



# Фотоника

Научно-производственная компания

ООО «НПК «Фотоника»  
197022, г. Санкт-Петербург,  
ул. Инструментальная, дом. 3, литер Б, помещение 01Н  
Тел./факс.: +7 (812) 740-71-28  
[www.npk-photonica.ru](http://www.npk-photonica.ru)

Евгений Бунтов, НПК «ФОТОНИКА», [eugene.b@npk-photonica.ru](mailto:eugene.b@npk-photonica.ru)

## Гетероструктуры на основе нитрида Галлия (GaN) и технологии компании ОММІС на их основе

*Развитие техники, увеличение требований заказчиков к техническим характеристикам изделий и общемировые тенденции делают крайне необходимым развитие технологий по выращиванию гетероструктур на основе нитрида галлия. В статье рассматриваются преимущества применения этих технологий в современных СВЧ-приборах, области применения, перспективы и тенденции дальнейшего совершенствования этих гетероструктур.*

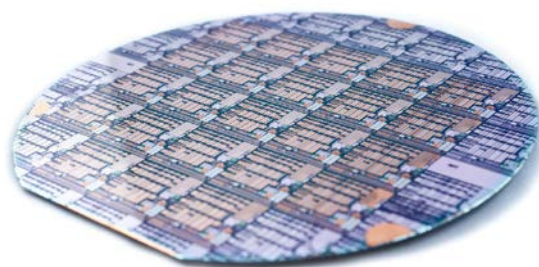


Рис. 1. Полупроводниковая пластина

### Развитие технологии полупроводниковых гетероструктур на основе GaN

Растущий спрос на высокоскоростные, высокотемпературные и высокопроизводительные характеристики позволил полупроводниковой промышленности пересмотреть выбор материалов, используемых в качестве полупроводников. С появлением быстродействующих и компактных вычислительных устройств использование кремния стало затруднять соответствие закону Мура, а использование арсенида галлия не всегда способно удовлетворить требования заказчика. Благодаря отличным характеристикам нитрид галлия (GaN) является уникальным материалом для решения энергетических проблем будущего. Системы на основе GaN имеют более высокую энергетическую эффективность, более высокое пробивное напряжение, высокую плотность тока, что, в конечном счете, уменьшает потери мощности, позволяет использовать более высокие частоты, а также уменьшить массогабаритные характеристики.

Гетероструктуры GaN и его твердых растворов обладают физическими свойствами, которые обеспечивают электронным приборам на их основе оптические, мощностные и частотные характеристики, позволяющие применять эти приборы в разных областях полупроводниковой электроники.

Начиная с середины 1990-х гг., о нитриде галлия и его твердых растворах заговорили как об одном из самых перспективных оптоэлектронных материалов. Однако структуры на основе GaN перспективны не только для оптоэлектроники, но и для разработки компонентной базы силовой и СВЧ-электроники, такой как диоды Шоттки и СВЧ-элементы.

Компонентная база на основе GaN- гетероструктур особенно перспективна для использования в передающих СВЧ- устройствах. Обусловлено это рядом преимуществ широкозонных структур на основе GaN над структурами на основе узкозонных полупроводниковых материалов. Основное преимущество транзисторов на основе GaN – высокая удельная мощность, что позволяет существенно упростить топологию интегральных схем усилителей мощности, повысить эффективность, уменьшить массу и улучшить габаритные параметры. Развитие данной технологии на основе GaN за последние несколько лет привело к существенным практическим результатам, освоению мощных СВЧ-транзисторов и, главным образом, монокристаллических интегральных схем (МИС) на основе GaN в промышленном производстве.

Как уже упоминалось, транзисторы на основе GaN-гетероструктур перспективны для применения в СВЧ- устройствах. В последние годы получили развитие технологические способы повышения характеристик структур на основе GaN для МИС СВЧ- диапазона. Одним из наиболее важных решений является углубление

подзатворной области путем плазмохимического травления, которое обычно совмещается с процедурой травления щели в диэлектрике. В результате многие параметры улучшаются. К ним относятся, например, крутизна транзистора, которая улучшается за счет меньшего расстояния затвор–канал; уменьшаются сопротивления истока и стока из-за отсутствия обеднения областей затвор–исток и затвор–сток транзистора; ослабевает или исключается негативное воздействие переходных процессов при включении транзистора из-за меньшего влияния ловушек в области затвор–сток, т. к. поверхность, на которой они находятся, можно переместить на безопасное расстояние. В связи с этим пассивирующий слой диэлектрика выращивается непосредственно после формирования всех слоев гетероструктуры. Применение новых материалов позволяет увеличить импульсный ток транзистора, его крутизну и значительно уменьшить время включения за счет компенсации поверхностных состояний.

### Поиск компромисса между технологиями на основе GaAs и GaN

Компания OMMIC, основанная в 2000 г. компанией Philips, преуспела в создании транзисторных структур с хорошими частотными параметрами, которые явились основой для разработки и выпуска эффективных интегральных схем усилителей мощности в разных диапазонах, показатели которых в несколько раз превосходят показатели ИС на основе арсенида галлия (GaAs). К настоящему времени компания уже освоила массовый выпуск усилителей мощности на основе GaN-гетероструктур с частотами до 100 ГГц (рис. 2).



Рис. 2. Процесс контроля качества в компании OMMIC

За несколько лет были решены основные производственные и технологические проблемы, не позволявшие монолитным интегральным схемам на основе GaN выйти на коммерческий уровень. В настоящее время технологии структур на основе GaN широко применяются в области СВЧ-приборов. Темпы промышленного освоения технологии существенно превышают те, которыми развивались технологии создания приборов на основе GaAs.

*Компания OMMIC разработала усилитель мощности CGY2650UH/C1 частотного диапазона 28–31,5 ГГц, имеющий мощность 39 дБм и коэффициент усиления 22 дБ. Точка децибельной компрессии усилителя — 28,5 дБм. Усилитель выполнен в виде кристалла. Это устройство является первым усилителем, серийно выпускаемым компанией OMMIC на основе технологии GaN.*

В ближайшие годы частотный диапазон до 160 ГГц может стать доступным технологиям приборов и на основе GaN, и на основе GaAs, которые практически равны по частотным и усилительным свойствам. Однако заметим, что технология производства приборов на основе GaN обладает серьезными преимуществами по параметрам и свойствам, тогда как вторая, на основе GaAs, более выгодна по себестоимости и уровню освоения в массовом производстве. Такие позиции могут сохраняться лишь на стадии

освоения производства и существенно меняются после их переоснащения. Поскольку новая технология не стоит на месте и ее освоение в массовом производстве быстро увеличивается, по мере внедрения себестоимость снижается, при том что все указанные преимущества сохраняются (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика основных параметров GaAs- и GaN-материалов

Свойства материала	Единицы измерения	GaAs	GaN
Плотность выходной мощности, $\rho(P_{out})$	Вт/мм	0.5-1.5	4.0-8.0
Рабочее напряжение, $V_{ds}$	В/мм	5-20	28-48
Обратное напряжение, $V_{br}$	В/мм	20~40	>100
Максимальная плотность тока, $I_{max}$	А/мм	~0.5	~1.0
Коэффициент теплопроводности, К	Вт/м*К	47	390(z)/490(SiC)

### Выращивание гетероструктур на основе GaN/Si, GaN/SiC

В последние годы технологический прорыв произошел также в технологии изготовления гетероструктур на основе GaN и его твердых растворов для разработки транзисторов. Новые исследования и разработки в области СВЧ-микроэлектроники, связанные с расширением области применения транзисторов на основе широкозонных GaN-структур в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн, открывают интересные возможности для разработчиков. Развитие этих технологий обусловлено необходимостью освоения более высоких частотных диапазонов, улучшением параметров мощности и линейности характеристик и, как следствие, повышением эффективности. Компания OMMIC в 2016 г. освоила производство изделий по технологиям на основе нитрида галлия. Их применение имеет целый ряд описанных выше преимуществ. Развитие технологии в последующем определит необходимость использования изделий на нитриде галлия в таких системах как сети сотовой связи, широкополосный доступ в интернет, станции РЭП, РЛС гражданского и военного назначения, спутниковые системы.

Увеличение плотности мощности HEMT-транзисторов на основе GaN в несколько раз выше, чем у их аналогов на GaAs. В результате их качественные характеристики существенно выше. Кроме того, гетероструктуры нитрида галлия способны работать при более высоких температурах при меньшем электропотреблении и, в результате, с более высоким КПД. Совокупность этих факторов делает данные технологии предпочтительными для применения в космических системах, а также в системах передачи данных. В силу непосредственного использования этих систем не только в гражданском, но и в военном секторе развитие технологии построения гетероструктур на основе нитрида галлия в достаточной мере финансируется на государственном уровне многими странами.

В настоящее время интегральные схемы на гетероструктурах, которые выращены на подложке из карбида кремния (SiC), обеспечивают максимальную мощность благодаря высокой теплопроводности соединения даже при высокой плотности мощности. Однако из-за некоторых сложностей, обусловленных технической адаптацией новых приборов, в настоящее время ряд производителей (в т. ч. OMMIC) использует подложки из других материалов, например эпитаксиальные структуры GaN на кремнии (GaN/Si), что также объясняется высокой ценой производства пластин из карбида кремния при отсутствии массового производства. Однако структуры на пластинах из кремния уступают по ряду характеристик, таких как теплопроводность, значение параметра решетки и коэффициент термического расширения. Еще одна проблема технологии на основе GaN/Si заключается в том, что коэффициент термического расширения для

кремния (Si) на 50% меньше, чем для GaN, что приводит к формированию в эпитаксиальном слое сильных растягивающих термонапряжений, и, как следствие, растрескиванию слоя нитрида галлия. Эта проблема решается путем введения в гетероструктуру переходных слоев, которые компенсируют растягивающие напряжения и открывают широкие возможности для конструирования и оптимизации под конкретные задачи. Основными элементами переходных слоев являются AlN и AlGa (рис. 3), которые имеют меньший параметр решетки, чем нитрид галлия. В гетероструктурах AlGaN/GaN полярная природа GaN и AlGaN приводит к их

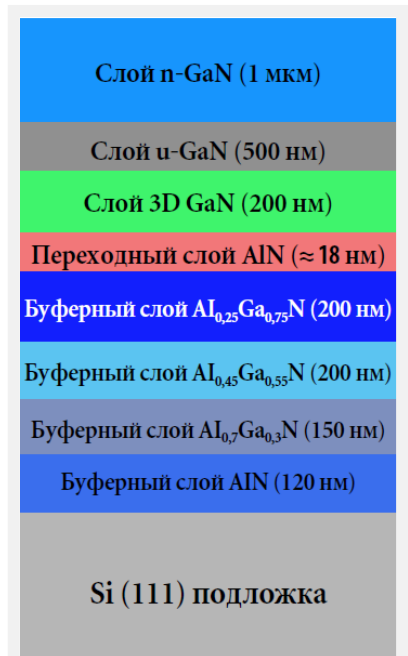


Рис. 3. Пример введения переходных слоев на подложке из кремния



Рис. 4. 3-дюймовая пластина производства компании OMMIC

спонтанной поляризации уже в процессе роста. Кроме того, возникает дополнительная пьезоэлектрическая поляризация из-за тангенциальных растягивающих напряжений на границе раздела AlGaIn/GaN. Напротив, в гетероструктурах InGaIn/GaN при выращивании слоя InGaIn/GaN возникают сжимающие напряжения, которые приводят к генерации зарядов противоположного знака. Таким образом, в гетероструктурах на основе GaN и его твердых растворов можно управлять концентрацией двумерного газа носителей, что как раз и позволяет оптимизировать их свойства под конкретные применения уже в процессе роста (табл. 2).

**Таблица 2. Характеристики подложек для эпитаксии нитридных соединений**

Параметр	Si	4H-SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Стоимость (см <sup>2</sup> ), отн. ед. 1 100 10	1	100	10
Проводимость пластин	Проводящая	Полупроводящая	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

**\*Примечание: «+» или «-» означает, что данный параметр больше или, соответственно, меньше аналогичного параметра GaN.**

Применение кремния в качестве подложечного материала рассматривается как одно из самых оптимальных решений в силу того, что при данной структуре обеспечиваются такие качества как 12-дюймовая подложка, совместимость со стандартным оборудованием, наличие производственных линий под кремний и, как следствие – меньшая стоимость изготовления приборов.

OMMIC является одной из компаний, освоивших применение технологии на основе нитрида галлия на кремнии. OMMIC использует собственную технологию D01GH по выращиванию таких структур. Эта технология обеспечивает ширину затвора 100 нм с плотностью мощности 3300 мВт/мм при уровне шума 1,5 дБ в частотном диапазоне до 94 ГГц. В настоящее время компания сделала упор на выпуск усилителей мощности по данной технологии для работы в Ka-, V- и E-диапазонах длин волн. Кроме того, применение технологии направленно на использование в продукции, изготавливаемой для сетей связи пятого поколения (5G).

К концу сентября 2017 г. компания освоит выпуск МИС на основе GaN/Si на пластинах размером 6 дюймов. В ближайшее время будет запущена технология по производству структур нитрида галлия на карбиде кремния (GaN/SiC).

В силу разных требований к характеристикам, отличий внешних воздействующих факторов на проектируемые изделия и необходимости обеспечить соответствие разным техническим характеристикам, компания OMMIC параллельно с освоением технологии нанесения нитрида галлия на карбид кремния продолжит выпускать изделия на кремнии, чтобы уменьшить конечную цену изделий при достаточности технических характеристик и удовлетворения требований заказчиков.

На IV кв. 2017 г. запланировано освоение производства интегральных схем по технологии D006GH путем выращивания гетероструктур на основе нитрида галлия на кремнии и карбиде кремния. Эта технология обеспечит ширину затвора 60 нм при плотности мощности 2 Вт/мм в частотном диапазоне до 170 ГГц.

В 2018 г. будет освоена технология D004GH по выращиванию гетероструктур на основе GaN/SiC с шириной затвора 40 нм, плотностью мощности 800 мВт/мм и частотным диапазоном до 210 ГГц. Как видно на примере компании OMMIC, развитие технологии носит весьма динамичный характер.

На сегодняшний день OMMIC ведет производство на основе 3-дюймовых пластин (рис. 4), однако к концу сентября 2017 г. производственная база будет полностью переоснащена под использование 6-дюймовых подложек, что существенно уменьшит стоимость продукции. График снижения стоимости показан на рис. 5.



На территории России и стран СНГ поставкой компонентной базы компании OMMIC занимается научно-производственная компания «Фотоника», являясь ее официальным дистрибьютором. Будучи квалифицированным поставщиком, НПК «Фотоника» осуществляет не только поставки продукции компании OMMIC, но и полную техническую поддержку клиентов, постоянно актуализируя сведения о новой продукции и технологиях, а также имеет возможности по организации контрактного изготовления на производственной базе компании OMMIC монолитных интегральных схем по конструкторской документации заказчика с использованием самых современных технологий.

Учитывая развитие СВЧ-направления в компании, НПК «Фотоника» также занимается оказанием услуг по поставкам и технической поддержке усилителей мощности на основе нитрида галлия в частотном диапазоне до 6 ГГц, имеющих модульное исполнение, предназначенных для коммутации с помощью SMA-разъемов и имеющих выходную мощность до 200 Вт.

Подводя итог, заметим, что развитие техники, технологий, увеличение требований заказчиков к техническим характеристикам изделий и общемировые тенденции делают крайне необходимым совершенствования гетероструктур на основе нитрида галлия, что предопределяет перспективность их освоения и использования, а, учитывая повсеместность применения электронной базы СВЧ-диапазона, обеспечит столь необходимую массовость производства для уменьшения стоимости изготовления и конечной стоимости продукции.

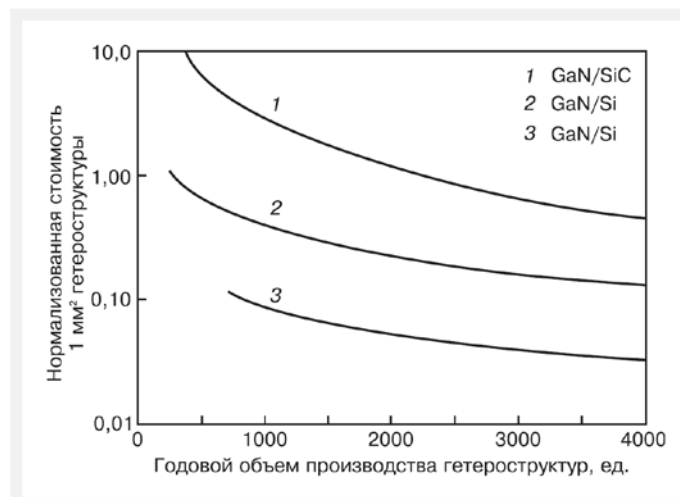


Рис. 5. Сопоставление стоимости 1 мм<sup>2</sup> нитридных структур на подложках SiC и Si в зависимости от объема производства: 1 — диаметр 3 дюйма; 2 — 4 дюйма; 3 — 6 дюймов