

УДК 621.315.592

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ НИТРИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© 2015 г. А. А. Арендаренко, В. А. Орешкин,
Ю. Н. Свешников, И. Н. Цыпленков
ЗАО «Элма–Малахит»,
проезд 4806, д. 2, стр. 4, Зеленоград, Москва, 124460, Россия

Рассмотрены основные тенденции в развитии технологии гетероструктур нитридных соединений для элементной базы СВЧ–техники и силовой электроники, а также светоизлучающих диодов. Отмечено, что важнейшим современным технологическим направлением является разработка гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния. Рассмотрены основные проблемы гетероэпитаксии нитридных соединений на подложке кремния и пути их решения. Представлены некоторые результаты разработок технологии гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния в ЗАО «Элма–Малахит». Гетероструктуры AlGaIn/GaN/Si выращены МОС–гидридным методом. Показано, что предэпитаксиальная обработка подложек кремния и начальная стадия процесса выращивания, включающая предварительное покрытие поверхности Si алюминием при подаче в реактор потока ТМА, играют большую роль в формировании гетероструктур, свободных от трещин и с хорошей морфологией. В то же время установлено, что форма поверхности гетероструктур определяется главным образом композицией переходной области между зародышевым слоем AlN и слоем GaN. Транзисторы, изготовленные на основе выращенных гетероструктур AlGaIn/GaN/Si, продемонстрировали приемлемые статические характеристики: максимальная плотность тока составила 800 мА/мм, пробивное напряжение — более 120 В, крутизна — 170 мСм/мм. Показано, что для дальнейшего развития гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния экспериментально–технологическую работу необходимо организовать в тесном взаимодействии с аналитическим прогнозированием и расчетами свойств выращиваемого материала методами математического моделирования. Такой подход поможет повысить результативность разработок технологии и углубит научные представления в отношении процессов, ответственных за формирование свойств гетероструктур.

Ключевые слова: нитрид галлия, карбид кремния, сапфир, кремний, гетероструктура, подложка, гетероэпитаксия, технология.

Введение

Уже более полутора десятков лет серьезное внимание в электронике уделяется разработке элементной базы СВЧ–техники и силовой электроники на основе нитридных соединений элементов III группы. Развитие указанных приборов (рис. 1, см. вторую стр. обложки) определено необходимостью освоения новых, более высоких частотных диапазонов, повышения их мощности и линейности характеристик, а также улучшения их эффективности [1, 2].

В настоящее время производство приборов на основе нитрида галлия находится на подходе к массовому уровню. Оно рассматривается всеми индустриально развитыми странами как магистральное направление, обеспечивающее не только совершенствование характеристик устройств на их основе (в том числе и по размерно–весовым факторам), но и решение задач по существенно–му сбережению электроэнергии и совершенствованию ее потребления, улучшению экологической обстановки.

По мнению представителей DAPRA (*Defense Advanced Research Project Agency* — Агентство перспективных исследований

МО США), существующий уровень разработок приборов СВЧ–техники на основе нитрида галлия по их параметрам, надежности и объему производства позволяет уже говорить о необходимости замены их предшественников (приборов на арсениде галлия) в СВЧ–системах, таких как базовые станции мобильной связи, тактические и спутниковые системы радиосвязи, станции активного РЭП, радиолокационные системы гражданского и военного назначения.

Достигнутые значения плотности мощности НЕМТ–транзисторов на основе нитрида галлия в 5–10 раз выше, чем у их аналогов на основе GaAs. Это обеспечивает существенное улучшение качественных характеристик СВЧ–устройств на их основе по выходной мощности, эффективности, стоимостным характеристикам (в том числе, имеется в виду, что широкий температурный рабочий интервал позволяет перейти от жидкостного охлаждения к воздушному), массогабаритным размерам (рис. 2). Так, объем сканирования радаров увеличивается в 5 раз по сравнению с радаром такого же размера на основе приборов из GaAs.

Арендаренко Алексей Андреевич — генеральный директор, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: arendarenko@elma-malachit.ru; **Орешкин Виктор Анатольевич** — начальник научно–производственной лаборатории, e-mail: oreshkin-malachit@yandex.ru; **Свешников Юрий Николаевич** — главный научный сотрудник, старший научный сотрудник, кандидат техн. наук, e-mail: sveshnikov-elma@yandex.ru; **Цыпленков Игорь Николаевич** — главный технолог, старший научный сотрудник, кандидат техн. наук, e-mail: icyplenkov@yandex.ru

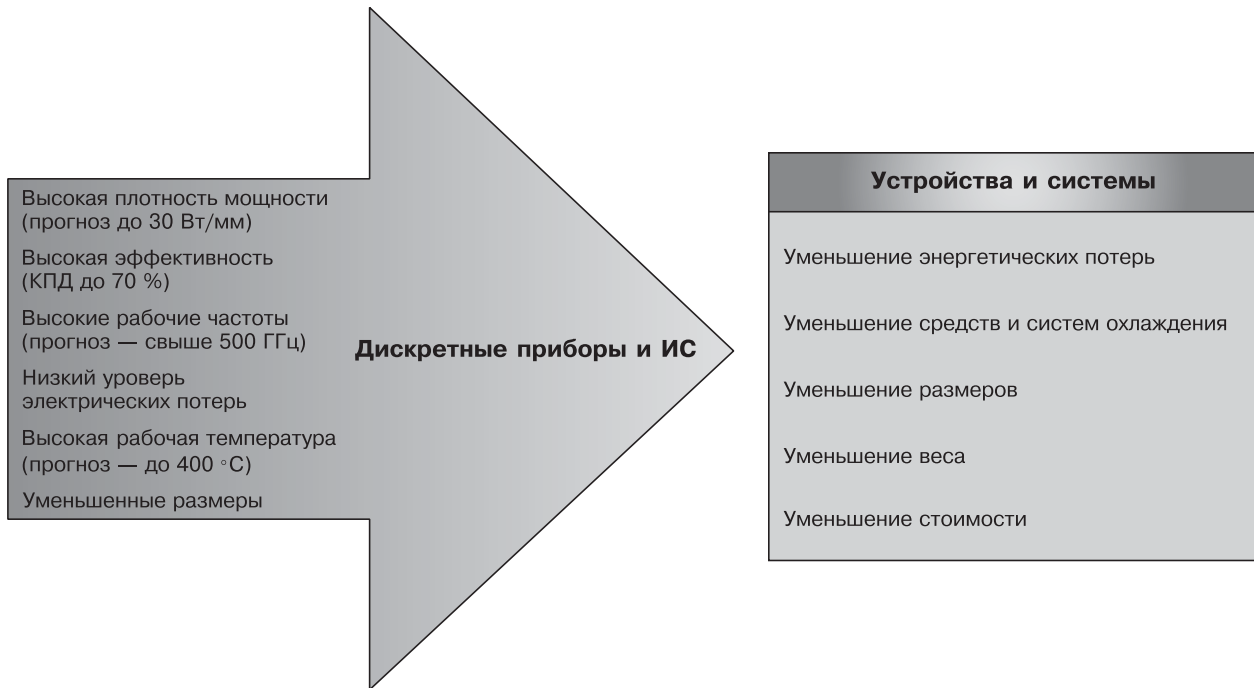


Рис. 2. Реализация свойств нитридных материалов в приборах СВЧ–техники
 Fig. 2. Applications of properties of nitrides in RF devices

Разработки приборов на основе гетероструктур нитрида галлия проводятся многими крупными зарубежными компаниями (более 30). Большинство из них (Nitronex, RFMD, TriQuint, Cree (США); NEC, Toshiba, Edyna (Япония) и др.) к настоящему времени уже приступили к промышленному выпуску элементной базы для различных систем радиосвязи как гражданского, так и военного применения (рис. 3).

Представленные на рис. 3 данные не носят исчерпывающего характера, но свидетельствуют о бурном развитии технологии материалов и приборов на основе нитрида галлия для СВЧ–техники. Например, за последние два года на рынок приборов (HEMT–транзисторы и усилители мощности на их основе) вышло не менее 10 известных компаний, при этом их продукция пользуется большим спросом. Так, по сообщению Sumitomo Electric (Япония), компания к

середине 2011 г. поставила потребителям уже более 1 млн HEMT–транзисторов; компания RFHIC (США) развила объем производства усилителей мощности для LTE RRH до 10 тыс. ед./мес. К середине 2013 г. компания Cree только в сектор мобильной телефонии поставила более 2 млн транзисторов на основе нитрида галлия.

Значительные преимущества СВЧ–приборов на основе нитридных соединений по мощности, рабочим температурам, частотному диапазону делают их весьма привлекательными для создания систем связи и вооружения, в частности для наземных и бортовых АФАР (активная фазированная антенная решетка). Поэтому за рубежом эти работы активно поддерживаются на правительственном уровне. В частности, в США, помимо DARPA, финансирование этого направления осуществляется Агент-

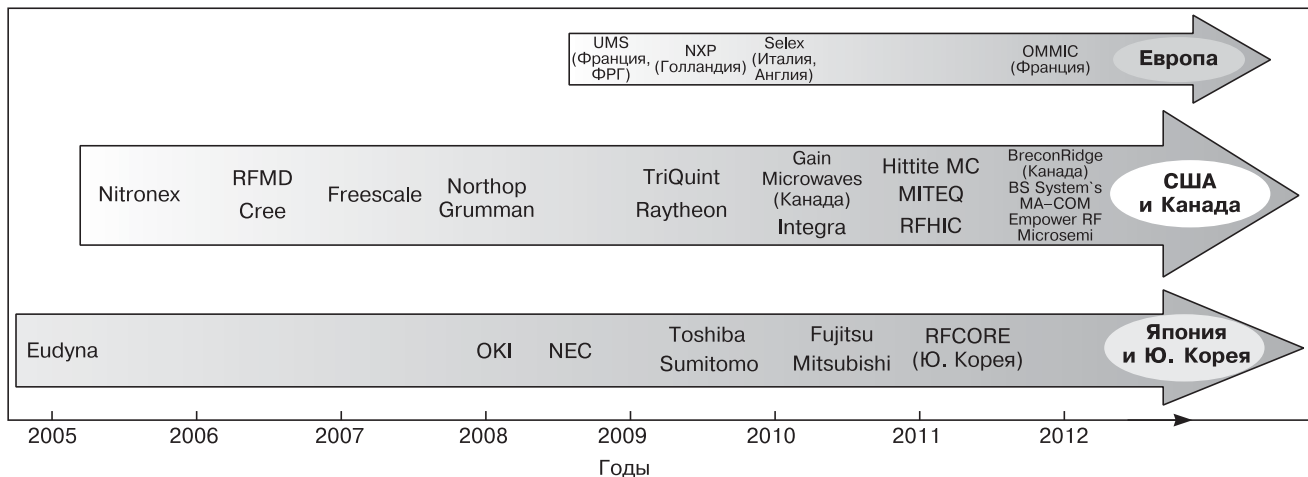


Рис. 3. Развитие производства HEMT на основе гетероструктур нитрида галлия
 Fig. 3. Development of gallium nitride heterostructure based HEMT technology

ством ракетной обороны (Missile Defense Agency), военно-воздушными силами (через Исследовательскую лабораторию военно-воздушных сил — The Air Force Research Laboratory, AFRL), военно-морскими силами (через Navy EOC — Электрооптический центр военно-морских сил). В Европе выполнены крупномасштабные многонациональные проекты Korrigan, Morgan, объединившие усилия ведущих фирм и лабораторий европейских стран. Цель проектов — разработка собственной передовой GaN-HEMT-технологии, создание самостоятельной европейской структуры поставок надежных современных GaN-приборов и монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона, а также промышленных мощностей по их производству для обеспечения всех основных оборонных предприятий Европы. Министерство экономики, промышленности и торговли Японии также финансирует подобные проекты.

Производимая в настоящее время элементная база СВЧ-техники на основе нитрида галлия в основном предназначена для использования в устройствах Q—С—Х-диапазонов частот. Однако ожидается, что в ближайшие 5 лет будет успешно преодолен рубеж в 500 ГГц. Исследовательские работы по совершенствованию как самих транзисторов на основе нитрида галлия, так и материалов для изготовления HEMT носят чрезвычайно широкий характер, и их результаты свидетельствуют о бурном прогрессе данного направления электроники. Результаты выполненных в последние годы разработок дают все основания считать этот прогноз небезосновательным. Частота отсечки экспериментальных образцов HEMT-транзисторов составляет 260 ГГц, максимальная частота осцилляций — 400 ГГц.

Направления развития производства гетероструктур

В настоящее время лидирующим по достигнутой мощности и частотным показателям можно считать приборы, изготовленные на гетероструктурах, выращенных на подложках полуизолирующего SiC. Преимуществом использования структур на таких подложках является высокая теплопроводность SiC, что позволяет обеспечивать хороший теплоотвод, определяющий в конечном счете уровень выходной мощности устройств. Однако, несмотря на большие успехи в разработке технологий получения материалов и создания приборных структур, элементные базы СВЧ-техники и особенно силовой электроники на основе нитридных соединений на подложках карбида кремния пока еще испытывают ряд затруднений в плане масштабности их использования. На это существуют определенные причины, связанные не только с вопросами технической адаптации новых приборов. В первую очередь это относится к стоимостным характеристикам последних. Высокая стоимость полуизолирующего карбида кремния является заметным

препятствием для коммерческого использования приборов на основе таких структур. Стоимостной фактор имеет очень важное значение, поскольку транзисторы на нитриде галлия предназначены не только для оснащения систем вооружения, но и для широкого круга гражданских применений. В связи с этим в последнее десятилетие проведен активный поиск альтернативы SiC как подложечного материала для выращивания гетероструктур нитрида галлия. В результате в мировой практике сформировались три основных направления в производстве нитридных гетероструктур, отличающихся материалом подложки. В промышленном производстве структур нитрида галлия применяют в основном пластины сапфира и карбида кремния; с целью уменьшения стоимости эпитаксиальных структур многие фирмы разработали, и небезуспешно, эпитаксиальные структуры GaN на кремнии. Указанные виды подложечного материала существенно отличаются от нитрида галлия по значению параметра решетки, КТР и уровню проводимости (табл. 1). Это обуславливает особенности технологии структур GaN, выражающиеся в том, что для получения гетероструктур необходимо выращивать на подложках переходные области определенной конструкции, предназначенные как для формирования полуизолирующих свойств буферных слоев, так и для компенсации возникающих в структуре напряжений.

Безусловно, в силу уникальных свойств приборов, изготавливаемых на основе гетероструктур нитридных соединений на подложках SiC, имеет место тенденция снижения стоимости этих приборов за счет увеличения размера подложечного материала и усиления конкуренции на рынке про-

Таблица 1

Характеристики подложек для эпитаксии нитридных соединений [Table 1. Characteristics of substrates for epitaxy of nitride compounds]

Параметр	Si(111)	4H-SiC	Сапфир
Стоимость (см ²), отн. ед.	1	100	10
Проводимость пластин	Проводящая	Полуизолирующая	Изолятор
Доступный диаметр пластин, дюйм	До 12	2—6	2—6
Теплопроводность, В/см·К	1,5	4,9	0,47
Рассогласование параметров кристаллических решеток относительно GaN, %	+17	-3,5	-14
Рассогласование коэффициентов термического расширения относительно GaN, %	-50	-18	+3
<i>Примечание:</i> «+» или «-» означает, что данный параметр больше или, соответственно, меньше аналогичного параметра GaN.			

изготовителей карбида кремния. В настоящее время имеется уже несколько основных производителей высококачественных пластин высокоомного карбида кремния: Cree, WBG Materials и Dow Corning из США; SiCrystal из ФРГ; Sixon и Nippon Steel из Японии. Причем Cree, WBG Materials, Dow Corning и Nippon Steel уже освоили промышленный выпуск высококачественных пластин диаметром 4—6 дюйма (1 дюйм = 2,5 см). Тем не менее, даже с учетом выхода на рынок такого гиганта, как Nippon Steel, в силу сложности технологии SiC трудно ожидать очень серьезного удешевления пластин карбида кремния, по крайней мере в ближайшие 5 лет, а следовательно, и очень широкого распространения приборов на его основе, в первую очередь в силовой электронике.

Что касается гетероструктур нитрида галлия на подложках сапфира, то этот материал существенно дешевле, чем гетероструктуры GaN/SiC, но подложка сапфира характеризуется значительно меньшей теплопроводностью, чем карбид кремния (в 20 раз) и кремний (в 6 раз), что является сдерживающим фактором для разработки приборов, работающих при больших плотностях тока и высокой температуре.

Поэтому в последние 5 лет интенсивное развитие получило третье из упомянутых выше технологических направлений создания нитридных гетероструктур — разработка структур на подложке кремния [3—7]. Применение Si в качестве подложечного материала рассматривается как чрезвычайно перспективное направление в силу того, что потенциал данной технологии гетероструктур GaN/Si обеспечивается следующими факторами:

- доступностью высококачественных недорогих подложек диаметром до 12 дюймов;
- совместимостью со стандартным оборудованием кремниевой технологии, развитостью производственных линий по обработке пластин большого диаметра и, как следствие, уменьшением затрат на изготовление приборов;
- возможностью интеграции приборов на основе Si и нитридных материалов.

Практически все ведущие производители гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия и приборов на их основе не оставляют без внимания данное направление. Некоторые компании, такие как Nitronex (США), OMMIC (Франция) и OKI (Япония), специализируются исключительно на производстве НЕМТ на основе гетероструктур Si/GaN. Так, Nitronex объявила о начале производства НЕМТ на основе гетероструктур GaN/Si диаметром 4 дюйма для СВЧ-техники еще в 2005 г. К 2011 г. компанией было поставлено заказчикам более 650 тыс. транзисторов, хорошо зарекомендовавших себя в соответствующих приборах, в том числе и военного назначения.

Накопленный за эти годы опыт позволил ряду компаний в течение последних 5—7 лет реализовать технологию GaN на подложках кремния диаметром

до 8 дюймов. Уже к 2006 г. на рынке появились структуры GaN/Si диаметром 4 и 6 дюймов производства компаний Picogiga (Франция), IMEC (Бельгия), Nitronex, IQE (Великобритания), Azzuro (ФРГ), NTT и Covalent Materials (Япония). Значительное число известных компаний-производителей элементной базы СВЧ-техники в настоящее время проводят разработку технологии транзисторов на основе гетероструктур GaN/Si. Часть из них, такие как упомянутые выше Nitronex, Integra Techn. (США), OMMIC (Франция) и OKI (Япония), уже осуществляют промышленный выпуск НЕМТ на основе рассматриваемого материала.

Согласно результатам анализа, выполненного специалистами компании Nitronex [8], производство нитридных структур на подложках кремния имеет неоспоримые преимущества по стоимости перед выпуском аналогичных структур на подложках карбида кремния. На рис. 4 приведено сравнение стоимости 1 мм² нитридных структур на различных подложках в зависимости от объема производства. Расчет выполнен из предположения, что стоимость изготовления гетероструктур GaN/Si и GaN/SiC и выход годных соответствующих приборов одинаковы. Здесь следует заметить, что вследствие присутствия дефектов «*micropipes*» в карбиде кремния выход годных приборов на основе гетероструктур GaN/SiC может быть ниже.

Из данных, приведенных на рис. 4, видно, что конкурентные преимущества гетероструктур GaN/Si по их стоимости будут возрастать при увеличении объема выпуска продукции и при переходе на большие диаметры подложек. Очевидно также, что меньшая стоимость материала будет стимулировать его использование для других возможных применений, например для производства силовой и автомобильной электроники.

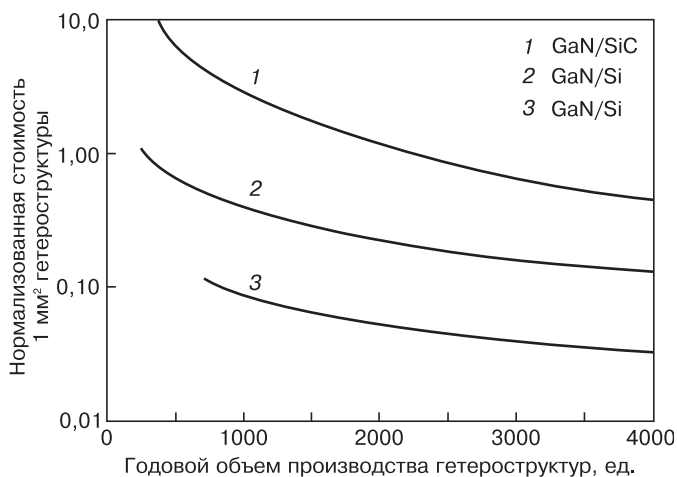


Рис. 4. Сопоставление стоимости 1 мм² нитридных структур на подложках SiC и Si в зависимости от объема производства [8]:

1 — Ø 3 дюйма; 2 — 4; 3 — 6

Fig. 4. Comparison of cost between 1 mm² of nitride structures on SiC and Si substrates for different production scales: (1) 3", (2) 4" and (3) 6"

ГЭС GaN/Si		
Lattice Power, КНР	Ø150 мм	Производство с 2012 г.
Bridgelux, США	Ø200 мм	Производство с 2012 г.
Toshiba, Япония	Ø200 мм	Производство с 2012 г.
Plessey, Англия	Ø150 мм	Производство с 2013 г.
Panasonic, Япония	Ø200 мм	Подготовка производства
Epistar, Тайвань	Ø150 мм	Подготовка производства
Samsung, Ю. Корея	Ø150 мм	Подготовка производства
Osram Opto., ФРГ	Ø150 мм	Подготовка производства

Рис. 5. Развитие производства нитридных гетероструктур на подложке кремния для светодиодов
 Fig. 5. Development of technology of nitride heterostructures on silicon substrates for LEDs

Результаты надежных испытаний приборов на основе GaN/Si, которые были опубликованы в ряде работ, показали, что приборы на основе этих гетероструктур являются достойными конкурентами в разнообразных системах связи гораздо более дорогих приборов на основе гетероструктур, выращенных на подложках карбида кремния [8—11].

Необходимо отметить, что, помимо СВЧ-техники, технология нитридных гетероструктур на подложке кремния по причинам, отмеченным выше, уже активно осваивается и в производстве светодиодов [12—15] (рис. 5). На рис. 6 в качестве примера показана тенденция изменения стоимости чипа прибора при переходе производства светодиодов на использование нитридных гетероструктур на подложке кремния диаметром 200 мм.

Только технология нитридных гетероструктур на подложке кремния предоставляет возможность, основываясь на уникальных свойствах нитридов III группы в сочетании с приемлемой стоимостью этих материалов на подложке Si, качественного преобразования электронной компонентной базы силовой электроники [1, 17—19]. Область применения нитридных гетероструктур на подложке кремния в приборах силовой электроники представлена на рис. 7.

Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что технология гетероструктур на подложке кремния уже состоялась как главное направление в удешевлении приборов на основе GaN для разных видов применения.

Проблемы технологии гетероструктур на подложке Si

Основная проблема технологии гетероструктур GaN/Si состоит в том, что нитрид галлия и кремний

имеют очень большие различия в значениях параметра решетки и коэффициентов термического расширения (см. табл. 1). Для сравнения: при $T = 300\text{ K}$ различие в параметрах решеток составляет 17 %, а при температуре роста эпитаксиальных слоев $T = 1000\text{ K}$ эта величина составляет 40 %. При этом коэффициент термического расширения для Si на 50 % меньше, чем для GaN, что приводит к формированию в эпитаксиальном слое при комнатной температуре сильных растягивающих термонапряжений, обуславливающих значительный прогиб гетероструктур, особенно выраженный при их большом диаметре. Результатом формирования растягивающих напряжений является растрескивание слоя нитрида

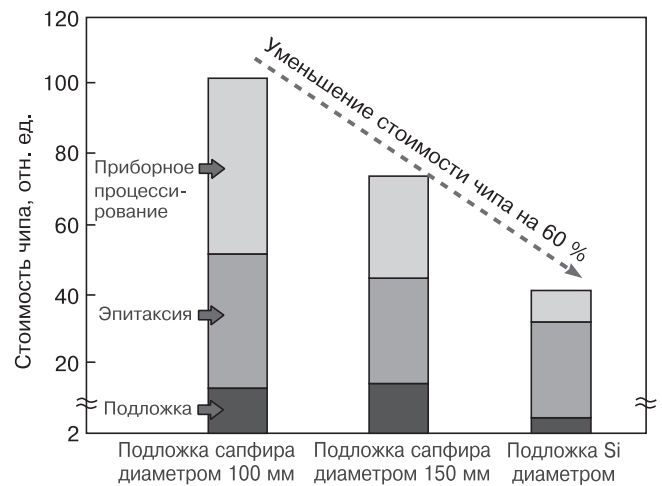


Рис. 6. Тенденция изменения стоимости чипа прибора при переходе производства светодиодов на использование нитридных гетероструктур на подложке кремния диаметром 200 мм [16]
 Fig. 6. Trend of device chip cost in case of LED technology transfer to the use of nitride heterostructure on 200 mm diam. silicon substrates [16]

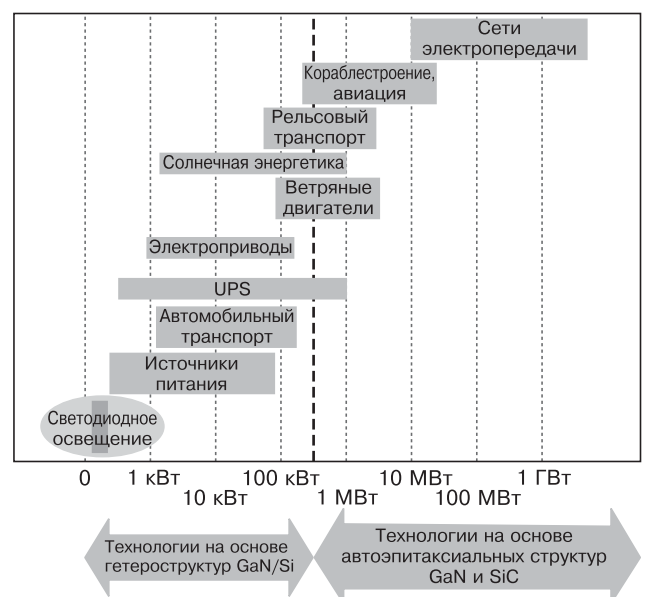


Рис. 7. Области применения нитридных гетероструктур на подложке кремния в приборах силовой электроники [19]
 Fig. 7. Applications of nitride heterostructures on silicon substrates in high power electronics [19]

галлия вдоль направлений $\{1\bar{1}00\}$ при толщине слоя более 1 мкм. Эту проблему устраняют главным образом посредством введения в композицию гетероструктуры переходных слоев, предназначенных для компенсации растягивающих напряжений.

Необходимо отметить, что в научно-технической литературе представлено множество примеров состава переходных слоев, позволяющих с той или иной степенью успеха решить проблему растрескивания слоев нитрида галлия в гетероструктурах GaN/Si. Самые результативные из них представляют ноу-хау, и их детали не описываются. Тем не менее можно заключить, что базовым элементом переходных слоев являются слои AlN и AlGa_xN, характеризующиеся меньшим значением параметра решетки, чем нитрид галлия. Слои отмеченных соединений наноразмерного уровня в разных исследованиях представлены в составе композиции переходного слоя в различных сочетаниях (примеры композиции переходных областей представлены на рис. 8), в том числе и в виде напряженных сверхрешеток (SLS) типа AlN/GaN и AlGa_xN/GaN [20].

Различие в параметрах решеток нитрида галлия и кремния обуславливает также формирование напряжений в процессе роста, которые приводят к изгибу системы «эпитаксиальный слой — подложка» и к растрескиванию эпитаксиальных слоев при превышении их критической толщины.

Однако остаточные напряжения, сформированные в процессе роста, наряду с напряжениями, обусловленными различием коэффициентов термического расширения, могут играть значительную роль в конечных свойствах гетероструктуры. С целью снижения уровня остаточных напряжений в слоях нитрида галлия часто используют введение в состав переходной области слоя AlN толщиной 10–100 нм, выращенного при низких температурах (см. рис. 8, слой LT AlN) [22]. По мнению авторов работы [12], низкотемпературный (600–800 °C) слой AlN вырастает некогерентно, но сохраняет эпитаксиальную симметрию, т. е. поддерживается ориентация в а- и

с-направлениях. Хотя механизм влияния этого слоя до конца неясен, отмечается, что он осуществляет «развязку» по напряжениям между выше- и нижележащими слоями гетероструктуры [12].

Технологическую задачу при получении гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния можно в целом определить так, как представлено на рис. 9 (см. вторую стр. обложки). Как правило, начальным этапом процесса получения гетероструктуры является рост слоя AlN, а последующая область структуры формируется таким образом, чтобы в процессе роста создать напряжения сжатия, в той или иной степени компенсирующие растягивающие напряжения, которые возникают при охлаждении.

Как уже отмечалось выше, решение этой задачи в принципе носит эмпирический характер. В последние годы этот процесс проходит с привлечением современных аналитических методов контроля процесса роста *in situ*, особенно успешно разработанных компанией Lay Tec (ФРГ). Оптические методы, предложенные этой компанией и ставшие в настоящее время неотъемлемой частью современного технологического оборудования, позволяют осуществлять на основе анализа характеристик отраженного от поверхности растущей структуры излучения разных длин волн контроль скорости роста слоев и формы поверхности гетероструктуры в любой момент ее образования. Пример записи изменения геометрии гетероструктуры для светоизлучающих диодов в процессе ее получения представлен на рис. 10.

Как видно из приведенного на рис. 10 примера, конечный вид геометрии структуры можно менять посредством изменения толщины слоев и их состава, добываясь в конечном итоге нужного результата (минимального коробления структуры при отсутствии растрескивания). Таким образом, посредством тщательного подбора условий формирования и композиции переходных слоев удалось найти решение проблем, определяющих систему напряжений в гетероструктуре и обуславливающих посредством этого

Рис. 8. Примеры композиций переходных областей гетероструктур GaN/Si:

а, б, в — данные работы [20]; г — [21].

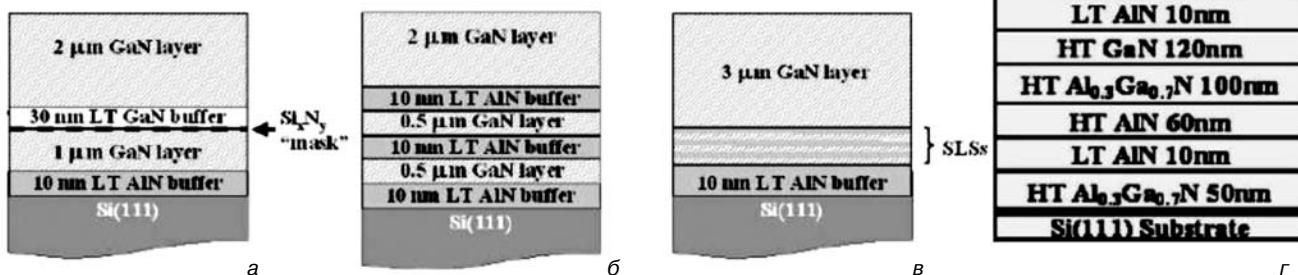
LT, HT — слои, полученные при низко- и высокотемпературном осаждении соответственно;

MQW (multiquantum-well structure) — структура со множественными квантовыми ямами

Fig. 8. Examples of compositions of GaN/Si heterostructure transition regions: (a–c) data of [20] and (d) data of [21].

LT/HT layers synthesized by low and high temperature deposition respectively;

MQW = multiquantum-well structure



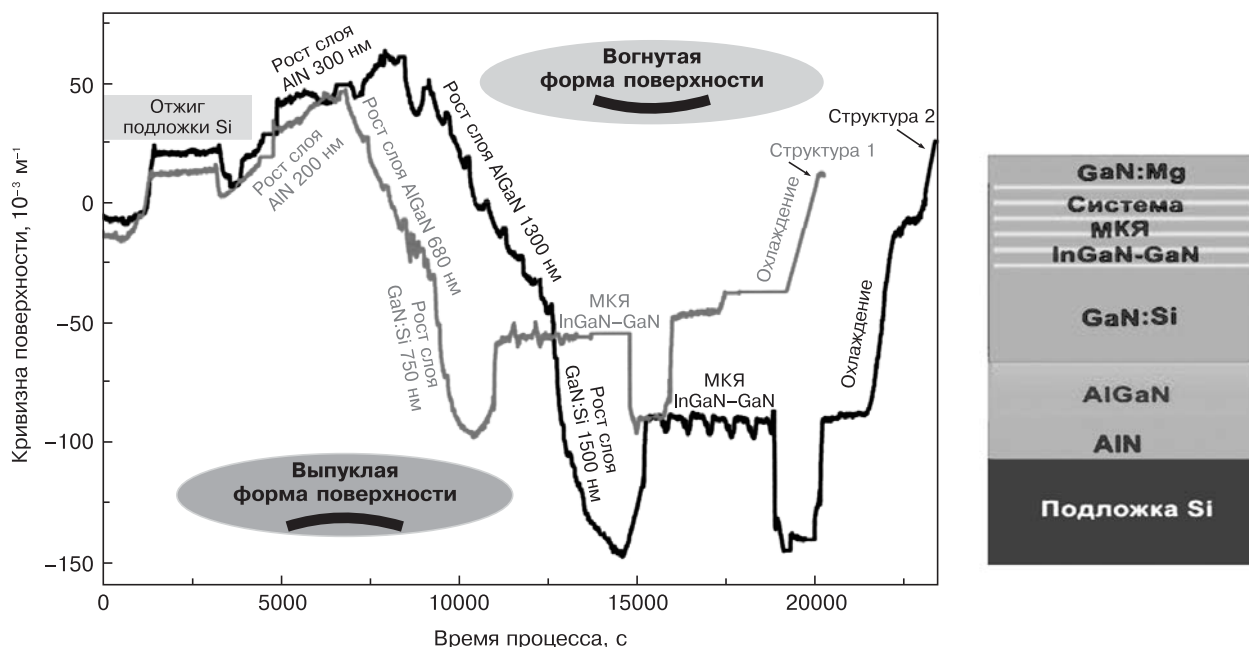


Рис. 10. Формирование геометрии гетероструктур нитридных соединений при росте на подложке кремния [23]
 Fig. 10. Formation of nitride heterostructure pattern on silicon substrates [23]

возможность получения нитридных гетероструктур на подложке кремния с приемлемой величиной прогиба и с толщиной слоев до 4 мкм без их растрескивания. Такие приемы, являющиеся в значительной мере секретами фирмы, разработаны в компаниях Nitronex, Soitec Group (США), Oki Electronics (Япония). Более того, разработки компании Bridgelux (США) показали возможность изготовления гетероструктур нитрида галлия на подложках кремния диаметром 8 дюймов с полным отсутствием прогиба при комнатной температуре.

Технология гетероструктур на подложке Si в России

В нашей стране технология гетероструктур нитридных соединений на подложке кремния находится в стадии своего становления. В ЗАО «Элма-Малахит» впервые проведены успешные разработки нитридных гетероструктур для СВЧ-полевых транзисторов, связанные с использованием подложек кремния. К сожалению, отсутствие современного оборудования, рассчитанного на подложки большого диаметра, обусловило разработку гетероструктур диаметром 2 дюйма. Однако даже в этом случае результаты выполненной работы представляются чрезвычайно полезными, поскольку позволили предприятиям страны приступить к исследованию и разработке новых перспективных видов приборов.

Основные аспекты исследования состояли в следующем.

1. Подготовка подложек кремния.
2. Начальная стадия формирования гетероструктуры.
3. Рост слоя AlN.

4. Оптимизация переходной области $Al_xGa_{1-x}N$.
5. Формирование гетероструктуры AlGaIn/GaN.
6. Испытания при изготовлении НЕМТ.

Для получения гетероструктур применяли МОС-гидридный метод эпитаксии. В качестве источников элементов III группы использовали триметилгаллий (ТМГ) и триметилалюминий (ТМА), источник азота — аммиак. Процессы проводили в водородно-азотной среде при давлении в реакторе 60—100 мм рт. ст. и температуре роста 1000—1050 °С. В качестве подложек применяли пластины высокоомного (с удельным электрическим сопротивлением $\rho > 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) кремния диаметром 2 дюйма с ориентацией (111).

В настоящее время практически все применяемые технологии основаны на том, что рост GaN на подложках Si происходит с использованием буферного слоя AlN, так как, во-первых, слой AlN предотвращает непосредственный контакт Ga с Si и реакции взаимодействия, а во вторых — буферный слой AlN позволяет сгладить градиент напряжений при переходе к росту слоя GaN, что приводит к снижению плотности дислокаций в эпитаксиальном слое GaN. Поэтому базовая композиция гетероструктуры состояла из начального слоя AlN и трехслойной переходной области на основе сочетания слоев AlGaIn различного состава и толщины, поверх которой выращивали слой GaN толщиной 1,2 мкм и барьерный слой $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$ толщиной 25 нм.

В ходе исследований изучали влияние различных технологических факторов на структурное совершенство и геометрические характеристики полученных структур, а также на их электрофизические параметры.

Исследование влияния предэпитаксиальной обработки подложек Si на структурное совершенство гетероструктур показало, что независимо от способов ее проведения структурное совершенство полученных структур значительно выше, чем при использовании необработанных подложек. Так, ширина кри-вых рентгеновской дифракции на половине высоты

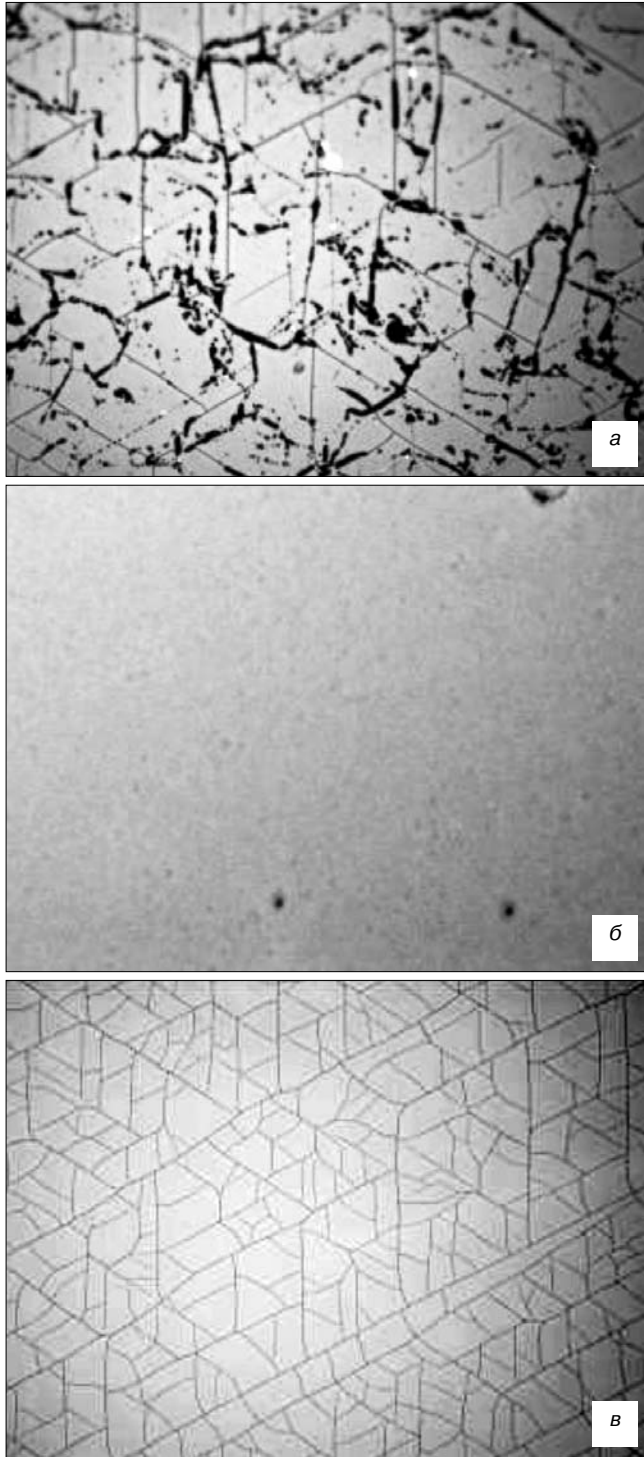


Рис. 11. Зависимость вида поверхности гетероструктур AlGaIn/GaN на подложке кремния от времени обработки Si в парах ТМА:

а — 0,1 мин; б — 0,2; в — 0,5

Fig. 11. Surface pattern of AlGaIn/GaN heterostructures on silicon substrates as a function of time of Si treatment in the vapors: (a) 0.1 min, (b) 0.2 min and (c) 0.5 min

пика (ПШКК) для отражения (002) в серии процессов составляла 580—620" для структур на обработанных подложках и 670—750" для структур, выращенных на подложках, которые не прошли обработку.

В большинстве случаев росту первого слоя AlN на подложке кремния предшествует не только термический отжиг подложки в реакторе, но и предварительное покрытие ее поверхности алюминием (порядка монослоя) при подаче в реактор потока ТМА. Оптимизация этой стадии процесса имеет большое значение [24]. В проведенных авторами экспериментах длительность подачи ТМА в реактор изменялась от 0 до 0,5 мин. Анализ полученных структур показал, что период 0,2 мин является оптимальным для используемого потока алюминия (50 мкмоль/мин). При меньшем времени покрытия наблюдается большое число трещин и почернение периферии структуры, а также сильно развитый рельеф поверхности; большее время обработки вызывает появление трещин по всей поверхности пластины (рис. 11).

Важное значение для последующего использования структур в процессах изготовления приборов имеет форма рабочей поверхности. Так, в приведенных в работе процессах при использовании переходной области, состоящей из трех слоев AlGaIn, суммарная толщина которой изменялась от 0,5 до 1,0 мкм, получался вогнутый профиль структуры. Коробление при этом достигало 50 мкм. Более заметный эффект управления внутренними напряжениями в ходе роста структуры (и, следовательно, конечной ее геометрией) был получен при использовании переходной области, состоящей из шести слоев AlGaIn, имеющей ту же суммарную толщину. В этом случае можно было получить даже выгнутые структуры, коробление которых зависело уже от толщины слоя GaN, выращенного на поверхности переходной области. Характер изменения геометрии структур, выращенных в различных режимах, приведен на рис. 12 (см. вторую стр. обложки). При оптимальном соотношении всех элементов структуры значение прогиба составляло ~2 мкм.

Измерения электрофизических характеристик полученных структур показало, что в отработанных режимах значение подвижности электронов в двумерном электронном газе составляло порядка 1500—1750 см²/(В·с) при слоевой концентрации (1—1,2) · 10¹³ см⁻² (рис. 13), что уступает параметрам, полученным на этом же оборудовании в структурах на подложках карбида кремния ($\mu \sim 2000 \div 2200$ см²/(В·с) при этой же слоевой концентрации носителей заряда). Тем не менее структуры пригодны для изготовления НЕМТ.

Сформированные на структурах тестовые транзисторы имели Ni—Al—Ti—затвор длиной 0,8 мкм и шириной 100 мкм. Омические контакты формировали вжиганием при 720 °С композиции Ti—Al—Ni—Au. Изоляцию осуществляли с помощью мез, полученных методом плазмохимического травления

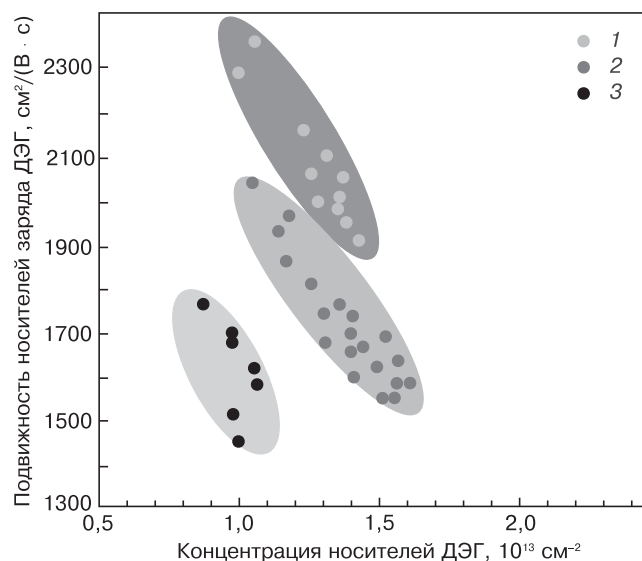


Рис. 13. Электрофизические параметры гетероструктур AlGaIn/GaN на различных видах подложек:

1 — SiC; 2 — Al₂O₃; 3 — Si

Fig. 13. Electrical properties of AlGaIn/GaN heterostructures on different types of substrates:

(1) SiC, (2) Al₂O₃ and (3) Si

в Cl-содержащей плазме. Всю структуру пассивировали плазменным Si₃N₄ толщиной 0,5 мкм. Измерения статических характеристик показали, что максимальная плотность тока в транзисторах составила 800 мА/мм, пробивное напряжение — более 120 В, крутизна — 170 мСм/мм, что демонстрирует высокий потенциал разрабатываемого подхода к созданию нитридных гетероэпитаксиальных структур на подложках кремния [25].

Дальнейшее совершенствование технологии гетероструктур AlGaIn/GaN на подложке Si ЗАО «Элма-Малахит» связывает с проведением работ по оптимизации системы напряжений в структуре переходной области. Конечно, для успешного решения этой задачи необходимо, как показывает опыт зарубежных разработок, осуществление контроля

Таблица 2

Этапы разработки технологии нитридных соединений на подложках кремния [26]

[Table 2. Stages of development of technology of nitride compounds on silicon substrates [26]]

Этап	Производство структур Ø 6", шт/год	Длительность этапа, годы
Исследования	не более 1000	5—10
Разработка и создание прототипа	1000—2000	2—3
Квалификация	3000—5000	3—5
Расширение производства	более 10000	1
Массовое производство	более 50000	—
Общее время развития производства от прототипа до массового выпуска		6—9

процесса формирования структуры *in situ*. В этом отношении имеются очевидные перспективы, поскольку компания Lau Tec (ФРГ) смогла разработать систему оптического контроля, позволяющую осуществлять одновременное измерение *in situ* температуры структур, скорости их роста, значения и знака прогиба.

Необходимо подчеркнуть, что в силу сложности технологии получения гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния процесс ее разработки достаточно материалоемкий и длительный. В табл. 2 представлены результаты анализа этапов разработки технологии нитридных соединений на подложках кремния ряда ведущих зарубежных компаний [26].

Как следует из приведенных в табл. 2 данных, длительность периода развития технологии до выхода на массовое производство составляет 6—9 лет. При этом следует иметь в виду отличную оснащенность зарубежных компаний технологическим и аналитическим оборудованием, а также значительный уровень инвестиций в это направление. Для сокращения имеющегося разрыва между уровнем зарубежных и отечественных разработок, по крайней мере в отношении качественных характеристик гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния, экспериментально-технологическую работу необходимо организовать в тесном взаимодействии с аналитическим прогнозированием и расчетами свойств выращиваемого материала методами математического моделирования. Такой подход поможет повысить результативность разработок технологии и углубит научные представления в отношении процессов, ответственных за формирование свойств гетероструктур.

Заключение

Рассмотрены основные тенденции в развитии технологии гетероструктур нитридных соединений для элементной базы СВЧ-техники и силовой электроники, а также светоизлучающих диодов. Отмечено, что важнейшим современным технологическим направлением является разработка гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния. Рассмотрены основные проблемы гетероэпитаксии нитридных соединений на подложке кремния и пути их решения.

Представлены некоторые результаты разработок технологии гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния в ЗАО «Элма-Малахит». Гетероструктуры AlGaIn/GaN/Si выращены МОС-гидридным методом. Показано, что предэпитаксиальная обработка подложек кремния и начальная стадия процесса выращивания, включающая предварительное покрытие поверхности Si алюминием при подаче в реактор потока ТМА, играют большую роль в формировании гетероструктур, свободных

от трещин и с хорошей морфологией. В то же время установлено, что форма поверхности гетероструктур определяется главным образом композицией переходной области между зародышевым слоем AlN и слоем GaN. Транзисторы, изготовленные на основе выращенных гетероструктур AlGaIn/GaN/Si, продемонстрировали приемлемые статические характеристики: максимальная плотность тока составила 800 мА/мм, пробивное напряжение — более 120 В, крутизна — 170 мСм/мм.

Показано, что для дальнейшего развития гетероструктур нитридных соединений на подложках кремния экспериментально-технологическую работу необходимо организовать в тесном взаимодействии с аналитическим прогнозированием и расчетами свойств выращиваемого материала методами математического моделирования. Такой подход поможет повысить результативность разработок технологии и углубит научные представления в отношении процессов, ответственных за формирование свойств гетероструктур.

Библиографический список

1. **Okumura, H.** Present status and future prospect of widegap semiconductor high-power devices / H. Okumura // Jap. J. Appl. Phys. – 2006. – V. 45, N. 10A. – P. 7565–7586.
2. **Anwar, A.** Compound Semiconductor Markets: Current Status and Future. Report of Strategy Analytics. 2012. <http://www.strategyanalytics.com>
3. **Azam, S.** Comparison of two GaN transistor technologies in broadband power amplifiers / S. Azam, C. Svensson, Q. Wahab, R. Jonsson // Microwave J. – 2010. – V. 53, N 4. – P. 184–192.
4. **Sun, H.** Ultrahigh-speed AlInN/GaN high electron mobility transistors grown on (111) high-resistivity silicon with FT = 143GHz / H. Sun, A. R. Alt, H. Benedickter, C. R. Bolognesi, E. Feltn, J.-F. Carlin, M. Gonschorek, N. Grandjean // Appl. Phys. Express. – 2010. – V. 3. – P. 094101-1–094101-3.
5. **Medjdoub, F.** Effects of AlGaIn back barrier on AlN/GaN-on-silicon high-electron-mobility transistors / F. Medjdoub, M. Zegaoui, B. Grimbert, N. Rolland, P.-A. Rolland // Appl. Phys. Express. – 2011. – V. 4. – P. 124101-1–124101-3.
6. **Cheng, K.** AlGaIn/GaN/AlGaIn double heterostructures grown on 200 mm silicon (111) substrates with high electron mobility / K. Cheng, H. Liang, M. Van Hove, K. Geens, B. De Jaeger, P. Srivastava, X. Kang, P. Favia, H. Bender, S. Decoutere, J. Dekoster, J. I. del Agua Bornique, S. W. Jun, H. Chung // Appl. Phys. Express – 2012. – V. 5. – P. 011002-1–011002-3.
7. **Marcon, D.** Excellent stability of GaN-on-Si high electron mobility transistors with 5 μm gate-drain spacing tested in off-state at a record drain voltage of 200 V and 200 °C / D. Marcon, M. Van Hove, D. Visalli, J. Derluyn, J. Das, F. Medjdoub, S. Degroote, M. Leys, K. Cheng, R. Mertens, M. Germain, G. Borghs // Jap. J. Appl. Phys. – 2010. – V. 49. – P. 04DF07-1–04DF07-4.
8. Application note AN-011: Substrates for GaN RF devices. – Nitronex corporation, 2008. http://www.richardsonrfd.com/resources/RellDocuments/SYS_16/Nitronex_Substrates_for_GaN_RF_Devices_App%20Notes.pdf
9. **Ikeda, N.** High-power GaN HFETs on Si substrate / N. Ikeda, J. Li, K. Kato, Sh. Kaya, T. Kazama, T. Kokawa, Y. Sato, M. Iwami, T. Nomura, M. Masuda, S. Kato // Furukawa Rev. – 2008. – N 34. – P. 17–23.
10. **Gajewski, D. A.** HEMT MMIC technology on 100–mm 4H-SiC / D. A. Gajewski, S. Sheppard, T. McNulty, J. B. Barner, J. Milligan, J. Palmour // 26th Annual JEDEC ROCS Workshop. – Indian Wells (CA, USA), 2011. – P. 141–142.
11. **Wallis, D. J.** 2 dimensional electron gas uniformity of GaN HEMT layers on SiC / D. J. Wallis, P. J. Wright, D. E. J. Soley, L. Koker, M. J. Uren, T. Martin // J. Cryst. Growth. – 2012. – V. 338, N 1. – P. 125–128.
12. **Krost, A.** Blue optoelectronics in III–V Nitrides on Silicon / A. Krost, A. Dadgar // Acta Physica Polonica A. – 2002. – V. 102, N 4–5. – P. 555–566.
13. **Dadgar, A.** Epitaxy of GaN LEDs on large substrates: Si or sapphire? / A. Dadgar, C. Hums, A. Diez, F. Schulze, J. Blasing, A. Krost // Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6355. – P. 63550R-1–63550R-8.
14. **Zhu, Y.** High performance of GaN-based light emitting diodes grown on 4-in. Si(111) substrate / Y. Zhu, A. Watanabe, L. Lu, Z. Chen, T. Egawa // Jap. J. Appl. Phys. – 2011. – V. 50. – P. 04DG08-1–04DG08-3.
15. **Egawa, T.** High performance InGaIn LEDs on Si(111) substrates grown by MOCVD / T. Egawa, B. A. Bakar A. Shuhaimi // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – V. 43. – P. 354008 (8 pp).
16. GaN-on-Si. Report of Yole Development, 2014. <http://www.yole.fr>
17. **Briere, M. A.** GaN based power devices: Cost-effective revolutionary performance / M. A. Briere // Power Electronics Europe. – 2008. – N 7. – P. 29–31
18. **Baliga, B. J.** Gallium nitride devices for power electronic applications / B. J. Baliga // Semicond. Sci. Technol. – 2013. – V. 28. – P. 074011.
19. Power GaN. Report of Yole Development, 2010. <http://www.yole.fr>
20. **Hageman, P. R.** Growth of GaN epilayers on Si (111) substrates using multiple buffer layers / P. R. Hageman, S. Haffouz, A. Grzegorzczk, V. Kirilyuk, P. K. Larsen // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 2001. – V. 693. – P. 13.20.1–13.20.6.
21. **Hsu, Y. P.** Crack-free high-brightness InGaIn/GaN LEDs on Si (111) with initial AlGaIn buffer and two LT-Al interlayers / Y. P. Hsu, Y. P. Chang, W. S. Chen, J. K. Sheu, J. Y. Chu, C. T. Kuo // J. Electrochem. Soc. – 2007. – V. 154, N 3. – P. H191–H193.
22. **Dadgar, A.** Improving GaN-on-silicon properties for GaN device epitaxy / A. Dadgar, T. Hempel, J. Blasing, O. Schulz, S. Fritze, J. Christen, A. Krost // Physica status solidi (c). – 2011. – V. 8, iss. 5. – P. 1503–1508.
23. **Zhu, D.** Low-cost high-efficiency GaN LED on large-area Si substrate / D. Zhu, C. J. Humphreys // CS MANTECH Conf. – New Orleans (Louisiana, USA), 2013. – P. 269–272. <http://www.csmantech.org/Digests/2013/papers/078.pdf>
24. **Cao, J.** The influence of the Al pre-deposition on the properties of AlN buffer layer and GaN layer grown on Si (111) / J. Cao, Sh. Li, G. Fan, Y. Zhang, Y. Y. Zheng, J. Huang, J. Su // J. Cryst. Growth. – 2010. – V. 312, N 14. – P. 2044–2048.
25. **Арендаренко, А. А.** Некоторые особенности выращивания гетероструктур AlGaIn/GaN на подложках кремния для СВЧ-транзисторов / А. А. Арендаренко, И. Г. Ермошин, В. А. Орешкин, Ю. Н. Свешников, И. Н. Цыпленков, В. И. Гармаш, В. И. Егоркин, В. Е. Земляков, Л. Г. Литош // Сб. тез. 9-й Всероссийской конф. «Нитриды галлия, индия, алюминия — структуры и приборы». – М.: МГУ, 2013. – С. 78–79
26. **Stevenson, R.** Analysts are tipping tremendous growth for the compound semiconductor industry / R. Stevenson // Compound Semiconductor. – 2012. – V. 18, N 3. – P. 14–19.

Статья написана по материалам междисциплинарного научно-практического семинара «Математическое моделирование в материаловедении электронных наноструктур», проведенного в ВЦ РАН имени А. А. Дородницына

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2014 г.

Trends in the Development of the Epitaxial Nitride Compounds Technology

Aleksei Andreevich Arendarenko — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Director General (arendarenko@elma-malachit.ru); **Viktor Anatolevich Oreshkin** — Head of Research and Production Laboratory (oreshkin-malachit@yandex.ru); **Yurii Nikolaevich Svshnikov** — Cand. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Senior Researcher (svshnikov-elma@yandex.ru); **Igor Nikolaevich Tsyplenkov** — Cand. Sci. (Eng.), Production Manager, Senior Researcher (icyplenkov@yandex.ru).

«Elma-malachit» JSC,

4806 Road, blok 2, building 4, Moscow, Zelenograd
124460, Russia

Abstract. The main trends in the development of technology for nitride heterostructures element base of microwave-technology and power electronics, as well as light-emitting diodes have been reviewed. It has been noted that most modern technological focus is the development of nitride heterostructures on silicon substrates. The basic problems of nitride compounds on silicon substrate and the ways of their solution have been discussed.

Some results of GaN/Si heterostructures technology development in «Elma-Malachit» JSC have been presented. The AlGaIn/GaN/Si heterostructures have been grown by MOCVD. We show that early process stages such as Si-surface treatment and Al pre-deposition are of great importance for the growth of crack-free structures with good structural and surface quality. Meanwhile the surface curvature of the grown structures is influenced mainly by the composition of multilayered transition region between the AlN nucleation layer and the GaN layer. Transistors fabricated on AlGaIn/GaN structures grown on Si substrates under optimized conditions demonstrated rather good static characteristics: $I_{d,max} = 800$ mA/mm, $U_{br} > 120$ V, $g_m = 170$ mS/mm.

For the further technology development experimental and technological work should be arranged in close coordination with analytical prediction and calculation of properties of the grown material with mathematical modeling methods. This approach will help enhance the efficiency of technology development and deepen scientific views on the processes responsible for the formation of properties of heterostructures.

Key words: gallium nitride, silicon carbide, silicon, sapphire, heterostructure, substrate, heteroepitaxy, technology.

References

- Okumura H. Present status and future prospect of widegap semiconductor high-power devices. *Japan Journal of Applied Physics*. 2006, vol. 45, no. 10A, pp. 7565–7586. doi: 10.1143/JJAP.45.7565
- Anwar A. Compound semiconductor markets: Current status & future. *Report of Strategy Analytics*, 2012, www.strategyanalytics.com
- Azam S., Svensson C., Wahab Q., Jonsson R. Comparison of two GaN transistor technologies in broadband power amplifiers. *Microwave Journal*. 2010, vol. 53, no. 4, pp. 184–192.
- Sun H., Alt A. R., Benedickter H., Bolognesi C. R., Feltn E., Carlin J.-F., Gonschorek M., Grandjean N. Ultrahigh-speed AlInN/GaN high electron mobility transistors grown on (111) high-resistivity silicon with FT = 143GHz. *Applied Physics Express*. 2010, vol. 3, pp. 094101-1–094101-3. doi: 10.1143/APEX.3.094101
- Medjdoub F., Zegaoui M., Grimbart B., Rolland N., Rolland P.-A. Effects of AlGaIn back barrier on AlN/GaN-on-silicon high-electron-mobility transistors. *Applied Physics Express*. 2011, vol. 4, pp. 124101-1–124101-3. doi:10.1143/APEX.4.124101
- Cheng K., Liang H., Van Hove M., Geens K., De Jaeger B., Srivastava P., Kang X., Favia P., Bender H., Decoutere S., Dekoster J., del Agua Bornique J. I., Jun S. W., Chung H. AlGaIn/GaN/AlGaIn double heterostructures grown on 200 mm silicon (111) substrates with high electron mobility. *Applied Physics Express*. 2012, vol. 5, pp. 011002-1–011002-3. doi: 10.1143/APEX.5.011002
- Marcon D., Van Hove M., Visalli D., Derluyn J., Das J., Medjdoub F., Degroote S., Lays M., Cheng K., Mertens R., Germain M., Borghs G. Excellent stability of GaN-on-Si high electron mobility transistors with 5 μ m gate-drain spacing tested in off-state at a record drain voltage of 200 V and 200 °C. *Japan Journal of Applied Physics*. 2010, vol. 49, pp. 04DF07-1–04DF07-4. doi: 10.1143/JJAP.49.04DF07

8. Nitronix Corporation. Substrates for GaN RF devices. *Application note AN-011*. 2008. http://www.richardsonrfd.com/resources/RelDocuments/SYS_16/Nitronex_Substrates_for_GaN_RF_Devices_App%20Notes.pdf

9. Ikeda N., Li J., Kato K., Kaya Sh., Kazama T., Kokawa T., Sato Y., Iwami M., Nomura T., Masuda M., Kato S. High-power GaN HFETs on Si substrate. *Furukawa Review*. 2008, no. 34, pp. 17–23.

10. Gajewski D. A., Sheppard S., McNulty T., Barner J. B., Milligan J., Palmour J. Reliability of GaN/AlGaIn HEMT MMIC technology on 100-mm 4H-SiC. *26th Annual JEDEC ROCS Workshop*. Indian Wells (CA, USA), 2011. pp. 141–142.

11. Wallis D. J., Wright P. J., Soley D. E. J., Koker L., Uren M. J., Martin T. 2 dimensional electron gas uniformity of GaN HEMT layers on SiC. *Journal of Crystal Growth*. 2012, vol. 338, no 1, pp.125–128.

12. Krost A., Dadgar A. Blue optoelectronics in III–V nitrides on silicon. *Acta Physica Polonica A*. 2002, vol. 102, no. 4–5, pp. 555–566.

13. Dadgar A., Hums C., Diez A., Schulze F., Blasing J., Krost A. Epitaxy of GaN LEDs on large substrates: Si or sapphire? *Proceedings of SPIE*. 2006, vol. 6355, pp. 63550R-1–63550R-8. doi: 10.1117/12.691576

14. Zhu Y., Watanabe A., Lu L., Chen Z., Egawa T. High performance of GaN-based light emitting diodes grown on 4-in. Si(111) substrate. *Japan Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 50, pp. 04DG08-1–04DG08-3. doi: 10.1143/JJAP.50.04DG08

15. Egawa T., Bakar B. A., Shuhaimi A. High performance InGaIn LEDs on Si(111) substrates grown by MOCVD. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010, vol. 43, pp. 354008 (8 pp). doi:10.1088/0022-3727/43/35/354008

16. GaN-on-Si. *Report of Yole Development*, 2014, www.yole.fr

17. Briere M. A. GaN based power devices: Cost-effective revolutionary performance. *Power Electronics Europe*. 2008, no. 7, pp. 29–31.

18. Baliga B. J. Gallium nitride devices for power electronic applications. *Semicond. Sci. Technol.* 2013, vol. 28, pp. 074011. doi: 101088/0268-1242/28/7/074011

19. Power GaN. *Report of Yole Development*, 2010, www.yole.fr

20. Hageman P. R., Haffouz S., Grzegorzczk A., Kirilyuk V., Larsen P.K. Growth of GaN epilayers on Si (111) substrates using multiple buffer layers. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 2001, vol. 693, pp. 13.20.11–3.20.6. doi: 10.1557/PROC-693-13.20.11

21. Hsu Y. P., Chang Y. P., Chen W. S., Sheu J. K., Chu J. Y., Kuo C. T. Crack-free high-brightness InGaIn/GaN LEDs on Si(111) with initial AlGaIn buffer and two LT-Al interlayers. *J. Electrochem. Soc.* 2007, vol. 154, no. 3, pp.H191–H193. doi:10.1149/1.2429040

22. Dadgar A., Hempel T., Blasing J., Schulz O., Fritze S., Christen J., Krost A. Improving GaN-on-silicon properties for GaN device epitaxy. *Physica Status Solidi (c)*. 2011, vol. 8, no. 5, pp. 1503–1508. doi: 10.1002/pssc.201001137

23. Zhu D., Humphreys C. J. Low-cost high-efficiency GaN LED on large-area Si substrate. *CS MANTECH Conf.* New Orleans (Louisiana, USA), 2013. pp. 269–272.

24. Cao J., Li Sh., Fan G., Zhang Y., Zheng Y. Y., Huang J., Su J. The influence of the Al pre-deposition on the properties of AlN buffer layer and GaN layer grown on Si(111). *Journal of Crystal Growth*. 2010, vol. 312, no. 14, pp. 2044–2048.

25. Arendarenko A. A., Ermoshin I. G., Oreshkin V. A., Svshnikov Yu. N., Tsyplenkov I. N., Garmash V. I., Egorkin V. I., Zemlyakov V. E., Litosh L. G. Nekotorye osobennosti vyrashchivaniya geterostruktur AlGaIn/GaN na podlozhkakh kremniya dlya SVCh tranzistorov [Some growth features for AlGaIn/GaN heterostructures on Si substrates for microwave transistors]. *Sbornik tezisov 9-i Vserossiiskoi konferentsii «Nitridy galliya, indiya, alyuminiya — struktury i pribory» [Abstracts of 9-th All-Russian conference «Gallium, indium and aluminium nitrides — structures and devices»]*. Moscow: MGU, 2013. pp. 78–79. (In Russ.)

26. Stevenson R. Analysts are tipping tremendous growth for the compound semiconductor industry. *Compound Semiconductor*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 14–19.

Acknowledgements. The article was written based on an interdisciplinary scientific and practical seminar «Mathematical Modeling in Materials electronic nanostructures», held in the Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS.

Received December 25, 2014