

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.12737/23648

Мамаев В.В., инж.,
Новиков С.А., инж.,
Петров С.И., канд. физ.-мат. наук
ЗАО «Научное и технологическое оборудование», Санкт-Петербург
Зайцев С.В., инж.-иссл.,
Прохоренков Д.С., инж.-иссл.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ Ga В КАЧЕСТВЕ СУРФАКТАНТА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА СЛОЕВ AlN И AlGaN, ВЫРАЩЕННЫХ АММИАЧНОЙ МЛЭ*

petrov@semiteq.ru

Представлены результаты выращивания слоев AlN методом высокотемпературной аммиачной МЛЭ с использованием Ga в качестве сурфактанта. Основными параметрами влияющими на кинетику роста и дефектообразование являются эффективные потоки прекурсоров и сурфактанта, а также температура подложки, которая ограничивает поток сурфактанта из-за десорбции Ga с поверхности. В частности, добавление потока Ga, равного потоку Al при температуре подложки 1150 °C не изменяет скорость роста, меняя при этом его кинетику. Такой подход позволяет повысить поверхностную подвижность адатомов и обеспечивает быстрый переход в режим 2D-роста. В гетероструктурах с двумерным электронным газом, выращенных с использованием сурфактанта была достигнута подвижность носителей до 2000 см²/В·с.

Ключевые слова: гетероструктуры, AlN/AlGaN, оптоэлектронные приборы, свч транзисторы, плотность дислокаций.

Введение.

Нитриды металлов третьей группы обладают уникальными свойствами и интенсивно исследуются с целью 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 GaN (10⁹–10¹⁰ см⁻² для МЛЭ, 10⁸–10⁹ см⁻² для МОГФЭ), что усложняет задачу получения приборных гетероструктур [1]. Более высокие значения плотности дислокаций в GaN 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 GaN, AlGaN или AlN) находятся в диапазоне 250–350 см²/В·с для МЛЭ и 500–700 см²/В·с для МОГФЭ [2, 3]. При этом метод МЛЭ обладает рядом достоинств по сравнению с МОГФЭ, а именно: позволяет осуществлять in situ диагностику роста на

уровне одного монослоя и получать резкие гетерограницы, обеспечивает высокую чистоту камеры роста и выращиваемого материала, предоставляет возможность построения высоковакуумных кластерных систем, более безопасен [4].

МЛЭ нитридов элементов III группы развивается в двух основных направлениях, различающихся природой источника активного азота: МЛЭ с использованием аммиака в качестве источника азота, по основным ростовым условиям лежащая ближе к МОГФЭ; и активированная плазмой МЛЭ, принципиально более близкая к классической молекулярно–лучевой эпитаксии традиционных соединений A₃B₅ [5].

В настоящее время все большее число исследователей выбирают МЛЭ с плазменным источником азота, поскольку она 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 за счет увеличения поверхностной подвижности атомов.

В настоящей работе представлены результаты выращивания высокотемпературных буферных слоев AlN методом аммиачной МЛЭ с использованием Ga в качестве сурфактанта, а так же транзисторных гетероструктур методом плазменной и аммиачной МЛЭ. Представлены сравнительные характеристики полученных структур.

Методика. Гетероструктуры на основе GaN были выращены на подложках Al₂O₃ (0001) в Прикладной лаборатории ЗАО «НТО» на установке МЛЭ STE3N2 (SemiTEq, Россия). Уникальными особенностями данного оборудования являются значительно расширенный диапазон рабочих температур подложки и отношений V/III. В качестве инструментов для in situ контроля скорости роста и состояния ростовой поверхности использовалась лазерная интерферометрия и отраженная дифракция быстрых электронов. Свойства выращенных образцов исследовались

при помощи просвечивающей электронной микроскопии и Холловских измерений.

Ранее нами было показано, что использование высокотемпературных буферных слоев AlN/сверхрешетка/AlGaIn, выращенных методом МЛЭ с использованием аммиака в качестве источника азота при экстремально высокой температуре подложки (до 1150 °С) позволяет кардинально улучшить структурное совершенство слоев GaN [6]. Плотность дислокаций в GaN была понижена до значений $9 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (рис. 1). Максимальная подвижность электронов в слаболегированном кремнием слое GaN толщиной 1.5 мкм находится на уровне $600 - 650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации электронов $3 - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Экспериментальные значения подвижности и плотности дислокаций согласуются с данными расчетов [7, 8].

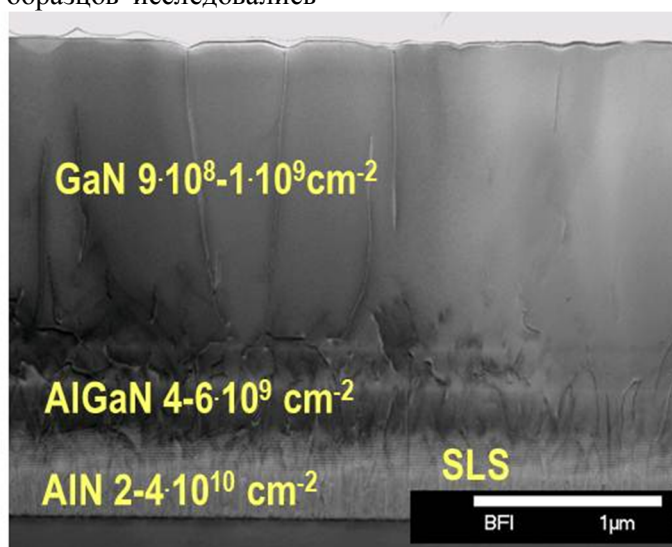


Рис. 1. STEM изображение многослойной гетероструктуры

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 °С [9].

Использование указанных слоев GaN в двойной гетероструктуре с барьерным слоем Al_xGa_{1-x}N различного состава ($x = 0.25 - 0.4$) позволило контролируемо изменять слои сопротивление, концентрацию и подвижность в двумерном электронном газе в диапазоне 230–400 Ом/м, $(1.0 - 1.8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и 1300–1700 см²/В·с, соответственно. При этом барьерный слой состоял из тонкого слоя AlN толщиной 1 нм и модулировано легированного кремнием

слоя AlGaIn толщиной 24 нм. В случае использования сверхрешетки AlN/GaN в качестве барьерного слоя его толщина составляла 10 нм.

Введение сурфактанта – вещества находящегося на ростовой поверхности и при этом не участвующего в росте пленки – меняет кинетику адатомов, увеличивая их поверхностную подвижность. При небольшом потоке аммиака и температуре выше 1000 °С рост нитрида галлия невозможен, поэтому галлий может выступать в качестве сурфактанта для роста слоев AlN [10]. Важными параметрами, определяющими механизмы роста и дефектообразования, являются эффективный поток компонентов растущей пленки и сурфактанта. При этом температура подложки

влияет на скорость десорбции галлия с поверхности, что накладывает ограничение на поток галлия. Слои AlN выращенные с использованием сурфактанта имеют плотность дефектов ниже, чем слои выращенные без потока галлия при тех же условиях. Использование аперриодичных сверхрешеток, градиентных слоев переменного состава и их комбинаций позволяет снизить плотность прорастающих дислокаций путем их загиба и объединения.

В данной работе было установлено, что использование Ga в качестве сурфактанта при высокотемпературной эпитаксии буферных слоев AlN позволяет увеличить подвижность электронов как в объемном слое GaN, так и в двумерном электронном газе GaN/AlGaN. Основные параметры, которые влияют на кинетику роста и дефектообразование это эффективные потоки прекурсоров и сурфактанта, а также температура подложки, которая ограничивает поток сурфактанта из-за десорбции Ga с поверхности. В частности, добавление потока Ga, равного потоку Al при температуре подложки 1150 °C не изменяет скорость роста, меняя при этом его кинетику. Такой подход позволяет повысить поверхностную подвижность адатомов и обеспечивает быстрый переход в режим 2D-роста. В гетероструктурах с двумерным электронным газом, выращенных с использованием сурфактанта была достигнута подвижность носителей до 2000 см²/В·с. В настоящее время проводятся исследования плотности дислокаций в гетероструктурах, полученных с использованием сурфактанта.

Полученные значения подвижности электронов в слоях GaN являются лучшими на сегодняшний день для метода МЛЭ и находятся в числе лучших для метода МОГФЭ.

Результаты.

Использование высокотемпературных буферных слоев AlN позволяет значительно улучшить структурное совершенство нитридных гетероструктур и повысить подвижность электронов в слоях GaN. Для дальнейшего улучшения качества слоев предложено использовать Ga как сурфактант при высокотемпературной эпитаксии AlN методом аммиачной МЛЭ. Ключевыми параметрами определяющими кинетику роста и дефектообразование являются эффективные потоки прекурсоров и сурфактанта, а также температура подложки. Установлено что использование оптимальных условий роста с использованием сурфактанта позволяет заметно увеличить подвижность электронов слоях GaN.

В гетероструктурах с двумерным электронным газом GaN/AlGaN была получена подвижность электронов до 2000 см²/В·с.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08048 «р_офи_м».*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ambacher O. Growth and applications of group III-nitrides //Journal of Physics D: Applied Physics. 1998. Т. 31. №. 20. С. 2653.
2. Webb J.B., Tang H., Bardwell J.A., Moisa S., Peters C., MacElwee T. Defect reduction in GaN epilayers and HFET structures grown on (0001) sapphire by ammonia MBE //Journal of crystal growth. 2001. Т. 230. №. 3. С. 584–589.
3. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. In situ monitoring and Hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers //Journal of applied physics. 1992. Т. 71. №. 11. С. 5543–5549.
4. Akasaki I., Amano H. Crystal growth of column-III nitride semiconductors and their electrical and optical properties //Journal of crystal growth. 1996. Т. 163. №. 1. С. 86–92.
5. Hoke W.E., Kennedy T.D., Torabi A., Lyman P.S., Howsare C.A., Schultz B.D.. Highly uniform AlGaIn/GaN HEMT films grown on 200-mm silicon substrates by plasma molecular beam epitaxy //Journal of Vacuum Science & Technology B. 2014. Т. 32. №. 3. С. 030605.
6. Petrov S.I., Alexeev A.N., Krasovitsky D.M., Chaly V.P. Growth of high quality III-N heterostructures using specialized MBE system //physica status solidi (c). 2012. Т. 9. №. 3–4. С. 562–563.
7. Ng H.M., Doppalapudi D., Moustakas T.D., Weimann N.G., Eastman L.F. The role of dislocation scattering in n-type GaN films //Applied physics letters. 1998. Т. 73. №. 6. С. 821.
8. Weimann N.G., Eastman L.F., Doppalapudi D., Ng H.M., Moustakas T.D. Scattering of electrons at threading dislocations in GaN //Journal of Applied Physics. 1998. Т. 83. №. 7. С. 3656–3659.
9. Jmerik V.N., Mizerov A.M., Nechaev D.V., Aseev P.A., Sitnikova, A. A., Troshkov S.I., Ivanov S.V. Growth of thick AlN epilayers with droplet-free and atomically smooth surface by plasma-assisted molecular beam epitaxy using laser reflectometry monitoring //Journal of Crystal Growth. 2012. Т. 354. №. 1. С. 188–192.
10. Li J., Lin J.Y., Jiang H.X. Surfactant effects of gallium on quality of AlN epilayers grown via metal-organic chemical-vapour deposition on SiC substrates //Journal of Physics D: Applied Physics. 2012. Т. 45. №. 28. С. 285103.

**Mamaev V.V., Petrov S.I., Novikov S.A., Zaycev S.V., Prohorenkov D.S.
HIGH QUALITY GAN AND ALGAN LAYERS GROWN BY AMMONIA MBE WITH
US GA AS SURFACTANT**

In this work we present the results of AlN buffer layer ammonia MBE growth for HEMT using Ga as surfactant. Key parameters that affect the growth kinetics and defects formation are efficient fluxes of precursors and surfactant as well as the substrate temperature which limits surfactant flux because of desorption Ga from the surface. In particular, addition of Ga flux equal to Al flux at substrate temperature 1150 °C keeps the growth rate constant. This approach allows to increase surface mobility of adatoms, provides quick transition to 2D-growth mode, that results in mobility increasing in GaN bulk layer as well as in heterostructures with 2DEG. In GaN/AlGaN heterostructures mobility up to 2000 cm²/Vs was achieved.

Key words: heterostructures, AlN/AlGaN, uv optoelectronic devices, microwave transistors, dislocation density

Мамаев Виктор Викторович, инженер

ЗАО «НТО»

Адрес: Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

Новиков Сергей Андреевич, инженер

ЗАО «НТО»

Адрес: Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

Петров Станислав Игоревич, кандидат физико-математических наук, начальник прикладной лаборатории.

ЗАО «НТО»

Адрес: Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

E-mail: petrov@semiteq.ru

Зайцев Сергей Викторович, инженер-исследователь

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Прохоренков Дмитрий Станиславович, инженер-исследователь

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.