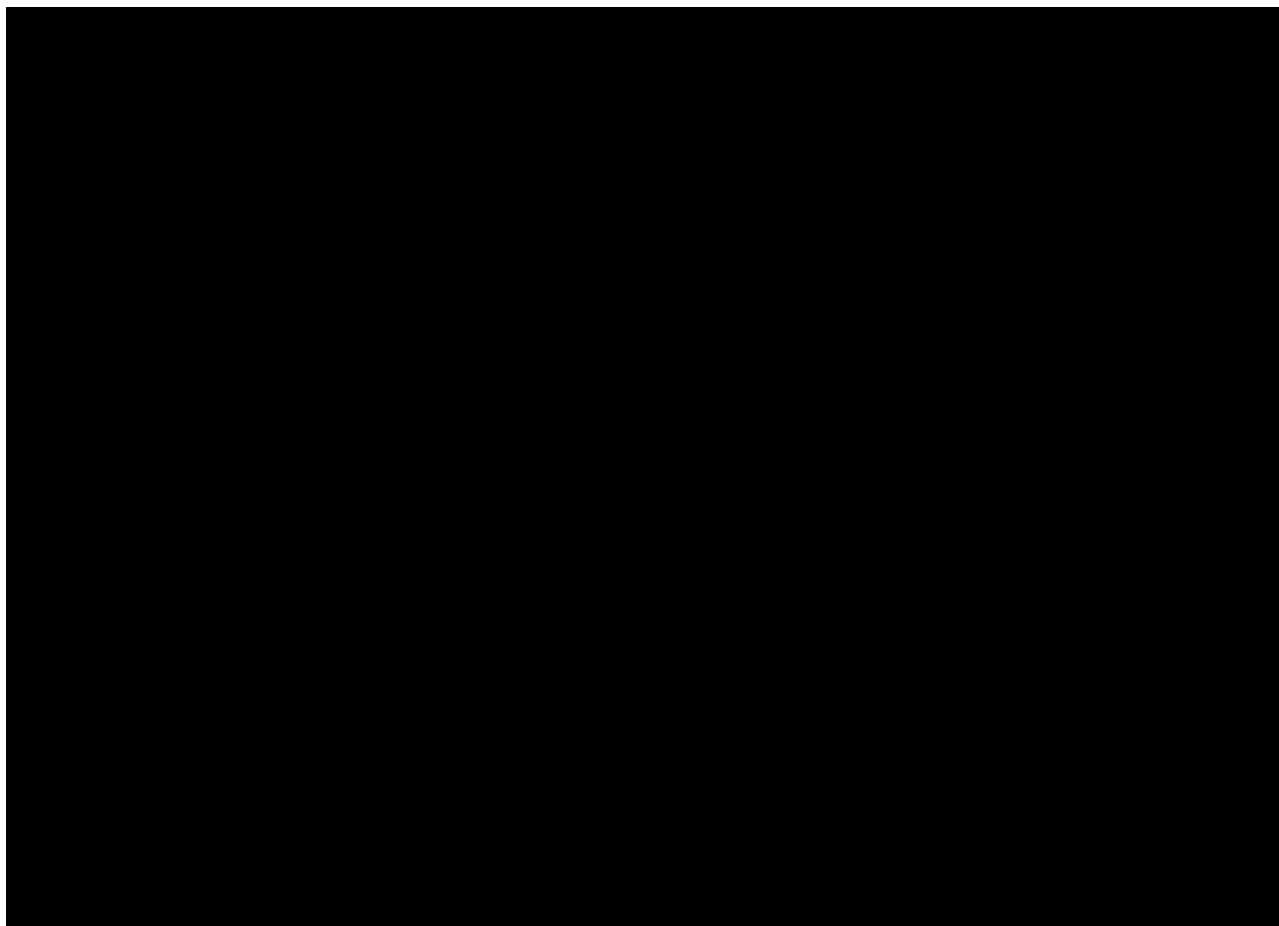
кой стоимости их изготовления. Однако гетероструктуры III-N на сапфире имеют весьма высокое количество собственных дефектов (в первую очередь – дислокаций).

Основные методы выращивания приборных гетероструктур – газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). В слоях, выращенных с применением МОГФЭ, плотность дислокаций в среднем на порядок меньше, чем в получаемых при МПЭ. Уменьшение плотности дислокаций при МОГФЭ скорее всего связано с более высокими температурами подложки, что выражается в лучшей, по сравнению с МПЭ, коалесценции зародышевых блоков на начальном этапе роста. (МПЭ для сохранения высокого вакуума с целью обеспечения баллистического пролета частиц не позволяет увеличить давление азотсодержащих ре-

агентов до значений, сравнимых с МОГФЭ, и повышение температуры роста ограничено термическим разложением материала.)

Таким образом, качество гетероструктур, выращиваемых на сапфире, находится на пределе, достаточном для их прикладного использования, и весьма чувствительно к методу получения. Использование подложек с большим кристаллическим сродством к материалам III-N (в первую очередь – карбида кремния (SiC) и так называемых "квазиподложек" – сравнительно толстых слоев GaN или AlN, эпитаксиально нанесенных на сапфир или даже отделенных от него) дает более высокое качество гетероструктур III-N, однако стоимость таких подложек высока, производство сосредоточено за рубежом, а импорт проблематичен из-за стратегического характера продукции.

Другая проблема при производстве мощных нитридных



СВЧ-транзисторов – теплоотвод от приборов, рассеиваемая мощность которых составляет десятки ватт. Температура активной области транзисторов на сапфире, обладающем низкой теплопроводностью, может достигать 300°C [5]. При использовании технологии field-plate, расширяющей рабочие диапазоны приборов за счет значительного снижения уровня утечек затвора, результаты составляют 12 Вт/мм и 32 Вт/мм для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6] и полуизолирующего SiC [7], соответственно.

На сапфире при использовании flip-chip технологии возможно трехкратное снижение теплового сопротивления [8], однако оно более чем в три раза превышает аналогичный показатель для подложек из полуизолирующего SiC. Так, на сапфире в транзисторах, демонстрирующих плотность мощности 4,6 Вт/мм на 8 ГГц для ширины затвора 100 мкм, даже с использованием flip-chip-технологии, удалось получить в усилителе [9] с общей периферией 4 Вт лишь 8 Вт суммарной мощности. Потенциально перспективны подложки "отделенного GaN" (9,4 Вт/мм на 10 ГГц для периферии затвора 2×75 мкм) [10]), промышленное производство которых не налажено, а также различные варианты "квази-объемных" AlN-подложек [11], приборные результаты на которых пока не получены.

Динамично развивается технология нитридов на кремнии, стимулированная, в первую очередь, перспективой массового применения относительно недорогих приборов в системах связи на частотах до 6 ГГц. Преодоление растрескивания гетероструктур и использование высокоомных подложек Si (>10<sup>4</sup> Ом·см) позволило достичь плотности мощности 7 Вт/мм на 10 ГГц [12] и 5,1 Вт/мм на 18 ГГц [13].

В целом для создания нитридных гетероструктур наилучшие рабочие частоты и

мощности достигаются на подложках из полуизолирующего SiC. Их основные недостатки – высокая стоимость и торговые ограничения по целому ряду параметров, обусловленные практически монопольным положением на рынке основных производителей.

Альтернативным представляется подход, предложенный в 2004 году компанией Fujitsu (Япония), основанный на использовании относительно толстых переходных изолирующих слоев AlN на более дешевых подложках SiC n-типа, применяемых для производства светодиодов на основе GaN. Высокая теплопроводность и пониженная плотность проникающих дислокаций делает возможным изготовление на подобных подложках большего диаметра (до 4") мощных высокочастотных нитридных транзисторов нового поколения, имеющих высокую плотность мощности. Уже изготовлены приборы с плотностью мощности до 7 Вт/мм, усилением до 22,2 дБ и PAE до 70% на частоте 2,14 ГГц.

Таким образом, проблема выбора подложки для ни-

тридных транзисторов заключается в компромиссе между качеством формируемых на ней гетероструктур, возможностью эффективного теплоотвода и себестоимостью процесса в целом.

### Конструкция гетероструктур, обеспечивающих воспроизводимость СВЧ-параметров

Прогресс в создании нитридных гетероструктур и приборов на их основе достигнут благодаря исследованиям, начатым в середине 90-х годов прошлого века, когда были продемонстрированы первые перспективные изделия. Одновременно была отмечена основная проблема нитридных транзисторов, решение которой оказалось весьма трудоемким и отодвинуло сроки коммерциализации на пять с лишним лет. Оказалось, что ДЭГ, высокая плотность которого в нитридных гетероструктурах обусловлена в большой мере особенностями зонной диаграммы и пьезополями, весьма чувствителен к внешним воздействиям,

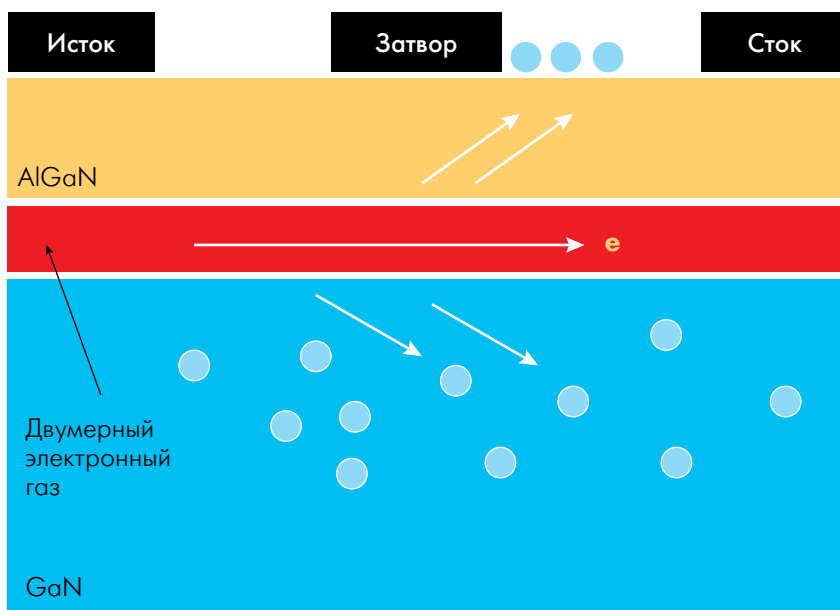


Рис.2. Схематическое изображение механизма возникновения эффекта "коллапса тока" в транзисторах на основе гетероструктур AlGaIn/GaN



что приводит к нестабильности СВЧ-характеристик приборов и их деградации во времени.

К 2002 году была анонсирована коммерциализация нитридных транзисторов, объемы продаж которых прогнозировались очень высокие.

Конструкция гетероструктуры AlGaIn/GaN, широко используемая для изготовления СВЧ-транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT – High Electron Mobility Transistor), включает относительно толстый (1–3 мкм) буферный слой GaN, покрытый тонким (100–300 Å) слоем  $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0,15 < x < 0,35$ ). Благодаря большему, по сравнению с GaAs/AlGaAs, разрыву зон проводимости и эффекту пьезолегирования, на гетерогранице GaN/AlGaIn происходит образование ДЭГ с указанными выше значениями слоевой концентрации и подвижности электронов. Такая структура представля-

ет собой простейшее, базовое HEMT-построение на основе нитридов III группы. На практике используются ее различные модификации, например, для увеличения концентрации электронов в канале и уменьшения сопротивления омических контактов – модулированное легирование слоя AlGaIn (спейсер – донорный и барьерный слой).

Ключевым аспектом при создании полевых транзисторов является электронное ограничение, определяющее утечки в приборе в закрытом состоянии. Кроме того, вследствие высокой слоевой концентрации при больших напряжениях затвор-сток происходит "выброс" электронов из канала, что ограничивает максимально достижимые токи и плотности СВЧ-мощности и создает значительный вклад в так называемый "коллапс тока" в СВЧ-режиме вследствие захвата электронов на ловушки в бу-

ферном и барьерном слоях (рис 2).

Существует ряд причин, из-за которых решение этой проблемы выращиванием легированного GaN (даже высокого кристаллического качества) сопряжено со значительными трудностями.

Во-первых, зародышевые слои, используемые на начальных стадиях роста нитридов на рассогласованных по параметру решетки подложках ( $Al_2O_3$ , SiC, Si), могут образовывать области с дефектной проводимостью вблизи их интерфейсов с буферным слоем [14].

Во-вторых, диффузия донорных примесей в GaN из подложки (в частности, кислорода и кремния) может привести к образованию в приборе каналов шунтирующей проводимости.

Кроме того, наличие спонтанной и пьезополяризации приводит к образованию наведенных как положительных, так и от-

рицательных зарядов вблизи дефектов, границ блоков мозаичной структуры, на гетероинтерфейсах. Это может усилить утечки по вертикальным каналам, вплоть до пробоя через буферный слой. Указанные обстоятельства – причина того, что в реальных приборных гетероструктурах, работающих при высоких (порядка 50 В) напряжениях, необходимы специальные, дополнительные меры для обеспечения сопротивления буферного слоя.

Существует несколько подходов к созданию в транзисторной структуре такого высокоомного слоя. Во-первых, оптимизация условий роста нелегированного GaN, поскольку сопротивление слоев в зависимости от изменения отношения потоков V/III групп, процедуры отжига зарядышевого слоя, температуры и скорости роста эпитаксиального слоя может меняться на несколько порядков. Столь существенное изменение проводимости GaN как правило связано с изменением прочих его свойств, в частности, структурного совершенства, морфологии поверхности, что вызывает трудности при совмещении различных режимов роста слоев в рамках одной приборной гетероструктуры. Токи утечки могут быть также минимизированы компенсирующим легированием буферного слоя GaN, Fe, C, Mg и др. Для уменьшения "коллапса тока", возникающего из-за захвата электронов на ловушки в приповерхностном барьерном слое, используется его пассивация, например слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , что, однако, не спасает от захвата электронов на ловушки в буферном слое GaN. Проблема усугубляется тем, что при его легировании компенсирующие примеси создают дополнительные ловушки.

С другой стороны, двухстороннее электронное ограничение и предотвращение захвата электронов на ловушки в буферном слое могут быть обеспечены в так называемых двойных гетероструктурах (ДГС). Подобный подход,

реализованный в полупроводниковой системе In-Al-Ga-As, применительно к нитридам имеет и ряд других преимуществ. Полевые транзисторы на основе ДГС GaN/InGaN/AlGaN продемонстрировали работоспособность в СВЧ-режиме без возникновения "коллапса тока". Однако, несмотря на большие теоретические значения подвижности в InN по сравнению с GaN, в InGaN из-за неоднородности состава она, как правило, меньше. Известно о создании полевых транзисторов на основе ДГС AlGaN/GaN/AlGaN с характеристиками, сравнимыми с полученными в приборах на основе "классических" однопереходных структур GaN/AlGaN [15].

Полноценная реализация потенциальных преимуществ ДГС затруднена характерными для данного материала проблемами – механическими напряжениями вследствие несоответствия параметров решеток GaN и Al, а также связанными с этим пьезополями, существенно искажающими зонную диаграмму. Введение широкозонного материала с нижней стороны канала GaN без дополнительных изменений конструкции ДГС AlGaN/GaN/AlGaN приводит к уменьшению проводимости по двум основным причинам.

Во-первых, релаксация механических напряжений в слое GaN при превышении некоторой критической толщины сопровождается формированием дополнительных дефектов, и приближение двумерного электронного газа к этой области приводит к уменьшению подвижности электронов в канале.

Во-вторых, при уменьшении толщины GaN возрастает влияние искривления зонной диаграммы, вызванного поляризационными эффектами. При высоком содержании алюминия в буферном слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  на нижней гетерогранице AlGaN/GaN может образоваться слой с дырочной проводимостью (аналогично формирова-

нию двумерного электронного газа на верхней гетерогранице GaN/AlGaN).

Таким образом, для получения ДГС с каналом GaN, имеющим двойное электронное ограничение и электрофизические параметры, сравнимые со структурой с "толстым" слоем GaN, необходимо определить оптимальную конструкцию буферного слоя и найти толщину релаксации GaN для этой конструкции.

*Работа проводилась при поддержке Минобрнауки России в рамках ГК №02.523.11.3019.*

### Литература

1. R.Gaska et. al. Appl. Phys. Lett., 2001, v.78, p.1870.
2. U.K.Mishra et al. Proceedings of the IEEE, 2002, v.90, №6.
3. Y.F.Wu et. al. IEEE Electron Dev. Lett., 2004, v.25, p.117.
4. T.Kikkawa et. al. www.gaasmantech.org/Digests/2004/2004Papers/6.1.pdf
5. J.Kuzmik et.al. IEEE Trans. Electron Dev., 2002, v.49, p.1496.
6. A.Chini et.al. Elec. Lett., 2004, v.40, p.73.
7. Y.F.Wu et al. IEEE Electron Dev. Lett., 2004, v.25, p.117–119.
8. J.Sun et.al. IEEE Electron Dev. Lett., 2003, v.24, p.375–377.
9. J.J.Xu et.al. IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques., 2000, v.48, p.2573–2578.
10. K.K.Chu et.al. IEEE Electron Dev. Lett., 2004, v.25, p.596–598.
11. X.Hu et.al. Appl. Phys. Lett., 2003, v.82, p.1299–1301.
12. Ph.Bove et.al. Manufacturing Engineered wafers for GaN RF power applications. GaAs MANTECH, New Orleans. 2005. (<http://gaasmantech.org/Digests/2005/2005Papers/4.3.pdf>)
13. D.Ducatteau et.al. IEEE Electron Dev. Lett., 2006, v.27, p.7–9.
14. M.G.Cheong et. al. Appl. Phys. Lett., 2000, v.77, p.2557.
15. Y.Cordier et. al. J. Crystal Growth., 2005, v.278, p.393.