



УДК 621.315.592

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.610.614

# ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АММИАЧНОЙ МЛЭ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaN ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

## ADVANTAGES OF USING RUSSIAN AMMONIA MBE SYSTEM FOR GROWING NITRIDE HETEROSTRUCTURES FOR MICROELECTRONICS

АЛЕКСЕЕВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ<sup>1</sup>ALEXEEV ALEXEY N.<sup>1</sup>ПЕТРОВ СТАНИСЛАВ ИГОРЕВИЧ<sup>1</sup>PETROV STANISLAV I.<sup>1</sup>*petrov@semiteq.ru*МАМАЕВ ВИКТОР ВИКТОРОВИЧ<sup>1</sup>MAMAEV VICTOR V.<sup>1</sup>НОВИКОВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ<sup>1</sup>NOVIKOV SERGEY A.<sup>1</sup>ЛУЦЕНКО ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ<sup>2</sup>LUTSENKO EVGENII V.<sup>2</sup>РЖЕУЦКИЙ НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ<sup>2</sup>RZHEUTSKII NIKOLAI V.<sup>2</sup><sup>1</sup> ЗАО «HTO»<sup>1</sup> *SemiTEq JSC*

194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27

27 Engels Ave., Saint-Petersburg, 194156, Russia

<sup>2</sup> Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларусь  
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2, Беларусь<sup>2</sup> *Stepanov Institute of Physics of NASB*

68 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220072, Belarus

Использование буферного слоя AlN, выращенного при экстремально высокой температуре (до 1150 °C) в сочетании со сверхрешетками AlN/AlGaN на установке молекулярно-лучевой эпитаксии STE3N российского производства с использованием аммиака в качестве источника активного азота, позволяет кардинально улучшить структурное совершенство активных слоев GaN (понизить плотность дислокаций до значений  $9 \cdot 10^8$ – $1 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>), увеличить подвижность электронов в канале GaN/AlGaN до 2000 см<sup>2</sup>/В·с и обеспечить приборное качество гетероструктур для микрэлектроники.

**Ключевые слова:** МЛЭ; ДЭГ; НЕМТ; сурфактант; AlGaN.

The paper deals with using an AlN buffer layer grown at extremely high temperatures (up to 1150 °C) in combination with AlN/AlGaN superlattices at the Russian STE3N MBE System using ammonia as a nitrogen source, which allows drastically improving the structural quality of active GaN layers (dislocation density reduced to  $9 \cdot 10^8$ – $1 \cdot 10^9$  cm<sup>-2</sup>, as well as increasing the mobility of electrons in the GaN/AlGaN channel to 2000 cm<sup>2</sup>/V·s, and providing the device-level quality of heterostructures for microelectronics.

**Keywords:** MBE; 2DEG; HEMT; surfactant; AlGaN.

### ВВЕДЕНИЕ

Среди всего спектра материалов особый интерес представляют нитриды металлов третьей группы (III-N), так как они обладают уникальными свойствами и интенсивно исследуются в целях создания оптоэлектронных и СВЧ мощных высокотемпературных приборов на их основе.

Одной из основных проблем при изготовлении приборов на основе III-нитридов является отсутствие недорогих согласованных по параметру решетки подложек. Выращивание на рассогласованных подложках приводит к высокой плотности дислокаций в слоях GaN ( $10^9$ – $10^{10}$  см<sup>-2</sup> для МЛЭ,  $10^8$ – $10^9$  см<sup>-2</sup> для МОГФЭ), что усложняет задачу получения приборных гетероструктур. Более высокие значения плотности дислокаций при выращивании МЛЭ связаны с меньшей температурой роста и, соответственно, худшей поверхностной подвижностью атомов на ростовой поверхности. Типичные значения подвижности

электронов при комнатной температуре в слоях GaN, выращенных на сапфире с использованием буферных слоев, находятся в диапазоне 250–350 см<sup>2</sup>/В·с для МЛЭ и 500–700 см<sup>2</sup>/В·с для МОГФЭ. Рекордные значения составляют 560 см<sup>2</sup>/В·с (с использованием буферного слоя AlN, полученного при помощи магнетронного распыления) и 900 см<sup>2</sup>/В·с для МЛЭ и МОГФЭ соответственно [1, 2]. Путем оптимизации условий МЛЭ роста в слоях GaN, выращенных на МОГФЭ «темплейтах», были получены значения подвижности электронов более 1100 см<sup>2</sup>/В·с [3]. При этом метод МЛЭ обладает рядом достоинств по сравнению с МОГФЭ, а именно: позволяет контролировать рост на уровне одного монослоя и получать резкие гетерограницы, обеспечивает высокую чистоту камеры роста и материала, предоставляет возможность построения высоковакуумных кластерных систем и др.

В настоящее время все большее число исследователей выбирают МЛЭ с плазменным источником азота, поскольку она



PA MBE			
Metal - rich growth conditions	Low temperature (<900°C)	Nitrogen - rich growth conditions	High temperature (>1000°C)
Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> N	Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> N	GaN 150 nm	GaN 150 nm
GaN 150 nm	GaN 150 nm	Graded AlGaN/GaN	Graded AlGaN/GaN
Graded AlGaN/GaN	Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> N	Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> N	Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> N
Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> N	Superlattice AIN/AlGaN	Superlattice AIN/AlGaN	Superlattice AIN/AlGaN
Superlattice AIN/AlGaN	AIN 200 nm 850–880°C	Graded AIN/AlGaN	AIN 200 nm 1150°C
AIN 200 nm 850–880°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AIN 200 nm 1150°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
<b>N<sub>DIS</sub> in GaN, cm<sup>-2</sup></b> (5–7) · 10 <sup>9</sup>		(3–4) · 10 <sup>9</sup>	(0,9–1) · 10 <sup>9</sup>
<b>Mobility in DEG, cm<sup>2</sup>/V·s</b>	900–1200	1300–1600	1500–1800

Рис. 1. Конструкции и условия роста гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN

Fig. 1. Design and growth conditions of the AlN/AlGaN/GaN/AlGaN heterostructure

более проста в обслуживании, а также обладает рядом особенностей, таких как возможность низкотемпературного роста и отсутствие водорода на ростовой поверхности. Однако в отличие от аммиачной МВЕ данный метод не позволяет заметно увеличить температуру роста и таким образом повысить качество материала.

## ВЫРАЩИВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaN

Гетероструктуры на основе GaN были выращены на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) методом плазменной и аммиачной МЛЭ на установке STE3N (ЗАО «НТО», SemiTEq). Уникальными особенностями данного оборудования являются значительно расширенный диапазон рабочих температур подложки и отношений V/III. В частности, благодаря криопанелям увеличенной площади и усиленной системе откачки в ростовой камере обеспечивается

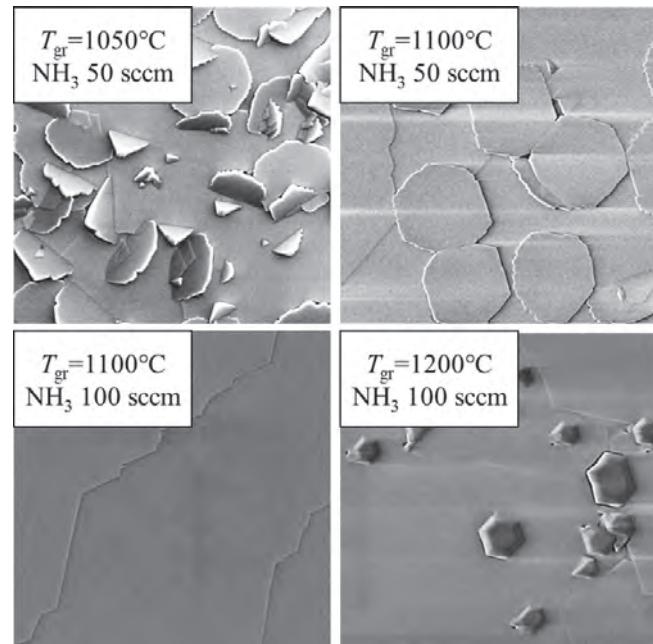


Рис. 2. СЭМ-изображения (1×1 мкм) слоев AlN толщиной 1,25 мкм, выращенных при разных потоках NH<sub>3</sub> и температурах подложки T<sub>gr</sub>. Fig. 2. SEM images (1×1 μm) of 1.25 μm thick AlN epilayers grown at different NH<sub>3</sub> flows and substrate temperatures

вакуум не хуже 5·10<sup>-3</sup> Па при увеличении температуры подложки до 970 °C при потоке аммиака 400 см<sup>3</sup>/мин. В результате дополнительной модернизации узла нагрева образца и ростового манипулятора обеспечивается возможность длительного роста с вращением на подложках диаметром до 100 мм при температуре до 1200 °C (показания пирометра). При этом вакуум находится на уровне не хуже 1·10<sup>-3</sup> Па (при потоке аммиака 60 см<sup>3</sup>/мин).

В качестве инструментов для *in situ* контроля скорости роста и состояния ростовой поверхности использовалась лазерная интерферометрия и отраженная дифракция быстрых электронов ОДБЭ (RHEED). Выращенные гетероструктуры были

## INTRODUCTION

Among the wide spectrum of semiconductor materials, group-III metal nitrides are of particular interest, since they have unique properties and are intensively studied for the purpose of creating optoelectronic and microwave high-temperature devices based on them.

One of the main problems in manufacturing GaN-based devices up to date is high cost and lack of lattice matched substrates. Heteroepitaxy of nitrides on mismatched substrates usually gives high dislocation density ( $10^9$ – $10^{10}$  cm<sup>-2</sup> for MBE,  $10^8$ – $10^9$  cm<sup>-2</sup> for MOCVD) affecting the device quality and reliability. Higher dislocation density in GaN is related to lower growth temperature which leads to insufficient atomic surface mobility and worse coalescence of nucleation blocks. Typical values of the room-temperature

electron mobility in GaN layers grown on sapphire (with GaN, AlGaN, or AlN buffer layers) are within the range of 250–350 cm<sup>2</sup>/V·s for MBE and 500–700 cm<sup>2</sup>/V·s for MOCVD. The best values are 560 cm<sup>2</sup>/V·s (using an AlN buffer layer formed by magnetron sputtering) and 900 cm<sup>2</sup>/V·s for MBE and MOCVD, respectively [1, 2]. Electron mobilities higher than 1100 cm<sup>2</sup>/V·s were attained by optimizing the MBE growth conditions in GaN layers grown on MOCVD “templates” [3].

On the other hand, MBE has several advantages in comparison with the MOCVD: growth monitoring at atomic layer thickness, sharper heterointerfaces, high cleanliness of growth chamber and high purity of the materials make it possible to build a high-vacuum cluster systems etc. At present an increasing number of researchers choose plasma-assisted (PA) MBE as it is simpler

in service and has its own benefits. However unlike the ammonia-MBE this method does not allow a noticeable increase in the temperature growth which usually improves the material quality.

## GROWN ON GaN-BASED HETEROSTRUCTURES

GaN-based heterostructures were grown on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) substrates by ammonia and plasma-assistant MBE at STE3N system (SemiTeq).

The specific features of this system are greatly extended ranges of the working substrate temperatures and V/III element ratios. In particular, cryopanels with an increased area and the enhanced pumping system provide the growth chamber with vacuum 5·10<sup>-3</sup> Pa at a substrate temperature raised to 970 °C and an ammonia flow rate

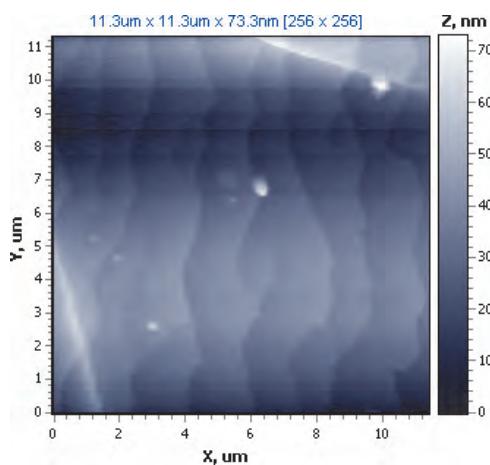


Рис. 3. AFM-изображение ( $11 \times 11$  мкм) слоя AlN толщиной 1,25 мкм, выращенного в оптимальных условиях ( $RMS = 0,7$  нм)

Fig. 3. AFM image ( $11 \times 11$   $\mu\text{m}$ ) of a  $1.25 \mu\text{m}$  thick AlN epilayer grown at optimal conditions ( $RMS = 0.7$  nm)

исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ПРЭМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и Холловских измерений.

Ранее нами было показано, что выращивание высокотемпературных буферных слоев AlN при экстремально высокой температуре (до  $1150^\circ\text{C}$ ) позволяет кардинально улучшить структурное совершенство всей гетероструктуры и слоев GaN в частности [4].

Использование только высокотемпературных буферных слоев AlN даже без использования специальных сверхрешеток приводит к заметному улучшению структурного совершенства. Плотность дислокаций в слоях GaN, выращенных на таком буферном слое, составляет  $(3-4) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , а подвижность в двумерном электронном газе (ДЭГ) в двойных гетероструктурах с барьерным слоем  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x = 0,25$ ) достигает  $1300-1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{s}$ .

Использование высокотемпературного подхода вместе со сверхрешетками AlGaN/AlN позволило понизить плотность дислокаций в GaN до значений  $9 \cdot 10^8-1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , что привело

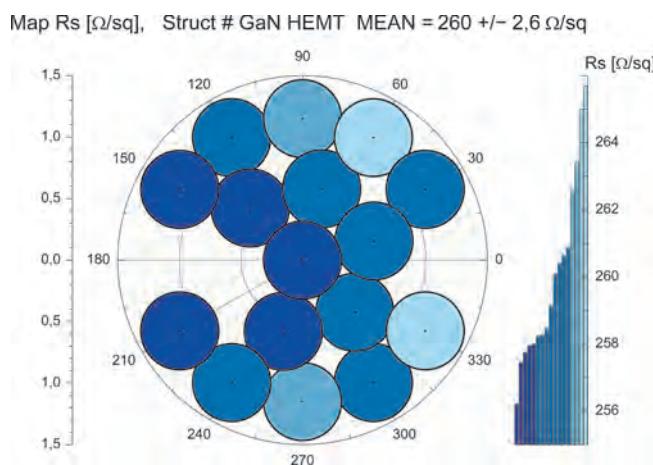


Рис. 4. Однородность слоевого сопротивления по пластине 3"  $260 \Omega/\square \pm 1\%$

Fig. 4. Uniformity of sheet resistance at 3" substrate  $260 \Omega/\square \pm 1\%$

к увеличению подвижности электронов в «объемном» GaN до  $600-650 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{s}$  при концентрации электронов  $3-5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Полученные значения плотности дислокаций и подвижности электронов в слоях GaN являются лучшими на сегодняшний день для метода МЛЭ и находятся в числе лучших для метода МОГФЭ. Экспериментальные значения подвижности и плотности дислокаций согласуются с данными расчетов [5]. При этом подвижность в ДЭГ, образованном на границе таких слоев GaN, достигает  $1800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{s}$  на подложках сапфира и SiC.

Важно отметить, что получение таких буферных слоев трудно реализовать в плазменной МЛЭ, поскольку для двумерного режима роста AlN необходим Al-обогащенный режим, а десорбция алюминия становится существенной при температуре подложки более  $900^\circ\text{C}$ . Использование буферных слоев AlN, выращенных при помощи плазменной МЛЭ на температуре  $850-880^\circ\text{C}$ , вместе с использованием сверхрешеток позволяет получить подвижность в ДЭГ на уровне  $900-1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{s}$ , что связано, по всей видимости, с повышенной плотностью дислокаций (более  $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ). Конструкции и условия роста гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN представлены на рис. 1.

of 400 sccm. Additional modification of the sample holder and growth manipulator provide long-time growth on rotating substrates with diameters of up to 100 mm at a temperature of  $1200^\circ\text{C}$  (pyrometer readings). During the process, the residual pressure is no higher than  $1 \cdot 10^{-3}$  Pa (at ammonia flow rate of 60 sccm).

Laser interferometry and reflection high-energy electron diffraction (RHEED) served as tools for *in situ* monitoring of the growth rate and the state of the growth surface. The properties of the grown samples were examined via transmission electron microscopy (TEM) and Hall measurements.

As the primary tool for *in situ* process monitoring we have used laser

interferometry and reflection high-energy electron diffraction (RHEED). The grown heterostructures were investigated by transmitted electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM) as well as measurements of 2DEG density and mobility by a Hall measurement.

Earlier it was shown that the use of high-temperature AlN buffer layers grown using ammonia as a nitrogen source with an extremely high substrate temperature (up to  $1150^\circ\text{C}$ ) makes it possible to drastically improve the structural quality of heterostructure and of GaN layers [4].

Only high-temperature AlN buffer layers, even without the use of special superlattices,

lead to the improvement of structural quality. The dislocation density in GaN layers grown on such a buffer layer is  $(3-4) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , and the mobility in a two-dimensional electron gas (2DEG) in double heterostructures with  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x = 0.25$ ) barrier layer reaches  $1300-1600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .

Using the high-temperature approach together with the AlGaN/AlN superlattices allowed decreasing dislocations density in GaN to  $9 \cdot 10^8-1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , which resulted in increasing electron mobility in “bulk” GaN to  $600-650 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  at electron concentration of  $3-5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . These values of the dislocation density and electron mobility are among the best reached up to date for GaN grown on sapphire using MBE method.



Детально исследовано влияние потока аммиака в интервале температур 1000–1200 °C на шероховатость поверхности AlN. Установлено заметное улучшение морфологии поверхности при увеличении потока аммиака с 30 см<sup>3</sup>/мин до 100 см<sup>3</sup>/мин. Отмечено, что температура подложки  $T_{gr} \leq 1050$  °C способствует поликристаллическому росту, приводящему к образованию разориентированных кристаллитов. При слишком высокой температуре или избытке аммиака на поверхности слоя образуются гексагональные призматические дефекты. Можно предположить, что дефектами являются области инверсной полярности. Дальнейшее увеличение потока NH<sub>3</sub> до 200 см<sup>3</sup>/мин не позволяет существенно улучшить качество поверхности (рис. 2). Поэтому температура подложки  $T_{gr} = 1100$  °C и поток NH<sub>3</sub> в 100 см<sup>3</sup>/мин в минуту приняты как оптимальные. В данных условиях получена атомарно-гладкая поверхность AlN с террасами и RMS ниже 1 нм (рис. 3).

Далее было исследовано влияние Ga как сурфактанта при росте буферного слоя AlN. При температурах выше 1000 °C и потоке аммиака менее 100 см<sup>3</sup>/мин скорость термического разложения нитрида галлия существенно выше скорости роста, поэтому рост нитрида галлия невозможен и галлий может выступать в качестве сурфактанта для роста слоев AlN. Было установлено, что даже использование равных потоков Al и Ga не приводит к изменению скорости роста AlN при температуре подложки 1150 °C, что говорит о том, что атомы галлия не встраиваются в решетку AlN, при этом обеспечивается ускоренный переход в двумерный режим роста. Наиболее быстрый переход к двумерной картине роста происходит при соотношении потоков около 10:1. Данные об использовании сурфактанта Ga для улучшения свойств AlN и всей гетероструктуры коррелируют с данными, представленными в работе [6].

Применение обоих подходов (сурфактанта Ga [7] или оптимизация потока аммиака [8]) позволяют дополнительно увеличить на 20–30 % подвижность электронов в канале GaN/AlGaN до 2000 см<sup>2</sup>/В·с. Однородность слоевого сопротивления в полученных слоях находится пределах ±1 %.

На основе таких двойных гетероструктур в ЗАО «Светлана-Рост» созданы транзисторы с длиной затвора 0,5 мкм и 0,25 мкм. Достигнута плотность мощности 6 Вт/мм на частоте 4 ГГц и 4,5 Вт/мм при усилении малого сигнала 11 дБ на частоте 10 ГГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что увеличение температуры роста буферного слоя для аммиачной МЛЭ по сравнению с плазменной и оптимизация конструкции гетероструктуры позволяют снизить плотность дислокаций в слоях GaN на 1–1,5 порядка, что приводит к существенному увеличению подвижности в двумерном газе до значений 1500–1800 см<sup>2</sup>/В·с. Использование как оптимизированного потока аммиака, так и сурфактанта Ga при росте слоя буферного слоя AlN позволило дополнительно увеличить подвижность электронов до 2000 см<sup>2</sup>/В·с. Использование таких гетероструктур, выращенных на подложках SiC в СВЧ-транзисторах, позволило достигнуть плотностей мощности 6 Вт/мм и 4,5 Вт/мм на частотах 4 ГГц и 10 ГГц соответственно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Webb J. B. et al. Defect reduction in GaN epilayers and HFET structures grown on (0001) sapphire by ammonia MBE // Journal of Crystal Growth, 2001. V. 230. № 3. P. 584–589.
2. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. Insitu monitoring and Hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers // Journal of Applied Physics, 1992. V. 71. № 11. P. 5543–5549.
3. Koblmüller G. et al. High electron mobility GaN grown under N-rich conditions by plasma-assisted molecular beam epitaxy // Appl. Phys. Lett., 2007. V. 91. № 22. P. 221905.
4. Petrov S. I. et al. Growth of high quality III-N heterostructures using specialized MBE system // Physica status solidi c, 2012. V. 9. № 3–4. P. 562–563.
5. Ng H. M. et al. The role of dislocation scattering in n-type GaN films // Applied physics letters, 1998. V. 73. № 6. P. 821–823.
6. Mayboroda I. O. et al. On the Growth of High-Temperature Epitaxial AlN (AlGaN) Layers on Sapphire Substrates by Ammonia Molecular Beam Epitaxy // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2017. V. 11. № 6. P. 1135–1144.
7. Alexeev A. N., Mamaev V. V., Petrov S. I. Study of the influence of Ga as a surfactant during the high-temperature ammonia MBE of AlN layers on the properties of nitride heterostructures // Semiconductors, 2017. V. 51. № 11. P. 1453–1455.
8. Lutsenko E. V. et al. MBE AlGaN / GaN HEMT heterostructures with optimized AlN buffer on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Semiconductors, 2018.

The experimental mobility and dislocation densities values agree with the calculation data [5]. The mobility in the 2DEG on such GaN layers reaches 1800 cm<sup>2</sup>/Vs on sapphire and SiC substrates.

It should be noted that growth at such high temperatures in the plasma-assisted MBE is very difficult to realize since Al-rich mode is necessary for two-dimensional growth of AlN and the desorption of aluminum becomes significant at substrate temperature more than 900 °C.

Electron mobility in heterostructures grown on PA PBE AlN layers at 850–880 °C with superlattices reaches 900–1200 cm<sup>2</sup>/Vs which is explained by high dislocation density (more than 5 · 10<sup>9</sup> cm<sup>-2</sup>). Design and growth

conditions of the AlN/AlGaN/GaN/AlGaN heterostructure are shown in Fig. 1.

Influence of ammonia flow in the temperature range 1000–1200 °C on roughness of the AlN layer has been studied. There is a substantial improvement of surface morphology with an increase of NH<sub>3</sub> flow from 30 sccm to 100 sccm which is probably caused by an increase in V/III ratio.

It is obvious that a substrate temperature  $T_{gr} \leq 1050$  °C promotes a polycrystalline growth leading to the formation of misoriented crystallites. At high temperature or high ammonia flow, hexagonal prismatic-shaped hills are formed on a layer surface. An origin of the hills is not clear yet, but one can suppose the defects are polarity inversion

domains. A further increase of NH<sub>3</sub> flow to 200 sccm doesn't improve the surface quality substantially (Fig. 2). Therefore, the substrate temperature of  $T_{gr} = 1100$  °C and NH<sub>3</sub> flow of 100 sccm can be accepted as close to optimal conditions providing growth of well-ordered layer with satisfactory surface smoothness. Under these conditions, an atomically smooth AlN surface with terraces and RMS below 1 nm was obtained (Fig. 3).

The influence of the Ga surfactant flow and substrate temperature at a AlN buffer layer growth on the properties of the heterostructure was investigated.

The thermal decomposition rate of GaN at temperatures above 1000 °C and a small



ammonia flow ( $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) is substantially higher than its growth rate; thus gallium nitride growth is impossible and gallium can be used as a surfactant for the growth of AlN layers.

It was established that even the use of equal Al and Ga flux does not lead to an increment in the AlN growth rate at a substrate temperature of  $1150^\circ\text{C}$ , which proves that Ga atoms do not incorporate into the AlN lattice, wherein accelerate transition to the 2D growth mode. It is obvious that the most rapid transition to a 2D growth mode occurs at a flow ratio of about 10:1. Results of using surfactant Ga to improve the properties of AlN and whole heterostructure correlate with the data presented in [6].

The use of both approaches (surfactant Ga [7] or optimized ammonia flow [8]) additionally increases 2DEG mobility up to  $2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Uniformity of sheet resistance in the obtained layers is within  $\pm 1\%$  (Fig. 4).

The use of this technology for growing on SiC substrates (Svetlana-Rost JSC) made it possible to manufacture a DHFET with a gate length of  $0.5 \mu\text{m}$  and  $0.25 \mu\text{m}$ . Up to 50 % PAE and delivered power density of  $6 \text{ W/mm}$  at  $4 \text{ GHz}$  and  $4.5 \text{ W/mm}$  with small signal gain up to  $11 \text{ dB}$  at  $10 \text{ GHz}$  have been achieved.

## CONCLUSIONS

It has been shown that high-temperature AlN buffer layers considerably improve the structural quality of nitride heterostructures compared with plasma-assisted ones and decrease the dislocation density in GaN layers by 1–1.5 orders, which leads to an increase in 2DEG mobility up to  $1500$ – $1800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Using optimized ammonia flow as well as surfactant Ga while AlN buffer layer is grown allows one to additionally increase 2DEG mobility to  $2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . The use of such heterostructures grown on SiC substrates in microwave transistors has made it possible to achieve power densities of  $6 \text{ W/mm}$  and  $4.5 \text{ W/mm}$  at  $4 \text{ GHz}$  and  $10 \text{ GHz}$ , respectively.

## REFERENCES

1. Webb J. B. *et al. Defect reduction in GaN epilayers and HFET structures grown on (0001) sapphire by ammonia MBE* // Journal of Crystal Growth, 2001. V. 230. № 3. P. 584–589.
2. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. *In situ monitoring and Hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers* // Journal of Applied Physics, 1992. V. 71. № 11. P. 5543–5549.
3. Koblmüller G. *et al. High electron mobility GaN grown under N-rich conditions by plasma-assisted molecular beam epitaxy* // Appl. Phys. Lett, 2007. V. 91. № 22, P. 221905.
4. Petrov S. I. *et al. Growth of high quality III-N heterostructures using specialized MBE system* // Physica status solidi c, 2012. V. 9. № 3–4. P. 562–563.
5. Ng H. M. *et al. The role of dislocation scattering in n-type GaN films* // Applied physics letters, 1998. V. 73. № 6. P. 821–823.
6. Mayboroda I. O. *et al. On the Growth of High-Temperature Epitaxial AlN (AlGaN) Layers on Sapphire Substrates by Ammonia Molecular Beam Epitaxy* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2017. V. 11. № 6. P. 1135–1144.
7. Alexeev A. N., Mamaev V. V., Petrov S. I. *Study of the influence of Ga as a surfactant during the high-temperature ammonia MBE of AlN layers on the properties of nitride heterostructures* // Semiconductors, 2017. V. 51. № 11. P. 1453–1455.
8. Lutsenko E. V. *et al. MBE AlGaN / GaN HEMT heterostructures with optimized AlN buffer on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* // Semiconductors — 2018.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 1188 руб.

## ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Р. Куэй

при поддержке ФГУП «НПП «Пульсар»  
перевод с англ. под ред. д. ф.-м. н. А. Г. Васильева

В книге рассматривается широкий круг вопросов, связанных с выбором подложек для гетероэпитаксии, с методами изготовления гетероэпитаксиальных структур, с технологией транзисторов на этих структурах.

Представленный в книге аналитический обзор охватывает свыше 1750 работ, посвященных III-N-полупроводникам, которые применяются для создания транзисторов и радиоэлектронных устройств большой мощности, работающих в СВЧ-диапазоне частот.

Рассмотрены материалы, приборы, их технология, моделирование, проблемы надежности и применения

Книга представляет большой интерес для студентов, аспирантов, инженеров, разработчиков приборов и соответствующей аппаратуры.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. – 592 с.  
ISBN 978-5-94836-296-0

## КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru