

06

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

© А.Н. Алексеев, С.Б. Александров, А.Э. Бырназ, С.В. Кокин,
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,
В.П. Чалый, А.П. Шкурко

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

Поступило в Редакцию 11 января 2008 г.

Сообщаются предварительные результаты переноса технологии роста нитридных транзисторных гетероструктур на подложки AlN/SiC. Использование многослойных гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN позволило практически воспроизвести основные приборные свойства гетероструктур, несмотря на более шероховатую по сравнению с сапфиром поверхность исходных подложек AlN/SiC. Ток насыщения тестовых приборов, изготовленных из гетероструктур на подложках AlN/SiC, 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 нового класса СВЧ-устройств, уникальных по сочетанию мощности и рабочих частот. Технологии нитридных транзисторов на подложках Al₂O₃ и SiC к концу 90-х гг. демонстрировали значения удельной мощности 6–7 W/mm на 2–4 GHz в приборах с малой (< 150 μm) шириной затвора без специальной организации теплоотвода, т.е. уровень результатов определялся в основном совершенством гетероструктур с двумерным электронным газом (ДЭГ). К настоящему

времени на указанных выше подложках методами газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) устойчиво получают гетероструктуры со слоевой концентрацией и подвижностью электронов в ДЭГ 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. Параметры современных приборов, определяющие перспективы развития мощной СВЧ-электроники, в первую очередь зависят от условий теплоотвода от проводящего канала, температура которого при использовании подложек сапфира может достигать 300°C и выше [1]. 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 Al_2O_3 [2] и полуизолирующего SiC [3] соответственно. На подложках сапфира с использованием „flip-chip“ технологии переноса на теплопроводящую подложку возможно трехкратное снижение теплового сопротивления [4], однако и в этом случае оно более чем в три раза превышает аналогичный показатель для случая использования подложек полуизолирующего SiC. 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, удалось получить в усилителе [5] с общей периферией 4 mm лишь 8 W суммарной мощности. Потенциально перспективны подложки так называемого „free-standing GaN“ (9.4 W/mm на 10 GHz для периферии затвора $2 \times 75 \mu\text{m}$) [6]), промышленное производство которых в данный момент не налажено, а также различные варианты „квазиобъемных“ AlN-подложек [7], приборных результатов на которых пока не получено. Динамично развивается в последние годы технология нитридов на кремнии, стимулированная, в первую очередь, перспективой массового применения относительно недорогих приборов в системах связи на частотах до 6 GHz. Преодоление проблемы растрескивания гетероструктур и использование высокоомных подложек Si ($> 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$) позволило достичь плотности мощности 7 W/mm на 10 GHz [8] и 5.1 W/mm на 18 GHz [9].

Таким образом, среди использовавшихся до последнего времени подложек для роста нитридных гетероструктур наилучшие по соотношению рабочих частот и мощностей результаты достигаются на подложках полуизолирующего SiC. Их основными недостатками являются высокая стоимость и торговые ограничения по целому ряду параметров, обу-

словенные практически монопольным положением на рынке основных производителей. Альтернативным представляется подход, предложенный в 2004 г. японской компанией Fujitsu, основанный на использовании относительно толстых переходных изолирующих слоев AlN на более дешевых подложках SiC *n*-типа проводимости, использующихся в мире для производства светодиодов на основе GaN. Сочетание высокой теплопроводности, близкой к теплопроводности SiC, и пониженной плотности проникающих дислокаций делает возможным изготовление на таких полуизолирующих подложках SiC/AlN нитридных мощных высокочастотных транзисторов нового поколения, сочетающих более дешевые подложки большего диаметра (на данный момент — до 4") и высокую плотность мощности. На таких подложках уже получены приборы с плотностью мощности до 7 W/mm, усилением до 22.2 dB и КПД суммирования мощности (PAE) до 70% на частоте 2.14 GHz [10].

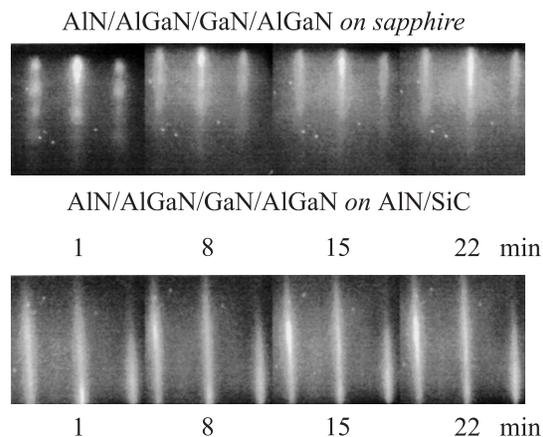
Ранее мы сообщали о получении методом МПЭ многослойных гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN на сапфире, на основе которых удалось изготовить транзисторы с шириной затвора 0.48 μm , имеющие мощность 1.8 W на 10 GHz (плотность мощности 3.8 W/mm) [11]. Несмотря на то что электрофизические параметры гетероструктур 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 нитридных транзисторных гетероструктур на подложки AlN/SiC. Использование многослойных гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN позволило практически воспроизвести основные приборные свойства, несмотря на более шероховатую поверхность исходных подложек AlN/SiC. Ток насыщения тестовых приборов, изготовленных из гетероструктур на таких подложках, 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 в специализированной установке молекулярно-лучевой эпитаксии нитридов STE3N3 (SemiTEq), с использованием аммиака в качестве источника азота, на экспериментальных подложках, представляющих собой пластины *n*-SiC с нанесенным на них газофазным способом

слоем AlN толщиной около $10\ \mu\text{m}$. Одной из основных особенностей разработанных нами гетероструктур является наличие относительно „толстого“ ($0.2\ \mu\text{m}$) „темплита“ 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 (AFM) и рентгеновской дифрактометрии (XRD).

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 омических контактов, реактивное ионное травление меза-изоляции и т.п. [12].

Основной целью данной работы являлся перенос технологии роста нитридных транзисторных гетероструктур на подложки AlN/SiC. Традиционно используемые нитридные транзисторные гетероструктуры GaN/AlGaIn, выращенные на таких подложках, должны обладать более высоким кристаллическим совершенством, поскольку слой AlN в подложке уже имеет пониженную плотность дислокаций и таким образом рост происходит на низкодислокационной подложке с близким значением параметра кристаллической решетки. При этом необходимо использовать промежуточные слои между слоями AlN и GaN для снижения влияния механических напряжений. Использование конструкции МГС AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn, которая при росте на сапфировых подложках позволяет значительно улучшить свойства структуры [12], в случае подложек AlN/SiC, кроме того, облегчает перенос технологии выращивания. Однако поверхность исходных подложек AlN/SiC является значительно более шероховатой по сравнению с epi-ready сапфировыми подложками. Значения среднеквадратичного отклонения поверхности (rms) сапфировой подложки составляют менее $0.2\ \text{nm}$ при площади сканирования $3 \times 3\ \mu\text{m}$ и $30 \times 30\ \mu\text{m}$. В то же время значения rms AlN на SiC при площади сканирования $3 \times 3\ \mu\text{m}$ составляют $0.4\text{--}0.6\ \text{nm}$, что ненамного выше соответствующих значений для сапфира, однако при площади сканирования $30 \times 30\ \mu\text{m}$ значения rms AlN на SiC составляют $1.8\text{--}5.9\ \text{nm}$, что гораздо выше соответствующих значений для сапфира. На поверхности видны столбы, ямы, ряды столбов и канавы с вертикальными размерами от 20 до $100\ \text{nm}$, которые, по всей видимости, являются дефектами полировки, что отражается на



Картинки RHEED, наблюдаемые при росте МГС AlN/AlGaN/GaN/AlGaN на подложках сапфира и AlN/SiC.

значениях rms. Кроме того, визуально и в оптическом микроскопе подложка сапфира выглядит зеркально-гладкой, а на поверхности AN на SiC видны макроскопические дефекты.

На рисунке представлены картины отражательной дифракции быстрых электронов (RHEED), наблюдаемые при росте МГС AlN/AlGaN/GaN/AlGaN на подложках сапфира и SiC. Как видно из рисунка, при выращивании на сапфировой подложке рост вначале происходит в трехмерном режиме и через некоторое время, зависящее от условий роста, переходит в двумерный режим (переход от точек к тягам). В то же время, несмотря на более шероховатую поверхность исходной подложки AlN/SiC, рост МГС AlN/AlGaN/GaN/AlGaN происходит сразу в двумерном режиме. Кроме того, осцилляции сигнала лазерного интерферометра, как и в случае использования сапфировых подложек, носят незатухающий характер. Исследования поверхности полученных гетероструктур при помощи атомно-силовой микроскопии показали, что rms поверхности находится на уровне 2–5 nm, как и в случае выращивания на сапфировых подложках. По данным холловских измерений подвижность электронов в канале, образованном на верхней гетерогранице GaN/AlGaN, находится на уровне 1000–1200 cm²/V · s при их концентрации 1.4–1.6 · 10¹³ cm⁻². Подобные значения электрофизических

параметров сопоставимы с результатами, полученными на сапфировых подложках, и соответствуют уровню современных публикаций.

На поверхности гетероструктур были сформированы тестовые транзисторы с расстоянием исток-сток $4\ \mu\text{m}$ затворами $1 \times 20\ \mu\text{m}$, демонстрирующие в статическом режиме плотности тока до $1\ \text{A/mm}$, крутизну более $150\ \text{mS/mm}$ и пробойные напряжения свыше $100\ \text{V}$. Основной особенностью полученных вольт-амперных характеристик является, как и в случае использования кремниевых подложек, отсутствие уменьшения рабочего тока в области напряжений более $15\ \text{V}$ вследствие разогрева, как правило, наблюдающееся в транзисторах на сапфировых подложках, имеющих меньшую теплопроводность. Полученный результат свидетельствует о благоприятных перспективах развития технологии нитридных МГС на подложках AlN/SiC с целью получения более мощных и устойчивых к долговременному температурному воздействию приборов.

Таким образом, методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены многослойные гетероструктуры $\text{AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn}$ на экспериментальных подложках AlN/SiC . Несмотря на более развитую шероховатость исходной подложки AlN/SiC , рост МГС $\text{AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn}$ происходит сразу в двумерном режиме. По данным холловских измерений подвижность электронов в канале, образованном на верхней гетерогранице GaN/AlGaIn , находится на уровне $1000\text{--}1200\ \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при их концентрации $1.4\text{--}1.6 \cdot 10^{13}\ \text{cm}^{-2}$. В тестовых транзисторах достигнуты токи насыщения $1\ \text{A/mm}$, не уменьшающиеся в области больших рабочих напряжений вследствие теплового рассеяния, крутизна более $150\ \text{mS/mm}$ и пробойные напряжения свыше $100\ \text{V}$.

Список литературы

- [1] *Kuzmík J., Javorka P., Alam A.* et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2002. V. 49. P. 1496.
- [2] *Chini A., Buttari D., Coffie R.* et al. // Elec. Lett. 2004. V. 40. P. 73.
- [3] *Wu YF., Saxler A., Moore M.* et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25. P. 117–119.
- [4] *Sun J., Fatima H., Koudymov A.* et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2003. V. 24. P. 375–377.
- [5] *Xu J.J., Keller S., Parish G.* et al. // IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques. 2000. V. 48. P. 2573–2578.

- [6] *Chu K.K., Chao P.C., Pizzella M.T. et al.* // IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25. P. 596–598.
- [7] *Hu X., Deng J., Pala N.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 1299–1301.
- [8] *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>).
- [9] *Ducatteau D., Minko A., Hoël V. et al.* // IEEE Electron Dev. Lett. 2006. V. 27. P. 7–9.
- [10] *Kikkawa T., Imanishi K., Kanamura M. et al.* // Recent Progress of Highly Reliable GaN–HEMT for Mass Production. GaAs MANTECH. Princeton, 2006. (<http://gaasmantech.org/Digest/2006/2006%20Digests/12A.pdf>)
- [11] *Алексеев А.Н., Александров С.Б., Беляевский Д.Е. и др.* // Тез. докл. V Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы". М., 2007. С. 42.
- [12] *Алексеев А.Н., Александров С.Б., Бырнав А.Э. и др.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. С. 19–27.