

# ПЕРСПЕКТИВЫ НИТРИДА ГАЛЛИЯ В СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКЕ РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ RFNIC

А. Балакирев balakirev@prochip.ru, А. Туркин, к.ф.-м.н. turkin@prochip.ru

На протяжении многих лет нитрид галлия (GaN) представляет интерес для исследователей и разработчиков полупроводниковых приборов. Гетероструктуры GaN и его твердых растворов обладают физическими свойствами, которые обеспечивают электронным приборам, выполненным на их основе, высокие оптические, мощностные и частотные характеристики, что позволяет применять их в разных областях полупроводниковой электроники. До недавнего времени GaN был больше известен как материал для производства полупроводниковых источников света в коротковолновой (синей и зеленой) области спектра, а также для производства белых светодиодов. Однако сегодня очевидны перспективы применения нитрида галлия в СВЧ-электронике.

Структуры на основе полупроводниковых нитридов – GaN, AlN и некоторые соединения типа AlGaN и InGaN – в течение примерно 20 лет рассматриваются как перспективные материалы для электронной и оптоэлектронной техники [1–3]. Их несомненное преимущество – широкий спектр применения: они подходят для использования в качестве активных сред в лазерных диодах и светодиодах в диапазоне коротких длин волн, на их основе можно получать структуры с барьерами Шоттки для приборов силовой электроники, а также изготавливать различные транзисторы, в том числе для СВЧ-электроники.

## СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaN И ЕГО ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

О нитриде галлия и его твердых растворах как одном из самых перспективных оптоэлектронных материалов заговорили в середине 1990-х годов. Спектр его применения в оптоэлектронике действительно широкий: светодиоды синие-зеленой области видимого спектра, светодиоды ближнего ультрафиолетового диапазона, активные среды лазерных диодов и др. [1].

Максимумы спектров первых светодиодов на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов InGaN и AlGaN лежали в интервалах энергии  $\hbar\omega_{\max}=2,55\text{--}2,75$  эВ в синей,  $\hbar\omega_{\max}=2,38\text{--}2,45$  эВ в зеленой и  $\hbar\omega_{\max}=2,48\text{--}2,60$  эВ в синие-зеленой областях спектра [1–4]. Полученные результаты открыли для полупроводниковых светодиодов дорогу в коротковолновую часть видимого спектра – в диапазон длин волн от 400 до 550 нм [1–4]. Это позволило светодиодам полностью перекрыть видимый диапазон и сделало возможным применение светодиодов в полноцветных устройствах: индикаторах, экранах и т.д.

Создание ярких источников света – светодиодов (СД) – в коротковолновой (синие-зеленой) области видимого спектра и ближней ультрафиолетовой области спектра, а также источников белого цвета на основе системы "кристалл-люминофор" (полупроводниковый кристалл, покрытый люминофором) сегодня считается одним из перспективных направлений. Именно за разработку ярких синих СД на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов, а также СД белого свечения профессорам Исаму Акасаки и Хироси Амано из Университета г. Нагоя (Япония), профессору Шуджи Накамура из Университета Калифорнии

(США) была присуждена Нобелевская премия по физике 2014 года [2].

В настоящее время GaN считается перспективным материалом не только для оптоэлектроники в целом и светодиодных структур в частности, но и для разработки компонентной базы силовой и СВЧ-электроники [2].

### СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaN ДЛЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Транзисторы на основе GaN-гетероструктур перспективны для применения в передающих СВЧ-устройствах. Обусловлено это рядом преимуществ широкозонных структур на базе GaN перед структурами на основе узкозонных полупроводниковых материалов [5]. Ключевое достоинство транзисторов на базе GaN – высокая удельная мощность [2, 5], что позволяет существенно упростить топологию мощных интегральных схем, повысить эффективность, уменьшить массу и улучшить габаритные параметры. Развитие технологии на основе GaN в последние несколько лет привело к существенным практическим результатам и освоению мощных СВЧ-транзисторов, монолитных интегральных схем в промышленном производстве [2, 6].

В гетероструктурах на основе GaN и его твердых растворов возможно формировать слои с различным составом и свойствами, что открывает широкие перспективы для их конструирования и оптимизации под конкретные задачи [5]. Полярной природой GaN и AlGaIn обусловлена их спонтанная поляризация в гетероструктурах AlGaIn/GaN уже в процессе роста. Кроме того, дополнительная пьезоэлектрическая поляризация возникает из-за тангенциальных растягивающих напряжений на границе раздела AlGaIn/GaN. В гетероструктурах InGaIn/GaN, напротив, в процессе роста 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 и позволяет оптимизировать их свойства с учетом конкретного применения уже в процессе роста [2, 5].

В последние годы получили развитие технологические способы улучшения характеристик структур на основе GaN для СВЧ-транзисторов, которые применяются для различных типов гетероструктур.

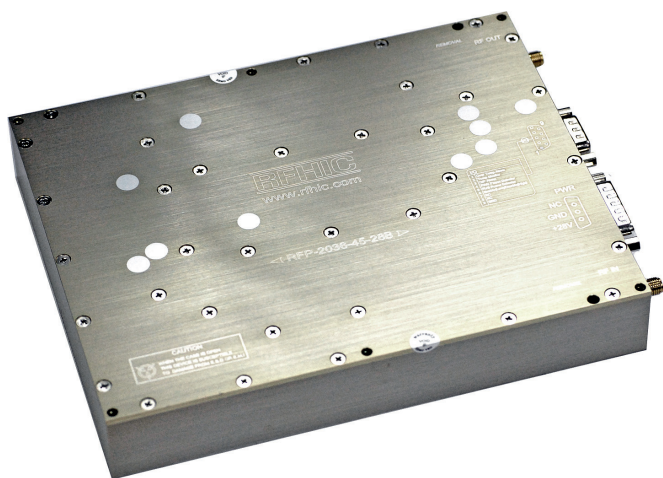
Один из наиболее важных способов – углубление подзатворной области путем плазмохимического травления, которое обычно совмещается с процедурой травления щели в диэлектрике [5]. В результате улучшаются многие параметры (например,

крутизна транзистора) вследствие уменьшения расстояния затвор-канал, снижается сопротивление истока и стока из-за отсутствия режима обеднения областей затвор-исток и затвор-сток транзистора, уменьшаются или даже устраняются переходные процессы при включении транзистора из-за снижения влияния ловушек в области затвор-сток, так как поверхность, на которой они находятся, может быть отодвинута на безопасное расстояние. В связи с этим предлагается выращивать пассивирующий слой диэлектрика непосредственно после выращивания всех слоев гетероструктуры [2, 5].

В последние годы ведется интенсивный поиск новых оптимальных пассивирующих материалов для транзисторных гетероструктур на основе GaN и его твердых растворов. Применение новых материалов позволяет увеличить более чем вдвое импульсный ток транзистора, его крутизну и значительно уменьшить время включения за счет компенсации поверхностных состояний [2, 5, 8].

Исследователи и разработчики из компаний Cree, TriQuint, Northrop Grumman и др. получили транзисторные структуры с высокими частотными параметрами. Эти результаты стали основой для разработки и создания эффективных интегральных схем усилителей мощности в разных диапазонах. Причем новые ИС более чем в десять раз превосходят интегральные схемы на основе арсенида галлия (GaAs) по массогабаритным параметрам [2, 5]. Кроме того, эти компании освоили массовый выпуск усилителей мощности на основе GaN-гетероструктур с частотами до 100 ГГц, а компания QuinStar Technology совместно с HRL разрабатывает приемопередающие модули для радиолокаторов диапазона 94 ГГц с выходной мощностью более 5 Вт [2, 5].

Другими словами, за последние несколько лет были решены основные производственные и технологические проблемы, которые не позволяли транзисторам, а также монолитным интегральным схемам на основе GaN выйти на коммерческий уровень [6]. Результатом этого стало активное внедрение технологии структур на основе GaN в область СВЧ-приборов. Темпы промышленного освоения новой технологии существенно (в 2–3 раза) превышают темпы, которыми ранее развивались технологии приборов на основе кремния (Si) и GaAs [2, 6]. В ближайшие годы частотный диапазон 1–50 ГГц может стать подвластным технологиям приборов на основе как GaN, так и GaAs, частотные и мощностные характеристики которых во многом схожи. Однако следует отметить, что технология производства приборов на основе



**Рис.1.** Усилитель для беспроводных систем связи компании RFIC

GaN имеет серьезные преимущества по параметрам и свойствам, а технология на основе GaAs – по себестоимости и уровню освоенности в массовом производстве [2, 6].

Новая технология не стоит на месте, по мере ее освоения в производстве будет увеличиваться выпуск продукции, а себестоимость будет снижаться. При этом все указанные преимущества сохраняются.

### РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ GaN КОМПАНИИ RFIC ДЛ Я СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

Компания RFIC (Южная Корея), основанная в 1999 году, достаточно быстро заняла лидирующие позиции на рынках телекоммуникационного оборудования и решений для кабельного телевидения [2]. Удалось это прежде всего за счет реализации инновационного подхода к использованию технологии создания компонентов. Для обеспечения заказчиков высококачественной продукцией на оптимальных условиях компания RFIC на своем заводе реализовала полный производственный цикл разработки и сборки изделия, который включает такие операции, как посадка кристалла на основание, разварка контактов, корпусирование и герметизация [2].

В настоящее время компания RFIC разрабатывает и выпускает широкую номенклатуру изделий на основе GaN для СВЧ-электроники – от усилителей для кабельного телевидения до мощных усилителей для радиолокации [2].

Особого внимания в линейке продукции компании заслуживают усилители для беспроводных систем связи (рис.1), которые предназначены для применения в сетях, использующих различные форматы передачи данных, включая LTE, CDMA,

WCDMA и WiMAX. Условно эти устройства можно разделить на группы [2] в зависимости от мощности и рабочего диапазона напряжения.

**В первую группу** можно включить усилители номинальной мощностью от 5 до 10 Вт (рабочее напряжение 28 В). Коэффициент усиления данных устройств, предназначенных для работы в диапазоне частот 2–3 ГГц, равен 40–45 дБ.

**Вторую группу** изделий представляют усилители с номинальной мощностью 28 Вт (рабочее напряжение 48–50 В). Они предназначены для работы в диапазоне частот 0,8 ГГц – 3 МГц, коэффициент усиления – 44,5 дБ.

**К третьей группе** относятся усилители номинальной мощностью 56 Вт, их рабочее напряжение в пределах 48–50 В. Устройства предназначены для использования в диапазоне частот 0,8 ГГц – 3 МГц, их коэффициент усиления составляет 47,5 дБ.

**Четвертая группа** усилителей номинальной мощностью 80 Вт (рабочее напряжение 48–50 В) предназначена для применения в диапазоне частот от 0,8 ГГц – 3 МГц. Коэффициент усиления устройств равен 55 дБ.

Кроме того, усилители для беспроводных систем связи представлены гибридными устройствами мощностью 1–5 Вт (рабочее напряжение 28 В), а также реализованными на основе схемы Доггерти, что позволяет обеспечить мощность 7 Вт при рабочем напряжении 31 В. Указанные усилители предназначены для применения в диапазонах частот 0,8–3 ГГц (коэффициент усиления составляет 27–38 дБ) и 1,5–3 ГГц (коэффициент усиления в пределах 14–16 дБ) [2].

Как уже отмечалось, материалом для этих усилителей является GaN, что позволяет использовать устройства при высоких температурах и напряжении, применять их для работы в различных диапазонах частот.

Другой вид продукции – усилители для импульсных радиолокационных станций (РЛС). Устройства (рис.2) используются в широком частотном диапазоне, охватывают практически весь спектральный промежуток от 135 МГц до 10 ГГц, для них характерен высокий уровень мощности [2]. Как и для предыдущего класса устройств, материалом для этих усилителей служит GaN, что наделяет данные изделия всеми преимуществами, о которых было сказано ранее.

Усилители для РЛС также можно условно разделить на несколько групп [2].

**Первая группа** – гибридные усилители, которые покрывают широкий диапазон рабочих частот: от 400–450 МГц до 9,3–9,5 ГГц. Коэффициенты

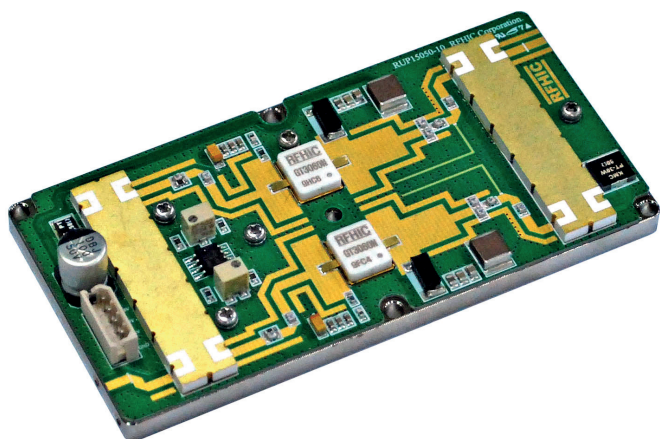


Рис.2. Усилитель для РЛС компании RFNIC

усиления устройств могут принимать значения от 11 до 33 дБ. Эффективность усилителей данной группы может достигать от 40 до 70%.

**Вторая группа** – маломощные усилители, которые перекрывают диапазон рабочих частот от 1,2–1,4 ГГц до 9,3–9,5 ГГц, значения коэффициентов усиления составляют от 10 до 18 дБ. Эффективность данных устройств – от 18 до 30%.

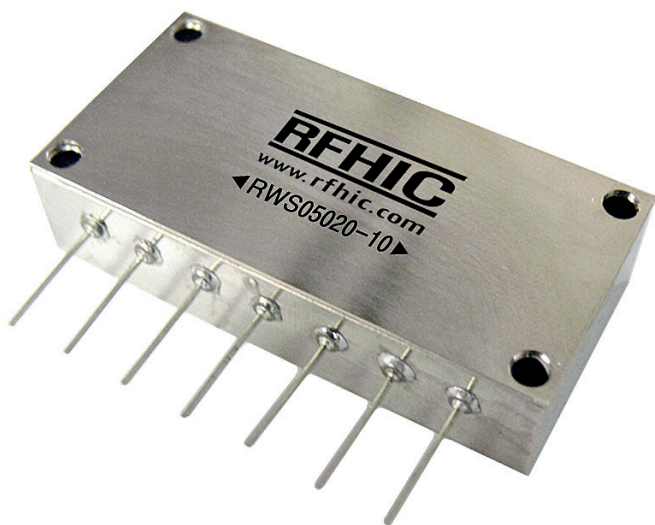
**Третья группа** – паллетные усилители, которые перекрывают диапазон частот от 135–460 МГц

до 9,0–10,0 ГГц. Их коэффициент усиления составляет от 8 до 39 дБ. Эффективность данного типа устройств равна от 5 до 20%.

**В самостоятельную группу** можно выделить мощные усилители, значение выходной мощности которых достигает значений от 200 Вт до 2,6 кВт, рабочие диапазоны частот перекрывают фактически всю область от 1,02–1,03 ГГц до 9,30–9,50 ГГц. Значения коэффициента усиления данных устройств составляют от 20 до 63 дБ, а эффективность – от 20 до 45% [2].

Еще один вид продукции компании RFNIC – мощные усилители для различных применений (рис.3). Устройства, также разработанные на основе GaN, применяются в жестких условиях эксплуатации, в частности, при повышенной температуре окружающей среды. Данные усилители перекрывают широкие диапазоны частот – примерно от 20–512 МГц до 2,0–6,0 ГГц. Коэффициент усиления составляет от 17 до 60 дБ, а рабочие значения напряжений находятся в диапазоне от 24 до 33 В [2].

Компания RFNIC не ограничивается поставкой исключительно серийной продукции, специалисты могут дорабатывать изделия согласно требованиям заказчика [2]. Например, известно, что существует некоторое различие между отечественными



**Рис.3.** Мощный усилитель компании RFHIC для различных применений

и зарубежными стандартами на частотные диапазоны и соответствующие им значения мощности изделий в СВЧ-диапазонах. Поэтому, нередко дает о себе знать проблема поиска комплектующих зарубежного производства, которые полностью соответствовали бы требованиям, предъявляемым в России. При этом на самом деле усилитель способен обеспечивать необходимые мощностные характеристики в конкретном диапазоне частот, но его тестирование в нужных условиях не проводилось, или, возможно, требуется небольшая доработка устройства. Специалисты RFHIC готовы реализовать оба варианта, что подтверждается рядом проектов, успешно выполненных за последние несколько лет компанией ProChip.

\* \* \*

В заключение остается отметить, что GaN и его твердые растворы – одни из самых востребованных и перспективных материалов современной электроники. Работы в этом направлении ведутся во всем мире, регулярно организуются конференции и семинары, что способствует быстрому развитию технологии создания электронных и оптоэлектронных приборов на основе GaN. Прорыв наблюдается как в параметрах светодиодных структур на основе GaN и его твердых растворов, так и в характеристиках гетероструктур для СВЧ-транзисторов.

Кроме того, продолжающийся процесс освоения технологии выращивания GaN-гетероструктур в массовом производстве на подложках диаметром 6 дюймов (150 мм) позволит ускорить развитие

данного направления, а также существенно снизить себестоимость кристаллов за счет увеличения выхода годной продукции. Такие подложки уже на протяжении нескольких лет используются в массовом производстве светодиодных структур и структур силовых приборов [2]. Технология, позволившая получить на пластинах диаметром 150 мм высокие характеристики в сочетании с отличной однородностью по толщине, удельному сопротивлению и качеству слоев, дала возможность начать использование данных пластин и в массовом производстве структур для СВЧ-направления. Все это позволяет сделать предположение о дальнейшем успешном применении GaN-гетероструктур в данной области в ближайшем будущем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Туркин А.Н.** Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. 2011. № 5. С. 6-10.
2. **Балакирев А., Туркин А.** Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике // Современная электроника. 2015. № 4. С. 28-32.
3. **Юнович А.Э.** Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов // Светотехника. 1996. Вып. 5/6. С. 2-7.
4. **Золина К.Г., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э.** Спектры люминесценции голубых и зеленых светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами // ФТП. 1997. Т. 31. № 9. С. 1055-1061.
5. **Федоров Ю.** Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In) N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // Электроника: НТБ. 2011. № 2. С. 92-107.
6. **Кишинский А.А.** Твердотельные СВЧ-усилители на нитриде галлия – состояние и перспективы развития // Материалы XIX Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, Вебер, 2009.
7. **Туркин А.Н., Юнович А.Э.** Лауреаты Нобелевской Премии 2014 года: по физике – И.Акасаки, Х.Аmano, С.Накамура // Природа. 2015. № 1. С. 75-81.
8. **Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Д., Галиев Р.Р., Щербакова М.Ю., Свешников Ю.Н., Цыпленков И.Н.** Усилители мощности КВЧ-диапазона на гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN/Сапфир // Материалы IX научно-технической конференции "Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА". – Звенигород, 1-3 декабря 2010 года. С. 44-46.

