

# МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ IEDM САМЫЕ БЫСТРЫЕ, САМЫЕ НЕБОЛЬШИЕ, САМЫЕ НЕОБЫЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

ЧАСТЬ II\*

М.Гольцова

Как правило, конференция IEDM – форум, на котором производители электронных изделий представляют новейшие технологические достижения. Конференция 2011 года не была исключением. Помимо перспектив развития технологии наноразмерных транзисторов, микросхем памяти и 3D-технологии внимание участников привлекли доклады, посвященные приборам на основе полупроводниковых соединений, новейшим квантовым и наноприборам, сенсорам, устройствам аккумуляции энергии.

## ПРИБОРЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ III-V

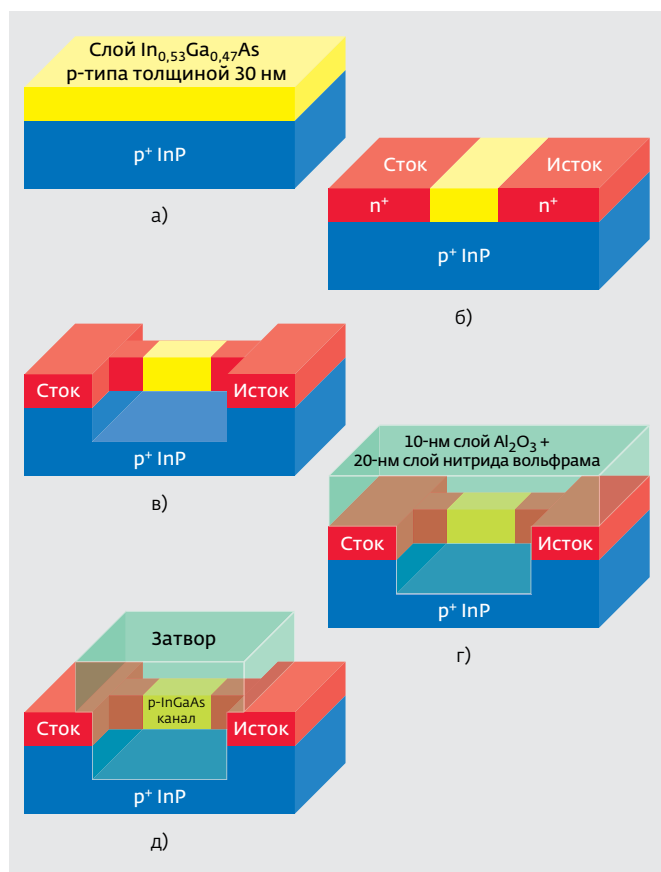
Многие десятилетия доклады на ежегодных конференциях IEDM посвящены успехам кремниевой технологии. Однако в последнее время число сообщений о разработках приборов на полупроводниковых соединениях группы III-V непрерывно растет, и в 2011 году достигло максимума. Рассматривались трехмерные МОП-транзисторы на полупроводниковых соединениях III-V, полевые транзисторы на квантовых точках с малым энергопотреблением, GaN-диоды и транзисторы с высоким пробивным напряжением и малым током утечки.

**Трехмерный InGaAs МОП-транзистор** впервые был представлен на IEDM 2011 учеными Университетов Пердью и Гарварда. Особенность разработанного  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  МОП-транзистора с окольцовывающими канал затворами – формирование структуры "сверху-вниз" в отличие от используемого сейчас метода создания структуры "снизу-вверх". Процесс изготовления трехмерного МОП-транзистора начинается с выращивания с помощью молекулярно-лучевой

эпитаксии поверх подложки фосфида индия  $p^+$ -типа слоя  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  толщиной 30 нм и последующей имплантации ионов кремния для создания  $p^+$ -областей стока и истока. Нанопровода, образующие канал, формируются в процессе литографии. Затем анизотропным травлением в соляной кислоте удаляется фосфид индия под InGaAs-каналами. Области каналов сначала "заворачиваются" в пленку окиси алюминия, получаемую осаждением атомных слоев. Затем на ободочку осаждается затвор из нитрида вольфрама (рис.1). По данным разработчиков, полученные нанопровода, образующие канал, способны выдерживать ток до 140 мкА, что больше тока лучших образцов трехмерных МОП-транзисторов на нанопроводах, выращенных "снизу-вверх".

Разработчиками были изготовлены МОП-транзисторы с одним, четырьмя, девятью и 19 каналами-нанопроводами. Рекордное значение тока стока транзисторов составило 1,17 мА/мкм. Крутизна транзисторов с длиной затвора 50 нм – 701 мкС/мкм, средние значения подпороговой крутизны и понижения потенциального барьера истока за счет проникновения поля стока – 150 В/декаду и 210 мВ/В, соответственно. Эти показатели не удовлетворительны

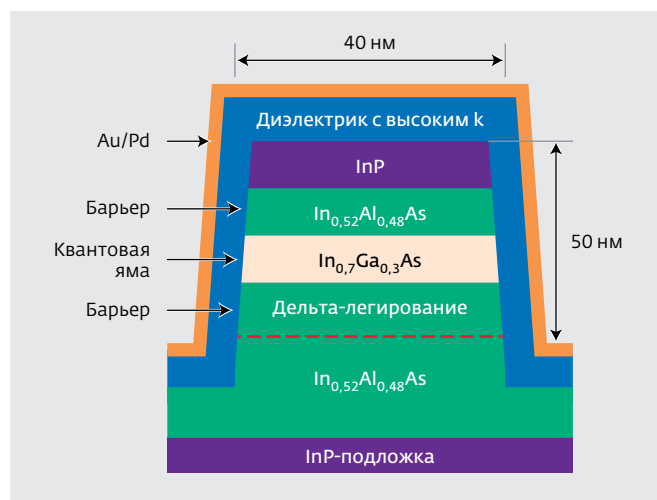
\* Часть 1 см. Электроника: НТБ, 2012, № 1, с.108-122.



**Рис.1.** Изготовление трехмерного InGaAs МОП-транзистора: осаждение пленки  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  (а); формирование областей стока-истока (б); создание наномостика путем анизотропного травления InP (в); осаждение диэлектрика для получения окольцованного затвором канала (г); вытравливание в пленке затвора контактных площадок стока и истока (д)

и усилия разработчиков направлены на их улучшение.

**Снижение потребляемой энергии.** К достоинствам приборов на полупроводниковых соединениях III-V относится и возможность создания логических устройств, работающих при меньших значениях рабочего напряжения, чем современные кремниевые схемы. Правда, при этом для функционирования прибора требуются большой ток включения и большое отношение токов включения-отключения. В случае замены кремния материалом с большей подвижностью носителей заряда для подавления эффекта короткого канала выполняется многозатворная структура транзистора, подобная структуре, предложенной специалистами Университетов Пердью и Гарварда. Ученые Пенсильванского университета для уменьшения



**Рис.2.** Структура многозатворного квантоворазмерного полевого транзистора

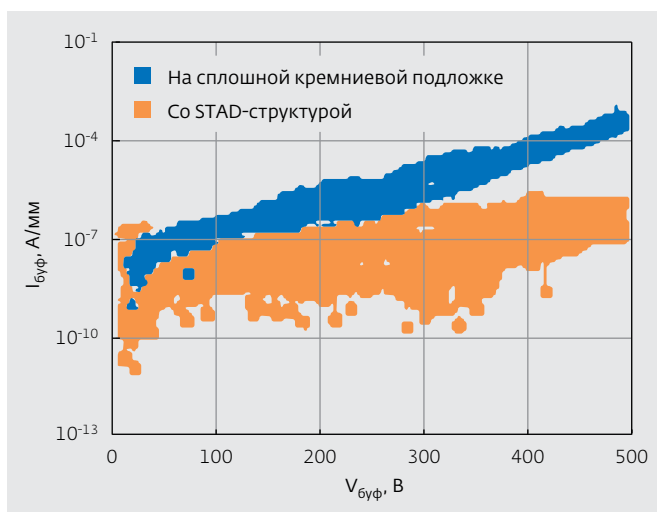
рабочего напряжения логических устройств обратились к многозатворным квантоворазмерным полевым транзисторам (Multi-Gate Quantum well FETs, MuQFETs). Ими были рассмотрены как классический вариант напряженного  $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$  MuQFETs с ребрами шириной 40 нм (рис.2), так и  $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$  образец с разделенными с шагом 80 нм затворами. Задающий ток классических транзисторов при напряжении сток-исток 0,5 В составлял 100 мкА/мкм. Приборы с неклассической структурой работали в режиме кулоновской блокады при температуре 4,2К. Отмечается, что по мере масштабирования транзисторы с неклассической структурой смогут работать в режиме кулоновской блокады и при комнатной температуре.

Рабочее напряжение построенной на основе MuQFETs обеих типов реконфигурируемой бинарной логической микросхемы принятия решений не превышало 250 мВ, а потребляемая энергия

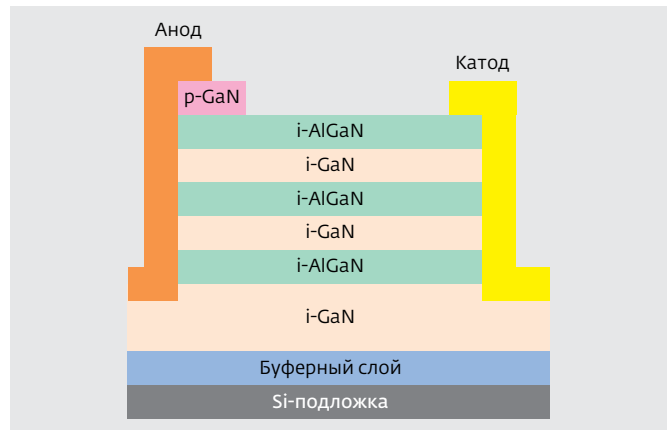
была на 50% меньше, чем у стандартной КМОП-схемы. Кроме того, на MuQFETs была выполнена микросхема СОЗУ, потребляемая энергия которой в динамическом режиме оказалась на 75% меньше, чем у кремниевого СОЗУ.

По мнению разработчиков, предложенная технология перспективна для создания приборов с минимальными размерами элементов до 14 нм и менее. К их достоинствам относится не только возможность применения в устройствах с батарейным питанием, но и предотвращение их перегрева благодаря низкому энергопотреблению.

**GaN полевые транзисторы** на кремниевой подложке нового класса были представлены Бельгийским исследовательским центром IMEC. Благодаря вытравливанию кремниевой канавки вокруг контактов стока (Si Trench Around Drain contacts, STAD) разработчики создали GaN двойной гетеропереходный полевой транзистор с напряжением пробоя более 2 кВ и хорошими термическими характеристиками при относительно малой толщине буферного слоя. Транзистор изготавливался на кремниевой (111) подложке, расхождение которой по кристаллографической ориентации с барьерным слоем AlN меньше, чем у (100) кремния. После формирования эпитаксиальной структуры, состоящей из барьерного слоя  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$  толщиной 3 нм, слоя GaN-канала толщиной 150 нм и  $Al_{0,18}Ga_{0,82}N$  буферного слоя толщиной 2 мкм, подложка утонялась до 125 мкм,



**Рис.3.** Сравнение зависимости тока утечки буферного слоя от напряжения при температуре 100°C для двух типов двойных гетеропереходных полевых транзисторов



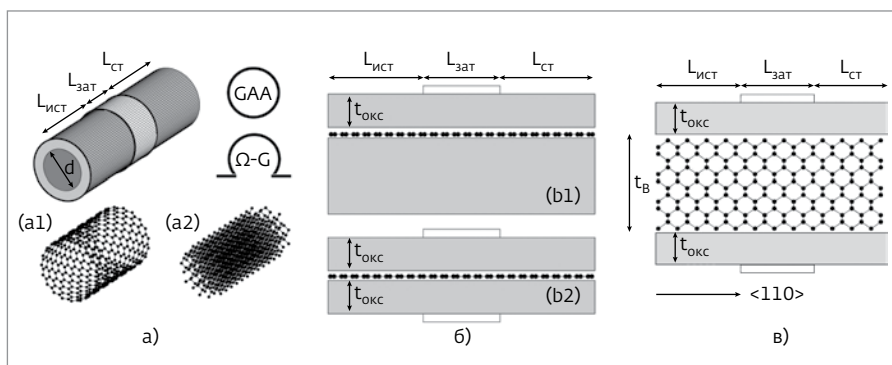
**Рис.4.** Структура "естественного суперперехода"

и вокруг контактов стока методом реактивного ионного травления вытравливались канавки.

Сравнение характеристик транзисторов с обычной и STAD-структурами показало, что напряжение пробоя STAD-транзистора превышало 2 кВ при расстоянии затвор-сток 20 мкм против 650 В у обычного двойного гетеропереходного полевого транзистора. Ток утечки буферного слоя STAD-транзисторов при температуре 100°C и напряжении 500 В был на несколько порядков меньше, чем в полевых транзисторах без канавки (рис.3).

**Новая структура GaN-диода**, характеризующегося малыми током утечки и временем восстановления, а также напряжением пробоя 600 В, была описана специалистами компании Panasonic. Диодная структура, названная разработчиками "естественным суперпереходом" (Natural Super Junction), содержит три перехода из нелегированных слоев AlGaN и GaN (рис.4). Эти переходы при обратном смещении диода благодаря балансу индуцированных поляризации зарядов в верхнем и нижнем слоях структуры ведут себя как диэлектрик. Для создания диода не требуется строгого контроля уровня концентрации примесей слоев. Поверх структуры со стороны анода наносится блокирующий слой GaN p-типа, приводящий к ее обеднению носителями и, тем самым, к уменьшению тока утечки. При формировании с двух сторон многопереходной структуры Al/Au- и Ti/Al-контактов анода и катода обеспечиваются низкие значения рабочего напряжения и контактного сопротивления.

Сравнение диодов с новой структурой и коммерческих SiC-диодов с барьером Шоттки показало, что во включенном состоянии сопротивление на емкость GaN-диода много



**Рис.5.** Варианты п-канальных полевых транзисторов с длиной затвора 5 нм: а) трехмерная структура на однослойных УНТ диаметром 65 нм с полностью (GAA) и частично (75% периметра нанопровода) (Ω-G) окольцовывающим затвором; б) однозатворный (b1) и двухзатворный (b2) транзистор на графеновой с кресельной ориентацией (armchair) нанополоске; в) двухзатворный на сверхтонкой подложке

меньше, чем у SiC-прибора (70 против 95 пОм·Ф). Напряжение пробоя у разработанного компанией диода достигало 600 В, выходной ток – 18 А при напряжении 1,5 В. Эффективность повышающего преобразователя, выполненного на основе нового GaN-диода и GaN инжекционного МОП-транзистора (сопротивление во включенном состоянии 100 мОм и пробивное напряжение 600 В), на частоте 100 кГц достигала 98,2% при выходном напряжении 400 В.

По мнению разработчиков, новый диод перспективен для применения в схемах источников питания, используемых, в том числе, и в гибридных электромобилях.

**Приборы на полупроводниковых соединениях с рекордными параметрами** представили компании Teledyne Scientific Co. и HRL Laboratories. Самое высокое значение предельной частоты – 688 ГГц – получено для  $In_{0,7}Ga_{0,3}As$  метаморфного НЕМТ, разработанного с специалистами компании Teledyne и Массачусетского технологического института. Максимальная частота генерации транзисторов с затвором длиной 40 нм составляет 800 ГГц, крутизна превышает 2,7 мС/мкм. Изготовлен транзистор на подложке из арсенида галлия.

В результате активного масштабирования длины затвора и расстояния исток-сток и применения новой технологии самосовмещенного затвора специалисты HRL Laboratories и Калифорнийского университета в Сан-Диего создали AlN/GaN/AlGaIn сдвоенный гетеропереходный НЕМТ с самой малой на сегодня длиной затвора – 20 нм. Предельная частота

транзистора составляет рекордное для GaN-транзисторов значение 310 ГГц при максимальной частоте 364 ГГц. Сопротивление транзистора во включенном состоянии равно 0,29 Ом·мм, максимальный ток стока – 2,7 А/мм, максимальная крутизна – 1,04 С/мм, напряжение пробоя – 9 В. Изготовлены НЕМТ на подложке карбида кремния диаметром 75 мм.

Таким образом, успехи, достигнутые компаниями при разработке приборов на полупроводниковых соединениях, свидетельствуют о возможности создания устройств, превосходящих по своим параметрам кремниевые приборы.

Хотя эра планарных КМОП-схем кончается, сегодня существует множество других новых технологий, которые позволят, по крайней мере, следующее десятилетие соблюдать закон Мура, и на IEDM 2012 можно ожидать множество сообщений о новых достижениях в этой области.

Об этом свидетельствует и включение нового технического подкомитета "Технология наноприборов" (Nanodevice Technology, NDT) в программу конференции IEDM 2011. Особое внимание подкомитет уделял приборам на основе нанотрубок, нанопроводов, квантовых точек, приборам аккумулирования энергии окружающей среды, приборам, не основанным на взаимодействии носителей заряда, нанoeлектронным электромеханическим системам (НМЭМС).

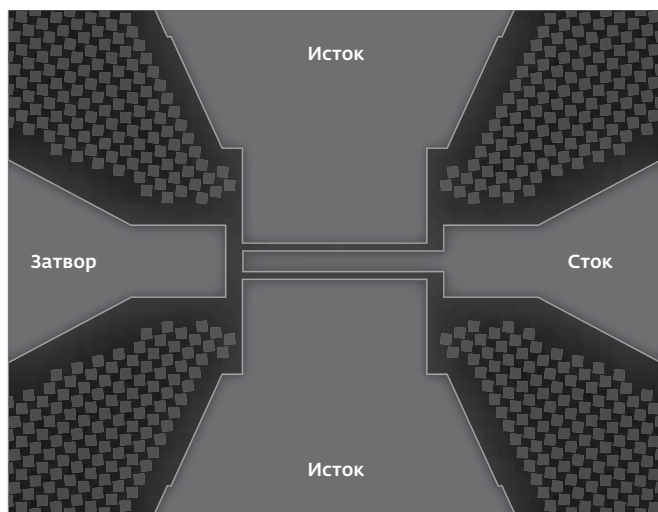
### ТЕХНОЛОГИЯ НАНОПРИБОРОВ

По мере масштабирования длина затвора МОП-транзисторов достаточно скоро достигнет 10 нм. А что же дальше? Ответить на этот вопрос постаралась группа ученых Университета Пердью, Массачусетского технологического института и Калифорнийского университета в Беркли. Они представили результаты изучения достоинств и недостатков трех перспективных конструкций и сочетаний материалов, пригодных для создания новых электронных приборов с затвором длиной до 5 нм: на основе углеродных нанотрубок, графеновых нанополосок, сверхтонких III-V и кремниевых подложках (рис.5). В ходе исследований были сделаны следующие выводы:

- при тщательном проектировании для многих изучавшихся приборов может быть получена хорошая подпороговая крутизна при длине затвора до 8 нм;
- непланарные приборы могут иметь высокие характеристики и при длине затвора 5 нм;
- при одинаковой ширине запрещенной зоны характеристики полевых транзисторов на УНТ или на кремниевых и III-V-нанопроводах малого диаметра одинаковы, хотя здесь большее значение имеют профиль потенциала и начало межзонного туннелирования.

В сообщении Стенфордского университета рассматривалась возможность разработки стойкой к недостаткам углеродных нанотрубок конструкции полевых транзисторов на УНТ (Carbon Nanotube Field-Effect Transistors, CNFETs), у которых, по утверждению исследователей, производство потребляемой энергии на быстродействие значительно лучше, чем у КМОП-приборов. Предложенный сопоставимый с КМОП-технологией метод избавления от металлических УНТ (VLSI-compatible Metallic-CNT Removal, VMR), доля которых в выращиваемых УНТ составляет 5–50%, позволяет получать идеальные CNFETs даже в присутствии таких недостатков, как наличие металлических нанотрубок, неправильное расположение УНТ и неоднородная их плотность.

Внимание участников конференции, несомненно, привлекло сообщение концерна IBM о возможности изготовления транзисторов на УНТ с затвором длиной 10 нм на стандартных подложках диаметром 200 мм, достаточно широко



**Рис.6.** Формирование структуры графенового полевого транзистора: увеличенный вид прибора со встроенной структурой затвора

используемых в полупроводниковом производстве. Плотность тока УНТ-транзисторов при напряжении 0,5 В была в четыре раза больше (2,41 мА/мкм), чем у лучших кремниевых приборов, что свидетельствует о возможности построения на их основе высокопроизводительных логических устройств с малым энергопотреблением. Отмечалось, что значения параметров созданных УНТ-транзисторов превосходили теоретически определенные значения. Это объясняется тем, что затвор транзистора модулирует заряд не только в канале, но и в контактных областях, что при расчетах не учитывалось.

Интерес присутствовавших на конференции специалистов привлекли и доклады IBM, посвященные приборам на графене. С помощью совместимого с КМОП-технологией процесса разработчики концерна на основе высокопроизводительных графеновых полевых транзисторов и ВЧ-пассивных компонентов изготовили на 200-мм подложке удвоитель частоты с коэффициентом преобразования -25 дБ на частоте 2 ГГц.

Основная трудность при изготовлении графеновых транзисторов заключается в формировании диэлектрика затвора на инертной поверхности графена. Это затруднение удалось преодолеть благодаря другому присущему графену свойству – возможности переноса выращенной вакуумным осаждением пленки с основания на разнообразные подложки без ухудшения ее качества. Разработчики переносили выращенные на подложке из карбида кремния графеновые пленки на кремниевые подложки с заранее созданными структурами затвора (рис.6). Для создания графеновой микросхемы, содержащей транзисторы, элементы индуктивности и межсоединения, требовались четыре металлических слоя и два слоя оксида. За исключением этапа переноса графеновой пленки все операции проводились на обычном оборудовании, предназначенном для обработки 200-мм кремниевых пластин.

Испытания показали, что характеристики удвоителя частоты не изменялись в диапазоне температур 25–200°C, а это свидетельствует о независимости крутизны p- и r-канальных транзисторов от температуры в этом диапазоне (не известное до сих пор свойство графеновых транзисторов).

И еще одно достижение концерна привлекло внимание слушателей – транзистор с длиной затвора 40 нм на основе синтезированного графена с рекордным значением предельной частоты 280 ГГц. Выходной ток и крутизна подобных

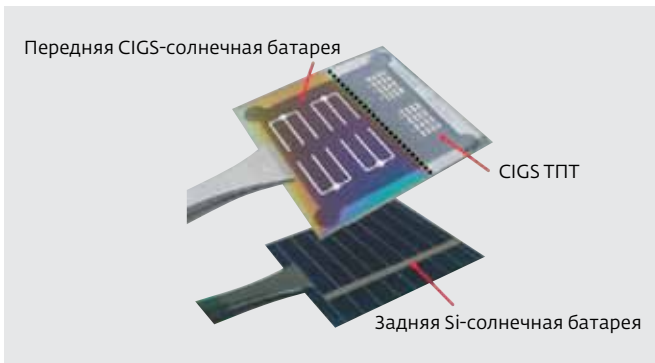


Рис.7. Двухсторонняя CIGS-солнечная батарея с ТПТ

транзисторов, но с большей длиной затвора, были равны 5 мА/мкм и 2 мС/мкм, соответственно. Усиление приборов было равно 10 дБ, что свидетельствует о возможности их применения в обычных электронных устройствах.

Но не только проблемы полупроводниковой электроники вызвали интерес на конференции IEDM 2011.

## ДРУГИЕ ЗАСЛУЖИВАЮЩИЕ ВНИМАНИЯ СООБЩЕНИЯ

**Электронную систему с собственным источником питания** – двухстороннюю микросхему с солнечной батареей, объединенной с тонкопленочными транзисторами, – представили специалисты Национальной лаборатории наноприборов Тайваня (National Nano Devices Laboratories). С одной стороны кремниевой подложки диаметром 150 мм изготавливалась кремниевая солнечная батарея, с другой стороны формировались структуры солнечной батареи и тонкопленочных транзисторов (ТПТ) на основе полупроводникового соединения меди-индия-галлия-селена ( $\text{CuInGaSe}_2$ , CIGS) (рис.7). При этом компания отказалась от использования натрия и кадмия, часто применяемых для повышения эффективности CIGS-батарей. Чтобы получить приемлемую 11%-ную эффективность CIGS-слой наносился на текстурированную поверхность. Подвижность дырок ТПТ составила 0,22 см<sup>2</sup>/В. Двухсторонняя солнечная батарея изготавливалась при температуре 400–500°C. Таким образом, низкотемпературный технологический процесс создания CIGS-солнечных батарей без использования натрия и кадмия совместим с технологией формирования КМОП-схем.

Разработчики бельгийского исследовательского института IMEC описали созданный пьезоэлектрический МЭМС-аккумулятор энергии

вибраций, возникающих при движении автомобиля, для питания датчиков системы контроля давления и температуры шин автомобиля (Tire Pressure Monitoring System, TPMS). МЭМС-аккумулятор содержит кантилевер с слоем пьезоэлектрика (нитридом алюминия), заключенным между металлическими электродами, образующими обкладки конденсатора. На конце кантилевера крепится тело, благодаря которому обеспечивается его вертикальное смещение при вибрации, приводящее к пьезоэлектрической деформации и изменению напряжения конденсатора. Значение напряжения конденсатора достаточно для возбуждения беспроводных приборов.

Максимальная мощность, генерируемая аккумулятором на резонансной частоте 1 кГц, составляет ~500 мкВт. В автомобиле, движущемся со скоростью 760 км/ч генерируемая мощность равна всего 42 мкВт, но ее достаточно для питания датчиков и беспроводных компонентов системы TPMS.

По утверждению разработчиков, процесс изготовления МЭМС-аккумулятора, монтируемого в сопоставимый по размерам со 150-мм пластиковый корпус, пригоден для массового производства дешевых изделий, которые смогут использоваться для питания беспроводных датчиков в приложениях, где замена батарей затруднена.

\* \* \*

Как отметил вице-президент, член совета компании IBM Берни Мейерсон, трудно предсказать, когда рассмотренные на конференции инновации появятся на рынке. Это связано с тем, что изготовители полупроводниковых приборов до сих пор отдают предпочтение совершенствованию традиционной кремниевой технологии, заняли позицию выжидания и пока лишь обсуждают возможности "не кремниевых" технологий. Марк Борн, руководящий разработкой микросхем компании Intel, признал, что такие инновационные решения, как углеродные нанотрубки и графен весьма перспективны для создания будущих электронных приборов, хотя большая часть из них, возможно, не будет широко применяться в отличие от транзисторов, которые в свое время стали основными компонентами современных электронных устройств. Тем не менее, Борн закончил свой доклад оптимистическим заявлением: "Это удивительное время для руководителя полупроводниковой отрасли, имеющего в своем распоряжении столь разнообразные "острые блюда". ●