

GaN-ТРАНЗИСТОРЫ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ: ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Б.Ботвелл¹, Д.Драммонд², М.Пилла³, У.Г.Зинг⁴, Д.Джина⁵, Г.Кон⁶

УДК 621.382
ВАК 05.27.06

Полупроводниковые силовые устройства – ключевой компонент энергетической инфраструктуры. Согласно прогнозам, к 2030 году до 80% электроэнергии будет проходить одну или более стадий преобразования на пути от генерации до потребления (сегодня 30%). Это еще больше повысит роль переключающих полупроводниковых приборов. Эффективным решением для создания переключателей могут стать GaN-транзисторы с вертикальной структурой. О достижениях разработчиков в данной сфере рассказывается в статье.

Создание современных переключающих элементов с высоким КПД стало возможным благодаря применению кремниевых МОП-транзисторов (MOSFET). Важные характеристики силовых переключающих устройств – время переключения и сопротивление транзистора в открытом состоянии (R_{on}). Влияние этих параметров особенно заметно при высоких значениях рабочего напряжения и тока.

В целом ряде отраслей – от электромобилей до генерации и передачи электроэнергии – необходимы переключающие устройства с высоким КПД и малыми потерями на переключение. Причем они должны иметь не только улучшенные характеристики, но и приемлемую стоимость.

Значительное повышение КПД приборов не может быть результатом дальнейшего усовершенствования кремниевой (Si) технологии, так как устройства подошли к пределу, определяемому свойствами материала. Промышленность обратила внимание на устройства, основанные на широкозонных полупроводниках, таких как нитрид гал-

лия (GaN) и карбид кремния (SiC). Подобные приборы уже сейчас способны удовлетворить возрастающие требования к энергоэффективности.

За последние несколько лет устройства на основе GaN и SiC стали коммерчески доступными, но их широкому внедрению мешали высокая цена и не доказанная экспериментально надежность в сравнении с кремниевой элементной базой. Однако по ключевым характеристикам приборы на основе широкозонных полупроводников значительно превосходят кремниевые устройства (рис. 1).

У GaN отличные электрическая прочность и подвижность электронов, что дает в итоге более высокие показатели качества, чем у SiC. Это справедливо для большинства применений, требующих преобразования электроэнергии, за исключением режимов работы при высоких температурах, где SiC превосходит все известные материалы. Потенциал обоих материалов можно оценить с применением различных показателей качества (figure of merit, FOM) (см. таблицу). Наиболее известный, предложенный Б. Дж. Балигой, основан на измерении сопротивления в открытом состоянии области дрейфа электронов (от истока до стока) полевого транзистора с вертикальной структурой. Два других ключевых показателя качества – скорость переключения и предельно допустимая мощность.

Ценовой баланс с кремниевыми устройствами достигим, если выпускать GaN HEMT устройства на кремниевых

¹ Qorvo, директор по стратегическому развитию.

² Qorvo, менеджер по стратегическому развитию.

³ Qorvo.

⁴ Корнельский университет, профессор.

⁵ Корнельский университет, профессор.

⁶ Макро Групп, руководитель направления ВЧ, силовые и оптические компоненты, George.Cohn@macrogroup.ru.

эпитаксиальных пластинах, правда, при этом уровни напряжения ограничены 650 В или меньше. Для более высоких напряжений требуется переход с Si- на SiC-подложки, но это влечет за собой удорожание изделий из-за повышения стоимости подложки и увеличение продольных размеров устройства, необходимых для обеспечения работы при больших напряжениях.

Оптимальный вариант – переход к устройствам с вертикальной структурой. Они будут соответствовать требованиям к характеристикам и стоимости благодаря значительному сокращению размера кристалла, но потребуют GaN-подложки для поддержки тока, протекающего вертикально. Задача состоит в том, чтобы разработать переключающие элементы, основанные на GaN и имеющие вертикальную структуру. Решение такой задачи позволит создавать устройства для преобразования энергии, которые будут обладать большим КПД и стоить дешевле существующих приборов.

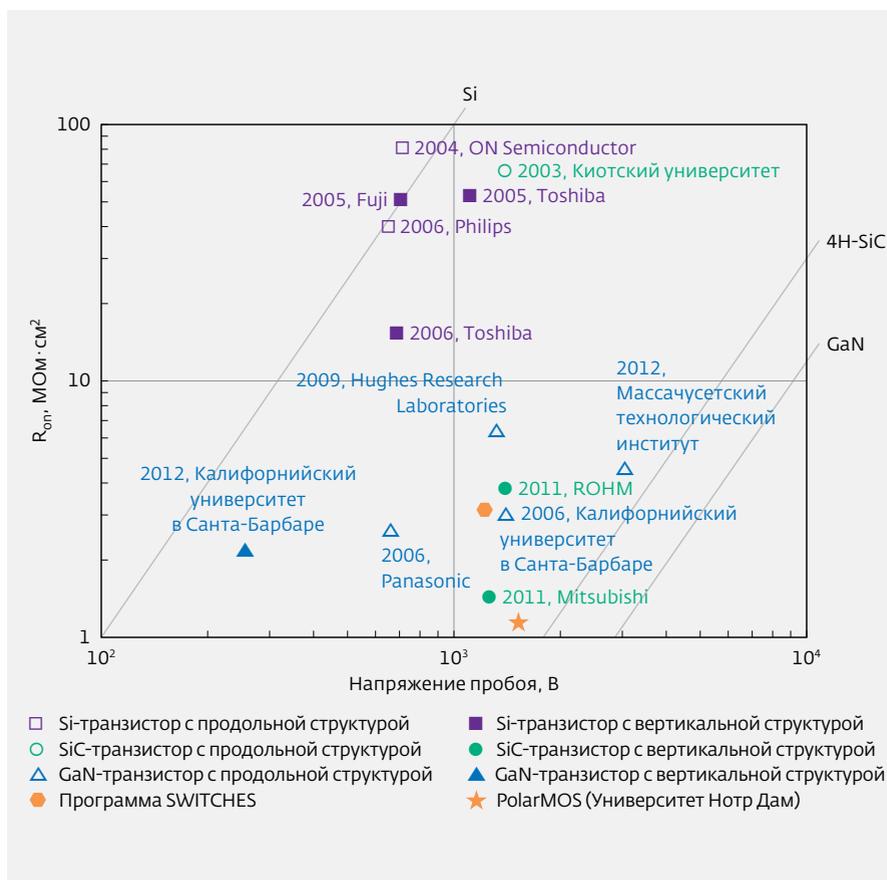


Рис.1. Сравнение характеристик устройств на основе Si, GaN и SiC

FOM широкозонных полупроводников

Наименование и описание FOM	Si	GaAs	6H-SiC	4H-SiC	GaN	CVD-алмаз
JFM (на основе частотных свойств материала, предложенный Джонсоном)	1	1,8	277,8	215,1	215,1	81 000
BFM (на основе сопротивления канала, предложенный Балигой)	1	14,8	125,3	223,1	186,7	25 106
FSFM (на основе скорости переключения полевого транзистора)	1	11,4	30,5	61,2	65	3 595
BSFM (на основе скорости переключения биполярного транзистора)	1	1,6	13,1	12,9	52,5	2 402
FPFM (на основе максимальной выходной мощности полевого транзистора)	1	3,6	48,3	56	30,4	1 476
FTFM (для силовых переключателей на основе полевых транзисторов)	1	40,7	1 470,5	3 424,8	1 973,6	5 304 459
BPFM (на основе максимальной выходной мощности биполярного транзистора)	1	0,9	57,3	35,4	10,7	594
BTFM (для силовых переключателей на основе биполярных транзисторов)	1	1,4	748,9	458,1	560,5	1 426 711

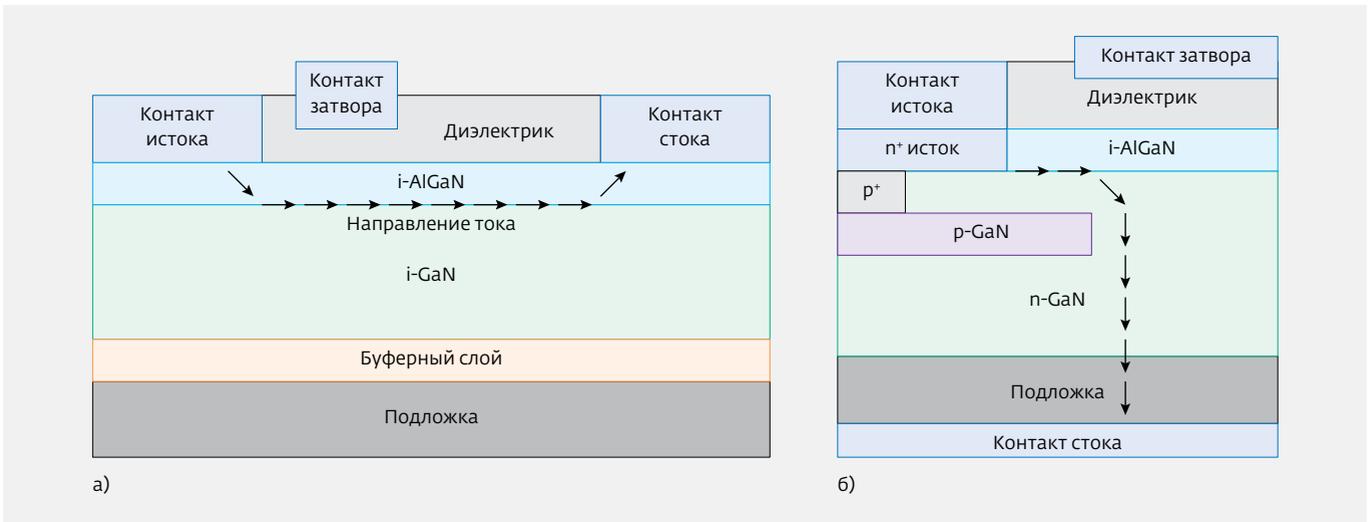


Рис.2. GaN-транзистор традиционной конфигурации с продольной (а) и вертикальной (б) структурами

Такого видения нового поколения GaN-устройств придерживается и агентство ARPA-E (созданное по образцу DARPA управление, занимающееся энергетикой). Чтобы воплотить мечту в реальность, это управление инвестировало 27 млн. долл. в реализацию трехлетней программы SWITCHES (Strategies for Wide-Bandgap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems – стратегии [создания] широкозонных полупроводников и недорогих транзисторов для эффективных устройств преобразования энергии). Цель SWITCHES – использовать преимущества широкозонных полупроводников для разработки однокристалльных силовых устройств, способных функционировать при напряжении более 1200 В и уровнях тока выше 100 А.

ОТ ПРОДОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ К ВЕРТИКАЛЬНОЙ

Преимущества эпитаксиального слоя GaN на GaN-подложке (GaN-on-GaN) в том, что такая структура дает возможность производить вертикальные устройства. Они предпочтительнее продольных устройств, в которых ток протекает близко к поверхности в слое двумерного электронного газа (2DEG), образованном вблизи перехода AlGaN/GaN (рис.2а). Недостатками продольной геометрии являются большое продольное расстояние, пропорциональное рабочему напряжению и току, плохая термическая стойкость из-за использования кремниевой подложки и так называемый коллапс тока (ограничение тока стока вследствие переходных процессов при переключении, вызванных влиянием накопленного заряда на ток проводимости в двумерном электронном газе). Совокупность этих факторов препятствует экономически эффективному масштабированию устройств с продольной структурой до значений, необходимых для поддержки высоких токов и напряжений.

Группа разработчиков из Калифорнийского университета (Санта-Барбара) стала пионером в создании вертикальных гомоэпитаксиальных GaN-структур, лишенных данных недостатков. В таких устройствах (рис.2б) ток протекает через GaN-подложку вертикально и большая часть падения напряжения приходится на вертикальное направление. Как следствие, нет необходимости масштабировать продольные размеры по мере увеличения рабочего напряжения. Благодаря этому размер кристалла может быть в пять и более раз меньше, чем при продольной структуре. Более того, в вертикальной структуре практически исчезает коллапс тока и в то же время повышаются скорости переключения и термическая стойкость. Справедливости ради стоит отметить, что вертикальная конфигурация требует биполярной структуры для реализации диода и транзистора, а из-за ограничений, связанных со свойствами материала, сложно получить примесно-легированный GaN р-типа.

Чтобы восполнить данные технологические пробелы, Ули Грейс Зингом и Дебдипом Джиной (руководителями групп, которые недавно перешли из университета Нотр Дам в Корнельский университет) были разработаны поляризационно-легированные (polarization-doped) слои р- и n-типов и соответствующие переходы. Теперь стало возможным получение структур с большим пробивным напряжением, высокой подвижностью электронов в канале и низким сопротивлением в открытом состоянии. Другая технология – включение недорогого кремния в поляризационно-легированную р-область для создания n-канала (рис.3).

GaN-устройства этого класса имеют многообещающее будущее при использовании в приводах электродвигателей, инверторах для солнечных батарей, системах зарядки электромобилей, DC/DC-преобразователях для телекоммуникационных систем и в военных приложениях,

но успех зависит от многих факторов. Первостепенный – обеспечение большого КПД при работе на высоких частотах и при высоких температурах. Если это станет возможным, системы будут занимать значительно меньше места и обойдутся дешевле, а их надежность будет соответствовать современным требованиям.

ДВИЖЕНИЕ В ДВУХ НАПРАВЛЕНИЯХ

Представители компании Qorvo – мирового лидера в разработке и производстве СВЧ-устройств – выступают в роли субподрядчиков при реализации двух проектов в рамках SWITCHES. Первый проект ведут Ули Грейс Зинг и Дедип Джина. В нем задействованы компания IQE, ведущий поставщик эпитаксиальных пластин, и Объединенный технологический центр разработок, исследовательская организация, выступающая в роли технологического инкубатора для проектов, связанных с разработкой силовых систем для аэрокосмических, военных и коммерческих применений. Второй проект ведет компания Microlink, которая специализируется на технологии отделения эпитаксиальных слоев, обеспечивающей повторное использование базовых GaN-подложек, что снижает общую стоимость изделия. Малые размеры и высокая стоимость GaN-подложек обусловили их низкую популярность, и усилия Microlink направлены на решение этих проблем. Таким образом, участники первого проекта работают над улучшением характеристик структур на основе GaN, а второй проект преследует цель повышения рентабельности их производства.

На сегодняшний день удалось добиться впечатляющего прогресса. Так, специалисты университета Нотр Дам и Корнельского университета разработали поляризационно-легированные р-п-диоды с запирающим напряжением 1200 В на основе эпитаксиальных пластин, созданных компанией IQE в рамках SWITCHES (есть и разработки р-п-диодов с запирающим напряжением более 3000 В). Были также продемонстрированы устройства типа PolarMOSH, основанные на гетероструктурах металл/окисел/полупроводник (Metal-Oxide-Semiconductor Heterostructure, MOSH), в которых используется поляризационное легирование. Такие устройства обеспечивают напряжение отсечки 1,3 В, максимальную плотность рабочего тока 250 мА/мм² и максимальное напряжение на затворе более 15 В. Кроме того, компанией Qorvo достигнуто запирающее напряжение более 700 В на JFET-транзисторе, полученном посредством молекулярно-лучевой эпитаксии. Компания планирует перейти к производству этих устройств на 4-дюймовых пластинах, чтобы снизить цену изделий. Таким образом, в ходе реализации SWITCHES были получены устройства с высокими значениями токов и напряжений, что подтверждает преимущество технологий, разрабатываемых в рамках этой программы.

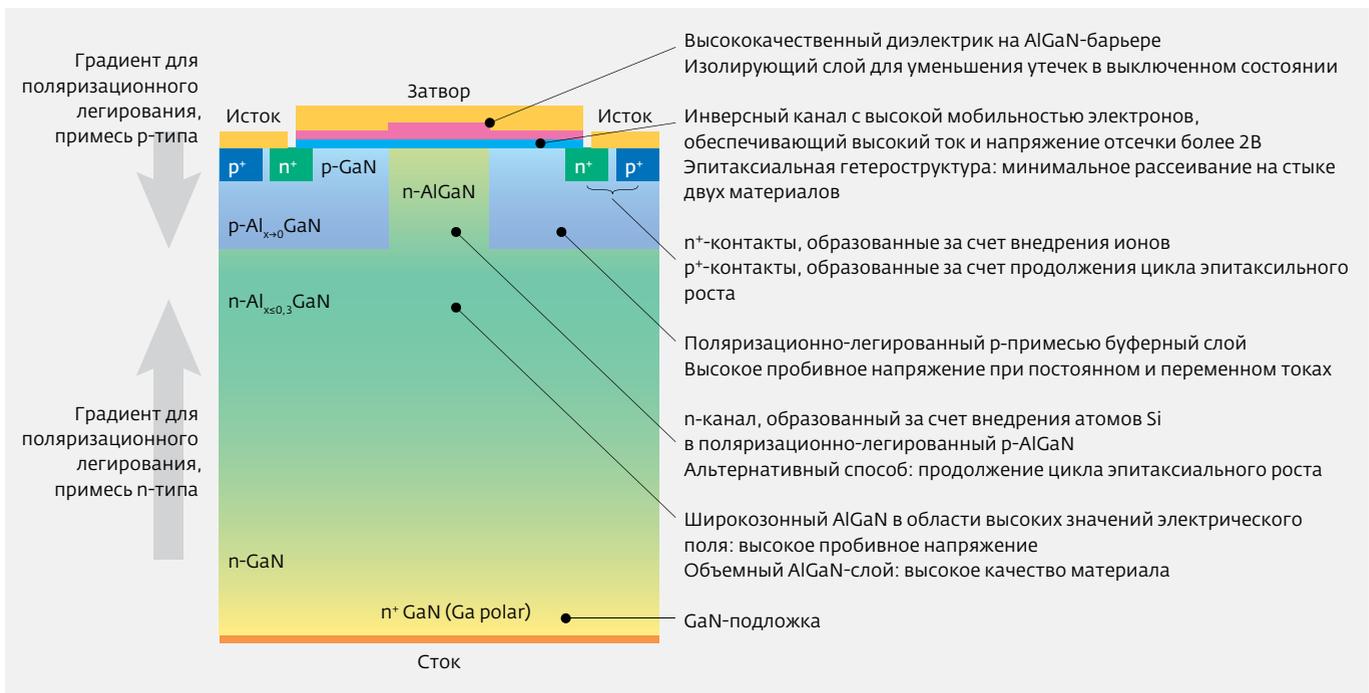


Рис.3. Структура, созданная на основе технологии PolarMOS

Но предстоит еще решить много задач. Одна из ближайших целей – с учетом улучшенных характеристик подложек и эпитаксиальных слоев изготовить вертикальный поляризационно-легированный JFET-транзистор (PolarJFET), который способен работать с напряжением 300 В при токе 10 А.

Другая большая цель – объединение технологий изготовления структур PolarMOSH и PolarJFET и создание вертикальных поляризационно-легированных MOSHJFET-устройств – PolarMOS (см. рис.3). Такие устройства позволят обеспечить высокие значения запирающего напряжения в сочетании с повышенной надежностью изделий. Кроме того, планируется внедрение в новые устройства технологии, связанной с отделением эпитаксиальных слоев.

И еще одна задача – разработка компактных корпусов для устройств высокой мощности. Компания Qorvo взаимодействует с участниками обоих проектов в рамках создания корпусов, обеспечивающих оптимальные показатели работы GaN-on-GaN устройств на системном уровне.

Востребованность таких устройств повышается, что объясняется их способностью удовлетворить потребность в недорогих переключателях с высоким КПД, обеспечивающих снижение энергопотребления и ускорение разработки альтернативных источников энергии.

Компания Qorvo имеет ряд преимуществ для создания новых полупроводниковых силовых элементов благодаря широкой сети партнеров, возможности выпускать

устройства в промышленных объемах и развитой технологии производства, включая повторное использование подложек.

Вывод на рынок большого количества силовых устройств на базе широкозонных полупроводников откроет блестящие перспективы для преобразования энергии.

Авторы благодарят Тима Хейделя и Дейва Хеншола из ARPA-E, которые возглавляют программу SWITCHES.

ИСТОЧНИКИ

- **Xinget H.G. et al.** Unique opportunity to harness polarization in GaN to override the conventional power electronics figure-of-merits. Device Research Conference, June 2015, <http://arxiv.org/abs/1505.04651>.
- Strategies for Wide-Band Gap, Inexpensive Transistors for Controlling High Efficiency Systems (SWITCHES). ARPA-E. 2013 – arpa-e.energy.gov.
- **Chowdhury S. et al.** Current status and scope of gallium nitride-based vertical transistors for high-power electronics application // Semiconductor Science and Technology. 2013. V. 28. № 7.
- **Simon J. et al.** Polarization-Induced Hole Doping in Wide-Band-Gap Uniaxial Semiconductor Heterostructures // Science. 2010. V. 327/ Is. 5961. P. 60–64 DOI: 10.1126/science.1183226.
- **Jena D. et al.** Polarization-engineering in group III-nitride heterostructures: New opportunities for device design // Phys. Stat. Solidi. 2011. V. 208. Is. 7. P. 1511–1516.