

06

## **Многослойные гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN для мощных полевых транзисторов, полученные аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках Si**

© А.Н. Алексеев, С.Б. Александров, А.Э. Бырназ,  
Л.Э. Великовский, И.Э. Великовский, Д.М. Красовицкий,  
М.В. Павленко, С.И. Петров, М.Ю. Погорельский,  
Ю.В. Погорельский, И.А. Соколов, М.А. Соколов,  
М.В. Степанов, А.Г. Ткаченко, А.П. Шкурко, В.П. Чалый

ЗАО „Светлана-РОСТ“, Санкт-Петербург  
E-mail: support@semiteq.ru

*Поступило в Редакцию*

Сообщаются предварительные результаты переноса технологии роста многослойных гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN на подложки кремния. Путем оптимизации ростовых условий минимизировано количество макроскопических трещин и получены гетероструктуры с двумерным электронным газом, пригодные для создания полевых транзисторов. Ток насыщения тестовых приборов, изготовленных из гетероструктур на подложках кремния, сопоставим с аналогичным параметром приборов на подложках сапфира, в то же время не наблюдается его уменьшения, связанного с тепловым рассеянием при больших значениях рабочих напряжений.

PACS: 71.55.Eq, 74.78.Fk, 81.15.-z, 81.16.-c

Полевые транзисторы на основе соединений нитридов III группы лежат в основе целого класса СВЧ-устройств, уникальных по сочетанию достигнутой плотности мощности и рабочих частот. Наиболее отработанные технологии нитридных транзисторов на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (сапфире) и SiC шли практически наравне до значений удельной мощности приборов 6–7 W/mm (уровень конца 90-х гг.), достигаемых на 2–4 GHz в приборах с малой (< 150 μm) шириной затвора без специальной организации теплоотвода, т.е. уровень приборных результатов

определялся в основном совершенством гетероструктур с двумерным электронным газом (ДЭГ). К настоящему времени эпитаксиальный рост, обеспечивающий концентрацию электронов и подвижность на уровне  $1.0\text{--}1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  и  $1200\text{--}1500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  соответственно, в целом отработан обоими основными методами (MOCVD и MBE), и теперь параметры приборов, определяющие перспективы развития мощной СВЧ-электроники, определяются, в первую очередь, теплопроводностью подложки. Результаты, полученные с использованием технологии „field-plate“, расширяющей рабочие диапазоны приборов за счет колоссального снижения уровня утечек затвора, составляют на указанных выше частотах 12 и 32 W/mm для подложек  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [1] и SiC [2] соответственно. Возможности увеличения полной мощности за счет увеличения периферии затвора полностью определяются схемой теплоотвода. Так, на сапфире в транзисторах, демонстрирующих плотность мощности 4.6 W/mm на 8 GHz для ширины затвора  $100 \mu\text{m}$ , даже с использованием „flip-chip“ технологии переноса на теплопроводящую подложку, удалось получить в усилителе [3] с общей периферией 4 mm лишь 8 W суммарной мощности. Показано, что оптимизация „flip-chip“ схемы позволяет в три раза снизить тепловое сопротивление прибора, выращенного на сапфире, однако и в этом случае оно более чем в три раза превышает аналогичный показатель для случая использования подложек полуизолирующего SiC [4], основным недостатком которых является их дороговизна и ограниченный 3 дюймами (на сегодняшний день) диаметр. Еще более редкими в этом смысле представляются подложки „свободностоящего GaN“, на которых достигнуты уровни мощности (9.4 W/mm на 10 GHz для периферии  $2 \times 75 \mu\text{m}$ ) [5], а также различные варианты „квазиобъемных“ AlN-подложек [6], приборных результатов на которых пока не получено.

Наиболее динамично развивается в последние годы технология нитридов на кремнии, стимулированная, в первую очередь, перспективой массового применения относительно недорогих приборов в системах связи в диапазоне 2–4 GHz. Основной нерешенной проблемой до недавнего времени оставалось растрескивание гетероструктур вследствие большого несоответствия КТР GaN и Si. Преодоление этой проблемы и использование высокоомных подложек Si ( $> 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ) позволило недавно достичь плотности мощности 7 W/mm на 10 GHz [7] и 5.1 W/mm на 18 GHz [8], что сравнимо с результатом на подложках SiC, составляющим 5.7 W/mm на 30 GHz [9]. На подложках кремния реализованы и первые усилительные МММС [10], мощность которых составила 20 W

в широком диапазоне 8–10.5 GHz на смещении 24 V. Приведенные значения практически идентичны параметрам ММІС на основе SiC [11]. Указанные результаты демонстрируют высокий потенциал технологии нитридов на кремнии и для приложений X-диапазона.

Ранее мы сообщали о получении методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) многослойных гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN, на основе которых удалось изготовить транзисторы с шириной затвора 0.48  $\mu\text{m}$ , имеющие мощность 1.8 W на 10 GHz (плотность мощности 3.8 W/mm) [12]. Несмотря на то что электрофизические параметры гетероструктур практически соответствовали мировому уровню и в транзисторах благодаря двойному электронному ограничению, минимизирован высокочастотный токовый коллапс, указанные выше значения мощности, полученные без оптимизации теплоотвода, близки к предельно возможным. В настоящей работе мы сообщаем предварительные результаты переноса технологии роста многослойных гетероструктур на подложки кремния. Путем оптимизации ростовых условий удалось минимизировать количество макроскопических трещин и получить гетероструктуры с двумерным электронным газом, пригодные для создания полевых транзисторов. Ток насыщения тестовых приборов, изготовленных из гетероструктур на подложках кремния, сопоставим с аналогичным параметром приборов на подложках сапфира, в то же время не наблюдается его уменьшения, связанного с тепловым рассеянием при больших значениях рабочих напряжений.

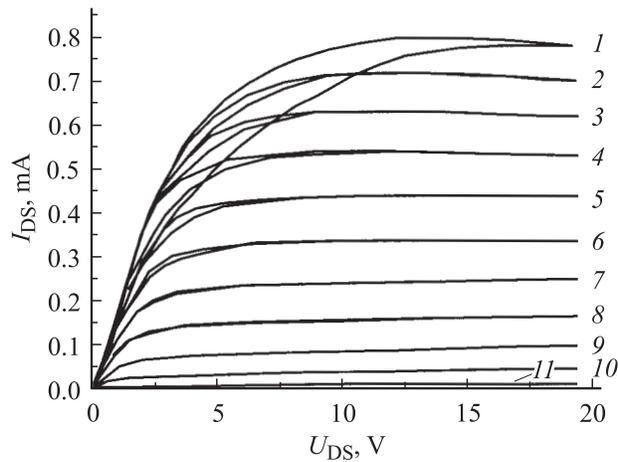
Многослойные гетероструктуры (МГС) AlN/AlGaN/GaN/AlGaN выращивались на подложках кремния (111) *p*-типа ( $10 \Omega \cdot \text{cm}$ ) в специализированной установке молекулярно-лучевой эпитаксии нитридов STE3N3 (SemiTEq) с использованием аммиака в качестве источника азота. Перед началом роста кремниевые подложки подвергались стандартной процедуре химической очистки, включающей „мокрое“ травление в буферном растворе. Одной из основных особенностей разработанных нами гетероструктур является наличие относительно „толстого“ (0.2  $\mu\text{m}$ ) „теплита“ AlN, выращиваемого при повышенной температуре (до 1200°C) непосредственно перед гетероструктурой в том же эпитаксиальном процессе. Свойства выращенных образцов исследовались при помощи атомно-силовой микроскопии и рентгеновской дифрактометрии.

Тестовые транзисторы с расстоянием исток-сток 4  $\mu\text{m}$  и затворами  $1 \times 20 \mu\text{m}$  изготавливались на указанных МГС по стандартному планарному циклу, включающему в себя оптическую фотолитографию,

электронно-лучевое напыление металлов, быстрый термический отжиг ОМ-контактов, реактивное ионное травление мезаизоляции и т.п. [13].

Основной целью данной работы являлся перенос технологии выращивания МГС с сапфировых подложек на кремниевые. Одна из основных проблем при выращивании нитридов на кремниевых подложках — возникновение трещин в эпитаксиальных слоях вследствие еще большего, по сравнению с сапфиром, рассогласования параметров кристаллической решетки и коэффициентов термического расширения. Для предотвращения трещинообразования одной из ключевых стадий технологии нитридов на кремнии является получение переходного слоя или многослойной композиции слоев, обеспечивающих бездефектную релаксацию напряжений и последующий рост приборных гетероструктур. В ходе наших экспериментов было установлено, что разработанная ранее конструкция МГС с двойным электронным ограничением оказалась весьма удачной с точки зрения остаточных напряжений, и оптимизации температурного режима охлаждения образца оказалось достаточно для заметного уменьшения количества трещин в гетероструктуре. В литературе [14] также упоминается о том, что более быстрый переход от трехмерного к двумерному режиму роста методом МЛЭ, помимо уменьшения числа дефектов, способствует также уменьшению количества трещин. В наших экспериментах установлено, что влияние начальных стадий эпитаксии AlN на кремнии на время перехода в двумерный режим роста оказалось в целом аналогичным наблюдаемому при эпитаксии на сапфировой подложке. В частности, при увеличении температуры подложки до 1200°C время от начала эпитаксии до получения методом дифракции быстрых электронов на отражение четкой картины поверхностной реконструкции ( $1 \times 1$ ) сокращается вдвое по сравнению с начальной температурой подложки 1050°C. Важно, что покрытие поверхности кремния слоем алюминия перед подачей потока аммиака, предотвращающее спонтанное образование на поверхности слоев переменного состава  $\text{SiN}_x$ , также позволяет сократить время перехода в двумерный режим роста. В результате использование указанных выше приемов на начальном этапе роста позволило практически полностью избавиться от макроскопических трещин в образцах.

Исследования поверхности полученных гетероструктур при помощи атомно-силовой микроскопии показали, что в результате прямого переноса технологии выращивания МГС с сапфира на кремний латеральный размер микрорельефа (размер „зерна“) уменьшается. Ранее нами сообщалось о связи кристаллического совершенства нитрида



Вольт-амперная характеристика тестового транзистора на основе гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn на подложке Si. Смещение на затворе,  $U_g$ , V: 1 — +0.75; 2 — +0.25; 3 — -0.25; 4 — -0.75; 5 — -1.25; 6 — -1.75; 7 — -2.25; 8 — -2.75; 9 — -3.25; 10 — -3.75; 11 — -4.25.

галлия на сапфировой подложке и размера „зерна“ на поверхности [15]. Увеличение размера „зерна“ сопровождается улучшением структурного совершенства слоя и подвижности электронов в нем, что соответствует литературным данным [16]. Снижение кристаллического совершенства нитрида галлия при выращивании на кремнии подтверждается данными рентгеновской дифрактометрии: полуширина кривой качания (0002) в режиме  $\Theta - 2\Theta$  сканирования увеличивается в полтора-два раза по сравнению с сапфировыми подложками. По всей видимости, для получения образцов более высокого качества требуется дополнительная оптимизация начальных стадий роста и конструкции переходных слоев.

Поскольку используемые в работе подложки кремния имели довольно большую шунтирующую проводимость  $p$ -типа, то измерения методом Холла не позволили точно определить электрофизические параметры двумерного электронного газа. По этой же причине не удалось корректно оценить величину пробойных напряжений, которые по оценкам составляют не менее 50 V. На поверхности структуры были сформированы тестовые транзисторы с расстоянием исток-сток  $4 \mu\text{m}$  и затворами  $1 \times 20 \mu\text{m}$ , ток насыщения которых сравним с ана-

логичным параметром транзисторов на сапфире и достигает 0.8 A/mm (см. рисунок). Основной особенностью полученных вольт-амперных характеристик является отсутствие уменьшения рабочего тока в области напряжений более 15 V вследствие разогрева, как правило наблюдающееся в транзисторах на сапфировых подложках, имеющих меньшую теплопроводность. Полученный результат свидетельствует о благоприятных перспективах развития технологии нитридных МГС на кремнии с целью получения более мощных и устойчивых к долговременному температурному воздействию приборов.

Таким образом, методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены многослойные гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN на подложках кремния диаметром 2 дюйма, не имеющие трещин по всей площади образца. В тестовых транзисторах с малой периферией достигнуты токи насыщения 0.8 A/mm, не уменьшающиеся в области больших рабочих напряжений вследствие теплового рассеяния, пробойные напряжения на данном этапе составили не менее 50 V. Для достижения требуемых сверхвысокочастотных параметров нитридных приборов дальнейшими шагами оптимизации технологии являются улучшение структурного совершенства слоев гетероструктуры и электрофизических параметров ДЭГ, а также переход к использованию непроводящих подложек кремния.

## Список литературы

- [1] *Chini A., Buttari D., Coffie R. et al. // Elec. Lett. 2004. V. 40. P. 73.*
- [2] *Wu Y.F., Saxler A., Moore M. et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25. P. 117–119.*
- [3] *Xu J.J., Keller S., Parish G. et al. // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 2000. V. 48. P. 2573–2578.*
- [4] *Sun J., Fatima H., Koudymov A. et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2003. V. 24. P. 375–377.*
- [5] *Chu K.K., Chao P.C., Pizzella M.T. et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25. P. 596–598.*
- [6] *Hu X., Deng J., Pala N. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 1299–1301.*
- [7] *Bove Ph., Thuret J., Letertre F. et al. // Manufacturing Engineered wafers for GaN RF power applications. GaAs MANTECH. New Orleans, 2005. (<http://gaasmantech.org/Digests/2005/2005Papers/4.3.pdf>).*
- [8] *Ducatteau D., Minko A., Hoël V. et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2006. V. 27. P. 7–9.*

- [9] *Moon J.S., Wu S., Wong D.* et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2005. V. 26. P. 348–350.
- [10] *Fanning D.M., Witkowski L.C., Lee C.* et al. // 25 Watt X-band GaN on Si MMIC. GaAs MANTECH, New Orleans, 2005. (<http://gaasmantech.org/Digests/2005/2005papers/8.3.pdf>)
- [11] *Benkhkelifa F., Kiefer R., Müller S.* et al. // Performance and Fabrication of GaN/AlGaN Power MMIC at 10 GHz. GaAs MANTECH, New Orleans, 2005. (<http://gaasmantech.org/Digests/2005/2005papers/8.4.pdf>).
- [12] *Алексеев А.Н., Александров С.Б., Беляевский Д.Е.* и др. // Тез. докл. 5-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“. М., 2007. С. 42.
- [13] *Алексеев А.Н., Александров С.Б., Бырназ А.Э.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. С. 19–27.
- [14] *Nikishin S.A., Faleev N.N., Antipov V.G.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 2073–2075.
- [15] *Алексеев А.Н., Бырназ А.Э., Красовицкий Д.М.* и др. // ФТП. 2007. Т. 41. С. 1025–1030.
- [16] *Webb J.B., Tang H., Bardwell J.A.* et al. // J. Crystal Growth. 2001. V. 230. P. 584–589.