

СИЛОВАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

МНОГООБЕЩАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТАНОВЯТСЯ РЕАЛЬНОСТЬЮ

М.Гольцова

Прочно установившаяся задача полупроводниковой промышленности – "меньше, быстрее, дешевле". Улучшение рабочих характеристик при одновременном уменьшении размеров и цены – непереносимые требования при создании практически любого полупроводникового прибора. Для силовых полупроводниковых устройств эти требования в первую очередь означают обеспечение как можно меньших потерь на переключение и электропроводность диэлектрика, более высокой частоты переключения, стабильности характеристик в широком диапазоне температур, высокой рабочей температуры и как можно более высокого запирающего напряжения. По мере достижения кремниевыми силовыми компонентами теоретических пределов популярными становятся приборы на основе полупроводниковых соединений с большой шириной запрещенной зоны (широкозонные материалы), высокими теплопроводностью и напряженностью поля пробоя. Это – карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN). Интерес также представляет и алмаз благодаря более чем на порядок лучшим характеристикам, чем у кремния.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРИБОРОВ

Алмаз – весьма перспективный материал для создания силовых приборов, но процессы его обработки все еще находятся на ранней стадии развития. Если принять во внимание, что при создании приборов на карбиде кремния, несмотря на немного меньшую, чем у алмаза температуру обработки, существует множество производственных проблем, то, очевидно, что при работе с алмазом их еще больше. По-видимому, силовые приборы на алмазе появятся не раньше, чем через 20–50 лет.

У SiC и GaN много привлекательных свойств, определяющих перспективность их применения для изготовления силовых приборов. Легирование карбида кремния донорной примесью позволяет изготавливать на его основе биполярные, полевые

и МОП-транзисторы, тогда как на нитриде галлия можно создавать лишь транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) и полевые транзисторы с инжекцией затвора (GIT). К тому же GaN-приборы в основном имеют горизонтальную структуру, тогда как у SiC-компонентов структура вертикальная. Тем не менее исследования различных топологий силовых преобразователей показали, что GaN- и SiC-приборы работают примерно одинаково, но для обеспечения высокого напряжения переключения нужны вертикальные GaN-приборы.

Интерес к широкозонным полупроводниковым материалам со стороны разработчиков силовых компонентов вызван возможностью снижения потерь и увеличения частоты переключения устройств на их основе, их высокими значениями

напряжения пробоя и рабочей температуры, а также робастностью, надежностью и радиационной стойкостью. Появилась возможность создания оборудования, которое раньше не могло быть реализовано на кремниевых приборах. Поэтому сейчас кремниевые компоненты, практически захватившие рынок силовой электроники, начинают испытывать усиливающееся давление со стороны приборов на основе карбида кремния и нитрида галлия.

Но практически реализовать достоинства приборов на широкозонных материалах совсем не просто. Так, к достоинствам карбида кремния относится возможность его термического окисления для формирования затворного диэлектрика SiO_2 , тогда как для получения затворного диэлектрика GaN МОП-транзистора необходимо осаждать пленки SiO_2 , Si_3N_4 или Al_2O_3 [1]. Однако, как отметил профессор Политехнического института Ренсселира Поль Чжоу в своем выступлении на конференции IEDM 2013, несмотря на возможность термического окисления 4H-SiC, состояние границы раздела окисла и поверхности кристалла совсем не идеальное и сильно зависит от кристаллографической ориентации материала и от его политипа. Кроме того, распространенная практика резки пластин под углом скалывания $4-8^\circ$ по отношению к оси, используемая для контроля политипа при эпитаксиальном росте, пагубно влияет на свойства SiC-транзистора.

К проблемам, присущим технологии 4H-SiC-транзисторов, относятся и неоднозначные результаты используемых в обычной кремниевой технологии методов оптимизации характеристик прибора. Так, отжиг в атмосфере водорода при температуре $700-800^\circ\text{C}$ позволяет эффективно минимизировать плотность ловушек на границе раздела с кристаллографической плоскостью (000-1) (или плоскостью C), но не на более часто используемой границе с (0001) плоскостью (плоскостью Si). С другой стороны, отжиг при температуре $1150-1300^\circ\text{C}$ в атмосфере окиси азота приводит к значительному сокращению центров захвата на границе раздела $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$ благодаря вводу фиксированного положительного заряда, но при этом увеличивается рассеяние носителей заряда. Чжоу отметил и уменьшение подвижности носителей заряда в инверсионном слое вследствие активации легирующей примеси и отжига омических контактов.

Плотность пограничных состояний 2H-GaN меньше, чем у 4H-SiC, особенно вблизи края зоны проводимости. Полярность фиксированных или захваченных носителей на границе раздела

зависит от материала диэлектрика затвора (SiO_2 или Al_2O_3). Один из основных недостатков GaN-приборов – изменение характеристик на постоянном токе при увеличении скорости переключения прибора. Происходит "коллапс" тока, который связан с плотностью поверхностных состояний на границе раздела диэлектрика и материала затвора. Большинство операций обработки поверхности пластины нитрида галлия, например плазменное травление, приводят к необратимому ухудшению характеристик GaN МОП-транзисторов.

Отмечается и необходимость изменения методов тестирования SiC- и GaN-приборов, ширина запрещенной зоны которых больше, чем у кремния. При снятии вольт-фарадных характеристик таких приборов для возбуждения электронов, находящихся на глубоких уровнях запрещенной зоны, и определения плотности граничных состояний необходимо применять УФ-облучение иногда совместно с увеличением температуры испытания [2].

С момента выпуска на рынок компанией Infineon в 2001 году первых SiC-диодов с барьером Шоттки на напряжение от 300 до 600 В ожидалось, что карбид кремния станет самым перспективным материалом для построения высокоэффективной силовой электроники. Однако разработка приборов на его основе затянулась из-за сложности получения достаточно дешевых SiC-подложек и, следовательно, дешевых SiC-приборов (рис.1).

Транзисторы на нитриде галлия появились на рынке лишь в начале 2010 года (до этого нитриду галлия внимание уделялось в основном как материалу для замены GaAs, используемого для изготовления РЧ-транзисторов и монолитных микросхем, а также голубых и белых светодиодов). Отношение к нитриду галлия как к материалу, пригодному для создания силовых устройств, изменилось после того, как ряд компаний выпустили GaN-приборы на напряжение от 40 до 600 В с сопротивлением канала в открытом состоянии, равном всего нескольким миллиомам (рис.2). И сейчас затраты на развитие GaN-силовой технологии существенно возросли.

Силовые приборы на основе SiC и GaN находят применение в блоках питания с коррекцией коэффициента мощности, источниках бесперебойного питания, в гибридных и электромобилях, промышленных электроприводах, солнечных преобразователях, ветряных энергетических установках и в транспортных системах.

Многие проблемы, препятствующие широкому применению приборов на основе этих материалов, одинаковы. В первую очередь это высокая стоимость



Рис.1. Развитие рынка силовых SiC-приборов

силовых приборов на основе широкозонных материалов, особенно на карбиде кремния. В сравнении с кремниевыми приборами, SiC-диоды Шоттки в пять-семь раз дороже, полевые транзисторы – в четыре-семь раз дороже и МОП-транзисторы – в десять-пятнадцать раз дороже (рис.3). Но если учесть выигрыш от их применения, стоимость силовых SiC-модулей не имеет важного значения. Так, в некоторых поездах во Франции все новые инверторы были оснащены силовыми модулями на 1700-В SiC МОП-транзисторах (ток 250 А) компании Danfoss Silicon Power. Это позволило увеличить их КПД на 1%. Казалось бы, небольшой показатель. Но при увеличении КПД на 1% потери преобразователя сокращаются на 50%, а это уже весьма большой показатель, особенно для транспортных средств.

Силовые GaN-приборы можно изготавливать на эпитаксиальном материале, выращенном на

стандартных кремниевых или сапфировых пластинах большого диаметра, которые намного дешевле пластин карбида кремния.

Велика и инерционность разработок. Производители предпочитают совершенствовать кремниевую технологию и не тратить усилия на создание пока рискованных новых приборов. Поэтому на рынке еще нет достаточно большого числа устройств, пригодных для замены кремниевых диодов и транзисторов. Нет и вторичных поставщиков SiC- и GaN-приборов.

Таким образом, ни один тип прибора на основе материала с широкой запрещенной зоной не утвердился на рынке, если по стоимости он не будет сопоставим с дешевыми кремниевыми приборами, например с полевыми транзисторами семейств Super Junction или высоковольтными биполярными транзисторами с изолированным затвором (БТИЗ,

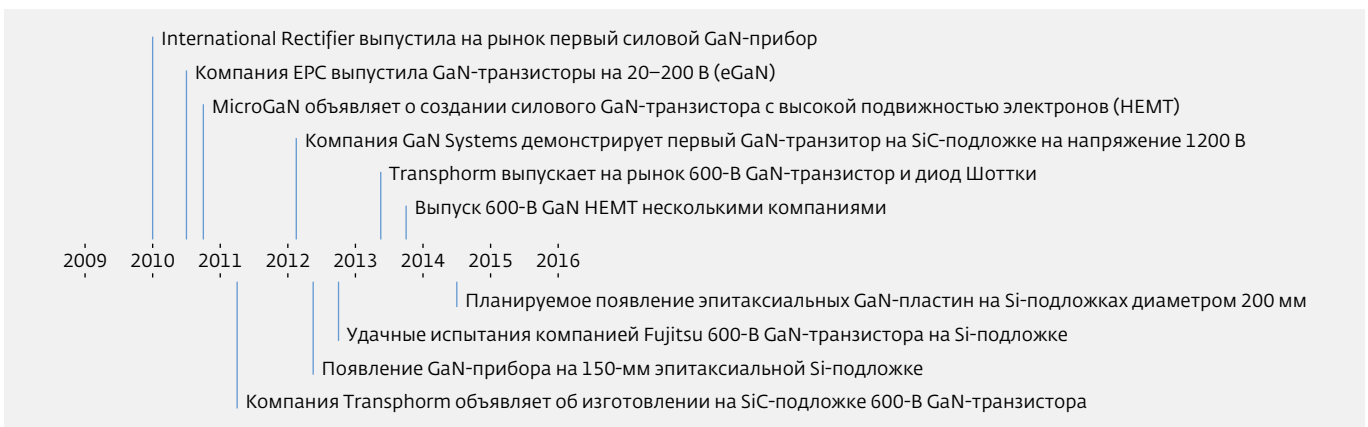


Рис.2. Развитие рынка силовых GaN-приборов



Рис.3. Динамика снижения стоимости SiC-силовых приборов

или IGBT). Эту задачу можно решить за счет их изготовления на 150-мм пластинах, что позволит снизить стоимость приборов на 20–50%. SiC-пластины диаметром 150 мм появились на рынке в 2012 году, но с отставанием от графика выпуска. Сейчас пластины карбида кремния такого диаметра помимо

компании Cree выпускают Dow Corning, II-VI Inc., SiCrystal, Sumitomo и др. GaN-силовые приборы изготавливаются на кремниевых пластинах диаметром 100 и 150 мм. Эпитаксиальные GaN-пластины выпускают компании Azzurro, DOWA, NTT, EpiGaN, Soitec, IQE и др. На рынке представлены и пластины диаметром 200 мм, но пока их производство лишь наращивается.

К другим факторам, определяющим, насколько быстро SiC- и GaN-приборы смогут утвердиться на рынке силовых устройств, относятся:

- время, которое потребуется SiC- и GaN-транзисторам и силовым модулям для демонстрации высокой надежности при длительной эксплуатации в промышленном оборудовании или в аппаратуре охраны здоровья и безопасности;
- насколько быстро квалифицированные поставщики SiC-пластин и эпитаксиальных GaN-пластин на кремниевой подложке начнут конкурировать;
- усиление конкуренции между растущим числом производителей SiC- и/или GaN-изделий, что будет способствовать увеличению их портфелей и росту применения;
- появление новых законодательных или правительственных инициатив, касающихся

энергетической эффективности силовых полупроводниковых электронных систем.

В условиях высоких требований к энергозатратам во всех сферах человеческой деятельности и необходимости повышения энергоэффективности систем проблема совершенствования силовых полупроводниковых приборов требует безотлагательного решения. Поэтому сейчас в мире уделяется большое внимание программам НИОКР, направленным на развитие технологий силовых приборов на основе карбида кремния и нитрида галлия и скорейшего освоения их массового производства.

ПРОГРАММЫ НИОКР США

В США в связи с необходимостью модификации устаревающей электросети страны развитие силовой электроники имеет первостепенное значение. И, как во всем мире, проводимые в стране программы предусматривают совершенствование силовых приборов на SiC, GaN и алмазе. Чтобы как можно полнее реализовать их возможности, определить новые структуры приборов, предназначенных для применения в электросети, рассчитанной на высокий уровень мощности, обеспечить экономически эффективное крупномасштабное производство робастных приборов, программы рассчитаны на решение таких проблем, как:

- обеспечение чрезвычайно высоких значений давления и температуры плавления, требуемых для получения объемного нитрида галлия;
- контроль плотности дефектов и определение эксплуатационной готовности материала – важные задачи, которые пытаются решить не одно десятилетие;
- возможность применения алмаза, который благодаря своим незаурядным характеристикам является наиболее перспективным материалом для построения силовых устройств.

Справиться с этими проблемами должна программа проектирования и разработки силовой электроники, проводимая Министерством энергетики США и его Управлением энергоснабжения и энергетической безопасности (Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, OE). По программе будут разрабатываться силовые приборы, отвечающие требованиям, предъявляемым к приборам, используемым в электросети. В ее рамках должны быть созданы силовые GaN-приборы, изготавливаемые на пластинах эпитаксиального нитрида галлия, выращенного на кремниевой подложке (GaN на Si) большого диаметра (вплоть до 12" или 300 мм). Правда, часть средств, выделяемая на программу, пойдет

на изучение силовых приборов, выполненных на объемном нитриде галлия, на карбиде кремния и алмазе.

В программе проектирования и разработки силовой электроники, проводимой Управлением энергоснабжения и энергетической безопасности, будут использованы результаты проектов других подразделений МЭ:

- Управления перспективных исследовательских проектов МЭ (Advanced Research Projects Agency-Energy, ARPA-E);
- Управления энергоэффективности и возобновляемой энергии (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE);
- Научного управления (Office of Science).

Эти проекты предусматривают научные исследования или рассмотрение различных концепций реализации низко- и средневольтных GaN-приборов в соответствии с полномочиями подразделений (см. таблицу). При создании приборов с требуемыми характеристиками их технология может быть использована OE для доработки по проводимой программе высоковольтных GaN-приборов для электроэнергетических приложений.

Хотя на рынке представлены силовые GaN-приборы различных компаний, участие OE в разработке таких компонентов имеет большое значение из-за риска поставки частными компаниями на относительно небольшой, но критически важный сегмент рынка силовой электроники для систем энергосети приборов, выполненных по неотработанной технологии.

Программа предусматривает краткосрочное и долгосрочное решение проблем. В краткосрочной перспективе (2011-2016 годы) планируется:

- проведение НИОКР, направленных на создание опытных компонентов на серийно выпускаемых подложках GaN на Si;
- разработка методов изготовления приборов на GaN на кремниевых подложках с помощью отработанных операций;
- разработка надежных корпусов для GaN-приборов на кремниевых подложках, монтируемых в крупногабаритные системы. Приборы в таких корпусах должны выдерживать термические нагрузки, которые могут создавать системы, а также условия эксплуатации, в которых они могут оказаться;
- изучение перспективных процессов выращивания других широкополосных материалов, которые могут быть использованы для создания силовых приборов;

Программы разработки GaN-компонентов Управления перспективных исследовательских проектов (ARPA-E) Министерства энергетики США

Программа (основной исполнитель)	Краткое содержание
Переключатели для автомобилей: GaN-ключи для двунаправленных аккумулятор-энергосеть зарядных устройств (HRL Laboratories)	Разработка эффективных высоковольтных малозатратных силовых преобразователей для автомобильных систем. Преобразователи должны быть выполнены на основе дешевых высоковольтных GaN-переключателей на кремниевой подложке, работающих на мегагерцовых частотах.
Перспективные технологии интегрированных устройств силовой электроники (Massachusetts Institute of Technology)	Коренное улучшение размеров, интеграции и характеристик силовых электронных приборов для твердотельных осветительных устройств. Основное внимание должно быть уделено схемам, взаимодействующим с напряжением электросети (>100 В) с уровнем мощности 10–100 В. Будут разработаны GaN-силовые приборы на кремниевой подложке, наноструктурные магнитные материалы и МЭМС-магнитные компоненты, а также высокочастотные схемы силовых преобразователей.
Высококачественные приборы на GaN с высокой подвижностью носителей для модулей передачи сигнала силовой электроники (Transphorm)	Создание компактных электроприводов и включаемых в электросеть инвертеров, выдерживающих высокую рабочую мощность (3-10 кВт) при КПД более 96%. В ходе программы должны быть разработаны первые гибридные многокристальные модули инвертеров и преобразователей, выполненных на сверхбыстродействующих GaN-силовых переключателях на кремниевой подложке, работающих в режиме обогащения. GaN-переключатели должны иметь малые потери и работать на высокой частоте (1 МГц)
Источники питания на кристалле (Политехнический институт и Университет штата Вирджиния, Virginia Tech)	Разработка технологии, которая позволит заменить современные стабилизаторы напряжения для микропроцессоров, графических адаптеров и устройств памяти будущих поколений однокристальными блоками питания. В ходе проведения программы разрабатываются трехмерные микросхемы источника питания, создаваемые путем интеграции в масштабе кристалла нового поколения GaN-приборов на кремнии с высокочастотным магнито-мягким материалом.
Перспективные силовые полупроводниковые приборы и методы корпусирования (Delphi Automotive Systems)	Разработка нового преобразователя электрической энергии, КПД которого должно быть на 50% больше КПД современных кремневых устройств. Преобразователь будет построен на 600-В GaN-приборах с вплавляемыми контактами и двухсторонним охлаждением.

- представить прибор на широкозонном материале с рабочим напряжением более 5 кВ и током 15 А. В задачи долгосрочной программы (2017–2032 годы) входят:
- интеграция GaN-компонентов на кремнии в силовые модули и системы, которые могут быть установлены в местных электросетях;
- развитие процессов обработки широкозонных материалов с тем, чтобы на их основе можно было разрабатывать и изготавливать силовые приборы;
- представить прибор на напряжение 20 кВ и ток 50 А [3].

Европа

В 2009 году, когда в мире основное внимание уделялось вопросам замены арсенида галлия нитридом галлия для создания высокочастотных транзисторов и монолитных микроволновых интегральных схем и на рынке было представлено небольшое число HEMT на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN, предназначенных для применения в беспроводных системах связи, Научный центр микро- и нанoeлектроники IMEC (Бельгия) запустил промышленную партнерскую программу координации работ по созданию GaN-приборов на кремниевых подложках (IMEC Industrial Affiliation Program, ИАР). Целью программы было объединение усилий поставщиков материалов и оборудования, разработчиков и производителей компонентов для создания как силовых GaN-приборов, так и мощных высокоэффективных белых светодиодов. При этом ставилась задача получения работающих в режиме обогащения силовых компонентов с напряжением пробоя 600–1000 В и низким сопротивлением в открытом состоянии, изготавливаемых на эпитаксиальном нитриде галлия, выращенном на кремниевых пластинах диаметром 200 мм, что позволило бы снизить стоимость GaN-приборов.

К 2013 году в программе участвовало 12 партнеров: разработчики приборов (в том числе Micron Technology и On Semiconductor), контрактные производители (такие как GlobalFoundries), поставщики материала и GaN на кремнии (Applied Materials, Dow Corning и Siltronic), поставщики оборудования (Ultratech и Veeco). В ходе программы исследовались различные архитектуры силовых GaN на Si-приборов с целью определения наиболее перспективных. Отобранные приборы продолжали разрабатывать с тем, чтобы передать их в производство.

Приборы предназначались для силовых переключателей систем преобразования солнечной

энергии, электроприводов, гибридных/электромобилей или импульсных источников питания, а также для твердотельных осветительных устройств [4].

Исследования велись по следующим направлениям:

- улучшение эпитаксиальной технологии, в том числе методов травления эпитаксиальных пленок, обеспечение совместимости с КМОП-технологией, уменьшение плотности дефектов эпитаксиальных пленок;
- получение высококачественных пластин GaN на Si с малым изгибом и высокой воспроизводимостью параметров диаметром до 200 мм;
- изготовление GaN-транзисторов на кремниевых подложках, работающих как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения;
- обеспечение совместимости методов изготовления GaN-транзисторов с КМОП-технологией, в первую очередь применение высококачественных омических контактов, не содержащих золота;
- обеспечение незначительного захвата носителей (т.е. *малого* динамического сопротивления во включенном состоянии R_{on});
- достижение высокой надежности приборов.

Работы по программе ИАР были основаны на разработанном в IMEC методе создания транзистора с двойной гетероструктурой SiN/AlGaIn/GaN/AlGaIn на кремниевой подложке с напряжением пробоя 980 В и низким динамическим сопротивлением [5].

Пластины нитрида галлия на кремнии диаметром 200 мм изготавливались с помощью перспективного метода химического осаждения GaN из паров металлоорганических соединений компании Applied Materials. Поверхность полученных пластин не имела трещин, изгиб не превышал 50 мкм.

Для того чтобы изготавливать силовые приборы с помощью процессов, сопоставимых со стандартными КМОП-процессами, и применять стандартное КМОП-оборудование, элементы транзистора не должны содержать примеси золота и иметь структуру металл-диэлектрик-полупроводник (MIS). Дополнительное достоинство HEMT с такой структурой (MISHEMT) – меньший, чем у обычных транзисторов этого типа ток утечки. После проверки всего используемого стандартного КМОП-оборудования на возможность обработки пластин GaN на Si потребовалась лишь незначительная корректировка программных и аппаратных средств [6].

В конце 2010 года Европейский инициативный консультативный совет по нанoeлектронике (European Nanoelectronics Initiative Advisory Council, ENIAC) создал консорциум LAST POWER (Large Area silicon carbide Substrates and heteroepitaxial for POWER device applications). Задача консорциума – проведение международной/комплексной междисциплинарной программы по разработке пластин карбида кремния большого размера и выращиванию GaN-гетероструктур для силовых приборов с целью установления приоритета Европы в области мощных полупроводниковых приборов на основе материалов с широкой запрещенной зоной. В ходе проведения программы следовало освоить производство силовых приборов на карбиде кремния и гетероэпитаксиальном нитриде галлия на кремниевой подложке.

Работы по программе проводились по пяти направлениям:

- выращивание 150-мм пластин карбида кремния и высококачественных пластин гетероэпитаксиального нитрида галлия на кремнии, превосходящих по характеристикам находившиеся в обращении на тот момент подложки, развитие методов эпитаксии и обработки поверхности;
- разработка нового специализированного оборудования выращивания, снятия характеристик и обработки материала;
- изготовление на 150-мм пластинах надежных и успешно функционирующих SiC- и GaN-приборов;
- демонстрация высококачественных приборов, характеристики которых недостижимы на кремнии, в том числе SiC МОП-транзистора на 1200 В/100 А, SiC-полевого транзистора, работающего при температурах вплоть до 250°C и GaN НЕМТ для силового переключателя;
- разработка перспективных корпусов для приборов, работающих при высокой температуре, а заодно и улучшение их надежности.

В консорциум вошли частные компании, национальные исследовательские центры и университеты Италии, Франции, Германии, Греции, Швеции и Польши, в которых изучались широкозонные полупроводниковые соединения, в том числе карбид кремния и нитрид галлия. Координатор программы – компания STMicroelectronics [7].

По окончании программы в 2013 году компания SiCrystal (Германия) представила пластины 4H-SiC диаметром 150 мм с углом скола, отстоящим от оси на 2°. По качеству кристаллической структуры и шероховатости поверхности пластины не уступали имевшимся на тот момент стандартным

100-мм пластинам с углом скола, отстоящим от оси на 4°. Компании LPE и ETC (Италия) с помощью усовершенствованного реактора химического осаждения из паровой фазы вырастили на 150-мм пластинах эпитаксиальные пленки со средним уровнем легирования, пригодные для изготовления диодов Шоттки и МОП-транзисторов на напряжение 600–1200 В. Измерения первых партий SiC-диодов Шоттки, произведенных на таких эпитаксиальных пленках на промышленной линии компании STMicroelectronics, показали, что по характеристикам они не уступали приборам, изготовленным ранее на 100-мм пластинах. Успех этой операции в первую очередь обусловлен процессом химико-механической полировки – StepSiC – компании NOVASiC (Франция), примененной для подготовки поверхности пластин перед эпитаксиальным выращиванием и для субнанометрового контроля шероховатости поверхности. Для повышения подвижности носителей заряда в канале 4H-SiC МОП-транзисторов специалисты STMicroelectronics и Института микроэлектроники и микросистем при Национальном совете Италии по научным исследованиям (IMM-CNR) исследовали свойства поверхности раздела SiO₂/SiC. И, наконец, изучались формовочные композиции и бессвинцовые материалы, необходимые для реализации надежных корпусов. В этой работе участвовали компания Астео (Швеция) и крупнейший исследовательский центр Греции – Фонд исследований и технологии (Foundation for Research & Technology-Hellas, FORTH). Работа проводилась при поддержке Исследовательского консорциума Катании (Consorzio Catania Ricerche, CCR).

Согласно разделу программы LAST POWER, предусматривавшего создание GaN-приборов, совместными усилиями компании STMicroelectronics, Института IMM-CNR и Института физики высокого давления, Unipress (Польша) на эпитаксиальных AlGaIn/GaN-структурах, выращенных на 150-мм кремниевых пластинах, были созданы транзисторы, работающие в режиме обогащения и не содержащие золота в контактах. Толщина эпитаксиальных пленок составляла 3 мм, напряжение пробоя транзисторов – 200 В. Взаимодействие участников программы, занятых разработкой методов эпитаксии и технологии изготовления приборов, привело к рассмотрению возможности объединения приборов на основе GaN и SiC [8, 9].

Через год в сентябре 2011 года Институт Фердинанда Брауна, FBH (институт СВЧ-техники Лейбница), открыл европейскую программу разработки компактных и мощных преобразователей

энергии для информационных и связных систем и солнечных инверторов. Бюджет программы HiPoSwitch (High Power Switch), которая должна закончиться в августе 2014 года, составляет 5,57 млн. евро (~7,6 млн. долл.), из которых 3,58 млн. евро (~5 млн. долл.) отчислил Европейский Союз. Работы по программе охватывают всю цепочку создания приборов с добавочной стоимостью – от разработки силовых GaN-транзисторов до их применения. Предпочтение материалу для создания силовых приборов было отдано нитриду галлия, поскольку карбид кремния, по мнению разработчиков программы, не сможет найти широкого применения из-за своей высокой стоимости.

Координатор программы – институт Фердинанда Брауна. Помимо ФВН в программе участвуют Институт электротехники Академии наук Словакии, Технический университет Вены, Университет Падуи (Италия), которые ответственны за проведение научных исследований, а также компании Aixtron SE (Германия), поставщик оборудования осаждения пленок, Artesyn Austria GmbH & Co KG, поставщик систем преобразования энергии, EpiGaN (Бельгия), поставщик эпитаксиальных пластин, и Infineon Technologies, разработчик транзисторов (Австрия).

В ходе проведения программы специалистами исследовательского института ФВН и компании Infineon Technologies должны быть разработаны силовые GaN-транзисторы с вертикальной архитектурой, работающие в режиме обогащения. Транзисторы в основном будут изготовлены на эпитаксиальном нитриде галлия на кремниевых пластинах (GaN на Si), поставляемых компанией EpiGaN. Для сравнения изготавливаются контрольные транзисторы на пластинах эпитаксиального нитрида галлия на карбиде кремния (GaN на SiC), предоставляемых ФВН. Программа должна способствовать быстрому освоению на производственных линиях Infineon технологических операций, разработанных сотрудниками ФВН.

Ученые Технического университета Вены и Академии наук Словакии ответственны за исследования новых транзисторов, работающих в режиме обогащения, в том числе их температурных характеристик вплоть до 250°C. Таким образом, при проведении программы будут предусмотрены меры по дальнейшему совершенствованию GaN-транзисторов. Весьма полезным при интенсивном тестировании и изучении механизмов отказов приборов окажется опыт Университета Падуи по изучению надежности и неисправностей GaN-приборов.

Помимо создания приборов предусмотрена передача разработанной участниками программы технологии в крупносерийное производство. Так, EpiGaN изучает технологию получения пластин эпитаксиального GaN на кремнии диаметром 200 мм, а корпорация Aixtron работает над проблемой обеспечения массового производства эпитаксиальных пластин за счет оптимизации реакторов эпитаксиального роста. Она в итоге должна продемонстрировать возможности разработанной технологии, построив высокоэффективную систему преобразователя мощностью в несколько киловатт, которая сможет использоваться в базовых станциях мобильных систем [10].

Япония

В августе 2009 года в Японии было организовано объединение по проведению научно-исследовательских работ в области технологии будущей силовой электроники (Future Power Electronics Technology, FUPET) с целью создания следующего поколения силовых преобразователей на основе SiC-приборов. Первоначально в объединение вошли девять компаний и организаций – Hitachi, Mitsubishi Electric, Toshiba, Fuji Electric Holdings, Sanken Electric, Nissan Motor, Университет Чибы, Токийский городской университет и Токийский технологический университет. В задачу FUPET входило выполнение пяти проектов по контракту с Организацией по разработке новой энергетической и промышленной технологии (NEDO). В ряде проектов предусматривалось и участие Национального института перспективной промышленной науки и технологии (AIST). Бюджет программы в 2009 году составлял 680 млн. иен (7 млн. долл.), в 2010 – 560 млн. иен (5,5 млн. долл.).

По проектам FUPET проводились следующие разработки:

- источников питания на основе SiC-приборов для серверов центров баз данных;

- источников стабилизированного электропитания на основе SiC-приборов для фотовольтаических применений;
- будущих SiC-приборов и технологии преобразования энергии;
- методов проектирования источников стабилизированного электропитания с учетом влияния высокой температуры и высокой плотности выходной мощности.

В мае 2010 года Министерство экономики, торговли и промышленности Японии выделило 10 млрд. иен (125 млн. долл.) на пятилетнюю программу создания новой силовой полупроводниковой электроники, которая позволит реализовать "общество" с низким выбросом углерода. Программа охватывает больше задач: от получения высококачественных и дешевых пластин карбида кремния большого диаметра до создания SiC-переключателей для применения в высоковольтных системах преобразования энергии. Чтобы выполнить задачи программы, число членов организации было увеличено до 25 компаний и учреждений.

Министерство экономики, торговли и промышленности Японии учредило SiC-альянс, который должен привлечь к развитию силовой полупроводниковой электроники предприятия, университеты и государственные организации, проводящие работы в области карбида кремния, но не вошедшие в члены объединения FUPET. Задача альянса – обзор всех исследований и разработок SiC-приборов, проводимых в промышленности и академических институтах для установления их взаимного сотрудничества. К представляющим интерес работам относится создание SiC-приборов со сверхвысоким запирающим напряжением. Разработка ведется в рамках программы ведущих мировых инновационных НИОКР по науке и технологии (Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology, FIRST Program), проводимой Секретариатом Кабинета министров для усиления мировой конкурентоспособности Японии. Здесь следует отметить и работы группы "SiC и родственные полупроводники с широкой запрещенной зоной" японского общества прикладной физики [11].

Требование обеспечения высоких рабочих напряжений и токов у приборов для таких систем, как гибридные/электромобили, электросетевая инфраструктура, умные дома и умные города, привело к организации Ассоциации силовых приборов (Power Device Enabling Association, PDEA). По утверждению основателей (предположительно Toyota

Motors, Advantest, Dai Nippon Printing), ассоциация будет способствовать завоеванию Японией лидирующего положения на рынке силовых устройств. Ассоциация намерена собирать данные о состоянии и развитии рынка не столько у поставщиков силовых приборов, сколько у пользователей силовой электроники (например автопроизводителей), поставщиков материала и изготовителей тестового оборудования, т.е. основное внимание будет уделяться "юзерам". В соответствии с задачами организации председателем ее назначен представитель руководителей высшего звена корпорации Toyota Technical Development Corp. (TTDC), которая считается техническими мозгами Toyota Motors.

Для силовых приборов и модулей, отвечающих требованиям обеспечения высоких значений напряжения и тока, не существует установленных нормативов испытаний. Нужны процедуры испытаний, стандарты и технические условия, позволяющие оценивать силовые приборы, с тем, чтобы пользователи не получали результаты испытаний, в сильной степени зависящие от тестового оборудования. Процедуры испытаний приборов для потребительских систем хорошо оформлены, но равноценных процедур для силовых приборов нет. Задачи ассоциации – способствовать подкомитету 47E МЭК в разработке международных стандартов на испытания дискретных силовых приборов.

И еще одна причина, приведшая к организации ассоциации, – промышленность силовой электроники находится на перекрестке. При стремлении поставщиков силовых модулей снизить затраты на их производство им приходится выбирать между двумя типами силовых полупроводниковых приборов – на карбиде кремния или нитриде галлия. Ассоциация создана им в помощь [12].

В развитие силовой полупроводниковой промышленности активно инвестирует ряд японских компаний. К ним относятся:

- Fuji Electric, которая выделила 3,3 млн. иен. (~32,5 млн. долл.) на ввод в строй на своем заводе линии по производству SiC-приборов на 200-мм пластинах. Это позволит увеличить производительность завода на начальном этапе до обработки 1500 пластин в месяц и довести ее при окончательном освоении производства до 80 тыс. пластин в месяц;
- Toshiba, помимо инвестиций в развитие флеш-памяти, вкладывает капитал в освоение массового производства силовых SiC-приборов на своем заводе в префектуре Хёго;
- Mitsubishi Electric строит новое предприятие, в котором разместятся отделения

по проектированию и разработке силовых приборов. Для увеличения объема выпуска продукции этого класса компания купила завод по обработке 200-мм пластин у Renesas Electronics;

- Panasonic наращивает производство силовых GaN-приборов, считая, что они станут стержнем ее полупроводникового бизнеса;
- Hitachi намерена передать разработку, производство и другие операции в области создания силовых устройств образованной в конце 2013 года дочерней компании Hitachi Power Semiconductor Devices [13].

Интерес к приборам на основе широкозонных полупроводниковых соединений и проводимые в этой области программы привели к тому, что SiC- и GaN-приборы начинают активно проникать на рынок силовой полупроводниковой электроники. И если, по данным компании IMS Research (приобретена в 2012 году корпорацией HIS Technology), рынок силовых полупроводниковых приборов в 2022 году составит 65 млрд. долл. [14], то возникает вопрос: "А какова же доля SiC- и GaN-приборов на нем?"

РЫНОК СИЛОВЫХ SiC- И GaN-ПРИБОРОВ

По оценкам HIS Technology, рынок SiC/GaN силовых полупроводниковых устройств, рост которого стимулируется увеличением их применения в источниках питания, фотовальтических преобразователях и промышленных электроприборах, за десятилетие (с 2012 по 2022 год) увеличится в 18 раз – со 143 млн. до 2,8 млрд. долл. (рис.4). Это значит, что ежегодные темпы роста доходов от продаж за рассматриваемый период будут соответствовать двухзначным процентам. Сейчас самый популярный прибор в секторе силовых SiC/GaN-приборов – SiC-диоды Шоттки, доходы от продаж которых в 2012 году составили 100 млн. долл. Они будут расти до 2015 года, но затем, с появлением более дешевых 600-В GaN-диодов, рынок сократится. Тем не менее в 2022 году доходы от продаж SiC-диодов Шоттки достигнут 200 млн. долл., в основном за счет продаж приборов на напряжение 1200 В и выше. К тому времени самыми популярными станут SiC МОП-транзисторы, доходы от продаж которых составят 400 млн. долл. при доходах в этом секторе в целом более 1,6 млрд. долл. (рис.5). Доходы от продаж как SiC-полевых, так и биполярных транзисторов, несмотря на их надежность, достаточно низкую цену и хорошие рабочие характеристики, будут вдвое меньше, чем МОП-транзисторов. Компания HIS объясняет это тем, что сейчас потребители отдадут предпочтение

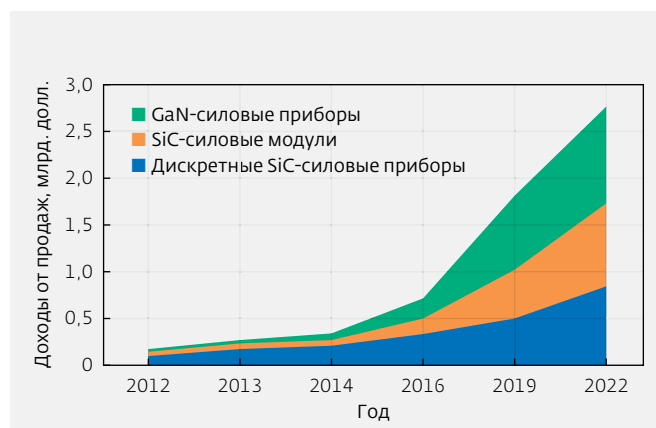


Рис.4. Динамика развития рынка силовых SiC- и GaN-компонентов

SiC МОП-транзисторам и перед поставщиками полевых и биполярных приборов стоит сложная задача убедить возможных заказчиков в достоинствах этих приборов.

По своим характеристикам дискретные приборы на основе нитрида галлия сопоставимы с приборами на основе карбида кремния. Рост продаж приборов этого типа в основном определяет их меньшая стоимость благодаря изготовлению на GaN эпитаксиальных подложках на кремнии. И здесь важную роль играет упоминавшийся ранее фактор: насколько быстро GaN-приборы на кремниевых подложках станут сравнимы по цене с кремниевыми МОП-транзисторами, БТИЗ или выпрямителями. По оценкам HIS, это будет достигнуто в 2019 году, благодаря чему доходы от продаж GaN силовых компонентов в 2022 году превысят 1 млрд. долл. (рис.6).

Следует отметить, что если после выпуска первых силовых диодов Шоттки игроков в SiC/GaN-секторе рынка силовых устройств было около десяти, то теперь на нем представлено более 40 ключевых

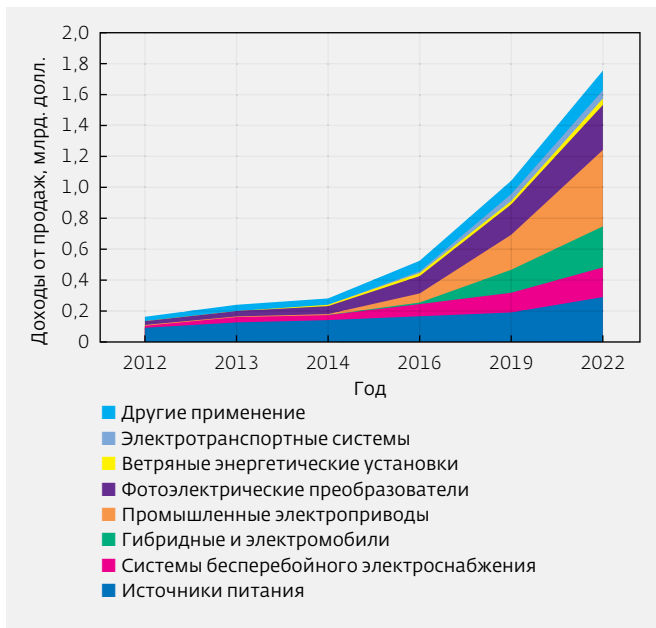


Рис.5. Динамика развития рынка силовых SiC-компонентов

поставщиков как SiC-приборов, так и материалов, в том числе Cree, Fairchild Semiconductor, Fuji Electric, GeneSiC, Infineon, Microsemi, Mutsubishi Electric, Rohm, Renesas, STMicroelectronic. Немало и поставщиков GaN-приборов. Правда, до последнего времени в секторе силовых GaN-приборов в основном были представлены американские компании – International Rectifier, EPC, NXP, RMD, Transphorm, Microsemi и GaN Systems. Но появление таких компаний, как MicroGaN (Германия), NEC, Fujitsu, Mitsubishi (Япония) свидетельствует о нарастании международной конкуренции в этом секторе.

В стремлении извлечь выгоду из развивающегося рынка силовых приборов на основе широкозонных материалов полупроводниковые компании непрерывно увеличивают число поставляемых SiC- и GaN-приборов.

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ GaN-технология

На конференции IEDM 2013 специалисты Института Фердинанда Брауна (FBN) сообщили о результатах анализа проблем современных силовых GaN-приборов, возникающих при динамическом переключении, и предложили методы улучшения их характеристик при работе в высокоскоростном режиме [15]. Работа проводилась в рамках немецкой программы PowerGaNPlus и европейской программы HiPoSwitch.

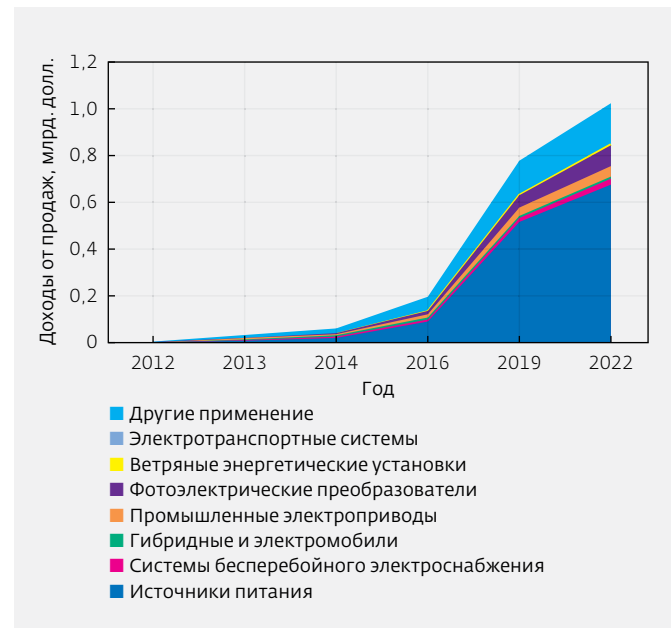


Рис.6. Динамика развития рынка силовых GaN-компонентов

При захвате отрицательно заряженных носителей вблизи канала протекание тока в канале затрудняется до освобождения захваченных носителей. Это приводит к потерям при переключении. В настоящее время значение сопротивления R_{on} в статическом режиме улучшено, но при переключении, особенно при высоких значениях напряжения, оно возрастает и может превысить свое значение в статическом режиме более чем на два порядка. В результате превосходство GaN-транзистора перед кремниевым прибором по показателю качества, равному произведению сопротивления в открытом состоянии R_{on} на заряд затвора Q_g , пропадает. Это явление в основном обусловлено захватом носителей заряда в буферном слое структуры транзистора, хотя и в пассивирующем слое, и в барьерном AlGaIn-слое также возможен захват носителей.

Акцепторы углерода в буферном слое увеличивают напряжение пробоя затвор-исток, но за счет увеличения R_{on} . Напряжение пробоя достигает 120 В/мкм, однако из-за высокого динамического сопротивления такие транзисторы не могут применяться в устройствах переключения. Легирование буферного и AlGaIn-барьерного слоев железом позволяет улучшить значение динамического сопротивления, но напряжение пробоя уменьшается до 40–50 В. Лучшие результаты можно получить, располагая AlGaIn-барьер вблизи канала, а легированный углеродом буфер под ним в областях, не предрасположенных к большим изменениям

электрического поля при переключении. Напряжение пробоя GaN-транзистора с такой структурой составило 80 В/мкм при увеличении динамического сопротивления всего в 1,1 раза при рабочем напряжении 65 В. Такая структура позволила получить увеличение $R_{он}$ сопротивления в динамическом режиме в 2,5 раза при переключении 500-В транзистора.

В начале 2014 года исследователи компании Toyota Gosei Co Ltd (Япония) сообщили о создании GaN МОП-транзистора, работающего в режиме обогащения, с вертикальной структурой и рекордным на сегодняшний день значением запирающего напряжения – 1,6 кВ [16]. До сих пор запирающее напряжение вертикальных GaN-транзисторов не превышало 1 кВ. Пороговое напряжение разработанного транзистора равно 7 В, что позволяет его применять в автомобильных системах, поскольку для предотвращения ложного срабатывания, вызываемого шумовыми сигналами, пороговое напряжение должно превышать 3 В. Такое значение порогового напряжения для GaN-транзисторов с горизонтальной структурой получить нельзя.

Эпитаксиальная структура транзистора (рис.7) формировалась химическим осаждением металлоорганических соединений из паровой фазы на GaN-подложку p⁺-типа с плотностью дислокаций (3–4)·10⁶ см⁻². Толщина пленки нитрида галлия p-типа равна 150 мкм, пленки нитрида галлия r-типа – 1 мкм и защитного GaN p⁺-слоя – 0,2 мкм.

Транзисторы размером 150×300 мкм изготавливались путем плазменного травления для получения

меза-изоляции структуры транзистора, палладиевых контактов к телу прибора r-типа шириной 2 мкм и углубленной области затвора также шириной 2 мкм. Затворным диэлектриком служила пленка двуокиси кремния, наносимая методом атомно-слоевого осаждения. Для получения контактов истока и стока использовалось покрытие титан/алюминий, отжигаемое при 550°С в атмосфере азота в течение 5 мин. Электрод затвора и соединительные провода прибора – алюминиевые. Изолирующие меза-структуру выемки пассивировались слоем оксида алюминия толщиной 100 нм, наносимого методом атомно-слоевого осаждения. Межслойная пленка SiO₂ толщиной 600 нм наносилась методом плазмохимического осаждения из паровой фазы.

Как указывают разработчики, плотность дислокаций по площади транзистора составляла 10³ см⁻². Активная площадь прибора равна 1,5·10⁻⁵ см², размер затвора – 2×10 мкм. Сопротивление транзистора в открытом состоянии составляет 12 мОм·см² при напряжении на затворе 50 В и смещении стока 0,5 В. Хотя это значение больше, чем у AlGaIn/GaN-транзисторов с горизонтальной структурой, исследователи компании считают, что дальнейшая миниатюризация приведет к уменьшению сопротивления в открытом состоянии без ухудшения пробивного напряжения. Напряжение пробоя транзистора без пластины возбуждения было равно 775 В, при ее наличии – 1605 В. Ток смещения затвора был меньше порога измерительной аппаратуры компании.

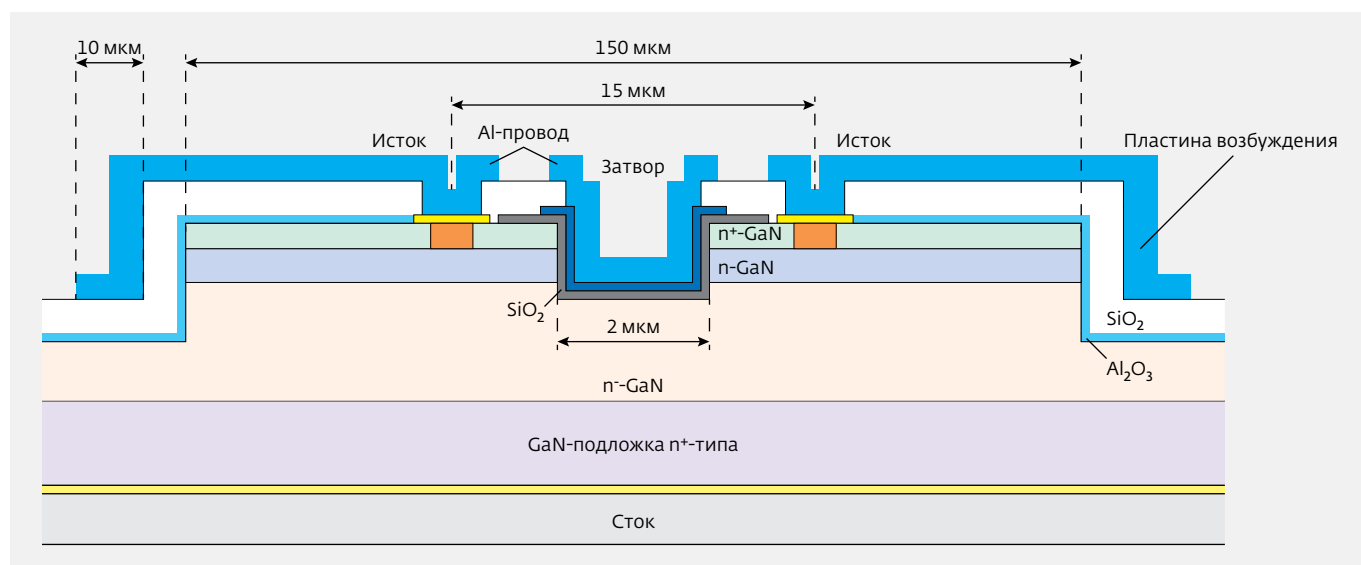


Рис.7. Структура вертикального GaN-транзистора

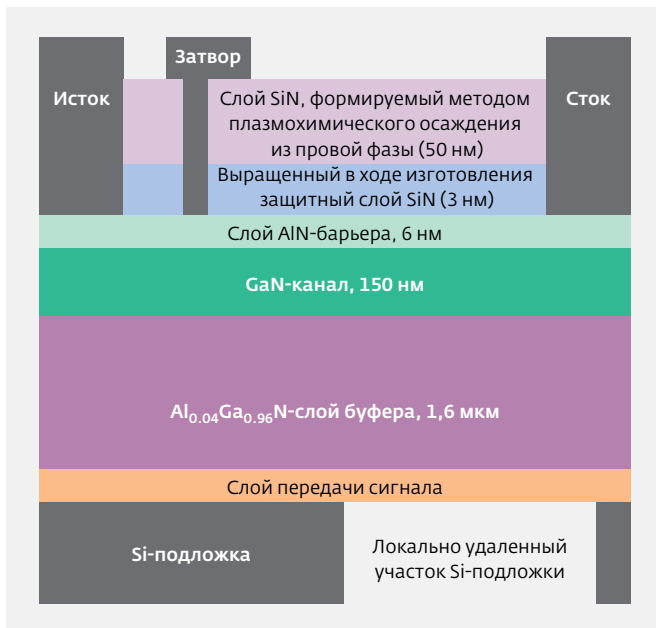


Рис.8. Структура AlN/GaN/AlGaN полевого транзистора с двойной гетероструктурой на подложке с локально удаленным участком

Ученые Института электроники, микроэлектроники и нанотехнологии (Institute of Electronic, Microelectronic and Nanotechnology, IEMN, Франция) и компании EpiGaN (Бельгия) в начале 2014 года заявили о достижении рекордного сочетания значений сопротивления в открытом состоянии ($1,6 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$) и пробивного напряжения ($1,9 \text{ кВ}$) полевого транзистора с двойной гетероструктурой (DHNFET), GaN-каналом и AlN-барьером, изготовленного на 100-мм кремниевой подложке с ориентацией (111) [17]. Группе разработчиков удалось решить проблему тока утечки вследствие проводимости подложки за счет удаления кремния под критическими участками прибора (рис.8)

Длина затвора равна $1,5 \text{ мкм}$, ширина 10 мкм , при этом затвор простирается на $0,75 \text{ мкм}$ в сторону истока. Зазор между затвором и истоком составляет $1,5 \text{ мкм}$, между затвором и электродами стока – от 2 до 15 мкм . Подложка с нижней стороны утоньшалась и полировалась до толщины 230 мкм . Затем выполнялось глубокое реактивное ионное травление локального участка подложки шириной 20 мкм под контактом к стоку вплоть до AlGaN-буферного слоя. Травление проводилось с помощью "Bosch-процесса", состоящего из последовательных этапов пассивации и травления и позволяющего получать воспроизводимые вертикальные стенки удаленного участка подложки с высоким аспектным отношением.

Максимальная плотность тока стока прибора, в котором расстояние между затвором и стоком составляло 15 мкм и локальный участок подложки не был удален, была равна $0,7 \text{ А/мм}$, при локальном удалении участка подложки – $0,5 \text{ А/мм}$. Эти результаты соответствуют значениям $R_{\text{он}}$, равным для этих двух структур $1,3$ и $1,6 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$. Разработчики объяснили полученную разницу в значениях сопротивления ухудшением рассеяния тепла в приборах с локально удаленной подложкой.

Плотность тока обоих транзисторов (с локально удаленным участком подложки и со сплошной подложкой) не превышал 10 мкА/мм . Напряжение пробоя при плотности тока 1 мА/мм линейно возрастало при увеличении зазора между затвором и стоком до 8 мкм , после чего в приборах со сплошной подложкой напряжение пробоя при достижении 750 В расти прекращало. Это объяснялось достижением электрическим полем через тонкий буферный слой подложки. В приборах с локально удаленной подложкой при расстоянии между затвором и стоком 15 мкм напряжение пробоя увеличивалось до $\sim 1,9 \text{ кВ}$.

Разработчики считают, что при увеличении в транзисторе с такой структурой расстояния между затвором и стоком до $\sim 30 \text{ мкм}$ удастся получить напряжение пробоя 3 кВ при $R_{\text{он}}$, равном $5 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$. Кроме того, высказывается предположение, что заполнение удаленного участка подложки диэлектриком, например AlN, позволит уменьшить саморазогрев прибора.

Не прекращаются разработки и SiC-устройств.

SiC-технология

Сегодня прилагаются большие усилия для построения "умных" энергетических систем. Основная задача при этом – разработка все более эффективных и надежных средств передачи и распределения электроэнергии. Оборудование управления умными электросетями требует применения надежных, компактных и высоковольтных ($>10 \text{ кВ}$) переключателей. Такие переключатели целесообразно выполнять на основе SiC БТИЗ, напряжение пробоя которых на порядок выше, чем у кремниевых транзисторов этого класса. Для создания БТИЗ необходимо наносить слой материала p-типа поверх слоя r-типа, но для карбида кремния это трудная задача. Специалисты Национального института перспективной промышленной науки и технологии Японии (AIST), компаний Fujitsu Electric, New Japan Radio Co., Tokyo Electron Ymanashi и Киотского университета решили эту задачу, перевернув последовательность процесса изготовления

высоковольтного БТИЗ. Процесс начинается с выращивания p -пленки на p^{++} -подложке и последующего выращивания поверх нее пленки r^{++} -типа [15, 18]. Эта многослойная структура переворачивается, и p^{++} -подложка удаляется. В результате p -пленка оказывается поверх пленки r^{++} -типа. Затем проводятся операции химико-механической планаризации поверхности, жидкостного оксидирования, ионной имплантации и эпитаксиального выращивания требуемых для формирования БТИЗ пленок.

В результате с помощью операций имплантации и эпитаксии на $4H$ -SiC был изготовлен "перевернутый" p -канальный БТИЗ (flip-type implantation and epitaxial (IE)-IGBT). Запирающее напряжение транзистора составляло 16 кВ, падение прямого напряжения V_f при плотности тока $100 \text{ A/cm}^2 - 5 \text{ В}$. Сдвиг порогового напряжения не превышал 0,1 В, нестабильность – 0,4 В. Эти параметры плюс хорошая термостабильность обуславливают перспективность применения нового БТИЗ в системах управления умными электросетями.

* * *

Сегодня карбид кремния широко используется при разработке силовых полупроводниковых приборов. Однако, по-видимому, применение нитрида галлия, также материала с широкой запрещенной зоной и с аналогичными карбиду кремния достоинствами, но более "дешевого", будет расти быстрее. К тому же GaN-приборы можно изготавливать на существующих кремниевых пластинах, что обеспечивает возможность их крупносерийного производства при пониженной стоимости. Ожидается высокий спрос на силовые SiC- и GaN-приборы в сегментах компонентов для гибридных и электромобилей, а также для промышленных электроприводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольцова М.** Мощные GaN-транзисторы. Истинно революционная технология. – Электроника: НТБ, 2012, №4, с.86-100.
2. **Chow T.P.** Interface Properties for SiC and GaN MOS Devices. – www.btbmarketing.com/iedm/releases/2013_IEDM_Program.pdf
3. US Department of Energy. Power Electronics Research and Development Program Plan. – energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/OE_Power_Electronics_Program_Plan_April_2011.pdf
4. IMEC launches new industrial affiliation program on GaN-on-Si technology. – www2.imec.be/be_en/press/imec-news/archive-2009/imec-launches-new-industrial-affiliation-program-on-gan-on-si-technology.html
5. Imec presents new GaN-on-Si architecture for enhancement mode power switching devices. – www.leuveninc.com/event/36/745/Imec_presents_new_GaN-on-Si_architecture_for_enhancement_mode_power_swit
6. **Bush S.** Imec: GaN power devices made on 200mm silicon wafers – www.electronicweekly.com/news/design/power/imec-gan-power-devices-made-on-200mm-silicon-wafers-2011-05/#sthash.oSuf55f7.dpuf
7. LAST POWER project targets strategic independence for Europe in wide-bandgap semiconductors. – www.semiconductor-today.com/news_items/2010/OCT/LAST_291010.htm
8. European project LAST POWER summarizes results on SiC and GaN power electronics developments. – www.semiconductor-today.com/news_items/2013/MAY/LASTPOWER_200513.html
9. LAST POWER to boost SiC & GaN power microelectronics. – www.compoundsemiconductor.net/csc/news-details/id/19736362/name/LAST-POWER-to-boost-SiC-&-GaN-power-microelectronic.html
10. EU-funded HiPoSwitch project launched, targeting more efficient power electronics. – www.semiconductor-today.com/news_items/2011/NOV/HIPO_151111.html
11. Сообщение Министерства экономики, торговли, промышленности Японии, май 2014. – www.meti.go.jp/english/press/data/20100520_02.html
12. **Yoshida J.** Japan to Form Power Device Initiative – www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1319102
13. **Ando Y.** Japan: Latest Semiconductor Investment Activities. – www.semi.org/en/node/46496
14. **Eden R.** IMSResearch. Market forecasts for Silicon Carbide & Gallium Nitride Power Semiconductors. – www.apec-conf.org/wp-content/uploads/2013/09/is1.4.2.pdf
15. Power Semiconductors at IEDM 2013. – www.powermag.com/pdf/issuearchive/66.pdf
16. **Cooke M.** Vertical GaN transistor with 1.6kV blocking voltage. – www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay2014-Vertical-GaN.pdf
17. **Cooke M.** Combining low on-resistance with high breakdown voltage. – www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay2014-Combining-low.pdf
18. **Yonezawa Y., Mizushima T., Takenaka K. et al.** Low V_f and Highly Reliable 16 kV Ultrahigh Voltage SiC Flip-Type n-Channel Implantation and Epitaxial IGBT. – http://www.deepdyve.com/lp/institute-of-electrical-and-electronics-engineers/low-v-f-and-highly-reliable-16-kv-ultrahigh-voltage-sic-flip-type-n-SXW0MpslOv