

МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ IEDM 60 ЛЕТ

КРЕМНИЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОСТИГЛА ПРЕДЕЛА ИЛИ У НЕЕ ЕСТЬ БУДУЩЕЕ?

М.Гольцова

Кремниевая технология господствует в микроэлектронной промышленности на протяжении многих десятилетий и активизирует многие значительные инновационные работы в области логических устройств, схем памяти, обработки аналоговых и смешанных сигналов, датчиков, МЭМС/НЕМС и многих других. Полупроводниковые компании научились предоставлять более высокую производительность микросхем за меньшую стоимость, то есть "делать больше дешевле". Однако сегодня для преодоления ограничений, вызванных масштабированием кремниевых приборов, особое внимание уделяется новым материалам и устройствам. И если в технической программе предыдущей конференции IEDM доминировали вопросы развития ключевой полупроводниковой технологии, то на 60-й юбилейной Международной конференции по электронным приборам IEDM 2014 приоритетными темами стали силовые приборы, состояние цифровой КМОП-технологии.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА – СКРЫТАЯ ДВИЖУЩАЯ СИЛА РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВА

Большое внимание на конференции IEDM 2014 уделялось докладам, посвященным проблемам силовой электроники. Силовые полупроводниковые приборы сегодня можно найти повсюду: в бытовой технике, автомобильной электронике, импульсных источниках питания, электрических сетях и другом разнообразном оборудовании. На протяжении многих лет полупроводниковая промышленность выпускает все более быстродействующие и эффективные силовые устройства, выполненные на основе широкозонных материалов – карбида кремния и эпитаксиальных пленок нитрида галлия на кремниевых подложках. Но недостатки

современных приборов этого типа стимулируют разработку силовых транзисторов следующего поколения: вертикальных GaN-приборов на объемном материале, новых типов SiC-устройств. Агентство передовых исследований в области энергетики (Advanced Research Projects Agency-Energy, ARPA-E), созданное в 2007 году по образцу Управления перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA), недавно объявило о реализации программы создания недорогих транзисторов на основе широкозонных материалов для управления высокоэффективными системами (Strategies for Wide-Band gap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems, SWITCHES). Цель программы – изучение

новых широкозонных полупроводниковых материалов и архитектур силовых приборов следующего поколения, рассчитанных на напряжение 1,2 кВ и ток свыше 100 А, а также процессов их изготовления, с тем чтобы увеличить скорость переключения преобразователей, улучшить температурный контроль силовых систем и снизить их потери. И все это при меньшей стоимости, по сравнению с современными устройствами.

Помимо ARPA-E множество компаний, исследовательских институтов и университетов небезосновательно проводят программы создания силовых полупроводниковых приборов следующего поколения. Согласно прогнозам крупнейшей нефтегазовой компании Exxon Mobil, мировая потребность в электроэнергии с 2010 по 2014 год должна была увеличиться на 87%. А потери при передаче и распределении энергии могли составлять 8–15% [1].

Многочисленные презентации и доклады представили на конференции выдающиеся специалисты – практики и ученые, имеющие непосредственное отношение к этой тематике. Вопросы,

рассматривавшиеся на конференции, касались не только мощных приборов на кремнии и полупроводниковых соединениях, но и проблем получения высоковольтных устройств для сверхмощных приложений. Особое внимание уделялось приборам на карбиде кремния.

Почему карбид кремния?

Интерес к карбиду кремния обусловлен его широкой запрещенной зоной – 3,26 эВ для материала политипа 4Н, который наиболее широко используется при создании силовых приборов. Благодаря широкой запрещенной зоне напряжение пробоя SiC-устройств в сравнении с кремниевыми на порядок выше, а теплопроводность втрое больше. Допустимая концентрация примесей материала высокая: 10^{14} – 10^{19} см⁻³ электронных и 10^{14} – 10^{20} см⁻³ донорных. Рабочая температура SiC-приборов достигает 250°C. Эти положительные свойства карбида кремния позволяют упростить громоздкие блоки охлаждения, часто применяемые в преобразователях мощности на основе кремниевых



Рис.1. Джейант Балига с компактной люминесцентной лампой, оснащенной БТИЗ

устройств. К тому же возможность функционировать при высоких значениях электрического поля позволяет уменьшить толщину блокирующего слоя SiC-транзистора в три раза по сравнению с кремниевыми приборами, а концентрацию примеси увеличить на два порядка. Тем самым удастся значительно снизить сопротивление области блокировки напряжения и потребляемую мощность.

Успехи в разработке SiC-приборов

На пленарной сессии учредитель и технический директор компании Cree Джон Палмоур в докладе "Разработка SiC-приборов на карбиде кремния для рынка изделий промышленного назначения" заглянул в будущее силовой полупроводниковой электроники. Он отметил, что проблемы качества и стоимости карбида кремния в значительной степени решены, благодаря чему приборы на основе этого материала уже могут успешно конкурировать с традиционными кремниевыми устройствами. На рынке можно найти подложки карбида кремния диаметром 150 мм. По мере совершенствования подложек такой показатель качества МОП-транзисторов, как сопротивление в открытом состоянии $R_{DS(on)}$, будет снижаться, возрастет запирающее напряжение. В результате уменьшатся потери на переключение и издержки производства мощных SiC-транзисторов следующего поколения. Сегодня сопротивление $R_{DS(on)}$ транзисторов с запирающим напряжением 900 В составляет 2,3 мОм/см² при напряжении пробоя 1230 В и 208 мОм/см² при запирающем напряжении 15 кВ и напряжении пробоя 15,5 кВ.

В сравнении с лучшими образцами современных кремниевых высоковольтных приборов (БТИЗ, тиристоры и рпн-диоды) с запирающим напряжением около 8 кВ SiC МОП-транзисторы на напряжение до 10 В и более, благодаря меньшим потерям на переключение и сокращению

числа последовательно соединенных компонентов, позволяют упростить конструкцию системы и повысить ее надежность, тем самым значительно улучшив ее эффективность, скорость переключения и плотность мощности. Дальнейшее совершенствование мощных SiC МОП-транзисторов будет способствовать не только более широкому их применению в системах преобразования энергии, работающих при меньших значениях напряжения, но и появлению новых топологий приборов с чрезвычайно высоким напряжением.

По оценке Палмоура, эффективность повышающего преобразователя нулевого напряжения на основе 15-кВ SiC МОП-полевого транзистора при напряжении переключения 6 кВ и токе ~5 А составляет 98,5 и 98,2% при 20 и 40 кГц соответственно, для жесткого переключателя при 40 кГц – 93,2%. Эти результаты, весьма обнадеживающие для мощных высокочастотных применений, поскольку могут оказать значительное влияние на размер, массу и стоимость будущих перспективных систем преобразования и передачи мощности.

Однако при запирающем напряжении выше 15 кВ из-за увеличения сопротивления полевых транзисторов в открытом состоянии изготовление SiC-приборов становится практически нецелесообразным с точки зрения стоимости и достигаемого выхода годных. Для создания приборов, рассчитанных на напряжение свыше 15 кВ, в компании Cree сосредоточились на разработке кремниевых запираемых тиристоров (ГТО), обеспечивающих высокую плотность тока инжекции, БТИЗ с меньшей плотностью инжектируемого тока, допускающих работу при более высоких значениях напряжения и частоты. В компании созданы SiC ГТО на напряжение 22 кВ при токе 200 А и БТИЗ на 27 кВ – прибор с рекордно высоким напряжением [2].

Секцию 2, посвященную силовым полупроводниковым приборам, открыл профессор Университета Северной Каролины Джейант Балига (рис.1), работавший в начале 1980 годов БТИЗ с большим рабочим током и активно способствовавший их коммерческой реализации. В докладе он указал на возрастающую роль мощных полупроводниковых приборов – мускулов электронных систем, предназначенных для управления их питанием, – в содействии социальному прогрессу общества. Ученый отметил, что за прошедшие три десятилетия БТИЗ сыграли заметную роль в совершенствовании систем питания транспортных средств, позволив сократить потребление бензина примерно на $4 \cdot 10^{12}$ литров, что соответствует уменьшению эмиссии углекислого газа на $34 \cdot 10^{12}$ кг.

Примером успешного развития БТИЗ, по мнению Д.Балига, может служить созданный стартап-компанией Amantys (Великобритания) для систем локомотивной тяги драйвер БТИЗ с диапазоном рабочих напряжений 1,2–6,5 кВ и током нагрузки до 3600 А.

Замена ламп накаливания компактными люминесцентными лампами с БТИЗ-модулями электронного пускорегулирующего устройства позволила сократить энергопотребление при освещении на 80%, увеличив на порядок срок службы светильников. Благодаря применению БТИЗ энергопотребление при освещении было сокращено на $5 \cdot 10^4$ кВт·ч. С внедрением новых силовых приборов на основе широкозонных материалов, сопоставимых по стоимости с кремниевыми, социальная роль мощной полупроводниковой электроники повысится [3].

Интерес у присутствовавших на сессии вызвало сообщение представителей Киотского университета о разработке надежных высоковольтных (>10 кВ) SiC-переключателей для эффективных и отказоустойчивых интеллектуальных (смарт) электроэнергетических систем, способных заменить существующие электросети. Сегодня для преобразования электроэнергии при сверхвысоком напряжении в силовом модуле последовательно соединяют несколько кремниевых тиристоров с рабочим напряжением 6–8 кВ. Но это приводит к рассеянию огромной мощности и разогреву системы. Замена существующих устройств сверхвысоковольтными SiC-схемами позволит значительно сэкономить энергию. Вот эту задачу и решили ученые Киотского университета, построившие три типа сверхвысоковольтных мощных биполярных SiC-приборов (pin-диоды, биполярные транзисторы и БТИЗ) и установившие новый ориентир для высоковольтных полупроводниковых приборов.

В качестве примера рассмотрим процесс изготовления сверхвысоковольтных SiC pin-диодов. Методом химического осаждения из газовой фазы при температуре 1650°C на низкоомных подложках карбида кремния p-типа выращивался блокирующий напряжение слой толщиной не менее 150 нм с концентрацией и временем жизни носителей не выше $\sim 10^{14}$ см⁻³ и > 30 мкс соответственно. Благодаря устранению проблем, связанных с нежелательной примесью азота, за счет уменьшения давления при выращивании пленки, либо увеличения отношения углерода к кремнию в используемых газовых потоках скорость роста эпитаксиальной пленки была увеличена с 10 до более 50 мм/ч.

Изоляция диода достигалась за счет применения улучшенной скошенной меза-структуры с закругленным основанием. Для исключения эффекта уплотнения электрического поля вблизи края p-n-перехода, вызывающего пробой прибора при более низких значениях напряжения, чем расчетное, с помощью ионной имплантации алюминия формировалась расширенная область контактной площадки перехода (Junction-Termination-Extension, JTE region) и проводился последующий отжиг для получения нужной структуры контактной площадки. Требуемое значение электрического поля у края перехода достигалось за счет "пространственного модулирования" JTE-области с помощью созданных в ней многочисленных кольцевых сфер. Изменяя ширину сфер и расстояния между ними, удалось минимизировать сжатие электрического поля у края перехода. Омическими контактами к области p-типа служила пленка Al/Ti, к области n-типа – никелевая пленка, осаждаемая при температуре 1000°C. Полученная структура диода пассивировалась путем термического окисления поверхности и осаждения пленки полиимида толщиной 4 мкм (рис.2).

Применение методов быстрого эпитаксиального роста, уменьшения дефектов (глубоких энергетических уровней, расположенных ниже зоны проводимости на 0,62 эВ), а также оптимизация омических контактов позволили изготовить высоковольтные биполярные SiC-приборы с запирающим напряжением более 20 кВ.

Напряжение пробоя созданных специалистами Киотского университета pin-диодов превышало 26,9 кВ при значении дифференциального сопротивления в открытом состоянии 9,7 мОм/см².

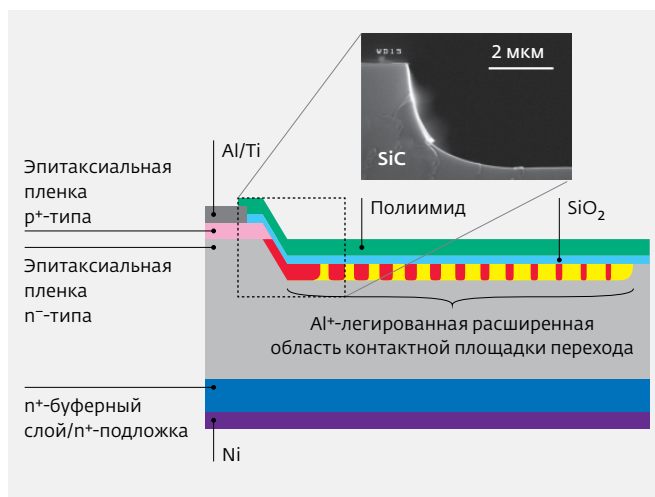


Рис.2. Структура предлагаемого SiC pin-диода

Отмечается, что это самое высокое напряжение пробоя современных полупроводниковых приборов (при таком значении $R_{DS(on)}$ напряжение пробоя кремниевых приборов на превышает 600 В), причем полученное значение напряжения было ограничено возможностями измерительных инструментов. Разработчики считают, что напряжение пробоя изготовленных диодов составляет 30 В, но чтобы доказать это, нужна более совершенная измерительная аппаратура.

Указывается также, что с помощью описанных методов был изготовлен n-канальный БТИЗ размером 8×8 мм с напряжением пробоя более 16 кВ. При температуре 250°C напряжение пробоя БТИЗ составило 6,5 В, а ток – 60 А [4].

Но SiC-приборы не без недостатков: пока они изготавливаются на подложках диаметром 100 или 150 мм, кроме того, эффективная подвижность носителей в канале мала. Внимание разработчиков и потребителей силовой электроники все больше привлекает другой перспективный широкозонный материал – нитрид галлия.

Силовые приборы на основе нитрида галлия

Потери силовых GaN-приборов на преобразование энергии более чем на 50% меньше, чем у кремниевых устройств при меньшем форм-факторе и стоимости. Особый интерес вызывает возможность выращивания материала на кремниевых подложках большой площади, с тем чтобы снизить стоимость приборов. В результате технологического и коммерческого успеха GaN-светодиодов и СВЧ-приборов появилась возможность промышленного производства силовых GaN-транзисторов и диодов.

Поэтому участников конференции заинтересовало сообщение компании Transphorm, в котором описывался GaN гетеропереходный полевой транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT) на напряжение 600 В первого поколения. GaN HEMT, работающие в режиме обеднения, изготавливались по запатентованной компанией EZ-технологии на эпитаксиальных пленках нитрида галлия, осажденных на Si- и SiC-подложке диаметром 100–150 мм. В HEMT-переключателе использовано каскодное включение высоковольтного транзистора, при котором на входе включен низковольтный кремниевый полевой транзистор, работающий в режиме обогащения, а на выходе – высоковольтный GaN HEMT, работающий в режиме обеднения (рис.3), то есть стандартная кремниевая управляющая схема обеспечивает работу высоковольтного GaN-прибора в режиме обогащения.

Для высокоскоростных применений силовых GaN HEMT по-прежнему пригодны обычные корпуса типа TO-220.

Сопротивление в открытом состоянии HEMT-переключателя, собранного в корпусе TO-220, составляет 150 мОм, заряд обратного восстановления – 54 нКл. Напряжение пробоя превышает 1700 В при стабильном значении сопротивления в открытом состоянии. Это значит, что приборы, работающие при типичном для GaN-транзисторов напряжении 600 В, по надежности намного превзойдут существующие кремниевые устройства. Действительно, впервые проведенные для силовых GaN HEMT на кремниевых подложках квалификационные JEDEC-испытания позволили даже с учетом самых консервативных механизмов отказов предположить, что среднее время наработки на отказ новых транзисторов при рабочем напряжении 600 В и температуре 80°C превысит 10^7 ч. Выражается уверенность, что разработанный компанией Transphorm переключатель может стать важной вехой на пути к широкому применению силовых GaN-устройств в источниках питания, фотоэлектрических преобразователях для солнечных батарей, электроприводах, преобразователях энергии для электромобилей [5].

Силовые GaN-транзисторы были широко представлены на 11-й секции, посвященной мощным приборам на полупроводниковых соединениях.

Для энергоэффективных безотказных переключателей требуются транзисторы, работающие в режиме обогащения, но на основе нитрида галлия их трудно изготавливать. Об успешном решении этой задачи сообщили специалисты

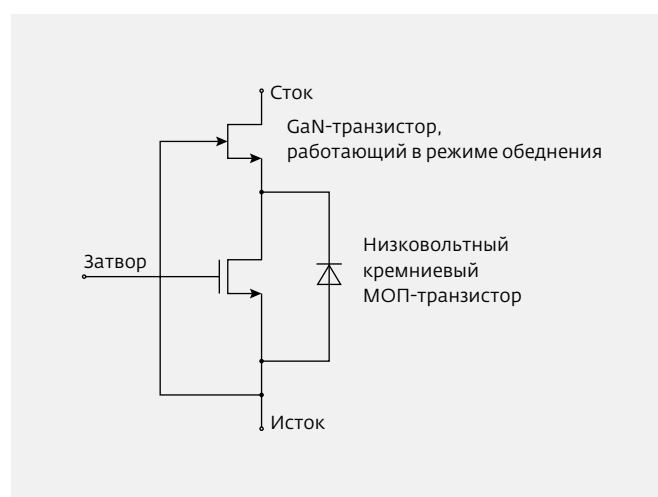


Рис.3. Каскодное включение высоковольтного GaN-транзистора

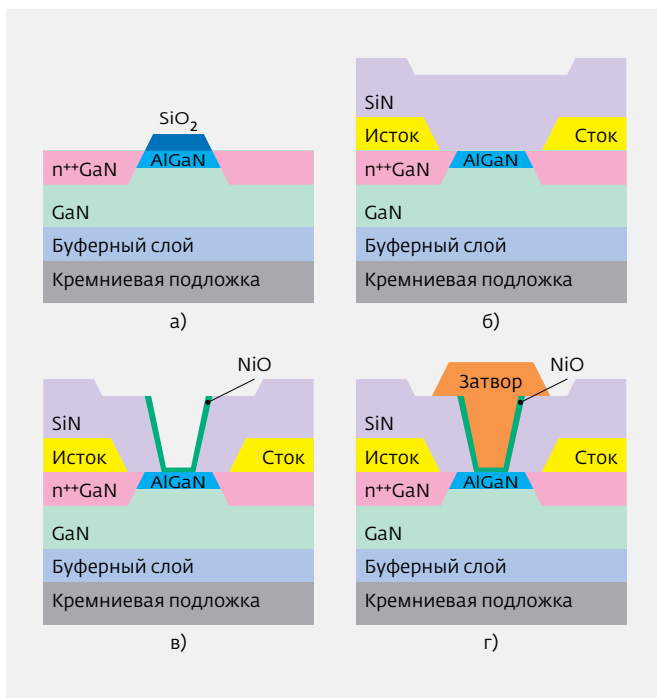


Рис.4. Процессы формирования работающего в режиме обогащения GaN-транзистора: а) селективная рекристаллизация легированного германием n^{++} -слоя GaN; б) осаждение нитрида кремния на поверхность прибора; в) формирование пленки NiO методом атомно-слоистого осаждения; г) осаждения металла затвора

компании Panasonic и Киотского технологического института. Ими создан работающий в режиме обогащения GaN НЕМТ-транзистор с легированным германием рекристаллизованным n^{++} -GaN-омическим контактом (рис.4). В результате легирования материала контакта германием плотность носителей заряда в нем достигает 10^{20} см^{-3} . Гетероструктура транзистора формировалась на кремниевой подложке химическим осаждением из паров металлоорганических соединений (MOCVD). Рекристаллизованный материал омического контакта также получали MOCVD-методом. Барьерным слоем служила пленка нитрида галлия алюминия ($\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$). В структуре затвора использовалась пленка оксида никеля (NiO) р-типа, селективно выращенного с помощью атомно-слоевого осаждения в зазор между истоком-стоком шириной 1 мкм. Длина затвора с NiO-пленкой – 400 нм. Благодаря пленке оксида никеля пороговое напряжение смещается в область положительных значений, позволяя транзистору работать в режиме обогащения.

Разработчики заявили, что для созданного транзистора достигнуто рекордное значение сопротивления в открытом состоянии – 0,95 Ом/мм. Максимальный ток стока и крутизна составляют 1,1 А/мм и 490 мСм/мм соответственно. Пороговое напряжение – 0,5 В, отношение токов включения и выключения – $5 \cdot 10^6$. Создатели GaN-транзистора утверждают, что он позволит существенно повысить эффективность DC-DC преобразователей [6].

Другая группа специалистов компании Panasonic доложила об изготовленном на 200-мм кремниевой подложке, работающем в режиме обогащения GaN-транзисторе с модуляцией проводимости канала за счет инжекции дырок – Gate Injection Transistor (GIT). В приборе используется инжекция дырок затвором на основе AlGaN р-типа в AlGaN/GaN-гетероструктуру транзистора. При отсутствии смещения затвор-исток граница раздела AlGaN/GaN обеднена носителями заряда (рис.4а), что соответствует работе транзистора в режиме обогащения. При превышении напряжением затвор-исток порогового значения дырки AlGaN-затвора инжектируются в канал, приводя к увеличению концентрации электронов в нем и изменению его проводимости (рис.4б). Поскольку у дырок эффективная масса на два порядка больше, чем у электронов, инжектируемые дырки группируются вблизи затвора и концентрация носителей в канале увеличивается на два порядка. В результате сопротивление транзистора в открытом состоянии существенно уменьшается. Таким образом, применение AlGaN-затвора р-типа и модулирование сопротивления транзистора за счет инжекции дырок позволили создать устройство, работающее в режиме обогащения, с малым сопротивлением в открытом состоянии. Пороговое напряжение первых созданных GIT-транзисторов составило 1 В при максимальном токе стока – 200 мА/мм. При этом прямое смещение затвора могло составлять 6 В. Напряжение пробоя GIT равно 800 В. Производство сопротивления в открытом состоянии на заряд затвора $R_{\text{Dson}}Q_g$ (критерий качества современных силовых приборов) для разработанного GIT составило 715 Ом·нСл, что равно 1/13 этого показателя у современных кремниевых МОП-транзисторов. По утверждению компании, впервые для GaN-транзистора получено рабочее напряжение 800 В без необходимости увеличения сопротивления в открытом состоянии на протяжении его непрерывного переключения.

Применение транзистора в резонансном преобразователе постоянного тока, объединяющего два элемента индуктивности и один конденсатор

(LLC DC-DC), показало, что выполненный на кремниевой подложке GaN GIT-транзистор пригоден для построения безотказных систем. Эффективность преобразователя при работе на частоте 1 МГц и выходной мощности 1 кВт превысила 96% [7].

Из представленных на конференции докладов, посвященных силовой полупроводниковой технологии, ясно видно, что созданные на кремнии GaN микросхемы и SiC-полевые транзисторы уже можно найти на рынке. Но отгрузки приборов массового производства начнутся лишь спустя много лет, если не десятилетие.

А каково состояние цифровой КМОП-технологии, о которой шла речь на конференции IEDM?

У КМОП-ТЕХНОЛОГИИ В ЗАПАСЕ ЕЩЕ МИНИМУМ 10 ЛЕТ

Конференция открылась заседанием, посвященным проблемам разработки микросхем с 7-нм топологическими нормами. Масштабирование интегральных схем и создание все более сложных многофункциональных и быстродействующих устройств для разнообразного применения привело к освоению 14-нм КМОП FinFET-технологии. Сегодня многие производители микросхем уже рассматривают возможность производства

схем с проектными нормами 10 нм, тогда как GlobalFoundries, Intel, Samsung и TSMC проявляют интерес к 7-нм и даже 5-нм технологиям. Ведь по графику Intel 7-нм FinFET-микросхемы появятся через четыре-пять лет. Но для реализации этих планов целесообразно знать требования, предъявляемые к микросхемам с проектными нормами 7 нм, поскольку совместная оптимизация технологического процесса и микросхемы может оказаться необходимой для ускоренной разработки новой технологии. Следует определить архитектуру 7-нм транзистора. Для масштабируемых непланарных приборов перспективными могут оказаться новые материалы канала. Так, на предыдущей конференции IEDM 2013 представители научного центра микро- и наноэлектроники в Лёвене (Бельгия) (IMEC) объявили об изготовлении на кремниевой пластине диаметром 300 мм трехмерных FinFET-транзисторов с InGaAs-каналами. Разработанная технология позволила заменить кремний фосфидом индия и арсенидом индия-галлия при расщеплении кристаллических решеток 8%. Конечно, пока желательно, должным образом интегрировать новый материал канала в кремниевую технологическую платформу. Остается актуальным вопрос о влиянии новых материалов и структур

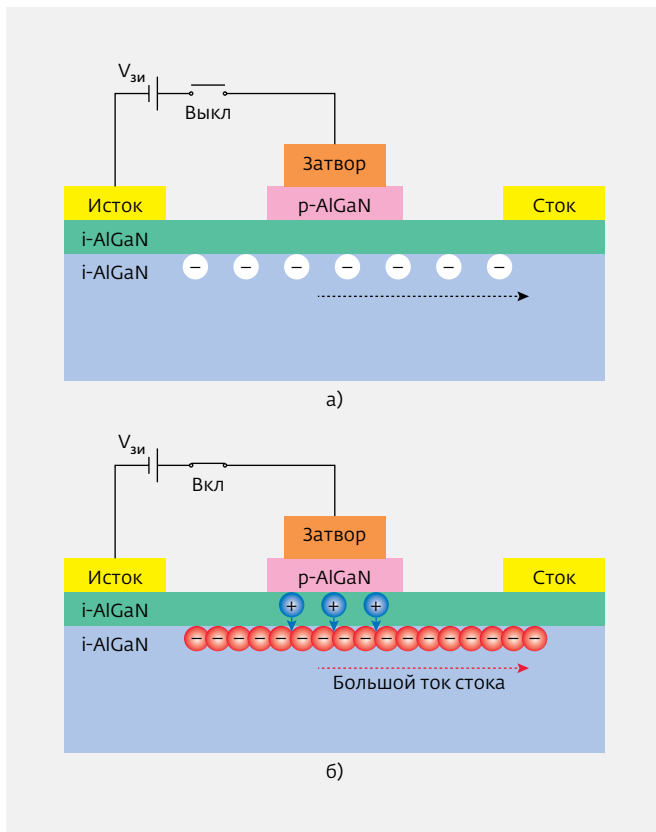


Рис.5. Принцип работы ГИТ-транзистора: а) обеднение электронами границы раздела AlGaN/GaN в отсутствии напряжения исток-затвор; б) модуляция проводимости при превышении напряжения исток-затвор порогового напряжения

на надежность устройств. Но во множестве докладов было перечислено такое количество вопросов, касающихся освоения 7-нм технологии, что напрашивается вывод: "Никто не знает, что надо делать". Правда, остается надежда, что конференция поможет ответить на них [8].

Появление все более сложных и энергоэффективных КМОП-схем для мобильных компьютерных систем, средств вычислений в клиент/серверной и облачной средах зависит от непрерывного совершенствования технологических процессов изготовления таких схем. Конференция оставила в прошлом сомнения относительно того, что трехмерные FinFET-транзисторы, в НИОКР которых вложены огромные средства, наиболее перспективны для развития большей части промышленности. Компания STMicroelectronics была одиноким защитником планарной структуры, отстаивая на конференции достоинства 55-нм SiGe БиКМОП-технологии. Поэтому интерес вызвали представленные на сессии "Интеграция

схем - перспективные платформы КМОП-технологии", доклады компаний Intel и IBM, посвященные 14-нм процессам создания полностью интегрированных FinFET-микросхем.

День FinFET-технологии на IEDM

Каждая полупроводниковая фирма и контрактный производитель пытаются построить трехмерные FinFET-транзисторы, которые могли бы конкурировать с приборами Intel, опережающей своих конкурентов на несколько лет. В затылок Intel дышит корпорация IBM, недавно заключившая с контрактным производителем GlobalFoundries соглашение о передаче своих FinFET производственных мощностей. Компании TSMC, AMD, Freescale и другие утверждают, что их разработки близки по своим параметрам к схемам Intel и IBM. Но это надо доказать. Вот почему сессия, получившая название "FinFET-технологии дуэлянтов", прошла в атмосфере захватывающего соперничества.

Дуэль Intel и IBM

Intel освоила 22-нм FinFET-технологии в 2011 году, когда использовала ее для массового производства микропроцессоров Ivy Bridge и позже - для Haswell. Сравнительно недавно компания объявила о преобразовании 22-нм FinFET-технологии в 14-нм процесс для создания микропроцессора Broadwell семейства Core M. Производство процессора уже освоено, и компания его продемонстрировала на выставке бытовой техники CES 2015. По мнению экспертов, конференция IDEM стала триумфом компании Intel, раскрывшей подробности 14-нм КМОП-технологии изготовления на объемном кремнии логических FinFET-микросхем с межсоединениями с воздушным зазором, рисунком, формируемым двойным самосовмещенным процессом, и ячейкой СОЗУ объемом 140 Мбит, площадь ячейки которого равна ~6 мкм² [9, 10].

С помощью 14-нм технологии были изготовлены и FinFET второго поколения, заметно отличающиеся от 22-нм транзисторов. Длину затвора транзисторов удалось уменьшить с 26 до 20 нм за счет формирования ребер шириной 8 нм с более резким вертикальным профилем распределения примеси. Высота ребер увеличена с 34 до 44 нм, а расстояние между ними уменьшено с 60 до 42 нм. Шаг затвора - 70 нм. Таким образом, в сравнении с 22-нм транзисторами у 14-нм FinFET ребра выше и стройнее и их в транзисторе меньше (рис.6). Поскольку транзисторы, как обычно в компании, изготавливались на объемном кремнии,

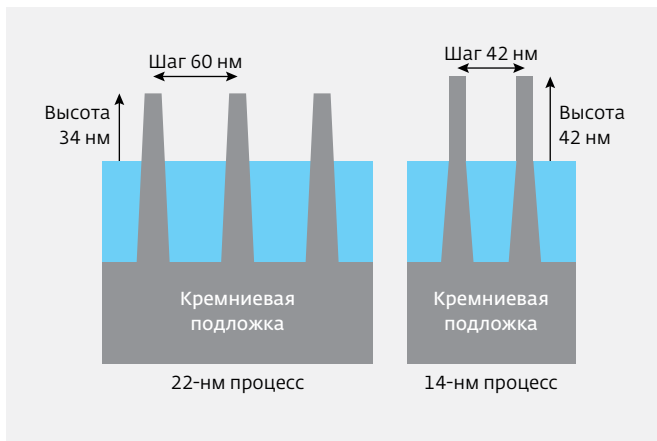


Рис.6. Ширина, высота, шаг ребер и их число в 22-нм (а) и 14-нм (б) транзисторах компании Intel

потребовался новый процесс формирования под 8-нм ребрами переходов, предотвращающих ток утечки через подложку. И, согласно поговорке "все новое – это хорошо забытое старое" разработчики использовали для формирования ограничивающего перехода процесс легирования областей под ребрами бором и фосфором из твердого источника.

В микросхеме 13 слоев металлизации. Толщина верхнего слоя металла больше, чем у остальных. Восемь первых слоев металлизации с шагом межсоединений 52 нм (против 80 в 22-нм варианте) разделены CdO-диэлектриком с пониженной диэлектрической проницаемостью. Четвертый и шестой слои металлизации структуры с шагом межсоединений 80 и 160 нм, соответственно, впервые выполнены с воздушным зазором, что позволило на 17% сократить емкостную задержку. Следует отметить, что слои межсоединений с воздушным зазором впервые использованы в выпускаемой промышленностью логической схеме, хотя их можно найти в схемах памяти. Intel представила убедительный доклад относительно металлизации с воздушными зазорами на Международной конференции по технологии межсоединений (ITC) в 2010 году, но было неясно, будут ли они реализованы при освоении 14-нм процесса.

При напряжении питания 0,7 В, токе в режиме ожидания 10 нА/мкм, управляющий ток в режиме насыщения при расстоянии между ребрами 42 нм и затворами 70 нм равен 1,04 мА/мкм для транзисторов обоих типов, то есть по сравнению с 22-нм транзисторами этот показатель улучшен на 15% и 41% для n- и p-канальных приборов

соответственно. Intel подчеркивает, что FinFET второго поколения выполнены с использованием структуры диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью/металлическим затвором приборов четвертого поколения и напряженного кремния – приборов шестого поколения [11].

В результате уменьшения шагов ребер, затворов и межсоединений транзистора на 22-35% компания сумела уменьшить и размер микросхемы процессора. Так, площадь кристалла процессора Haswell равна 131 мм², тогда как Broadwell умещается на площади 82 мм². При этом в Haswell 1 млрд. транзисторов, а в Broadwell – около 1,3 млрд.

Микросхемы по 14-нм технологии с 2014 года выпускают два предприятия Intel – в штатах Орегон и Аризона (США). В 2015 году компания планирует перевести на новую технологию предприятие в Ирландии. Полностью удовлетворить спрос на 14-нм микросхемы предполагалось в первом квартале 2015-го.

Возражения **IBM**. После выступления представителя Intel прославлению КМОП-технологии был посвящен доклад IBM, в котором описывался процесс изготовления 14-нм FinFET на КНИ-подложках. Специалисты компании убеждены, что КНИ-технология оправдывает высокую стоимость подложек, поскольку не требует проведения дополнительных процессов изоляции элементов схемы. С помощью 14-нм КНИ-технологии создано и встроенное ДОЗУ кэш-памяти с ячейкой размером всего 0,0174 мкм². Реализация встроенного ДОЗУ по 14-нм технологии объясняется тем, что благодаря применению памяти этого типа в 22-нм двухмерной микросхеме серверного процессора Power 8 объем его L3 кэш-памяти был вдвое больше, чем у 22-нм серверных процессоров Haswell компании Intel. Это и обеспечило процессору "синего великана" серьезное преимущество по производительности. Высокая производительность FinFET схемы достигается в широком диапазоне мощности: от значения потребляемого тока 100 нА/мм для мощных транзисторов до менее 1 нА/мм для маломощных устройств и полевых транзисторов матрицы оперативной памяти, которая присутствует во многих специализированных микросхемах ASIC-типа.

Компания также сообщила о разработке процесса обеспечения двойной работы выхода маломощных и высокоскоростных устройств, что позволило оптимизировать значения пороговых напряжений n- и p-канальных полевых транзисторов, без изменения подвижности носителей в канале. Еще одно достоинство процесса – отказ

от применения таких проблематичных мер, как сильное легирование или модуляция напряжения затвора. Правда, сам процесс докладчик не описал. Отличные функциональные возможности при подпороговом напряжении обеспечили возможность уменьшения длины затвора до менее 20 нм и работоспособность при сверхнизком напряжении питания. В результате при напряжении питания 0,8 В 14-нм КНИ-микросхема по производительности более чем на 35% превосходит предыдущую 22-нм планарную схему компании.

Поскольку 14-нм технология предназначена для построения разнообразных систем на кристалле – от консолей видеоигр до корпоративных центров обработки и передачи данных, в схеме используется рекордная 15-слойная медная металлизация, обеспечивающая невиданную ранее свободу распределения питания и синхроимпульсов в схеме системы на кристалле размером до 600 мм² и более.

Докладчик отметил, что форма и размер FinFET-транзисторов являются ключевыми параметрами схемы, но не привел подробной информации относительно их выбора. Он лишь подчеркнул, что компания следует закону Мура,

приведя в доказательство данные, касающиеся расстояния между ребрами (42 нм), шагов затвора (80 нм), контактов (80 нм), межсоединений, в том числе и двунаправленных в первом слое (64 нм).

По-видимому, решение IBM использовать 14-нм КМОП-технология для изготовления полностью интегрированных схем с FinFET-архитектурой, предназначенных для построения систем на кристалле и маломощных ASIC-схем, – хорошая новость для компании GlobalFoundries, которая унаследовала технологию и производство FinFET-схем в рамках сделки, заключенной с IBM в начале 2014 года [12].

TSMC – крупнейший тайваньский производитель полупроводниковых приборов – в общих чертах обрисовал усовершенствованный FinFET+ вариант представленной в 2013 году 16-нм КМОП FinFET-схемы. Эксперты отмечают, что за относительно короткий срок достигнут значимый результат.

В схеме использованы FinFET-транзисторы второго поколения и перспективные медные межсоединения с изолирующими слоями диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью. FinFET+-схема выполнена на объемном

кремнии. Расстояние между ребрами транзистора составляет 48 нм. Новая схема межсоединений позволила уменьшить емкость, образуемую слоями металлизации, примерно на 9%. Рабочее напряжение было увеличено до 70 мВ. По сравнению с 16-нм FinFET-схемой первого поколения быстродействие усовершенствованной FinFET+ микросхемы при той же частоте синхронизации должно возрасти на 15% при неизменной потребляемой мощности. При том же быстродействии мощность уменьшится на 30%. По сравнению с 20-нм планарной схемой системы на кристалле компании быстродействие FinFET+ схемы увеличено на 40%, а потребление энергии снижено на 60%.

Проектные нормы обеих 16-нм микросхем (FinFET и FinFET+) одинаковы. Как правило, FinFET-устройства с минимальными изменениями нетрудно изготовить с помощью FinFET+ процесса. Компания объявила о 95%-ной готовности своих предприятий к выпуску микросхем по 16-нм FinFET+ технологии. Подтверждена и 95%-ная готовность производственных мощностей, предназначенных для изготовления 30-нм микросхем по 16-нм FinFET-технологии. Таким образом, TSMC может очень быстро начать производство 16-нм FinFET- и FinFET+ схем. В 2014 году компания планировала выпустить первые 15 FinFET+ устройства, а в 2015-м еще 45 микросхем программируемых вентиляционных матриц и систем на кристалле для настольных компьютеров и серверов [13].

* * *

В ходе дискуссии, организованной компанией Applied Materials параллельно с конференцией, ведущий технолог компании Nvidia, бывший руководитель НИОКР в TSMC Джон Чен, отметил, что трудно быть пессимистом, видя размах и глубину прекрасных инженерных работ в области полупроводниковой технологии. При этом он заострил внимание на трех ключевых проблемах. Первая – отсутствие замены иммерсионным системам литографии, базовому оборудованию в полупроводниковой промышленности, вторая – рост цен на микросхемы и третья – отсутствие согласия относительно перехода к обработке пластин большего диаметра. Что касается выхода годных, то сейчас производители счастливы, когда в брак отправляется 20% продукции, но цена производства столь высока, что выбрасывать такое количество устройств непозволительно.

Так что полупроводниковым компаниям предстоит еще большой объем работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Searching For The Next Power Transistor. – semiengineering.com/searching-for-the-next-power-transistor/SiC-projected-to-have-Significant-Impact-on-Industrial-Markets. – www.smartgridelectronics.net/2015/01/sic-projected-significant-impact-industrial-markets
2. IEDM Report: 14nm Substrates, Power IGBTs and Mechanobiology. – www.chipestimate.com/blogs/IPInsider/?p=2313
3. **Kimoto T.** Ultra-High Voltage Devices For Future Power Infrastructure. – <http://www.powerelectronicworld.net/article/1/19737542-ultra-high-voltage-devices-for-future-power-infrastructure.html>
4. **Kikkawa T., Hosoda T., Imanishi K. et al.** 600 V JEDEC-Qualified Highly Reliable GaN HEMTs on Si Substrates. – [ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?arnumber=7046968&filter%3DAND\(p_IS_Number%3A7046955](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?arnumber=7046968&filter%3DAND(p_IS_Number%3A7046955)
5. **Cooke M.** Power & speed highlights for compound semiconductors. – www.semiconductor-today.com/features/PDF/semiconductor-today_february2015-Power-speed.pdf
6. **Sin H.** Normally-off and Current Collapse free GaN Transistor. – ru.mouser.com/applications/wide-bandgap-gan-transistor/
7. **Майская В.** Конференции IEDM и ISSCC. Лучшие из лучших. – Электроника: НТБ, 2014, № 2, с.32–37.
8. **Natarajan S., Agostinelli M., Akbar S. et al.** A 14nm Logic Technology Featuring 2nd-Generation FinFET Transistors, Air-Gapped Interconnections, Self-Aligned Double Patterning and a 0,0588 μm^2 SRAM cell size – <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/pdf/foundry/intel-14nm-iedm-2014-presentation.pdf>
9. **Smith R.** Intel's 14nm technology in detail. – www.anandtech.com/show/8367/intels-14nm-technology-in-detail
10. **James D.** IEDM-\$5onday was FinFET Day. – www.chipworks.com/en/technical-competitive-analysis/resources/blog/iedm-monday-was-finfet-day
11. **Johnson R.C.** Intel, IBM Dueling 14nm FinFETS. – www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1324343
12. **Shilov A.** TSMC reveals new 16nm FinFET+ process, vows to start 10nm production in Q4 2015. – www.kitguru.net/components/graphic-cards/anton-shilov/tsmc-reveals-new-16nm-finfet-process-vows-to-start-10nm-production-in-q4-2015/



Ростехнологии

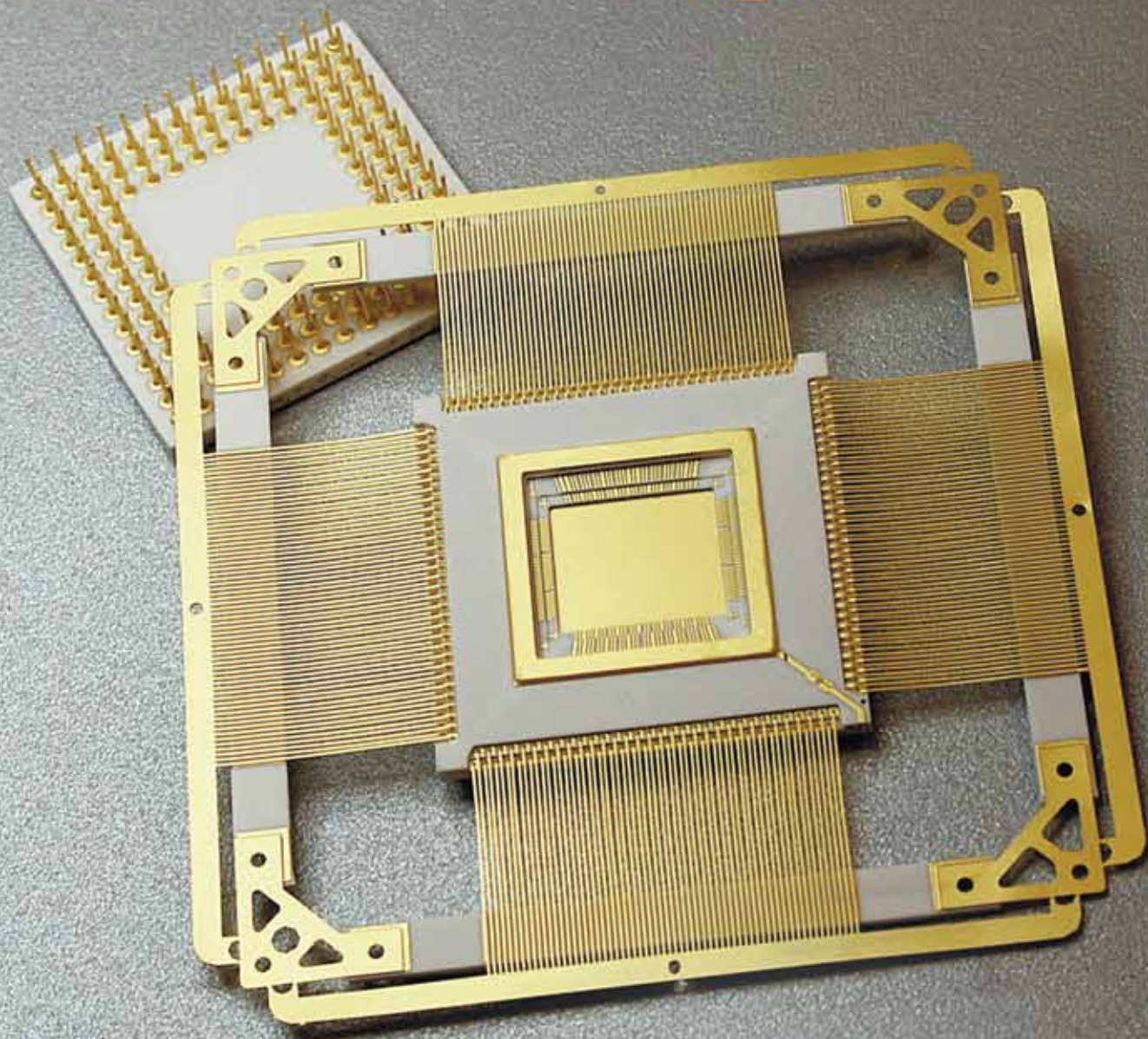
Росэлектроника

Холдинговая компания

ОАО «Российская электроника»



ОАО «Завод
полупроводниковых
приборов»



**ОАО «Завод полупроводниковых приборов» –
разработка и производство металлокерамических
корпусов для микросхем**

- 2-й тип (DIP)
- 4-й тип (QFP)
- 5-й тип (LLCC)
- 6-тип (PGA)
- 8-тип (BGA)
- корпуса типа LCC (безвыводные)
- основания типа DIP
- оптоэлектронные корпуса



424003, Республика Марий Эл,
г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26

Телефон: +7 (8362) 45-70-09
Факс: +7 (8362) 42-13-39, 41-33-11
info@zpp12.ru, www.zpp12.ru