

---

# Совершенствование технологии мощных транзисторов на широкозонных полупроводниках

Рыбакова Анастасия Олеговна,  
магистрант

Московский технологический университет

E-mail: [romanenkova-anastasiya@mail.ru](mailto:romanenkova-anastasiya@mail.ru)

## Аннотация

В статье описываются транзисторы и различные области их применения в современной электронике.

Ключевые слова: транзистор, мощность, электрон, оптика, СВЧ.

## Abstract

The article describes the various transistors and their applications in modern electronics.

Keywords: transistor, power, electron, optics, microwave.

С возросшими объёмами и потребностями телекоммуникационных средств по передаче информации как проводным оптоволоконным, так и беспроводным способом — LTE, WiMax, для повышения качества и надёжности работы сетей связи требуется надёжная электроника. Развитие технологии изготовления радиодеталей позволило создать новые модификации транзисторов, работающие в сантиметровом и миллиметровом диапазоне. К примеру, работающие на нитриде галлия (GaN). "В первые транзисторы на гетероструктуре AlGaN/GaN и их возможности были продемонстрированы в различных странах в период с 1991 по 1994 гг. С появлением первых транзисторов GaN и усилителей мощности сконструированных на их основе, запускаются программы двойного назначения (как гражданского, так и военного): в США — WBGSTI; в Европе — MARCOS, TIGER, KORRIGAN и в Японии — NEDO"[9]. Компании производители электроники, выпускавшие транзисторы GaAs, стали переключаться на разработку и использование GaN транзисторов в электронных блоках. "И в 2006 году были выпущены коммерческие мощные GaN транзисторы с диапазоном частот в 2-4 ГГц и выходной мощностью в 5-50 Вт. Следом появились с мощностью от 120 до 180 Вт. Первыми компаниями выпустившими транзисторы GaN были компании Eudyna, Nitronex, Cree. В 2008 году появились коммерческие широкополосные усилители мощности до 6 ГГц, производства компании Cree. В 2009 году на рынке появился широкополосный усилитель с мощностью 10 Вт с частотой от 2 до 17 ГГц"[3]. "Гетероструктуры основанные на GaN обладают физическими свойствами с высокой мощностью и оптическими возможностями"[1]. "В транзисторах GaN осуществляется управление концентрацией двумерного газа носителей электронного заряда, что позволяет регулировать возможности транзистора. Транзисторы на нитриде галлия используются в активной зоне в лазерных диодах, и светодиодах с короткой длиной волн. Они обладают высокой мощностью и выдают высокое пробивное напряжение с барьерами Шоттки"[8]. Ведутся разработки в создании коротковолновых светодиодов ультрафиолетового, сине-зелёного и белого спектра электромагнитного излучения, основанных на люминифоруме полупроводниковых кристаллах. "В 1014 году за разработку светодиодов основанных на транзисторах GaN профессоры Исаму Акасаки и Хироси Амано из Университета г. Нагоя, расположенного в Японии и профессору Шуджи Накамура из Калифорнийского университета в США, была присуждена Нобелевская премия по физике"[7]. GaN транзисторы используются не только в оптической электронике, но и в СВЧ транзисторах. На основе GaN

---

транзисторов были созданы интегральные схемы усиливающие мощность с высокой эффективностью при уменьшении габаритов и веса устройства использующихся в СВЧ оборудовании систем связи и радиолокации. Создание СВЧ транзисторов основанных на нитриде галлия стало возможно в результате разработки технологии основанной на травления щели в диэлектрике[8;6]. Данный метод позволил сократить расстояние между затвором и каналом, уменьшилось сопротивление в стоке и истоке в результате обеднения области затвор—исток и затвор—сток. Частично и даже полностью исчез переходный процесс при включении в результате более слабого воздействия ловушек расположенных в области затвор-сток, поскольку они были сдвинуты на безопасное расстояние. "Разработки в области создания новых материалов позволили создать GaN транзисторы, на основе которых были созданы интегральные микросхемы усиления мощности, превосходящие приблизительно в 10 раз по своим габаритам электронные блоки, созданные на основе транзисторов из арсенида галлия GaAs. Промышленностью выпускаются усилители мощности с частотой до 100 ГГц. Компаниями HRL и QuinStar Technology разработано оборудование, для локаторов работающее на частоте 94 ГГц, с мощностью свыше 5Вт«[8]. АО «Микроволновые системы» выпускаются мощные широкополосные СВЧ-усилители, применяемые в радиолокационной технике, как военного, так и гражданского назначения. "Усилителей мощности в диапазоне от 1-18 ГГц, с мощностью 100 — 160 Вт для комплексов радиолокационной борьбы (РЭБ). Также выпускает малозумные широкополосные СВЧ-усилители"[1].

Обладая несомненными преимуществами, транзисторы на широкозонных полупроводниках имеют недостатки, такие как низкое быстродействие и нелинейность амплитудно-частотных характеристик. Данные недостатки широкозонных транзисторов GaN компенсируются полевыми транзисторами на основе арсенида галлия, были разработаны в АО «НПП «Исток» им. Шокина"[4]. Данные транзисторы сконструированы с последовательно расположенной подложкой состоящей из буферного и легированного слоёв. Также имеет по одному легированному и нелегированному проводящему слою в которых расположены широкозонные полупроводники и один нелегированный слой узкозонного полупроводника. Преимущество транзисторов на основе арсенида галлия в том, что у них легированные слои и создаются квантовой ямы, залитые электронами, которые выдают высокие и резкие потенциальные барьеры, в результате чего повышается быстродействие. Поскольку для возрастания выходной мощности СВЧ у DrHEMT и rHEMT транзисторов необходимо минимальное сопротивление канала ВАХ выходов. Для эффективной работы необходимо, чтобы на выходе транзистор выдал более 1 Вт/мм. Поперечный перенос электронов из InGaAs канала происходит из-за их разогрева в электрополе, и они заполняют слои AlGaAs вблизи доноров вследствие чего горячие электроны становятся менее подвижными, что снижает выходную мощность транзистора. Разрыв дна зоны проводимости на гетерогранице в AlGaAs и InGaAs составляет около 0,3 эВ. Такого потенциала в InGaAs-канала не хватит для локализации в нем электроном из-за их сильного разогрева. С увеличением легирования транзисторов, также происходит поперечный перенос электронов из канала InGaAs в результате заполнения электронами в AlGaAs слои. Высокий уровень легирования отрицательно сказывается на выходной мощности транзистора. Добавление барьеров, позволяет локализовать горячие электроны в InGaAs канале, при этом в AlGaAs слоях количество электронов падает, то есть поперечный перенос электронов уменьшается. Ещё нет технологии промышленного производства барьеров с высоким более 0,5 эВ разрывом зоны проводимости, для локализации горячих электронов. Промышленностью выпускаются транзисторы с локализуемыми барьерами донорно-акцепторным легированием широкозонных слоёв. Локализуемые барьеры создаются в результате воздействия встроенных полей зарядов доноров и акцепторов в  $Al_xGa_{1-x}As$  слоях, при использовании технологии дельта-легирования. Данный способ позволяет максимально возможно локализовать горячие электроны в InGaAs канале. Транзисторы, созданные по данной технологии, имеют

---

название — (DA)-DpHEMT. "У таких мощных транзисторов меньше рассеивание горячих электронов в результате уменьшения толщины широкозонного слоя. Меньше квадрат волновой функции электронов возле барьеров, усилен эффект квантования. Выше плотность электронов из-за более глубокой квантовой ямы. Меньше перенос электронов от затвора в канал. Улучшенное управление током стока при прямом смещении контакта Шоттки, за счёт меньшей поверхностной плотности горячих электронов в широкозонных слоях.

Увеличение плотности электронов в InGaAs канале вызванных локализацией барьеров позволило транзисторам при частоте в 10 ГГц выдавать выходную мощность более 1,8 Вт/мм, 9,8 дБ, на 50% меньше выходной мощности при длине затвора в 0,5 мкм. Транзисторы (DA)-DpHEMT обладают большой выходной мощностью при высокой линейности амплитудно-частотной характеристики. Оптимальное соотношение слоёв в транзисторе дало выходную мощность более 1,5 Вт/мм, 12,5 дБ и на 60% меньше выходной мощности при длине затвора в 0,3 мкм"[2]. До этих изобретений применение полевого электрода в транзисторах X-диапазона было неэффективно из-за сильного падения коэффициента усиления. "Разработанные в последние годы легированные транзисторы в мм-диапазоне позволили повысить выходную мощность до 6 Вт/мм за счёт использования полевого электрода, GaN транзисторы с частотой 40 ГГц«[5].

Мощные полупроводниковые усилители были, сконструированы на основе транзисторов с гетероструктурой AlGaIn/GaN, за счёт их свойств в широкозонных полупроводниковых соединениях и использования нитрида галлия, вместо арсенида галлия GaAs, основываясь на разработках последних лет, которые доказали перспективность гетероструктур GaN в электронике и оптоэлектронике. Достигнуты высокие технические показатели в светодиодных и СВЧ-транзисторах. Разработки в области микроэлектроники расширяют область применения GaN транзисторов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Усовершенствование технологии выращивания кристаллов и подложек снизит себестоимость транзисторов. Совершенствование производства подложки для транзисторов позволило достичь высоких показателей гетероструктур на основе GaN.

#### **Источники**

1. АО «Микроволновые системы». Электронный ресурс доступа: <http://www.mwsystems.ru/>
2. В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, В.Г.Лапин, С.В.Щербаков, К.С.Журавлев, А.И.Торопов, А.А.Капралова «Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путём формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры» // Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 3, с. 81 — 87.
3. Свч электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. Белоус А.И., Мерданов М. К., Шведов С.В. Книга 2 с 736.
4. Патент РФ на полезную модель № 80069 по заявке № 2008133793. Электронный ресурс доступа: <http://www.freepm.ru/Models/80069>
5. Патент РФ № 2463685 по заявке № 2011123071. Электронный ресурс доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2463685>
6. Патент № 2316845. Электронный ресурс доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2316845>
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. Фёдоров Ю. Широкозонные гетероструктуры (Al,Ga,In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн. Электроника НТБ. 2011. № 2. С. 92–107.
9. Chen T. et al. X-Band 11W AlGaIn/GaN HEMT Power MMICs // EwMIC Conference Proceedings. — 2007. — P. 162–164

- 
10. F.Medidoub, B.Grimbert et al. Record combination of power-gain frequency and three-terminal breakdown voltage for GaN-on-Silicon devices //Appl.Phys.Express, 6 (2013) 044001.