

IEDM 2010

НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

М.Гольцова

Уже более 55 лет крупнейший мировой форум – ежегодная Международная конференция по электронным приборам (International Electronic Devices Meeting, IEDM) – освещает крупнейшие научные, технологические, конструктивные и производственные достижения в микроэлектронике, нанотехнологиях, опто- и биоэлектронике. Доклады охватывают широкий круг вопросов – от субмикронной технологии КМОП-устройств до новейших дисплеев и систем преобразования изображения, от новых полупроводниковых соединений до нанотехнологий и архитектур, от устройств, изготавливаемых методами микрообработки, до мощных интеллектуальных приборов. Такой диапазон рассматриваемых на конференции вопросов отражает как увеличение сложности различных интегрированных электронных устройств по мере совершенствования технологии, так и необходимость развивать междисциплинарные разработки. С 1955 года крупные технические достижения, о которых ежегодно сообщалось на IEDM, реализовывались в виде новых востребованных на рынке изделий и решений. Что показала конференция 2010 года?

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Конференция IEDM 2010 прошла 6–9 декабря 2010 года в отеле Hilton в Сан-Франциско. В ее работе участвовали 1645 представителей промышленности и научных организаций из разных стран мира. Представителей промышленности на конференции было на 50% меньше, чем раньше и, соответственно, было зачитано заметно меньше актуальных для промышленности докладов, чем в предыдущие годы. Число специалистов научных институтов и вузов возросло, а участие государственных организаций не изменилось. По-видимому, эта ситуация отражает изменения, происходящие в последнее десятилетие в промышленности, когда все меньше компаний проводят перспективные НИОКР и промышленность все больше зависит от исследований, проводимых высшими учебными и академическими институтами, а также от работ объединений независимых компаний. И если раньше, стремясь соблюдать закон Мура, усилия полупроводниковых компаний были направлены на разработку устройств высокого технического уровня и быстрого выпуска их на рынок, то теперь они не хотят раскрывать свои планы в области новейших технологий. В результате на кон-

ференции 2010 года присутствовало значительно меньше ведущих производителей, готовых сообщить о своих последних достижениях. Многие доклады носили академический характер или не раскрывали полностью обсуждаемую тему. Участники конференции так и не выработали единого мнения о структуре следующих поколений транзисторов с топологическими нормами (узлами) менее 20/22-нм. Правда, изготовители микросхем единодушно признали, что, несмотря на активные новые и экзотические разработки, решение о развитии той или иной технологии или транзисторной структуры будет зависеть в первую очередь от экономических и стоимостных факторов. И, возможно, ряд технологий, о которых докладывалось на IEDM 2010, так и не будут реализованы [1, 2].

До официального открытия конференции 5 декабря были проведены два коротких семинара: "15-нм КМОП-технология" под председательством компании Intel и "Надежность и выход годных, обеспечиваемых перспективными технологиями" под председательством Независимого исследовательского центра в области микроэлектроники (IMEC, Бельгия) [3]. Доклады, представленные на первом семинаре, показали,

что пределы активно проводимого полупроводниковой промышленностью масштабирования КМОП-микросхем пока не определены, как, впрочем, практически не был зафиксирован и конец "классического" масштабирования КМОП-микросхем, который произошел на уровне 130-нм норм и который, по утверждению компании Intel, "никто не заметил".

Компания Intel считает, что масштабирование микросхем будет продолжаться еще долго [3] и планирует в четвертом квартале 2011 года начать массовое производство микросхем памяти по 22-нм технологии.

Другой важный аспект новейшей микроэлектроники – надежность микросхем, изготовленных по перспективным новым технологиям, которые уже не могут гарантировать создание высоконадежных компонентов. Поэтому необходимы методы проектирования надежных систем, выполненных на компонентах с низкой надежностью или по малонадежным технологиям. В ходе семинара, посвященного надежности будущих микросхем, рассматривались такие фундаментальные проблемы как:

- влияние на надежность операций первоначальной обработки (Front-End-Of-Line, FEOL) зависящего от времени пробоя диэлектрика (Time-Dependant Dielectric Breakdown, TDDDB) и температурной нестабильности смещения (Bias Temperature Instability, BTI), а также диэлектриков с высоким значением диэлектрической постоянной k ;
- влияние на надежность медной металлизации и диэлектриков с низким k , используемых на конечных операциях обработки (Back-End-Of-Line, BEOL), а именно – проблемы электромиграции носителей, формирования пустот под воздействием механических напряжений и TDDDB-диэлектриков;
- влияние масштабирования и новых архитектур на защищенность приборов, выполненных по новым технологиям, от электростатического разряда;
- выход годных, модели определения выхода годных и проектирование с учетом технологических требований.

Доклады, представленные на конференции, касались проблем перехода от технологии изготовления микросхем в соответствии с законом Мура к технологии "больше, чем Мур" [4], вопросов обеспечения энергоэффективности, новых развивающихся технологий. Открылась конференция тремя вступительными докладами, отражающи-

ми основные задачи, стоящие перед современной электронной промышленностью. Доклад президента Института перспективной технологии компании Samsung (Samsung Advanced Institute of Technology, SAIT) К.Кинама был посвящен задачам и возможностям будущей кремниевой технологии [5]. В области схем памяти, по его мнению, минимальные топологические нормы ДОЗУ к 2016 году составят 10 нм (рис.1). Поскольку эффекты короткого канала и уменьшение числа хранимых электронов флеш-памяти NAND-типа препятствуют их дальнейшему масштабированию, будут развиваться микросхемы с трехмерным набором ячеек с минимальными размерами ~30 нм, и к 2013–2015 годам нормы трехмерных микросхем памяти NAND-типа также могут достигнуть 10 нм. В дальнейшем серьезным кандидатом для ее замены может стать низковольтное резистивное ОЗУ, или мемристор (ReRAM).

Что касается логических микросхем, при длине затвора МОП-транзисторов менее 20 нм из-за малой эквивалентной толщины затворного оксида кремния (EOT) и малой глубины переходов создание логических микросхем на основе планарных транзисторов будет затруднено. Потребуется новые структуры транзисторов и/или затворов. И такие компоненты уже существуют. Это вертикальные одно- и многозатворные трехмерные полевые транзисторы "плавникового" типа (FinFET и Multigate, MuG FinFET), полевые транзисторы с Ge-каналом или каналом на полупроводниковом соединении типа A^3B^5 , а также кремниевые микросхемы на полностью обедненном носителем изоляторе (FD SOI). Ожидается, что транзисторы типа MuG FinFET с топологическими нормами 10 нм

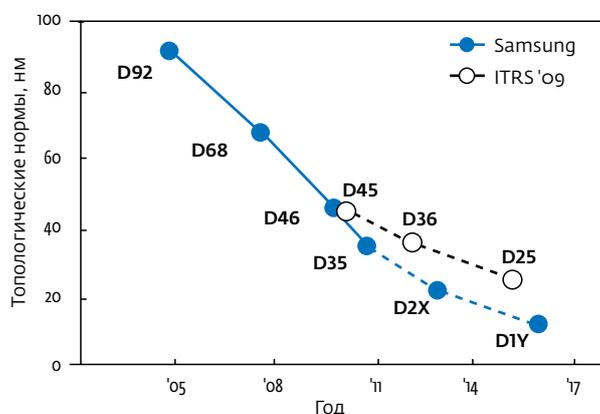


Рис.1. Развитие технологии микросхем ДОЗУ в соответствии с программой развития мировой полупроводниковой технологии (ITRS) и прогнозом компании Samsung

найдут применение в 2020 году. Для обеспечения низкого тока утечки затвора и высокой надежности таких транзисторов толщина затворного диэлектрика должна составлять ~60 нм, а k должно превышать 40 (значение k используемых сегодня пленок диоксида гафния HfO_2 толщиной менее 80 нм не превышает 20). Очевидно, получить диэлектрики с высоким k можно за счет фазового преобразования HfO_2 или ZrO_2 с помощью различных методов их легирования и обработки.

Решить задачу совершенствования характеристик логических микросхем, по мнению Кинама, можно с помощью следующих средств:

- напряженного кремния с целью увеличения подвижности носителей. Правда, для этого нужны более глубокие знания процессов формирования напряженного материала и его влияния на характеристики затвора при уменьшении размеров элементов;
- новых материалов канала с высокой подвижностью электронов, таких как Ge для р-канальных полевых транзисторов и InGaAs для п-канальных транзисторов;
- нанопроводов, графена и туннельных полевых транзисторов с целью увеличения подвижности носителей или обеспечения чрезвычайно малого отклонения порогового напряжения (рис.2). Кремниевые КМОП-схемы с каналом на основе полупроводникового соединения A^3B^5 и/или графеновые приборы, созданные

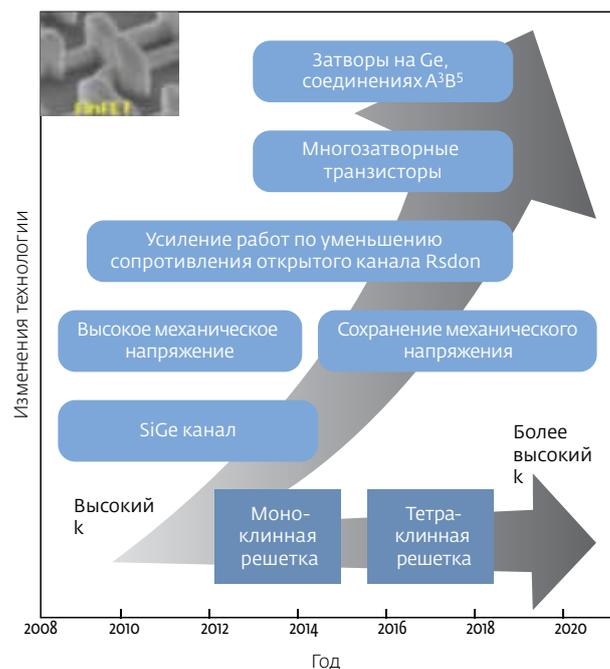


Рис.2. Ключевые технологии будущих кремниевых КМОП-микросхем

на кремнии, – перспективные кандидаты для изготовления системы на кристалле, в которой новые приборы будут выполнять высокопроизводительные функции, а традиционные КМОП-микросхемы – остальные функции.

Но какая бы технология не была выбрана, она должна быть совместимой с кремниевой технологией.

Для успешного создания 3D-структур многие вновь образованные (start-ups) компании активно работают в области формирования сквозных отверстий через кремний (Through-Silicon-Via, TSV). Здесь, очевидно, большое значение имеет правильный выбор метода получения TSV – после изготовления схемы, на промежуточных этапах, до изготовления или после сборки в корпус. Вероятно, для создания трехмерных кремниевых схем вместо печатных плат или керамических подложек целесообразно использовать TSV-пластины с короткими соединительными линиями и тем же коэффициентом теплового расширения, что и у кремниевых микросхем. Пока на рынке 3D-устройств на основе TSV-технологии немного. В основном это КМОП-датчики изображения, МЭМС-устройства и некоторые типы усилителей мощности. Для успешного освоения TSV-технологии потребуется решить ряд технологических и конструктивных проблем, таких как:

- предотвращение диффузии меди в кремний путем улучшения травления бокового профиля отверстий, изоляции облицовки и профиля барьера;
- определение размера TSV и их шага относительно соседних транзисторов;
- трассировка проводников;
- контроль температуры;
- обеспечение механической стабильности.

Кроме того, сегодня еще нет необходимого инструментария проектирования таких микросхем. Нужны средства совмещения операций сборки и испытания 3D-устройств. Отсутствуют стандарты. Для реализации 3D-устройств по TSV-технологии необходимо решить и проблему формирования интерфейсов логических устройств—запоминающих устройств, логических устройств—устройств на печатной плате. И, конечно, эти устройства недешевы. Поэтому, скорее всего, производители микросхем сначала обратятся к так называемым 2,5D-приборам с использованием промежуточных слоев для разводки межсоединений, которые, по-видимому, найдут широкое применение в 2012 году, тогда как 3D-микросхемы на основе TSV-технологии, очевидно, получат распространение лишь в 2013–2015 годы.

Морально устаревшее производственное оборудование, используемое для изготовления кремниевых микросхем, может быть успешно использовано в других отраслях электронной промышленности. Так, недавно на кремниевых подложках с (111) ориентацией были выращены высококачественные эпитаксиальные пленки GaN толщиной 3,5 мкм с концентрацией электронов $4,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, пригодные для создания светодиодов белого излучения. На основе пленки была изготовлена структура светодиода с вертикальным размером $1 \times 1 \text{ мм}$ и выходной мощностью 430 мВт при токе схемы управления 350 мА, что сопоставимо с характеристиками GaN-светодиодов на сапфире.

Доклад первого вице-президента и генерального управляющего отделением систем управления электропитанием и электродвигателей компании Infineon Technologies А.Миттала был посвящен обеспечению энергоэффективности сети электропитания с помощью инновационных электронных устройств [6]. Современные полупроводниковые и электронные устройства способствуют уменьшению потерь электроэнергии в сети питания как при ее генерации, так и при передаче и потреблении. В электроприводах, потребляющих ~55% генерируемой в мире энергии, с помощью системы регулировки частоты вращения двигателя можно добиться 25-40% экономии. В источниках света, потребляющих ~20% генерируемой электрической энергии, применение новых микросхем совместно со светодиодными светильниками также поможет существенной экономии энергии.

Наиболее перспективны сейчас импульсные источники питания на основе МОП полевых транзисторов с быстрым восстановлением (Super-Junction MOSFET), IGBT и полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом (Junction FET, JFET) (см. таблицу). Впервые представленные в 2001 году транзисторы типа Super-Junction MOSFET, изготавливаемые на подложках карбида кремния, совместно с новыми схемами управления электропитанием, позволят более чем на 90% улучшить эффективность источ-

ников питания. Разумное объединение генераторов электроэнергии, эффективных средств ее распределения и передачи приведет к созданию "интеллектуальной" электросети (smart grid), которая обеспечит эффективное использование электроэнергии и удовлетворение растущих потребностей в ней.

А.Миттал также отметил, что по мере развития технологии микроэлектроники и повышения плотности мощности и температуры переходов транзисторов все больше внимания следует уделять вопросам корпусирования силовых приборов.

Адъюнкт-профессор отделения биотехнологии Калифорнийского университета в Беркли Люк Ли в третьем вступительном докладе отметил, что сегодня как никогда актуальны проблемы качественной медицины и создания на основе бионауки и технологии эффективных и дешевых средств здравоохранения [7]. Ли познакомил слушателей с инновационными биологическими и медицинскими решениями, реализуемыми с помощью наноспутников (перспективных космических аппаратов массой от 1 до 10 кг), которые выполняют функции позиционирования, формирования изображения и геномной регуляции. Интерес представляют и биологические специализированные интегральные схемы (BASICS) на основе интегрированных новых микрофлюидных и нанофлюидных схем, способные точно описывать динамику живых клеток. Учеными Калифорнийского университета созданы наноспутники, представляющие собой изготовленные из золота полые серповидные оптические наноантенны размером 20-500 нм, резонансная частота которых соответствует длине волны падающего светового излучения. Разработаны также зонды, позволяющие переносить резонансную энергию плазмона (Plasmonic Resonant Energy Transfer, PRET) и фиксировать кинетику молекул живых клеток. Отмечается, что эти работы ведутся при поддержке DARPA, Национального научного фонда, Центра технологий медицинской радиологии, Национального института здравоохранения и компании Intel.

Сравнение трех архитектур силовых приборов, предназначенных для применения в высоковольтных системах

| Параметр | Super-Junction MOSFET | IGBT | JFET на карбиде кремния |
|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Уровень напряжения, В | 500-900 | 600-6500 | 600-1700 |
| Состояние при $V_{gs} = 0$ | | Работает в режиме обогащения | Работает в режиме обеднения |
| Проводимость | Основные носители | Оба типа носителей | Основные носители |
| Потери проводимости | $I^2 \times R_{Dson}$ | $\sim I \times V_{CEsat}$ | $I^2 \times R_{Dson}$ |
| Потери на переключение | Чрезвычайно низкие | Средние | Чрезвычайно низкие |
| Стоимость | Средняя | Низкая | Высокая |

Еще один доклад, посвященный развитию мобильных беспроводных систем связи, был прочитан 7 декабря старшим вице-президентом и генеральным управляющим оперативного подразделения компании Qualcomm CDMA Technologies Д.Клиффордом. Он рассмотрел проблемы развития производства изделий микроэлектроники [8]. Это не удивительно. Хотя компания Qualcomm является чистым разработчиком чипсетов для беспроводных средств связи, не располагающим производственными средствами (fabless), она входит в число десяти крупнейших поставщиков полупроводниковых приборов. Это можно объяснить тесным сотрудничеством с такими крупными производителями, как Freescale, GlobalFoundries, SMIC, TSMC и UMC.

Проблемы, стоящие перед производителями микроэлектроники, те же, что и у разработчиков:

- экономические: начиная с 90-нм технологии, стоимость производства транзистора при переходе к следующей топологической норме уменьшалась на 29%. Можно приветствовать переход к 450-мм пластинам. Но новые технологии могут оказаться очень дорогими и не соответствовать кривой снижения стоимости в соответствии с законом Мура;
- необходимость сотрудничества при освоении новых технологий¹;
- переход к новым методам литографии: вместо импринтлитографии с двойным экспонированием более широкое распространение получит жесткая УФ-литография (EUV). Нидерландская компания ASML Holding NV, крупнейший в Европе производитель оборудования для производства полупроводниковых приборов, напряженно работает над тем, чтобы в ближайшее время начать поставки пригодного для промышленного применения EUV-оборудования. Правда, по мнению Клиффорда, EUV-литография, которая пока не готова к освоению в производстве, требует весьма и весьма большого напряжения сил;
- новые материалы: если в 1980-е годы изготовители микросхем использовали десять элементов таблицы Менделеева, в 1990-е – 15, то сейчас они применяют около 55 элементов;
- срок службы батарей. Промышленность сейчас находится на полпути к "кризису в области управления электропитанием";
- необходимость согласования процессов изготовления и проектирования кремниевых микросхем.

- Каков же ответ электронных компаний на поставленные задачи?

МАСШТАБИРОВАНИЕ, МОЩНОСТЬ, БЫСТРОДЕЙСТВИЕ И ДРУГИЕ ДОСТИЖЕНИЯ

Масштабирование

Сейчас на рынке представлены микроэлектронные устройства на основе традиционной планарной КМОП-технологии. Однако с новыми технологиями и различными вариантами структуры транзистора работают практически все полупроводниковые компании. Так, компания Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) объявила на конференции о планах по выпуску во второй половине 2012 года микросхем памяти на основе FinFET с 0,22-нм топологическими нормами, а также о начале строительства предприятия по массовому производству микросхем 7-нм поколения. Новые n- и p-канальные FinFET компании характеризуются лучшими для этого класса транзисторов значениями тока в открытом и закрытом состояниях – $I_{отк} = 1200(n)/1100(p)$ мкА/мкм и $I_{зак} = 100$ нА/мкм (для n- и p-транзисторов) при напряжении 1 В. Структура FinFET формировалась с помощью 193-нм иммерсионной литографии и оптимизированного процесса травления на основе эпитаксиальных пленок кремния и легированного бором SiGe, диэлектрика с высоким k и металлического затвора. Пленка SiGe вносила дополнительное относительное сжатие p-канала транзистора, что приводило к увеличению подвижности носителей. С помощью этой технологии была изготовлена микросхема СОЗУ с площадью ячейки памяти 0,1 мкм². Запас памяти по помехоустойчивости составил 90 мВ при напряжении 0,45 В.

Интерес аналитиков вызывали планы активного сторонника "объемной" КМОП-технологии – компании Intel. Из интервью специалистов компании известно, что при производстве 22-нм микросхем они не намерены применять жесткую EUV-литографию. Возможно, компания продолжит работать с 193-нм иммерсионной литографией и при изготовлении устройств 11-нм поколения. По мнению экспертов консалтинговой компании Piper Jaffray & Co., возможно, в 22-нм микросхемах Intel транзисторы будут выполнены с германиевыми каналами или каналами на основе соединенных A³B⁵, или на полностью обедненных КНИ, что позволит существенно улучшить характеристики выпускаемых изделий, и на три-пять лет опере-

¹ Макушин М. Микроэлектроника: здравствуй, олигополия! См. наст. номер, с.114.

дить конкурентов. Правда, руководство компании VLSI Research считает, что такая консервативная компания, как Intel, до перехода к новой технологии должна сначала определить все рабочие характеристики транзисторов и функции нового устройства, а также их стоимость. Тем не менее, следует отметить, что Intel не отрицает экспериментов с микросхемами на полностью обедненных КНИ-подложках, 3D-схемами со сквозными отверстиями через кремний, TSV и р-канальными полевыми транзисторами на полупроводниковых соединениях A^3B^5 с Ge-каналом. Но такие устройства появятся не раньше чем через два-три года.

МОП-транзисторы на полупроводниковых соединениях представляют собой приборы n-типа, но для КМОП-схем необходимы и транзисторы p-типа, для чего и создается Ge-канал. На IEDM 2010 Intel сообщила о разработке р-канального полевого транзистора на основе структуры с квантовыми ямами (QWFET) и с германиевым каналом, который предназначен для маломощных A^3B^5 КМОП-микросхем [9]. Транзистор выполнен с затвором со структурой HfO_2/TiN , самосовмещенными областями истока/стока, полученными имплантацией ионов бора, и изолирующим слоем фосфора, подавляющим параллельную проводимость буферного слоя GeSi. При толщине оксида 145 нм подвижность носителей (дырок) равна $770 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при их плотности $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Это самое высокое значение подвижности для оксидов толщиной менее 400 нм, в четыре раза превышающее этот показатель для совершенных структур с напряженным кремнием.

Участниками конференции отмечен совместный доклад представителей Стенфордского университета, Стенфордского центра линейных ускорителей и Исследовательской лаборатории ВМС, посвященный созданию транзисторов полностью на антимониде индия галлия с подвижностью дырок $910 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для утопленного канала и $620 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ — для поверхностного [10]. Отношение токов в открытом и закрытом состояниях превышало 10^4 . Транзисторы изготавливались по технологии первоначального формирования затвора (gate first) при температуре 350°C .

Мощные полупроводниковые приборы

В последние годы растет интерес к компонентам мощных электронных устройств на нитридных полупроводниковых соединениях (нитриде галлия и нитриде алюминия галлия). Это обусловлено большой шириной запрещенной зоны таких соединений ($>3,4 \text{ эВ}$), благодаря чему приборы на их основе могут работать при более высоких

пробивных напряжениях и меньших значениях удельного сопротивления канала в открытом состоянии (R_{spont}), чем традиционные кремниевые компоненты (рис.3). Кроме того, они способны выдерживать и более высокие рабочие температуры. Поэтому неудивительно, что две секции IEDM – "Развивающиеся технологии – следующее поколение мощных приборов и технологий" и "Перспективные мощные компоненты и надежность" – привлекли внимание участников конференции [11].

Сейчас в силовом оборудовании в основном используются недорогие кремниевые компоненты, разработка и производство которых поддерживается хорошо развитой инфраструктурой. И, по-видимому, кремниевые приборы еще не один год будут доминировать на рынке. Но им "на пятки" все активнее наступают компоненты на нитридных соединениях и на карбиде кремния. Ряд компаний и организаций, например, Университет Калифорнии в Санта-Барбаре и компания ACOO Enterprises LLC (консультант в области полупроводниковых материалов и промышленной технологии, мощных приборов и организации НИОКР), видят большие возможности для компонентов на GaN и SiC. Ученые Калифорнийского университета показали, что напряжение пробоя

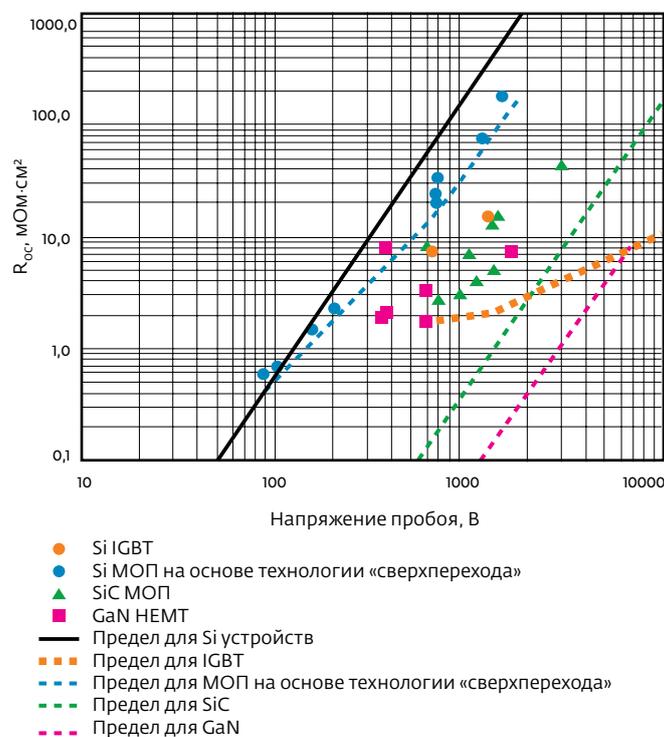


Рис.3. Зависимость удельного сопротивления в открытом состоянии от напряжения пробоя мощных компонентов на основе различных материалов

работающего в обедненном режиме AlGaN HEMT с наклонным металлическим электродом, модулирующим поле затвора (field plate, FP), может достигать 1900 В. Время переключения этого транзистора не превышало 20 нс, при этом полученное значение напряжения пробоя было ограничено схемой возбуждения затвора. Для транзисторов с аналогичной структурой, работающих в обогащенном режиме, пробивное напряжение равно 1400 В. Это одно из самых больших значений $V_{проб}$ для работающих в обогащенном режиме HEMT на основе нитридных соединений. Расчетное значение $R_{он}$ составило 3 Ом·см².

С точки зрения предотвращения разрушения прибора вследствие дугообразования на поверхности ученые считают более перспективными AlGaN HEMT с вертикальной структурой. Вертикальная структура удобна для корпусирования транзистора и, к тому же, ее площадь меньше традиционной горизонтальной структуры. Кроме того, поскольку область с сильным электрическим полем расположена под электродом затвора, ослабляется связанное с поверхностным состоянием рассеяние электронов [12].

Консультант компании ACOO Enterprises LLC М.Брайер рассмотрел перспективы применения GaN HEMT в модулях стабилизации напряжения многоядерных процессоров [13]. По его утверждению, такие модули обеспечат прямое эффективное (добротность более 85%) преобразование напряжения в 12 или даже 48 В до напряжения нагрузки на достаточно высокой частоте. При этом модули можно интегрировать с процессором в корпус или непосредственно на кристалле. Правда, пока еще разработка таких модулей находится на ранней стадии. Показатель качества – произведение $R_{он} \cdot Q_g$ (где Q_g – заряд затвора при перепаде напряжения переключения) – первых образцов модулей стабилизированного питания на основе GaN HEMT компании International Rectifier был равен 30 мОм·нК против 45–75 мОм·нК для модулей на основе кремниевых полевых транзисторов с утопленным каналом (TrenchFET) той же компании. По оценкам ACOO Enterprises, достичь такого показателя качества промышленных модулей, выполненных на базе

30-В GaN-транзисторов с частотой переключения выше 50 МГц и пригодных для питания многоядерных процессоров, удастся через пять лет.

Интерес вызвал описанный компанией Panasonic метод увеличения запирающего напряжения мощных GaN полевых транзисторов на гетеропереходе, изготовленных на высокоомной кремниевой подложке [14]. Изучение механизма формирования запирающего напряжения такого транзистора, которое провели специалисты компании, показало, что его значение ограничено током утечки, вызванного электронами инверсионного слоя на границе раздела нитрида галлия и кремния. В компании эта проблема была решена с помощью новой структуры повышения запирающего напряжения (Blocking-Voltage-Boosting, BVB). Структура включает селективно формируемые ионной имплантацией на поверхности кремниевой подложки области р-типа (рис.4). Эти области предотвращают утечку за счет электронов инверсионного слоя, благодаря чему к напряжению транзистора добавляется запирающее напряжение подложки. Согласно данным компании Panasonic, запирающее напряжение транзистора, изготовленного на эпитаксиальной пленке GaN толщиной 1,9 мкм, составило 2000 В. Утверждается, что при увеличении толщины пленки нитрида галлия запирающее напряжение может быть повышено до 3000 В. Компания подала 99 заявок на отечественные патенты и 64 – на иностранные патенты.

Ученые Стокгольмского королевского университета технологии (KTH Royal Institute of

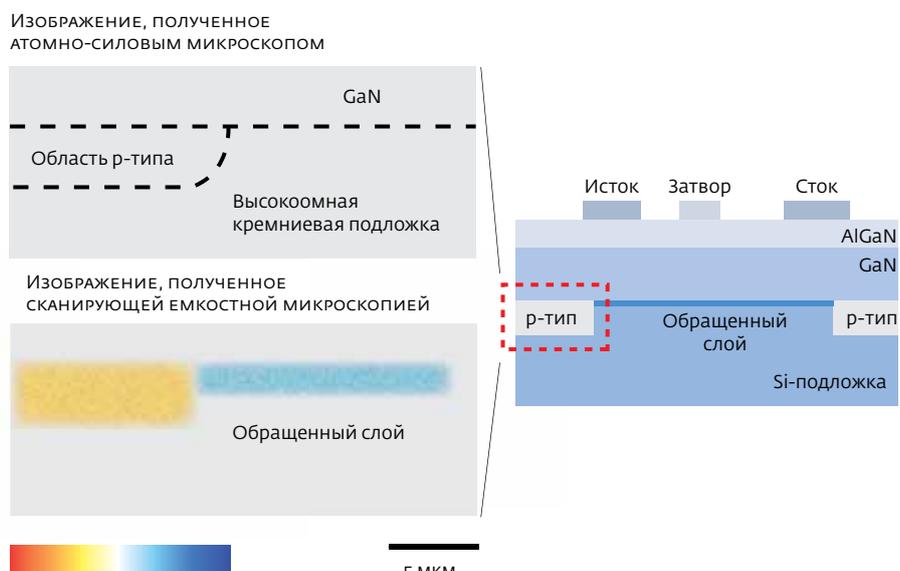


Рис.4. Мощный GaN-транзистор на кремниевой подложке со структурой увеличения запирающего напряжения (BVB)

Technology) считают карбид кремния перспективным материалом для изготовления мощных приборов, предназначенных для развивающихся рынков гибридных транспортных средств и фотоэлектрических преобразователей, а также источников питания [15]. Основное преимущество SiC-приборов перед мощными кремниевыми компонентами – значительно меньшие потери энергии при переключении (0,44 мДж для SiC JFET, работающего в обогащенном режиме, компании SemiSouth, против 1,55 мДж для Si IGBT компании Infineon). Сегодня спрос на приборы на карбиде кремния быстро растет. Этому способствует выпуск полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом, МОП полевых транзисторов и биполярных транзисторов на карбиде кремния. Появились сообщения о разработке SiC биполярных транзисторов на напряжение 1200 В, способных непрерывно работать без так называемого эффекта биполярной деградации, а также о создании запираемого тиристора (Gate Turn-Off thyristor, GTO) площадью 1×1 см² на напряжение 9 кВ и импульсный ток 3 кА (длительность импульса 1 мс). Правда, по-видимому, рынок приборов на карбиде кремния достигнет значительного объема лишь к 2014 году, когда начнется их широкое применение в фотоэлектрических инверторах и гибридных транспортных средствах.

Таким образом, разработка мощных приборов на GaN и SiC быстро набирает силу. Но вопрос о том, будет ли им или одному из них отдано предпочтение на рынке мощных устройств, пока не ясен. Все зависит от возможности масштабирования, надежности и стоимости этих компонентов. Победителя определяют такие показатели, как достижимый выход годных и более высокие в сравнении с кремниевыми приборами характеристики.

Память

Несколько секций конференции были посвящены проблемам, стоящим перед разработчиками и производителями микросхем памяти, технология которых "выдыхается". Поэтому интерес участников конференции вызвал доклад представителя компании Hynix Semiconductor, посвященный тенденциям развития современных и будущих микросхем памяти. Сегодня на рынке представлены всего пять компаний с массовым производством микросхем памяти (ДОЗУ и флеш NAND-типа) – Samsung Semiconductor, Toshiba, Hynix, Micron Technology и Elpida. При этом Samsung, Hynix и Micron

выпускают как ДОЗУ, так и флеш-память, Toshiba – флеш-память и Elpida – ДОЗУ. Сложившуюся ситуацию в области производства микросхем памяти обостряют проблемы масштабирования схем памяти обоих типов, для решения которых необходимо осваивать новые элементы. Для конденсаторов микросхем ДОЗУ таким элементом может стать диэлектрик со сложной структурой – TiN/ZrO₂/Al₂O₃/ZrO₂/TiN, эквивалентная толщина окисла (EOT) которого может быть менее 0,5 нм, а ток утечки меньше, чем при использовании диэлектрика с высоким k .

Для схем флеш-памяти NAND-типа с плавающим затвором частичным решением проблемы уменьшения емкостной связи между шинами (слов или разрядов) может стать предложенный компанией Micron метод создания воздушных зазоров. Воздушная "развязка" соседних электродов затворов и соседних шин слов использована в 25-нм микросхеме флеш-памяти емкостью 64 Кбит с многоуровневыми ячейками, выпущенной компаниями Intel и Micron. По всей вероятности, этот метод впервые освоен в промышленности. Правда, по мнению экспертов, термин "воздушный зазор" не совсем правильный. Скорее всего, зазор между проводящими линиями – вакуумный, заполненный остаточными газообразными элементами, присутствовавшими в камере осаждения [16].

Специалисты Micron также показали, что в микросхеме флеш-памяти с 25-нм нормами в плавающем затворе присутствуют около десяти электронов, вызывающих смещение порогового напряжения на 100 мВ. Таким образом, в схеме с многоуровневой структурой ячеек при разделении уровней в 300–500 мВ число электронов в ячейках отличается примерно на 3–50. При таком уровне чувствительности любое количество ловушек в структуре затвора будет влиять на пороговое напряжение, поэтому нужно активно решать задачу минимизации концентрации ловушек и тока утечки.

Самый отработанный на сегодняшний день новый тип энергонезависимой памяти – память с изменением фазового состояния (Phase Charge Memory, PCM). Но такие устройства предназначены лишь для замены флеш-памяти NOR-типа. Реальный кандидат для создания новых систем памяти – резистивные ОЗУ (ReRAM или RRAM). Скорость переключения резистивной памяти может быть менее 10 нс, а структура ее ячейки – проще и меньше (площадь конденсатора менее $8F^2$), чем у магнитной памяти. В сравнении с флеш- и

"трековой" памятью (racetrack memory), разработка которой была начата компанией IBM в 2005 году, резистивная память работает при более низких напряжениях. На IEDM 2010 представители Исследовательского института промышленных технологий Тайваня сообщили о создании резистивного ОЗУ, время переключения которого не превышало 0,3 нс. Разработчики утверждают, что за счет совершенствования технологии и процесса изготовления схемы можно добиться 100%-ного выхода годных. Правда, для коммерческой реализации ReRAM необходимо определить наиболее подходящий материал, выявить факторы, влияющие на рабочие характеристики и стоимость памяти. И главное – пока принцип работы этого типа памяти полностью не объяснен.

Единственный кандидат, обладающий быстрым действием и долговечностью, требуемыми для замены схем ДОЗУ, – оперативная память с задачей спинового вращательного момента (Spin Torque Transfer RAM, STT-RAM), о разработках которой на конференции доложили компании IBM-MAGIC (совместное венчурное предприятие IBM и TDK), Samsung Electronics, а также Hynix-Grandis. Группа специалистов IBM-MAGIC изучила свойства памяти типа STT-RAM на основе магнитных туннельных переходов (МТ) с перпендикулярной магнитной анизотропией (РМА). Ими показана возможность создания на основе таких МТ 90-нм микросхемы памяти емкостью 64 Кбит с 2-бит кодом коррекции ошибок. Отмечается, что для получения приемлемых размеров ячейки памяти ток записи не должен превышать 350 мкА.

Специалисты компаний Hynix и Grandis пошли по пути создания STT-RAM с размером ячейки $14F^2$ с помощью модифицированного процесса изготовления ДОЗУ с 54-нм нормами. В отличие от памяти IBM-MAGIC схема выполнена на планарных магнитных туннельных переходах, поскольку разработчики считают, что получению РМА-переходов препятствуют трудности формирования пленок с РМА и высокий коэффициент затухания магнитного поля. Кроме того, высказывается сомнение относительно термостабильности характеристик и стабильности тока переключения РМА МТ.

Работы компании Samsung показали возможность масштабирования STT-MRAM с осевым расположением МТ и создания ячеек памяти размером $6-8F^2$ против $12-16F^2$ для схем памяти с неосевым расположением МТ. Плотность тока переключения может быть уменьшена до 1 mA/cm^2 , а плотность рабочего тока – до $0,8 \text{ mA/cm}^2$. Путем

дальнейшего совершенствования ферромагнитного электрода и структуры МТ возможно продвижение в область 20-нм и менее топологических норм.

ВЧ/СВЧ-устройства

На конференции не были обойдены вниманием новые приборы и техника моделирования ВЧ/СВЧ-устройств. Компания HRL Laboratories совместно с Лабораторией реактивного движения NASA представили GaN HEMT с двойным гетеропереходом и каналом длиной 40 нм. Получены рекордные для транзисторов этого типа значения предельной f_T и максимальной f_{max} частот – 220 и 400 ГГц, соответственно. Вертикальное масштабирование AlN/GaN/AlGaIn гетероструктуры транзистора и рекристаллизация GaN n⁺-контактов с помощью молекулярной эпитаксии обеспечили отличные статические характеристики: $R_{on} = 0,81 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$, $I_{dmax} = 1,61 \text{ A/мм}$, $BV_{off} = 42 \text{ В}$ и $g_m = 723 \text{ мСм/мм}$.

Разработчики транзисторов на полупроводниковых соединениях все активнее вторгаются в миллиметровый диапазон длин волн. Так, специалисты Массачусетского технологического института сообщили о создании InGaAs HEMT с контактами на основе молибдена и малой паразитной емкостью затвора, изготовленного по разработанной ими технологии самосовмещенного затвора. Сопротивление контактов составило 7 Ом·мкм, сопротивление истока – 147 Ом·мкм. Омические контакты на основе молибдена отличались высокой термостабильностью при температурах до 600°C. Показано, что крутизна g_m InGaAs HEMT с длиной затвора 60 нм, изготовленных по разработанной технологии, составляет 2,1 мСм/мкм при $V_{DS} = 0,5 \text{ В}$, а $f_T = 580 \text{ ГГц}$ и $f_{max} = 675 \text{ ГГц}$ при $V_{DS} = 0,6 \text{ В}$. Разработчики считают, что они на верном пути к реализации транзисторов терагерцевого диапазона.

Еще дальше в достижении частот терагерцевого диапазона для транзисторов на полупроводниковых соединениях продвинулась компания Teledyne Scientific. Ее специалистами на InGaAs созданы псевдоморфные HEMT (pHEMT) с длиной затвора 50 нм, работающие в режиме обогащения, максимальная частота которых превышала 1 ТГц при напряжении сток-исток 0,75 В. Транзисторы изготавливались на 100-мм подложках фосфида индия. Толщина $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$ -канала составляла 10 нм.

Альтернативные источники энергии

Внимание участников конференции привлекло сообщение компании Fujitsu о создании гибридного

устройства, способного генерировать электричество при воздействии как тепла, так и света. Прибор может извлекать энергию тепла или света (самых типичных видов энергии окружающей среды) в результате объединения двух полупроводниковых материалов (р- и n-типов), каждый из которых выполняет функцию фотоэлектрического преобразователя или термоэлектрического генератора (рис.5). С помощью разработанных компанией органических материалов можно изготовить достаточно дешевый генератор электрической энергии. Новое устройство предназначено для применения в сенсорных сетях и медицинском оборудовании. Сейчас компания работает над улучшением характеристик прибора, выпуск которого планируется в 2015 году.

Новейшие устройства на графене

Еще одна сложная задача, стоящая перед полупроводниковой промышленностью, – освоение производства микросхем с минимальными размерами элементов менее 16 нм, которое, согласно прогнозам, начнется в обозримом будущем – ближе к 2013 году. Здесь речь уже идет о таких экзотических материалах, как графен или углеродные нанотрубки. И, конечно, такие разработки были представлены на конференции.

Специалисты Исследовательского центра Томаса Уотсона компании IBM доложили о создании графенового полевого транзистора на подложке карбида кремния (рис.6). Для получения поверхностного слоя графена подложка карбида кремния нагревалась в высоком вакууме до температуры 1450°C. Затем на графен осаждались параллельные электроды истока и стока, оставляя каналы открытого графена между ними. Для защиты на графен наносился 10-нм слой полимера – полигироксисегрена, после чего с помощью обычных процессов полупроводникового производства осаждались оксидный слой и металлический затвор.

Длина затвора транзистора равна 240 нм, граничная частота 230 ГГц (частота МОП полевых транзисторов с затвором такой же длины составляет 40 ГГц). Эта работа IBM впервые продемонстрировала возможность изготовления высокоэффективных устройств на основе графена с помощью традиционной полупроводниковой технологии. Перспективная область применения графенового транзистора – фотодетекторы. Применяв чередующиеся палладиевые и титановые электроды, разработчики изготовили фотодетектор со скоростью преобразования оптического сигнала более 10 Гбит/с.

В Колумбийском университете Нью-Йорка изготовлен графеновый полевой транзистор с ди-

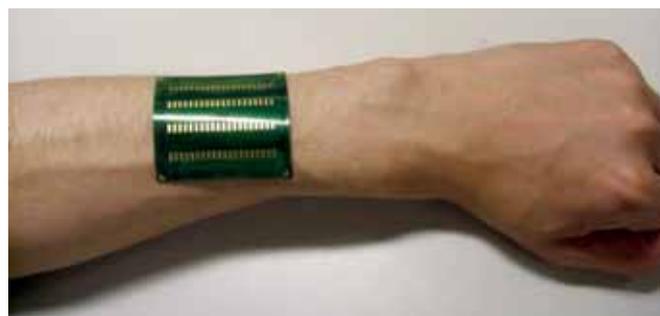


Рис.5. Образец гибридного генераторного устройства

электриком из гексагонального нитрида бора (h-BN). Рассогласования постоянных решетки гексагонального нитрида бора и графена составляет всего 2%, а теплопроводность h-BN в 600 раз больше, чем у двуокиси кремния. Подвижность носителей превысила 10000 см²/В·с, крутизна – 400 мСм/мм. Насыщение тока наблюдалось при значениях длины канала вплоть до 500 нм. В качестве омического контакта использовался Cr/AuPd, но отмечается необходимость проведения работ по уменьшению его сопротивления.

В Индийском институте науки смоделирован полевой транзистор с двойным затвором, полупроводниковыми областями истока и стока и двухслойным графеновым каналом. Проблема отсутствия запрещенной зоны в графене была решена путем ее формирования с помощью двух затворов. Цель работы – получение комплементарных униполярных полевых транзисторов с двухслойным графеновым каналом, пригод-

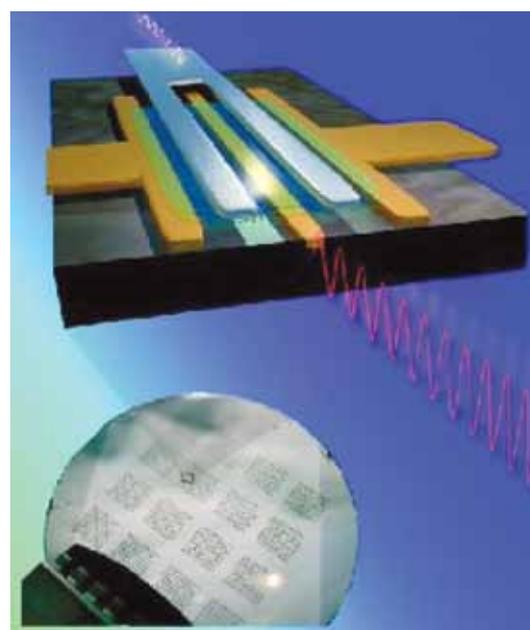


Рис.6. Графеновый полевой транзистор

ных для построения логических схем. По своим характеристикам транзистор соответствовал лучшим образцам кремниевых приборов – отношение токов в открытом и закрытом состояниях превышало 10^4 .

Интенсивное масштабирование КМОП-микросхем на протяжении многих лет было основной движущей силой развития микроэлектронной промышленности мира. Согласно Международному плану развития полупроводниковой технологии ITRS, к 2015 году будет освоено производство КМОП-микросхем с 22-нм топологическими нормами. Однако многие новые интересные способствующие улучшению качества жизни приложения наноэлектроники потребуют не только увеличения вычислительной мощности и объема памяти при сокращении их стоимости и энергопотребления, но и расширения функциональных возможностей микро- или скорее наносхем. Средствам связи, автомобильным электронным системам, оборудованию контроля окружающей среды и медицинской аппаратуре все больше требуются отличные от цифровых функции, присущие аналоговым и ВЧ-схемам, высоковольтным ключам, разнообразным сенсорам, исполнительным механизмам, альтернативным источникам энергии. А для их реализации нужны новые материалы, новые приборы, новые технологии, а также интеграция наноэлектронных и других инновационных устройств в микросхемы с помощью так называемых гетерогенных или смешанных технологических процессов.

Приведет ли гетерогенная интеграция к жизни после КМОП-микросхем или она продлит жизнь этим схемам в качестве ключевой технологии сложных систем, в которых разнообразные функции реализуются с помощью усовершенствованных КМОП-платформ? На эти вопросы пыталась ответить конференция IEDM 2010, хотя ответы получились не очень вразумительными.

Всего на 36 секциях конференции IEDM 2010 было зачитано более 200 докладов, но, к сожалению, как справедливо отметил Козьма Прутков, "Никто не обнимет необъятного". Поэтому здесь и остановимся.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEDM 2010 – www.his.com/~iedm/
2. IEDM 2010 too academic? or just right? – www.electroiq.com/index/blogs/eiq-blog-display/blogs/electroiq-blogs/eiqblog/post987_6403616626153564932.html
3. 2010 IEDM Short Course. – nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM%20Short%20Course/1-INTRODUCTION.PDF.
4. Дж.Хэйер, А.Петенко. Полупроводниковые технологии в Европе. Пути развития.— ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, №6, с.126–128.
5. Kinam Kim. From the Future Si Technology Perspective: Challenges and Opportunities. – nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM/DATA/S01P01.PDF
6. Mittal Arunjai. Energy Efficiency Enabled by Power Electronics. – nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM/DATA/S01P02.PDF
7. Lee Luke P. Bionano Science and Technology for Innovative Medicine – nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM/DATA/S01P03.PDF
8. Qualcomm Lists Challenges in IC Production. – www.eetimes.com/electronics-news/4211337/Qualcomm-lists-challenges-in-IC-production
9. Pillarisetty R., Chu-Kung B., Corcoran S. et al. High Mobility Strained Germanium Quantum Well Field Effect Transistor as the P-Channel Device Option for Low Power ($V_{cc} = 0.5$ V) III-V CMOS Architecture. – <http://download.intel.com/technology/silicon/IEDM-2010-paper-Ge-P-channel-QWFET.pdf>
10. Nainani A., Irisawa T., Ze Yuan et al. Development of high-k dielectric for Antimonides and a sub 350°C III-V pMOSFET outperforming Germanium. – <http://www.nrl.navy.mil/estd/pubs/10-1226-3885.pdf>
11. Cooke M. Power, speed and other highlights of IEDM 2010 – www.semiconductor-today.com/news_items/2010/DEC/IEDM_131210.htm
12. Mishra Umish K. AlGaIn/GaN Transistors for Power Electronics. – nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM/DATA/S13P02.PDF
13. Briere Michel A. Advanced Power Devices for Many-Core Processor Power Supplies. – nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM/DATA/S13P06.PDF
14. Umeda H., Suzuki A., et al. Blocking-Voltage Boosting Technology for GaN Transistors by Widening Depletion Layer in Si Substrate. – <http://nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM/DATA/S20P05.PDF>
15. Ostling Mikael. Silicon Carbide Based Power Devices. – nanosioe.ee.ntu.edu.tw/modules/2010%20IEDM/DATA/S13P03.PDF
16. IEDM 2010 Retrospective – Part 1 – http://www.electroiq.com/index/Semiconductors/sst-blogs/chipworks-blog-display/blogs/sst-blogs/chipworks/post987_1444520225576447187.html