

МОЩНЫЕ GAN-ТРАНЗИСТОРЫ ИСТИННО РЕВОЛЮЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

М.Гольцова

Приборы на основе нитрида галлия не новы. Они изучаются с 1980-х годов. Первыми приборами на нитриде галлия стали светодиоды, которые за последние 20 лет нашли широкое применение. Затем на передний план вышли AlGaIn/GaN гетероструктурные полевые транзисторы, или транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), отличающиеся высокими значениями мощности и рабочей частоты. Они в основном применяются в высокочастотных усилителях мощности систем военного и гражданского назначения. Сегодня, когда растут требования к снижению энергопотребления и уменьшению габаритов электронной аппаратуры, GaN-транзистор оказался одним из самых перспективных приборов, способных заменить мощные кремниевые полевые транзисторы в компактных импульсных источниках питания, DC/DC-преобразователях, разумных сетях электропитания, электроприводах. Интерес к транзисторам на нитриде галлия для силовой электроники особенно усилился в последнее время в связи с запуском компаниями International Rectifier (IR) и Efficient Power Conversion (EPC) проектов GaNpowIR и eGaN, соответственно. Появление в 2011 году разработанного молодой start-up компанией Transphorm 600-В GaN-транзистора убедительно доказало возможность конкуренции нитридгаллиевых транзисторов с высоковольтными МОП-транзисторами и БТИЗ.

ПОЧЕМУ GAN?

Рассмотрим вкратце достоинства и недостатки нитрида галлия – полупроводникового материала с широкой запрещенной зоной, что определяет ряд свойств, позволяющих создавать на его основе мощные приборы с отличными характеристиками. В последние годы основной движущей силой развития полупроводниковой промышленности было масштабирование, или увеличение плотности размещения элементов микросхем, что проще всего определять по шагу затвора МОП-транзисторов. К 2024 году, согласно редакции Международной дорожной карты развития полупроводниковой технологии ITRS 2010 года, он должен составить 15 нм (табл.1) [1]. Для выполнения требований ITRS сегодня, когда кремниевая технология практически

достигла предельных возможностей, наиболее перспективен нитрид галлия. Благодаря высокой дрейфовой подвижности носителей заряда сопротивление GaN-транзисторов в открытом состоянии мало. Критическая напряженность электрического поля и в результате пробивное напряжение выше, чем у кремния. А поскольку концентрация собственных носителей у GaN меньше, чем у кремния, приборы на его основе могут работать при более высоких температурах. Сотрудниками исследовательского центра НАСА имени Джона Гленна была продемонстрирована работа GaN полевых транзисторов при температуре 300°C [2], а учеными Института квантовой физики и фотоники (Швейцария) – при 1000°C в вакууме [3] (максимальная рабочая температура кремниевых транзисторов – 140–150°C).

И, наконец, теплопроводность нитрида галлия также выше (табл.2) [4].

Основная причина того, что нитриду галлия отдается предпочтение перед другими перспективными для изготовления мощных приборов полупроводниковыми материалами (GaAs, SiC, алмаз) – высокие характеристики приборов на его основе при относительно низких затратах на их изготовление. Так, по данным компании Yole Development, несмотря на увеличение в десятки раз стоимости модуля фотоэлектрического преобразователя мощностью 5 кВт на основе GaN-транзисторов, благодаря его эффективности и уменьшению размеров период окупаемости не превышает нескольких десятков дней.

Карбид кремния и алмаз – дорогостоящие материалы и объем их поставок ограничен. Кроме того, пока подложек больших размеров на основе этих материалов нет. В то же время благодаря совершенствованию процессов эпитаксиального роста нитрида галлия на кремниевых подложках (стоимость которых примерно на два порядка меньше стоимости подложек карбида кремния) возможно изготовление высококачественных GaN-транзисторов на пластинах большого диаметра.

Одно из самых перспективных свойств нитрида галлия с точки зрения создания мощных приборов для силовой электроники – возможность формирования AlGaIn/GaN гетероструктурных полевых транзисторов с малым сопротивлением в открытом состоянии (R_{dson}) (рис.1). Благодаря высоким

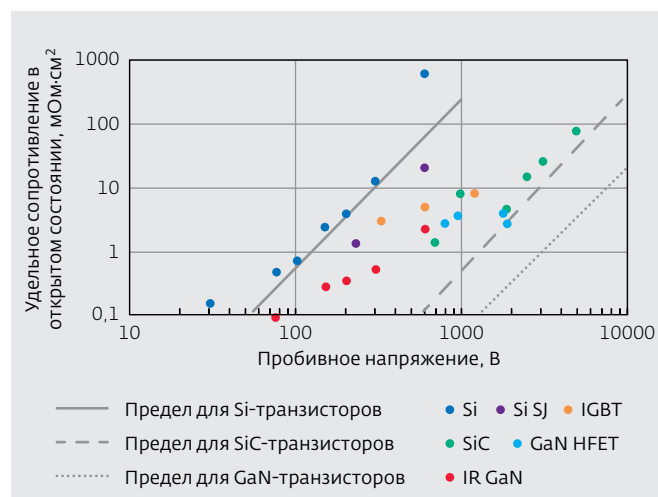


Рис.1. Сравнение сопротивления R_{dson} GaN-гетероструктурных полевых транзисторов на кремниевых подложках компании IR и мощных Si- и SiC-транзисторов

значениям подвижности и концентрации носителей заряда двумерного электронного газа (2DEG), формируемого у границы раздела гетероструктуры, ток насыщения такой структуры велик, а благодаря большой ширине запрещенной зоны материала велика и выходная мощность устройств на основе AlGaIn/GaN-приборов. При этом общий заряд затвора и заряд затвора относительно стока (Q_g и Q_{gd} , соответственно), требуемые для переключения транзистора, меньше, чем у кремниевых приборов такой же

Таблица 1. Изменение характеристик МОП-транзисторов в соответствии с ITRS

Параметр	Годы			
	2015	2018	2020	2024
Шаг затвора, нм	42	30	24	15
Длина затвора L_g , нм	17	13	13	7
Размер контактов истока и стока, нм	13	9	7	4
Сопротивление исток/сток, МОм	140	130	120	110
Напряжение питания, В	0,81	0,73	0,68	0,6
Пороговое напряжение, В	0,21	0,21	0,22	0,23
Ток стока в режиме насыщения, мкА/мкм	3000	2720	2733	2812
Емкость затвора, фФ/мкм	0,5	0,42	0,37	0,28
Поверхностная концентрация носителей заряда в канале, $\times 10^{12} \text{ см}^{-2}$	7,3	7,1	6,4	5,1
Эффективная скорость дрейфа носителей заряда, $\times 10^5 \text{ мс}^{-1}$	2,6	2,3	2,6	3,5

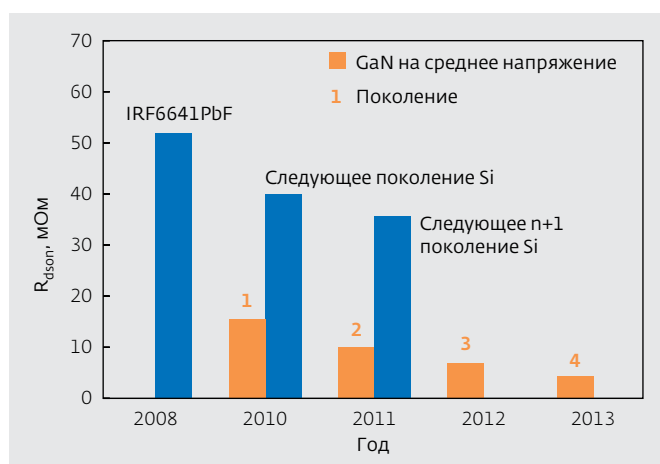


Рис.2. Результаты моделирования значения сопротивления канала в открытом состоянии $R_{ds(on)}$ 200-В GaN-транзистора

мощности. А чем меньше Q_{gd} , тем выше скорость переключения и тем меньше потери транзистора. Правда, поскольку в отличие от кремниевых полевых приборов электроны присутствуют в канале и при отсутствии напряжения на затворе, т.е. транзистор представляет собой "нормально включенный" или работающий в режиме обеднения прибор, и для управления им требуется специализированная схема драйвера, отличная от схем драйверов мощных кремниевых МОП-транзисторов. Вот почему одна из основных задач разработчиков мощных GaN-транзисторов – создание "нормально выключенных" приборов, т.е. приборов в режиме обогащения, для управления которыми пригодны схемы драйверов обычных КМОП-микросхем.

Важный параметр для оценки мощных транзисторов – показатель качества (figure of merit, FOM), который имеет несколько определений. Особый интерес для разработчиков силовых систем представляет FOM_p , определяемый значениями $R_{ds(on)}$ и Q_{gd} ($FOM_p = R_{ds(on)} Q_{gd}$). GaN-транзисторы первого поколения (с $U_{проб} = 200$ В) уже превосходили по параметру $R_{ds(on)}$ лучшие кремниевые транзисторы (рис.2) [5]. Для изготовителей и заказчиков мощных приборов более важное значение имеет их стоимость, т.е. соотношение "рабочие характеристики-стоимость" ($FOM_{pc} = R_{ds(on)} Q_{gd} \cdot \text{стоимость}$).

Для создания технологичных GaN-приборов необходимо, чтобы процессы их производства были сопоставимы с кремниевой технологией. Это требует формирования контактов на основе тугоплавких металлов и методами сухого травления, что вызывает затруднения при обработке полупроводниковых соединений из-за вносимых нарушений, не удаляемых последующим отжигом. Тем не менее, проблемы создания мощных GaN-транзисторов, несомненно, преодолеваются и их производство осваивается. И несмотря на "молодость" GaN-технологии, приборы на этом материале превосходят кремниевые и находят применение в силовой электронике, пока в основном в преобразователях напряжения.

РЕШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Нитрид галлия только начинает отвоевывать рынок силовой электроники у кремния, но тем не менее мощные GaN-транзисторы не только у всех "на слуху", они становятся коммерческой

Таблица 2. Свойства перспективных для создания мощных приборов полупроводниковых материалов

Свойство	Si	GaAs	6H-SiC	4H-SiC	GaN	Алмаз
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	1,43	3,03	3,26	3,45	545
Диэлектрическая проницаемость	11,9	13,1	9,66	10,1	9	5,5
Напряженность электрического поля пробоя, кВ/см	300	455	2500	2200	2000	10000
Подвижность электронов, см ² /В·с	1500	85		500	1000	1000–2000*
Подвижность дырок, см ² /В·с	600	400	101	115	850	850
Термопроводность, Вт/см·К	1,5	0,46	4,9	4,9	1,3	22
Скорость дрейфа электронов в режиме насыщения, 10 ⁷ см/с	1	1	2	2	2,2	2,7

* Данные получены для гетероструктуры AlGaIn/GaN.

реальностью. Чтобы найти применение в устройствах питания информационных и бытовых устройств на 30–600 В и автомобильных и промышленных системах на 600–1200 В, GaN-транзисторы должны успешно конкурировать с дешевыми кремниевыми приборами.

На ранних этапах развития технологии мощных GaN-транзисторов рассматривалась возможность их изготовления непосредственно на подложках нитрида галлия. Несомненно, это перспективно. Но применять 50-мм пластины нитрида галлия стоимостью 1,5–2 тыс. долл., конечно, экономически нецелесообразно.

Прорыв в области создания мощных GaN-транзисторов стал возможен благодаря разработке технологии эпитаксиального выращивания нитрида галлия на пластинах кремния диаметром до 150 мм. Правда, при этом требуются кремниевые пластины с кристаллографической ориентацией (111) вместо используемого в полупроводниковом производстве материала с ориентацией (100). Тем не менее, это самые дешевые подложки и не только дешевые. Они позволяют использовать производственные мощности и технологическое оборудование, созданное для многих этапов производства кремниевых приборов. И действительно, одна из характеристик, "приведших" первые GaN-приборы на рынок, – низкая стоимость кремниевых подложек.

Сегодня выпускаются пластины GaN на кремнии диаметром 150 мм с эпитаксиальным слоем толщиной более 7 мкм. Проводятся квалификационные испытания эпитаксиальных пластин диаметром 200 мм. И здесь важную роль сыграли работы по формированию эпитаксиальных пленок нитрида галлия на кремниевых подложках компаний AZZURRO Semiconductors, EpiGaN, NTT Advanced Technology, Oxford

Instruments Plasma Technology и Powdec (Япония) [6].

Для освоения производства эпитаксиальных пластин GaN на кремнии компания AZZURRO получила инвестиции в 17,9 млн. долл. Это позволило открыть новое предприятие в Дрездене, где в 2011 году наращивалось производство таких пластин, в том числе и диаметром 200 мм. К лету 2012 года планировалось достичь максимального объема производства предприятия.

Новые производственные мощности по выпуску эпитаксиальных пластин GaN на кремнии разворачивает и бельгийская компания EpiGaN (образованная специалистами крупнейшего европейского полупроводникового исследовательского центра IMEC). На это было инвестировано 5,1 млн. долл. Пуск нового предприятия, планировавшийся на первый квартал 2012 года, должен способствовать освоению массового производства пластин GaN на кремнии, пригодных для изготовления транзисторов на блокирующее напряжение исток-сток 600 В. Кроме того, предприятие начнет выпуск первых 200-мм пластин, на которых можно будет изготавливать транзисторы на напряжение 1000 В. К достоинствам пластин компании относятся малая дисперсия буферных слоев и возможность изготовления транзисторов с малыми потерями на радиочастотах. Блокирующее напряжение приборов, изготавливаемых на пластинах GaN на кремнии компании, может достигать нескольких киловольт, а частота – 100 ГГц. Вместе с тем EpiGaN поставляет и пластины нитрида галлия на карбиде кремния.

Компания EpiGaN при изготовлении пластин GaN на кремнии помимо эпитаксиального выращивания нитрида галлия проводит и процессы травления и пассивации пленок, хотя эти

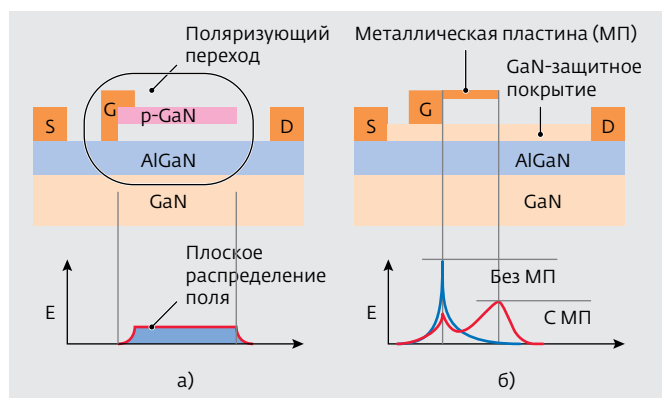


Рис.3. Решение проблемы коллапса тока для GaN-транзистора на напряжение 1100 В: с помощью поляризующего перехода GaN/AlGaIn/GaN (а) и металлической пластины формирования поля возбуждения (б)

операции, как правило, выполняются производителями приборов [7]. Специалисты компании объясняют это тем, что вторая по значимости задача после контроля механических напряжений материала – пассивация пластин. Они предлагают использовать для этого пленки нитрида кремния SiN. Операцию пассивации они проводят одновременно с процессом MOCVD-выращивания эпитаксиальной пленки GaN (in-situ), что весьма выгодно с точки зрения контроля ловушек, получения требуемых рабочих характеристик и повышения надежности приборов. При использовании SiN-покрытия воздействие высокой температуры не сказывается на характеристиках материала, тогда как GaN-пассивация может привести к нарушению свойств канала. Таким образом, пассивация in-situ способствует решению проблемы изменения свойств приборов на основе пластин GaN на кремнии.

Японская компания NTT Advanced Technology (NTT-AT) поставляет эпитаксиальные пластины GaN на кремнии диаметром 150 мм, пригодные для изготовления приборов с блокирующим напряжением 1800 В для РЧ-приложений. Осваивается производство эпитаксиальных пластин диаметром 200 мм. Компания также поставляет эпитаксиальные пластины GaN на сапфире и карбиде кремния диаметром 100 мм.

Несмотря на оптимистичные прогнозы поставщиков эпитаксиальных пластин GaN на кремнии, по мнению руководства фирмы Powdec, разрабатывающей GaN-приборы, коммерческое производство таких пластин большого диаметра начнется не раньше 2013–2014 годов. Они объясняют это необходимостью

решить проблему удешевления процесса формирования многослойного буферного слоя AlGaIn/AlGaIn толщиной 4–5 мкм для обеспечения блокирующего напряжения 600 В.

При производстве эпитаксиальных пластин GaN на кремнии существует и ряд других требующих решения проблем. Одна из основных – проблема "выброса" большим электрическим полем вблизи края затвора электронов из канала на поверхность пластины и в слой GaN, что приводит к увеличению сопротивления канала. В результате ток стока при росте напряжения стока резко падает – так называемое явление коллапса. Справиться с коллапсом тока можно с помощью формируемой поверхности структуры транзистора металлической пластины возбуждения электрического поля в сочетании с высококачественной защитной пленкой. Но более эффективный метод, по мнению разработчиков компании Powdec, – поляризация верхней и нижней границ раздела слоя AlGaIn (рис.3) [8]. В результате у границ раздела формируются двумерный дырочный газ (2DHG) с концентрацией дырок $1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и двумерный электронный газ (2DEG), что почти полностью подавляет коллапс тока. Так, при рабочем напряжении 350 В у транзисторов компании коллапс тока не наблюдался. При расстоянии затвор-сток 22 мм транзисторы выдерживали напряжение свыше 1100 В, ток утечки сток-затвор составлял 0,3 мА/мм.

Еще один барьер, который нужно преодолеть при создании мощных приборов на подложках GaN на кремнии, – получение приемлемого выхода годных. На этот показатель в первую очередь влияют поверхностные дефекты, возникающие при MOCVD-росте пленки. При этом с увеличением площади кристалла плотность дефектов растет. Площадь кристалла светодиода меньше $0,1 \text{ мм}^2$, тогда как для создания транзистора на ток $\sim 10 \text{ А}$ нужен кристалл площадью в несколько квадратных миллиметров. А по мнению специалистов компании Powdec, коммерческих реакторов, способных обеспечить высокий выход пластин такого размера, нет и пока их создание не предвидится.

Вот почему Powdec выпускает на рынок GaN диоды Шоттки на сапфировых подложках. Эпитаксиальная пленка нитрида галлия выращивается методом латерального эпитаксиального наращивания пленки, позволяющим на несколько порядков уменьшить плотность дислокаций в сравнении с обычными методами

эпитаксии. Изготовленный на такой пленке диод выдерживает напряжение более 800 В при малом сопротивлении в открытом состоянии, хотя его обратный ток больше, чем у SiC-диодов на такое же напряжение. Эту проблему можно решить с помощью барьера на основе р-п-перехода, как в SiC-приборах.

Активно участвует в решении задач производства GaN-приборов компания Oxford Instruments Plasma Technology (OIPT) – поставщик оборудования травления для производства светодиодов. Сейчас компания обратилась к созданию оборудования для изготовления мощных электронных компонентов. Поставляемые ею PECVD-установки для осаждения защитных пленок мощных кремниевых приборов можно использовать как для пассивации пластин GaN на кремнии, так и для формирования изолирующего слоя при изготовлении высоковольтных приборов.

На основе 30-летнего опыта создания мощных кремниевых транзисторов разработчики утверждают, что один из главных факторов, определяющих темпы признания новой пробивающейся на рынок технологии, – насколько она проста и, следовательно, малозатратна. Так как же сегодня решается эта проблема при разработке мощных GaN-транзисторов?

МОЩНЫЕ GAN-ТРАНЗИСТОРЫ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Для решения задач обеспечения энергоэффективности современных силовых систем при сохранении высокой выходной мощности Европейский союз в конце 2011 года начал рассчитанную на три года программу HiPoSwitch [9]. Основная цель программы, координатором которой является Институт Фердинанда Брауна (Берлин), – создание мощных GaN-транзисторов на кремниевых пластинах диаметром 200 мм для будущих преобразователей энергии. В программе помимо Института Фердинанда Брауна участвуют:

- Институт техники высоких частот Лейбница (FBH), который совместно с компанией Infineon разрабатывает мощный GaN-транзистор, работающий в режиме обогащения;
- Институт электротехники Академии наук Словакии, проводящий совместно с университетом Вены изучение термических характеристик транзисторов с целью получения их рабочей температуры 250°C;

- Технологический университет Вены;
- Институт Падуи (Италия), который должен проводить испытания на надежность и выявлять причины отказа;
- компания AIXTRON, в задачи которой входит оптимизация установок эпитаксиального роста пленок;
- компания Artesyn Austria GmbH & Co, разрабатывающая высокоэффективный преобразователь энергии "киловатт-класса";
- компания EpiGaN, ответственная за поставку эпитаксиальных пластин GaN на кремнии диаметром 200 мм;
- компания Infineon Technologies, которая помимо совместной разработки транзисторов с FBH, должна освоить их крупносерийное производство.

Бюджет программы составляет 5,6 млн. евро, из которых 3,6 млн. предоставлены Европейским союзом.

Специалистами FBH уже создан GaN-транзистор на SiC-подложке с квазивертикальной структурой, работающий в режиме

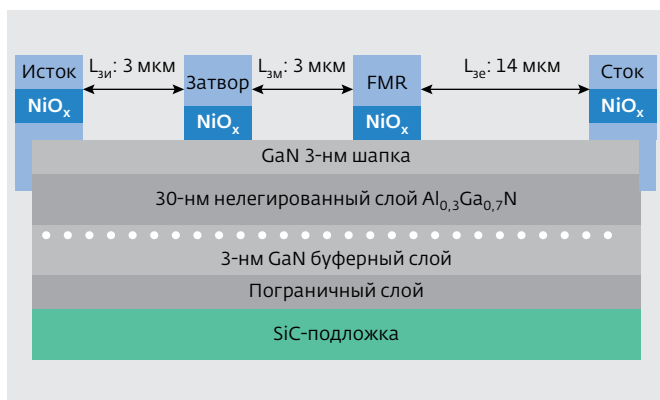


Рис.4. Структура НЕМТ с FMR на основе пленки NiOx

обогащения, на напряжение 250 В и ток 50 А. Теперь в рамках программы предстоит выполнить его на кремниевой подложке.

Интерес представляет разработанный бельгийским исследовательским центром IMEC двойной гетеропереходной полевой транзистор, напряжение которого благодаря формированию кремниевой канавки вокруг контактов стока (Si Trench Around Drain contacts, STAD) составляет 2 кВ [10].

На конференции, посвященной технологии приборов на полупроводниковых соединениях CS Mantech 2012, специалисты Национального университета в Сеуле доложили о возможности увеличения пробивного напряжения и подавления тока утечки с помощью металлического кольца с плавающим потенциалом (Floating Metal Ring, FMR) на основе оксида никеля (NiOx) (рис.4) [11]. Благодаря дополнительному обеднению носителями области затвор-сток в присутствии FMR и высокому удельному сопротивлению пленки NiOx при подаче обратного напряжения были получены стабильные характеристики блокировки. Напряжение пробоя предложенного НЕМТ составило 930 В, ток утечки транзистора – 1,1 нА (20,2 нА/мм) против 4,05 мкА (81 мкА/мм) для обычного НЕМТ. Материал подложки GaN-транзистора – карбид кремния.

Работы по совершенствованию мощных транзисторов, изготовленных на эпитаксиальных подложках GaN на кремнии, представили на CS Mantech 2012 специалисты IMEC. У GaN-транзисторов, выполненных на кремниевых подложках, вследствие проводимости областей исток-сток на границе раздела AlN/Si наблюдается "насыщение" пробивного напряжения V_{BD} . Увеличения V_{BD} можно добиться за счет увеличения толщины буферного слоя.

Так, специалистами Furukawa Electric Co. благодаря увеличению толщины буферного слоя до 7 мкм удалось получить $V_{BD} > 2$ кВ. Но при наращивании более толстого буферного слоя растет коробление пластины и вероятность ее растрескивания, что затрудняет эпитаксиальное выращивание пленок на пластинах большого диаметра. Таким образом, вследствие увеличения толщины буферного слоя растет стоимость и уменьшается выход годных процесса эпитаксиального роста.

В IMEC попытались решить задачу увеличения пробивного напряжения двойных гетероструктурных полевых транзисторов, изготовленных на Si-пластинах с буферным слоем AlGaN/AlN субмикронной толщины, за счет удаления кремниевой подложки после формирования структуры [12]. Было получено, что в результате напряжение пробоя буферных слоев и транзисторов существенно возросло независимо от толщины буфера (испытывались транзисторы с буферными слоями толщиной 600 нм, 1 и 2 мкм). Так, напряжение пробоя транзистора с расстоянием затвор-сток 20 мкм и буферным слоем толщиной 600 нм после удаления кремниевой подложки превысило 2000 В. Таким образом, по утверждению докладчиков, удаление кремниевой подложки в структурах GaN-транзисторов с тонкими буферными слоями – перспективное решение для получения достаточно дешевых, технологичных высоковольтных GaN-приборов с высоким выходом годных.

Прежде чем приступить к промышленному производству GaN-транзисторов на кремниевых подложках, необходимо убедиться в воспроизводимости их электрических параметров для большого числа образцов, формируемых на большом числе пластин и в различных партиях. Для этого специалисты IMEC провели испытания AlGaN/GaN НЕМТ со структурой металл-диэлектрик-полупроводник, не содержащих золотых контактов [13]. Тестировались транзисторы с эффективной шириной затвора от 10 до 100 мм, изготовленные на трех 150-мм Si-пластинах (по 345 транзисторов на каждой). Напряжение пробоя составляло 180 В (расстояние затвор-сток 4,5 мкм), 600 (9,5 мкм) и 1000 В (14,5 мкм), ток утечки приборов с шириной затвора 20 и 100 мм не превышал 100 мкА, максимальный ток для транзисторов с шириной затвора 20 мм был равен 8 А, $R_{dson} = 2,9$ мОм·см². Испытания транзисторов на короткое замыкание металлических

контактов, отсечку канала и токи утечки показали высокие результаты: до 100% годных приборов с шириной затвора 10 мм и ~87% при ширине 100 мм. Аналогичные результаты были получены и при испытании на пробивное напряжение.

Но все приведенные данные касаются разрабатываемых GaN-транзисторов. А что же представлено на рынке?

GaN-транзисторы компании International Rectifier

International Rectifier – первая компания, выпустившая в начале 2010 года на рынок транзисторы iP2010 и iP2011 на напряжение до 20 В, выполненные на подложке GaN на кремнии [14]. Это явилось результатом 30-летнего опыта разработки мощных полупроводниковых приборов и начатой компанией в 2008 году программы GaNpowerIR. Цель программы состояла в воплощении казавшегося тогда интеллектуального курьеза в коммерческую жизнеспособную платформу для силовой электроники на напряжение от 20 до 1200 В на основе мощных AlGaN/GaN HEMT, выполненных на эпитаксиальных подложках GaN на кремнии с помощью процессов, совместимых с производством кремниевых КМОП-микросхем [15]. При открытии программы ставилась задача – к концу 2011 года разработать транзисторы на блокирующее напряжение сток-исток 600 В. Постановка этой задачи обусловлена тем, что на долю приборов, рассчитанных на такое напряжение, приходится до 40% рынка силовых полупроводниковых устройств на напряжение 20–1200 В. Именно поэтому коммерческим GaN HEMT на напряжение 600 В было уделено больше внимания, чем первым поколениям более низковольтных (20–40 В) транзисторов.

Задача была решена. Созданные на 150-мм эпитаксиальных пластинах GaN на кремнии мощные 600-В приборы готовы для проведения поставщиками комплексного оборудования дополнительной независимой оценки и определения необходимых дальнейших работ по их совершенствованию.

Для получения тока утечки в закрытом состоянии не более 1 мкА/мм длины затвора было решено вместо затвора на основе барьера Шоттки использовать изолированный затвор. Это позволило уменьшить токи утечки сток-затвор и сток-исток 600-В HEMT до менее 1 нА/мм периферии затвора. В результате отношение токов I_{on}/I_{off} превысило 10^6 . Были решены проблемы коллапса тока стока и динамики сопротивления канала

в открытом состоянии (рис.5) [16]. И, наконец, разработка соответствующей техники монтажа созданных транзисторов позволила обеспечить их долговременную надежность, отвечающую требованиям жестких стандартов для коммерческих кремниевых транзисторов.

Как уже указывалось, мощные GaN-транзисторы компании IR работают в режиме обеднения, но IR "скрывает" это свойство своих изделий путем выпуска вместо дискретных приборов завершенных драйверных каскадов в виде двухкомпонентной каскадной схемы. Первый компонент схемы – работающий в режиме обеднения GaN HEMT, который включен последовательно со вторым компонентом – низковольтным кремниевым МОП-транзистором. Исток кремниевого транзистора соединен с затвором HEMT, а исток HEMT – со стоком кремниевого транзистора. В этом случае на выводы затвор-исток HEMT подается напряжение, обратное напряжению кремниевого транзистора, и работой переключателя можно управлять привычными для разработчиков кремниевых переключателей методами, т.е. можно применять стандартные схемы драйверов и выбирать пороговое напряжение в соответствии с условиями эксплуатации устройства (например, от логического уровня до 4,5 В обычно используемых в промышленных условиях или зашумленных установках).

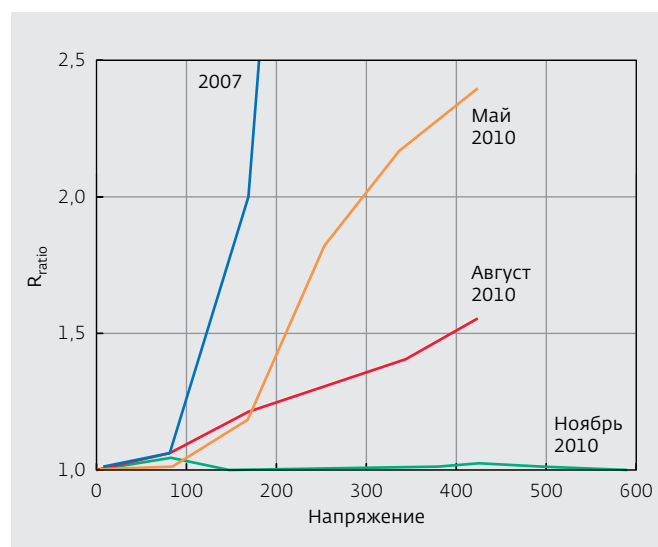


Рис.5. Улучшение сопротивления канала в открытом состоянии R_{dson} первых 600-В транзисторов, определяемое по отношению значений сопротивления канала после и до подачи обратного смещения R_{ratio} при переключении из закрытого состояния в открытое в течение 1 мкс при комнатной температуре

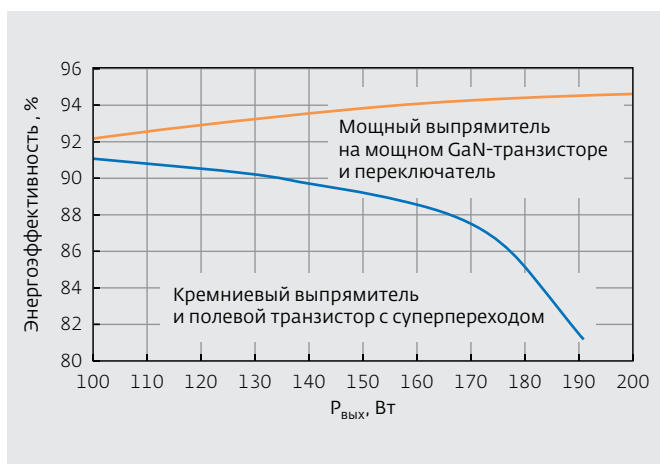


Рис.6. КПД (с учетом потерь элемента индуктивности) повышающего каскада 200-Вт схемы коррективки коэффициента мощности на основе GaN-транзистора компании IR и лучшего кремниевого транзистора данного класса. Рабочая частота 400 кГц, входное напряжение 150 В, выходное напряжение 350 В, рабочая температура 25°C

Кремниевый полевой транзистор в схеме 600-В GaN-выпрямителя можно заменить низковольтным кремниевым диодом. Поскольку концентрация неосновных носителей в широкозонном III-V материале мала и практически не влияет на переключение прибора, получаемый в результате выпрямитель с высокими характеристиками подобен SiC-диоду, но стоимость его значительно меньше. Поскольку крутизна GaN HEMT велика (например, 300 мС/мм ширины затвора) и значение эффективного сопротивления в открытом состоянии то же, что и у кремниевого диода (несколько миллиом), скорость переключения выпрямителя велика. В схеме коррективки коэффициента мощности корпусированный каскодный переключатель с выпрямителем этого типа позволил получить четкую форму волны при скорости переключения сигнала 600-В шины 50 В/нс.

Благодаря высокой скорости переключения потери каскодных переключателей на GaN-транзисторах компании IR малы (рис.6), благодаря высокой рабочей частоте малы и L- и C-компоненты выходного фильтра, а значит, малы габариты, масса и стоимость преобразователя, в котором используется схема коррективки коэффициента мощности с GaN-переключателем.

Хотя многообещающие достоинства систем на основе разработанных 600-В GaN-транзисторов вызвали больший интерес, чем первые



Рис.7. Прогнозируемое изменение показателя $R_{\text{ds(on)}}Q_g$ для 30-В GaN HFET

транзисторы, появившиеся в 2010 году, по мнению доктора М. Бриера, основателя научно-консультативной компании ACOO Enterprises LLC и консультанта IR, решения на основе первых разработанных по программе GaNpowIR 20–40-В транзисторов через пять лет окажут существенное влияние как на ситуацию на рынке мощных полупроводниковых приборов, так и на компьютерные приложения. Это утверждение частично обусловлено тем, что доля 20–40-В приборов на рынке силовой электроники на напряжение 20–1200 В также составляет 40%. В ближайшие годы разработанная в 2009 году технология GaNpowIR позволит на порядок уменьшить сопротивление канала в открытом состоянии $R_{\text{ds(on)}}$ и значение $R_{\text{ds(on)}}Q_g$ (рис.7) [5].

Кроме того, специалисты компании утверждают, что только выполнение системы на основе нитридгаллиевых приборов позволит получить эффективность преобразования напряжения от 12 до 1,2 В на частотах 60–100 ГГц, равную 88%. Работа на таких частотах позволит сократить габариты внешних компонентов, уменьшить расстояние между преобразователем и нагрузкой, а также ограничить паразитные потери мощности. В итоге на основе GaN-транзисторов на низкие напряжения появятся энергоэффективные источники питания на частоту преобразования свыше 30–50 МГц для многоядерных (более 32) микропроцессоров.

Еще одна перспективная область применения GaN-транзисторов на "малые напряжения" – AC/DC-преобразователи со схемой коррекции коэффициента мощности. Стабилизаторы, выполненные на основе GaN-транзисторов

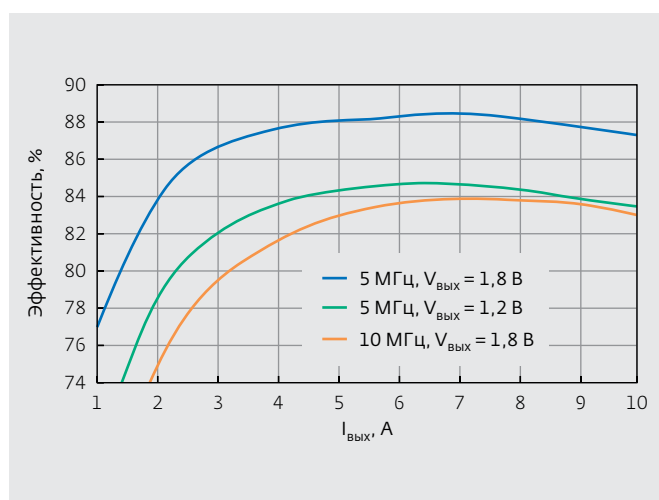


Рис. 8. Эффективность высокочастотного понижающего POL-преобразователя на $V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$ (с учетом потери фильтра) на основе мощного GaN-транзистора

с каскодным включением, по своим характеристикам мало уступают устройствам на основе более дорогих SiC-диодов Шоттки. Применение коммерческих GaN HEMT первого поколения ($R_{\text{дson}} Q_g = 30 \text{ мОм} \cdot \text{нК}$) в низковольтном локализованном к нагрузке преобразователе входного напряжения 12 В в выходное 1,8-В напряжение позволило получить на частоте 5 МГц эффективность, равную 88% в широком диапазоне нагрузок, на 10 МГц было получено рекордное значение эффективности – 84% (рис. 8). Для сравнения частота преобразователя напряжения 12 В в 1 В с эффективностью 88% на основе кремниевого транзистора с предельным значением $R_{\text{дson}} Q_g = 20 \text{ мОм} \cdot \text{нК}$ составляет всего 3 МГц.

Активно разрабатывает коммерческие мощные GaN-транзисторы компания Efficient Power Conversion (EPC), образованная в 2007 году бывшими специалистами International Rectifier. И ею также достигнуты высокие результаты.

Мощные GaN-транзисторы компании Efficient Power Conversion

Компания EPC в 2009 году поставила первые GaN-транзисторы, работающие в режиме обогащения (торговая марка eGaN – enhancement mode GaN) и предназначенные для замены мощных МОП полевых транзисторов. По утверждению соучредителя и президента компании Алекса Лидова, именно eGaN-транзисторы смогут в широком масштабе заменить кремниевые мощные приборы. Транзисторы изготавливаются на полупроводниковом заводе в Тайване

по малозатратной технологии стандартных кремниевых КМОП-микросхем. Основной дистрибьютор – компания Digi-Key [14, 17, 18].

Блокирующее напряжение GaN-транзисторов первого поколения составляет от 40 до 200 В при плотности тока от 5,35 до 2 А/мм², соответственно, и сопротивлении $R_{\text{дson}}$ – 4–100 мОм. Самая большая площадь кристалла, занимаемая eGaN-транзистором, равна 6,56 мм², самая малая площадь – 1,53 мм². В середине 2011 года компания выпустила eGaN-транзистор на напряжение 200 В с максимальным сопротивлением $R_{\text{дson}}$ 25 мОм и импульсным током 60 А.

Особенность структуры eGaN-транзисторов – формирование обедненной электронами области затвора, областей стока и истока транзисторов горизонтально на верхней поверхности пленки (рис. 9). В транзисторах на напряжение 40 В расстояние сток-исток составляет 7 мкм, а в транзисторе на 200 В – 15,6 мкм. Как и International Rectifier, компания EPC была готова в 2012 году представить транзистор на блокирующее напряжение 600 В в стандартном корпусе PQFN размером 5×6 мм

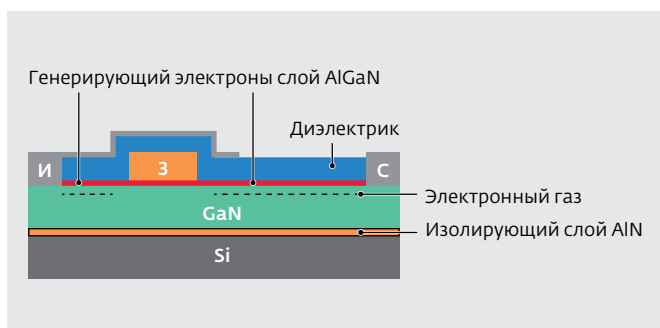


Рис.9. Структура eGaN-транзистора

и начать разработку транзисторов на 800–900 В. Но пока сообщений о создании таких приборов нет.

Для включения транзистора, так же как и кремниевого n-канального МОП-транзистора, на затвор подается положительное напряжение. Таким образом, принцип работы eGaN- и кремниевого полевых транзисторов аналогичны. Но не во всем.

В отличие от кремниевых МОП-приборов eGaN-приборы работают лишь в очень узком диапазоне напряжений затвора: для гарантированного включения транзистора напряжение затвора должно быть равно 4,5 В, но GaN-транзистор допускает лишь 6 В на затворе. С учетом выбросов напряжения в переходном режиме преобразователя мощности размах в 1,5 В мал для обеспечения надежной работы устройства. При напряжении затвора, близком к потенциалу земли, для того чтобы пороговое напряжение не превышало 1,4 В, необходимо жесткое управление им. Это не пороговое напряжение кремниевых транзисторов в 2,5 В. Этот фактор вначале ограничивал применение eGaN-транзисторов, поскольку ни одна микросхема драйвера мощного МОП полевого транзистора не могла работать с нитридгаллиевым.

Усмотрев в этой проблеме перспективы расширения своей продукции, Texas Instruments под маркой компании National Semiconductor* в конце 2011 года выпустила полумостовой драйвер LM5113 для 100-В eGaN-транзисторов верхнего и нижнего плеч стабилизаторов в синхронной повышающей или полумостовой конфигурациях. Напряжение смещения

* С 23 сентября 2011 года National Semiconductor официально вошла в корпорацию Texas Instruments на правах ее подразделения и представительства в Кремниевой долине.

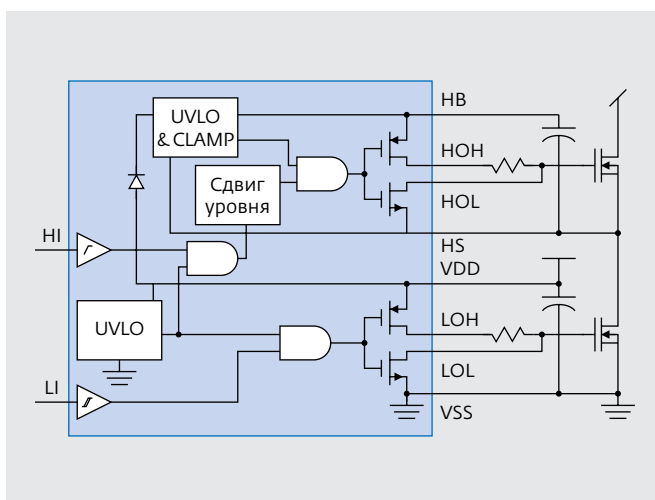


Рис.10. Упрощенная блок-схема драйвера LM5113

верхнего плеча генерируется методом подпитки (bootstrap) и ограничено уровнем 5,2 В (рис.10). Входы LM5113 верхнего и нижнего ключей совместимы с логическим TTL-уровнем и способны выдерживать входное напряжение до 14 В независимо от напряжения питания V_{DD} . Раздельные выводы затворов обеспечивают независимое регулирование интенсивности сигналов включения и выключения. Поставляется драйвер в корпусах LLP-типа размером 4×4 мм или SMD-типа размером 2×2 мм.

В начале этого года компания Texas Instruments представила драйвер нижнего плеча LM5114 для управления мощными МОП и eGaN полевыми транзисторами в синхронных выпрямителях и корректорах коэффициента мощности [19]. При использовании совместно с драйвером LM5113 микросхема LM5114 позволяет реализовать законченное решение драйвера изолированных DC/DC-преобразователей, применяемых в телекоммуникационных системах, сетевом оборудовании и центрах обработки данных.

Независимые выходы стока и истока избавляют от необходимости использовать диод в выходном каскаде драйвера и позволяют более точно контролировать время нарастания и спада напряжения.

Фактически сейчас eGaN-транзисторы применяются в системах, требующих достаточно большое понижение напряжения (например с 48 до 1,2 В), где они могут заменить несколько каскадов на кремниевых транзисторах. По утверждению компании, сегодня около 300 заказчиков

оценивают возможности применения eGaN полевых транзисторов в изолированных и неизолированных DC-DC-преобразователях серверов, телекоммуникационных систем и компьютеров. Причем отмечается, что ряд заказчиков разработали готовые для внедрения в производство преобразователи. Правда, их имена не указываются.

Однако, по мнению руководителей образованной в 2007 году компании Transphorm Inc., несмотря на успехи, достигнутые в разработке мощных GaN-приборов, превзойти современные кремниевые транзисторы по сочетанию таких параметров, как эффективность-габариты смогут лишь GaN HEMT на напряжение 600 В. Вот почему компания Transphorm отказалась от разработки GaN HEMT на относительно низкие напряжения.

Разработки компании Transphorm

В 2011 году компания Transphorm представила первые 600-В GaN-приборы, изготовленные на кремниевых подложках по запатентованной EZ GaN-технологии и поставляемые в стандартном корпусе TO-220 [21]. Это:

- GaN-диоды серии TPS30xxPK на напряжение 600 В и ток 2, 4 и 6 А;
- GaN-транзистор серии TRN3006PS на напряжение 600 В и сопротивление в открытом состоянии 180 мОм;
- трехфазный GaN-модуль серии TPT3044M на напряжение 600 В и сопутствующая плата оценки преобразователей серии TDMD2000E01.

Правда, пока приборы продаются на сайте компании для оценки санкционированными заказчиками.

По утверждению основателя и президента компании Умиш Мишра, первые 600-В GaN HEMT выдержали ускоренные испытания на долговечность в соответствии с промышленными стандартами объединенного технического совета по электронным приборам JEDEC. Было также показано, что высокая скорость переключения транзисторов не приводит к увеличению электромагнитных помех. Измерения спектральных характеристик преобразователей напряжения на основе GaN-транзистора и МОП-транзистора с быстрым восстановлением на суперпереходе показали сопоставимые результаты. Но значения времени включения и выключения GaN-транзистора были на порядок меньше, чем у кремниевого прибора.

Надо отметить, что компания отрабатывает технологию формирования GaN-приборов на подложках карбида кремния, кристаллическая решетка которого больше соответствует нитриду галлия, чем кремниевая. И только после решения основных проблем разработчики переходят к кремниевым подложкам. Так же как и компания IR, специалисты Transphorm используют каскадное включение и монтируют в корпус мощный GaN-транзистор и кремниевый прибор в качестве контроллера тока.

Возможности устройств на основе EZ GaN-технологии компания продемонстрировала на выставке и конференции, посвященной силовой электронике Power Control and Intelligent Motion (PCIM), состоявшейся в Нюрнберге 8-10 мая этого года [22]. Она представила DC-DC повышающий преобразователь с КПД более 99% и электропривод Tru-Sine с КПД на частоте 100 кГц на 2-8% выше, чем у электроприводов на частоту 15 кГц, выполненных на основе передовых кремниевых БТИЗ.

Разработке EZ GaN-технологии способствовали инвестиции в 39 млн. долл. от венчурного фонда Google Ventures. Кроме того, компания получила ассигнования на разработку нитрид-галлиевой технологии от Управления НИР ВМС и DARPA.

РЫНОК МОЩНЫХ GAN-ПРИБОРОВ

Инвесторы начали проявлять интерес к GaN-приборам для силовой электроники с 2006 года. Об усилении в настоящее время интереса к мощным нитридгаллиевым приборам убедительно свидетельствует состояние их рынка. Согласно отчету "Мощные GaN – версия 2012" исследовательской компании Yole Development, доходы от продаж мощных GaN-приборов в 2011 году составили менее 2,5 млн. долл. [23]. Yole объясняет такие относительно небольшие доходы тем, что на открытом рынке до последнего времени были представлены только два поставщика – International Rectifier (IR) и Efficient Power Conversion (EPC). Правда, компании, занятые разработкой нитридгаллиевых приборов, получали дополнительные доходы в виде контрактов на НИОКР и оплаты квалификационных испытаний и опытных образцов. В 2012 году, по оценкам экспертов Yole, продажи GaN-приборов не превысят 10 млн. долл., при этом на рынке по-прежнему останутся два основных поставщика – IR и EPC. С разработкой радаров следующего поколения, электронных

средств вооружения и коммуникационных систем установится достаточно большой сектор рынка мощных GaN-приборов для РЧ-систем. Правда, по оценкам еще одной аналитической компании Strategy Analytics, доля доходов от продаж GaN-приборов для систем военного назначения сократится за период 2010–2015 годов с 98 до 67% [24]. В то же время доходы от продаж этих приборов для беспроводных систем, силовой электроники, систем кабельного телевидения и малых наземных станций спутниковой связи возрастут в два раза. И по-прежнему развитию GaN-технологии

будут способствовать затраты на создание GaN-транзисторов для РЧ-систем и государственное финансирование компаний TriQuint и Cree.

В 2013 году начнется наращивание производства несколькими новыми поставщиками и рынок мощных GaN-приборов достигнет 50 млн. долл. По мере расширения производства и выпуска отвечающих требованиям заказчиков транзисторов на напряжение 600 В и более рынок начнет быстро расти (рис.11).

При соблюдении прогноза снижения стоимости приборов на этом материале (рис.12) выбор GaN-технологии для силовой электро-

ники к 2020 году станет очевидным. Возникнет спрос на приборы для непотребительских приложений. С ростом производства мощных GaN-приборов увеличится и спрос на подложки, требуемые для их изготовления. В 2015 году 12–15 производителей мощных нитридгаллиевых приборов приобретут 100 тыс. эпитаксиальных пластин (GaN на сапфире, GaN на SiC, GaN на GaN, GaN на AlN и GaN на Si) диаметром 150 мм. Предпочтение по-прежнему будет отдано пластинам GaN на Si. Появление таких пластин диаметром 200 мм окончательно утвердит выбор в пользу кремниевых подложек и в 2019 году продажи их могут превысить 300 млн. долл. Правда, пока это зависит от выбора автомобильными фирмами типа мощных приборов (SiC, GaN или хорошо освоенных кремниевых). И если поставщики электромобилей и гибридных автомобилей в конце концов также отдадут предпочтение GaN-технологии, рынок мощных приборов на этом материале в 2019 году сможет достичь 1 млрд. долл. Эта оценка совпадает и с прогнозом компании IMS Research, согласно которому продажи мощных GaN-приборов в 2021 году превысят 1 млрд. долл.

Таблица 3. Основные игроки на современном рынке мощных GaN-приборов [6]

Компания	GaN эпитаксиальные пластины	GaN-приборы
AZZURRO, Германия	+	
BeViTec, Германия		Только разработка
Dowa Electronics Materials, Япония	+	
ЕРС, США		+
EpiGaN, Великобритания	+	
Furukawa, Япония	+	+
GaN Systems, Канада		Только разработка
International Rectifier, США	+	+
MicroGaN, Германия		+
NTT, Япония	+	
OnChipPower, США		Только разработка
Panasonic, Япония	+	+
Powdec, Япония	+	+
Sanken, Япония	+	+
Sumitomo SEI, Япония	+	+
Toshiba, Япония	+	+
Transphorm, США	+	+

Примечание. Зеленым цветом выделены «чистые» игроки на рынке

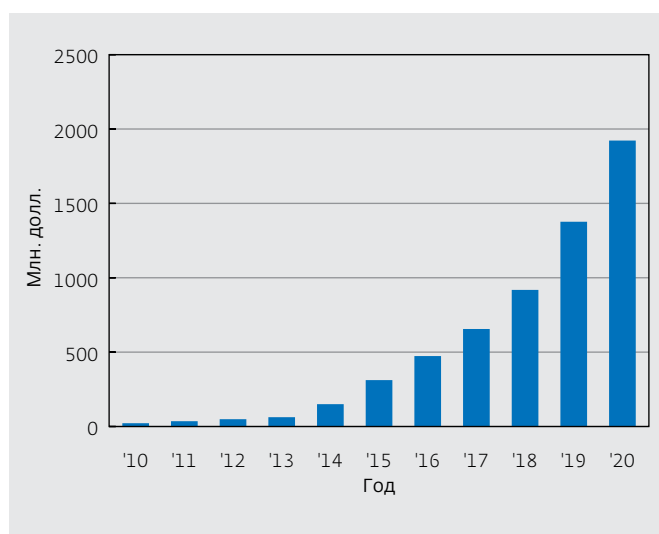


Рис.11. Динамика рынка мощных GaN-приборов

За последние пять лет в развитие перспективных материалов и мощных GaN-приборов было инвестировано более 200 млн. долл. Ощутимое финансирование получили компании Transphorm, EpiGaN, GaN Systems и Azzurro. В этом году ожидаются рекордные ассигнования, особенно на совершенствование подложек и развитие GaN-технологии, что будет способствовать появлению все большего числа изготовителей в секторе GaN-приборов для силовой электроники (табл.3). Так, компания Microsemi планирует совместно с EPC участвовать в создании высоконадежной версии eGaN HEMT [14].

Согласно проведенному компанией IMS исследованию, мощные GaN-приборы в первую очередь найдут применение в источниках питания для адаптеров ПК и ноутбуков, серверов и т.п., а также для домашних электроприборов. Экономия электроэнергии благодаря применению таких источников компенсирует относительно высокие цены их компонентов. После оценки надежности мощных GaN-приборов и решения возникающих проблем они найдут применение и в фотоэлектрических микропреобразователях, зарядных устройствах батарей электромобилей и других приложениях.

С растущим интересом на сегмент силовой GaN-электроники смотрят игроки на рынке светодиодов, оценивая возможности использования избытка своих мощностей для выпуска силовых устройств. Правда, по мнению экспертов компании Yole, это может нарушить

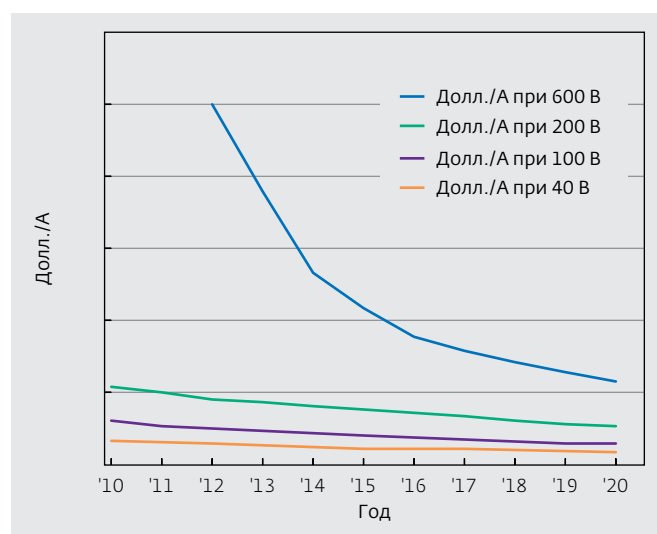


Рис.12. Динамика средней удельной продажной цены GaN-приборов в пересчете на ток

прогнозируемый рост исследований органических устройств. Но деловая активность в области технологии GaN-мощных приборов всегда была связана с промышленностью светодиодов. Предпосылки развития эпитаксиальной GaN-технологии созданы светодиодной промышленностью, что и позволило перейти от лабораторных исследований к массовому производству мощных транзисторов на нитриде галлия. Появившиеся сегодня эпитаксиальные пластины GaN на кремнии – результат совмещения опыта разработки светодиодов и мощных устройств. И сейчас большинство поставщиков выпускает специализированные эпитаксиальные пластины для этих двух секторов рынка. Но когда на рынок силовой электроники выйдут производители светодиодов, используя свои мощности и существующее оборудование для производства эпитаксиальных пластин или даже мощных GaN-приборов, речь пойдет не об отраслях светодиодов и мощных приборов, а о "GaN-промышленности".

Компания Yole отмечает две бизнес-модели для производителей мощных GaN-приборов. Согласно первой, изготовитель покупает эпитаксиальные GaN-пластины и обрабатывает их на существующих линиях первичных операций КМОП-технологии. Это позволяет отказаться от проведения MOCVD-процесса эпитаксиального выращивания нитрида галлия. Вторая модель заключается в проведении полного процесса изготовления GaN-прибора: от приобретения исходных кремниевых

пластин и проведения эпитаксии нитрида галлия до обработки пластин.

С учетом низкой стоимости приборов с высокими характеристиками, создаваемых на подложках GaN на кремнии, очевидно, будущие схемы преобразования энергии будут содержать сотни мощных приборов (сегодня – их несколько). Хотя еще не все проблемы создания мощных GaN-транзисторов решены, рост числа исследователей и компаний, занятых их изучением означает, что вопрос заключается не в том, появятся ли такие транзисторы на рынке, а в том, когда они появятся. GaN-приборы уже реальны. Принимая во внимание достижения кремниевой МОП-технологией предельных возможностей, можно уверенно ожидать быстрое совершенствование характеристик GaN-приборов, снижение их стоимости и наличие на рынке. Несомненно, сейчас именно в силовой электронике можно ожидать самые интересные разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Thayne I., Li X., Jansen W.** et al. III-V MOSFETs for Sub-15 nm Technology Generation CMOS: Some Observations, Issues and Solutions – sec.9a, CS Mantech 2011.
2. **Neudeck P., Okojie R.S., and Chen L.Y.** High-temperature electronics – a role for wide bandgap semiconductors? – Proceedings of the IEEE, 2002, v.90, №6, p.1065-1076.
3. **Medjdoub F. Carlin J.-F., Gonschorek M.**, et al. Can InAlN/GaN be an alternative to high power / high temperature AlGaIn/GaN devices? Electron Devices Meeting (IEDM 2006), p.1-4.
4. **Everts J., Dasz J., Van den Keybusx J. et al.** GaN-Based Power Transistors for Future Power Electronic Converters. – IEEE Benelux Young Researchers Symposium (YRS2010) edition:5.
5. **Briere M.** GaN-based Power Device Platform. The arrival of a new paradigm in conversion technology – www.powersystemdesign.com
6. GaN-on-silicon wafers: the enabler of GaN power electronics. – PowerDev', 2012, №4, p.6-9.
7. GaN-on-Si: best solution or efficient energy management. – Semiconductor today, Nov/Dec. 2011, v.6, №9, p.90-93.
8. GaN power transistors eliminate current collapse, cut power loss. –www.eetasia.com/ART_8800639119_765245_NP_a4849b54.HTM
9. EU-funded HiPoSwitch project launched, targeting more efficient power electronics. –www.semiconductor-today.com/news_items/2011/NOV/HIPO_151111.html
10. **Гольцова М.** Международная конференция IEDM 2011. Самые быстрые, самые небольшие, самые необычные микросхемы. Ч.2 – Электроника: НТБ, 2012, №2, с.92 –100.
11. **Kim Y.-S., Ha M.-W., Seok O.-G.** et al. High Breakdown AlGaIn/GaN HEMTs Employing Nickel Oxide Floating Metal Ring. – CS Mantech 2012, sec.9a.
12. **Srivastava P., Cheng K., Van Hove M.** et al. 4 2kV Breakdown Voltage GaN-on-Si DHFETs with Sub-micron Thin AlGaIn Buffer. – CS Mantech 2012, sec.9a.
13. **Lenci S., Kang X., Wellekens D. et al.** Au-free, High-Breakdown AlGaIn/GaN MISHEMTs with Low Leakage, High Yield and Robust TDDDB Characteristics. – CS Mantech 2011, sec.9a.
14. **Conner M.** GaN power transistors take aim at MOSFETs. – edn.com/electronics-news/4312289/GaN-power-transistors-take-aim-at-MOSFETs.
15. **Briere M.A.** The Status of GaN based Power Device Development at International Rectifier. – CS Mantech 2011, sec.9a.
16. **Briere M.A.** Commercial 600 V GaN-based Power Devices Coming of Age. – Power Electronics Technology, 2011, July, p.26-28.
17. Design Features – An Interview With Alex Lidow on GaN Developments. –www.powerpulse.net/techPaper.php?paperID=158
18. **Hallereau S.** GaN HEMT transistor from EPC. – Power Dev', 2012, Jan., N4, p.20-21.
19. Texas Instruments: Driving GaN FETs becomes reality. –www2.electronicproducts.com/Driving_GaN_FETs_becomes_reality-article-poypo_TI_NatSemi_jan2012-html.aspx
20. LM5114: Gate Driver Extends Family of GaN FET Drivers. – www.en-genius.net/site/zones/highpowerZONE/product_reviews/hpwrp_021312
21. Transphorm unveils the industry's first Qualified 600V Gallium Nitride product and demonstrates over 99% efficient DC-DC boost converter at APEC 2012. – www.transphormusa.com
22. Transphorm delivers first qualified 600V GaN-on-Si products. – www.semiconductor-today.com/news_items/2012/MAY/TRANSPHORM_090512.html.
23. GaN power electronics market may top \$1bn in a few years. –www.semiconductor-today.com/news_items/2012/MAR/YOLE_080312.html.
24. GaN gaining traction in commercial applications. – www.semiconductor-today.com/news_items/2012/JAN/STRAT_040112.html