

ПОСТ-КМОП СТРУКТУРЫ ГЛОБАЛЬНЫЙ ВЫЗОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В.Юдинцев vlad@eleves.com

Поскольку рано или поздно масштабирование КМОП-микросхем из-за их основных ограничений окажется невозможным, уже сейчас ведется поиск новых типов наноключей, способных заменить МОП-транзисторы и пригодных для масштабирования. Работа многих из этих новых устройств основана не на взаимодействии электронных зарядов, определяющего переменные параметры, характеризующие состояние прибора. Напротив, сейчас изучаются наноразмерные структуры, функционирующие на основе фотонных, магнитных, квантовых и даже тепловых взаимодействий. Появление новых "признаков" данных (data tokens) потребует замены системы соединений наносхем новыми средствами передачи информации. Функциональные возможности и характерные особенности новых ключей позволят реализовать оригинальные архитектуры, способные поддерживать специальные алгоритмы и рабочие нагрузки. А это, в свою очередь, приведет к существенному увеличению быстродействия компьютерных систем.

МОТИВАЦИЯ

В 2005 году на долю отраслей промышленности, производящих и потребляющих информационную технологию, приходилось более 25% ВВП США. Вклад этих отраслей в экономический рост страны составлял 50%. Беспрецедентный рост ИТ в значительной мере обусловлен совершенствованием технологии микроэлектроники. Неуклонное выполнение закона Мура в течение 30 лет привело не только к экспоненциальному росту быстродействия или, что более важно, к снижению стоимости изделий электроники, но и к расширению их номенклатуры – от тостеров до сотовых телефонов и суперкомпьютеров. При этом считалось, что с уменьшением критических размеров микросхем и рабочего напряжения на один

и тот же коэффициент плотности мощности остается постоянной.

Однако в последних поколениях схем уменьшение рабочего напряжения уже сдерживает увеличение их быстродействия. В результате, несмотря на возможности дальнейшего масштабирования размеров МОП-транзисторов, по крайней мере, в течение еще десяти лет, выгоды этого процесса будут ограничены вследствие роста плотности мощности. Следует отметить, что проблема увеличения плотности мощности существует не только для кремниевых микросхем, но и для схем на основе других материалов, в том числе органических или на углеродных нанотрубках. Хотя смена материала может привести к улучшению работы одного-двух поколений микросхем,

для решения проблемы увеличения вычислительной мощности, приведенной к единице площади (следовательно, и к стоимости) каждого следующего поколения, необходимо найти возможность долгосрочного масштабирования.

Это побудило ведущие ассоциации и объединения полупроводниковой промышленности США начать программы по выработке технической стратегии, которая позволит продлить дальнейшее масштабирование электронных схем. В начале 2000 годов рабочая группа по перспективным приборам, формирующая соответствующий раздел Международного перспективного плана развития полупроводниковой технологии (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS), приступила к исследованию проблем роста мощности при масштабировании. Научно-исследовательская корпорация в области полупроводниковой технологии (Semiconductor Research Corp., SRC), национальный научный фонд (National Science Foundation, NSF) и Ассоциация полупроводниковой промышленности (Semiconductor Industry Association, SIA) провели ряд совещаний с привлечением специалистов промышленных фирм, академических институтов и правительственных учреждений. В результате в 2005 году были определены 13 направлений перспективных исследований, которые могут привести к созданию будущих переключателей новых типов. Ключевыми были признаны следующие пять направлений [1]:

- физические явления, не связанные с взаимодействием электронов, но определяющие состояние прибора;
- неравновесные системы;
- новые механизмы передачи данных, помимо электрического тока;
- наноразмерная фоновая техника для средств термуправления;
- ориентированная самосборка новых структур.

Для развития этих направлений Ассоциация полупроводниковой промышленности в ноябре 2004 года учредила новую исследовательскую программу "Инициатива по исследованиям в области наноэлектроники" (Nanoelectronics Research Initiative, NRI) [2]. Финансовую поддержку NRI с 2005 года оказывают консорциум SRC, NSF и шесть ведущих полупроводниковых компаний – AMD, Freescale Semiconductor, IBM, Intel, Micron Technology и Texas Instruments.

Сегодня в NRI участвуют 58 университетов США, 252 исследователя, 86 промышленных специалистов. Заключено 60 контрактов, проводятся 82 научно-исследовательские программы, опубликовано более 1500 работ, посвященных проводимым исследованиям [3].

Цель NRI – создать к 2020 году новые вычислительные приборы, превосходящие современные полевые транзисторы по энергосбережению, быстродействию, плотности и/или стоимости и способные заменить КМОП-ключи. При этом, конечно, не будут обойдены проблемы совместимости новых устройств с КМОП-технологией.

ПОСТ-КМОП АЛЬТЕРНАТИВЫ

В идеальном случае, пост-КМОП ключ должен непосредственно заменить КМОП-переключатель, но он может также его дополнить в гибридной структуре и, в результате, улучшить существующую техническую инфраструктуру. С другой стороны, электроника может получить выгоду от особых свойств нового

переключателя и реализовать определенные функции способами, отличными от современных. Создание пост-КМОП ключа потребует переосмысления того, как представлять информацию, как ее обрабатывать и какие логические функции можно реализовать с помощью новой технологии. Следует помнить, что физические явления, поддерживающие представление информации двоичными разрядами, должны допускать манипуляцию этой информацией в соответствии с правилами логики, а также обеспечивать ее хранение и передачу. Так что же сегодня наука предлагает в качестве пост-КМОП технологии?

Графен в последнее время привлекает большое внимание благодаря следующим своим свойствам [4, 5]:

- высокому отношению прочности к массе, превосходящему этот показатель всех известных материалов;
- высокой подвижности носителей: более $2 \cdot 10^5$ см²/В·с (при гелиевых температурах – 10^6 – 10^7 см²/В·с);
- распространению без рассеяния фотонами носителей с нулевой массой, подобных фермионам Дирака, со скоростью в 300 раз меньшей, чем скорость света, на расстояние в диапазоне микрометров;
- электропроводности на три порядка выше, чем у меди, отсутствию электромиграции;
- теплопроводности свыше $5 \cdot 10^3$ Вт/мК;
- возможности выполнения на его основе областей стока, истока и канала полевых транзисторов, а также межсоединений;
- совместимости с КМОП-технологией.

Группа ученых наноцентра Колумбийского университета показала возможность задавать ширину запрещенной зоны графеновых полосок с помощью литографии. Для этого изучалась температурная зависимость полосок графена различной ширины (10–100 нм) и кристаллографической ориентации. Исследования показали, что удержание носителей заряда в горизонтальной плоскости полосок приводило к формированию запрещенной зоны вблизи точки нейтральности заряда, при этом чем они были уже, тем больше оказывалась ширина запрещенной зоны. Это и позволило утверждать, что ширину запрещенной зоны наноструктур графена можно задавать с помощью литографии. По мнению исследователей Колумбийского

университета, эти эксперименты открывают перспективы создания электронных приборов на основе графена [6].

Конечно, пока мировая промышленность далека от производства интегральных схем на графене. Однако в результате исследований технологических процессов и материалов, проводимых по программе NRI, уже появилась возможность выращивания пленок графена большой площади методом химического осаждения из паровой фазы. Такие пленки могут найти широкое применение, в том числе для изготовления туннельных полевых транзисторов (TFETs) и даже более экзотических приборов.

Спин (собственный момент импульса элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого) – другое фундаментальное свойство материи, которое может быть использовано для представления и обработки информации. Поэтому здесь интерес вызывают магнитные домены, формируемые благодаря сильной связи магнитных моментов атомов в результате квантово-механического взаимодействия большого числа электронов проводимости, а также спиновые волны.

В устройствах на основе магнитных доменов магнитное поле благодаря эффекту Зеемана вызывает два различных направления оси вращения спина (верхнее и нижнее, или "верхняя" и "нижняя" ориентации). Этот эффект и предложено использовать для создания полевых спин-транзисторов. Однако поскольку спин переносится электронами совместно с их зарядом, ограничения полевых спин-транзисторов те же, что и у обычных полевых транзисторов. Правда, принцип переключения состояния прибора в результате изменения ориентации отдельного спина отличается от характера переключения при перемещении заряда. Другие проблемы, возникающие при использовании отдельного спина для представления информации, – ее запись и считывание, а также отсутствие усиления, что является главным препятствием для реализации логических схем. Вот почему явление изменения ориентации спина в основном используется для создания систем хранения данных.

В последнее время в качестве магнитных ключей логических устройств предлагают применять достаточно малые структурированные

магнитные островки, способные поддерживать только один магнитный домен. Благодаря дипольному взаимодействию отдельных однодоменных наноманитов появилась возможность создания на основе магнитных ключей клеточного автомата на квантовых точках (Quantum dot Cellular-Automata, QCAs). Взаимодействие наноманитов предложено использовать также для построения схем произвольной комбинаторной логики. Предполагается, что на основе наноманитной логики (NanoMagnet Logic, NML) удастся создать полностью магнитные системы обработки информации, содержащие как память, так и логические устройства [7].

Спиновые волны (магноны) – колебания спинов в магнитных материалах. Длина когерентности магнонов при комнатной температуре составляет несколько микрон. Фаза спиновой волны может использоваться в качестве признака информации, а логические функции можно реализовать посредством волновой интерференции. Поскольку спиновые волны не обеспечивают усиления, для восстановления сигнала необходимо применять внешнюю схему.

Поверхностные плазмоны – связанные колебания электронов и электромагнитного поля на границе раздела тонких пленок металла и диэлектрика. При резонансе (который зависит от размеров и формы металлических частиц) поле усиливается, что может привести к возникновению физической связи между соседними частицами. Специалисты NRI полагают, что эти явления могут быть использованы для создания терагерцовых переключателей на основе плазмонов-поляритонов.

Температура (или фононы) также может служить информационным признаком. Базовые

блоки термических схем – микронагреватели и микротермометры. Экспериментально показано, что соответствующим образом обработанный асимметрично структурированный графен может иметь отрицательную дифференциальную теплопроводность и выполнять функцию выпрямления. Эти исследования находятся на ранней стадии и для оценки возможности создания логических термических схем их необходимо продолжить.

Архитектурные решения. В то время как пост-КМОП информационные признаки и механизмы переноса информации интенсивно изучаются, альтернативным архитектурам уделяется меньше внимания. Исключения составляют архитектура дерева двоичных решений на основе одноэлектронных приборов и структуры QCA с локальными межсоединениями для формирования наноманитной логики. По-видимому, новые архитектурные решения смогут воспользоваться особенностями новых ключей, и работы в этом направлении усилятся по мере продвижения проектов NRI.

Особый интерес вызывает задача объединения логических функций и памяти. Хотя основное внимание проектов NRI уделено разработке пост-КМОП ключей, некоторые новые устройства могут хранить информацию. Это открывает возможность создания архитектур с процессорами в составе памяти и логики в составе памяти.

ЦЕНТРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОГРАММ NRI

Большинство исследований по программе NRI проводится в четырех виртуальных университетских центрах, основанных промышленными фирмами, Национальным институтом стандартов и технологии (National Institute of

Standards and Technology, NIST), государственными учреждениями и местными органами управления. Каждый из этих центров предлагает свое решение пост-КМОП логического ключа.

WIN-центр (Western Institute of Nanoelectronics, Западный институт наноэлектроники). Основной исполнитель – Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе. Участвуют калифорнийские университеты в Ирвайне и Беркли, Стэнфордский университет, Университеты Денвера, штата Айова и Портланда. Направление работ – спинтроника и связанные с ней явления, включая исследование материалов, структур приборов и межсоединений для построения логических схем.

INDEX-центр (Institute for Nanoelectronics Discovery and Exploration, Институт открытий и исследований в области наноэлектроники). Основной исполнитель – Нью-Йоркский государственный университет в Олбани (SUNY). Участвуют Технологический институт Джорджии, Политехнический институт Ренсселира, Гарвардский университет, Массачусетский технологический институт, Университет Пердью, Йельский, Колумбийский, Калифорнийский, Виргинский университеты, Университет штата Северная Каролина. Направление работ – логические приборы на основе графена, экситонов, спинов квантовых точек, магнитных явлений. Особое внимание уделяется методике изготовления и измерения.

SWAN-центр (SouthWest Academy for Nanoelectronics, Юго-Западная академия наноэлектроники). Основной исполнитель – Техасский университет в Остине. Участвуют Техасский университет архитектуры и механики, Университет Райса, Нотр-Дамский университет, университеты штатов Аризона, Мэриленд и Северная Каролина, Иллинойс. Направление работ – графен, объединение теоретических, материаловедческих, приборных и метрологических проектов, а также изучение магнитных материалов, псевдоспинтроники, материала с сочетанием существующих одновременно электрических и магнитных свойств (мультиферрика) и плазмоники.

MIND-центр (Midwest Institute for Nanoelectronics Discovery, Среднезападный институт наноэлектроники). Основной исполнитель – Нотр-Дамский

университет. Участвуют Университет Пердью, университеты штатов Иллинойс, Пенсильвания, Мичиган, Техасский университет в Далласе, Корнельский университет, Технологический институт Джорджии. Направление работ – изучение явлений туннелирования, наномагнетизма, неравновесных состояний для создания энергетически эффективных приборов и архитектур, а также термическое фоновое управление.

Кроме того, NSF в рамках NRI финансирует 18 проектов в 15 центрах нанотехнологии.

Программы NRI предусматривают тесное сотрудничество экспертов промышленных фирм и сотрудников NIST с учеными университетов с тем, чтобы ознакомить научное сообщество с практическими проблемами и упростить передачу любой многообещающей теоретической идеи промышленной фирме для ее дальнейшего развития [1].

НОВЫЕ КЛЮЧИ И МЕХАНИЗМЫ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Рассмотрим типы приборов и схем, изучаемых по программам NRI.

Логические приборы на спиновых волнах, предложенные в центре WIN, основаны на выполнении логических функций и передаче информации с помощью магнитного поля, возбуждаемого спиновыми волнами, распространяющимися в так называемой шине спиновых волн (Spin Wave Bus, SWB) [7]. Достоинства SWB:

- выполнение логических функций за счет наложения спиновых волн в шине;
- возможность одновременной передачи нескольких спиновых волн на разных частотах нескольким приборам, функционирующим на основе спина;
- беспроводное взаимодействие спиновых волн с внешними устройствами с помощью магнитного поля.

Опытный образец логического вентиля с шиной спиновых волн выполнен на основе пленки ферромагнетика (NiFe или CoFe) толщиной 10–100 нм, осажженной на КНИ-подложку. Поверх структуры нанесены три асимметричные копланарные полосковые линии (Asymmetric CoPlanar Strips, ACPS), отделенные от ферромагнитной пленки слоем двуокиси кремния (рис.1а). Подача импульса напряжения на одну из ACPS-линий приводит к возбуждению магнитного поля,

перпендикулярного вектору намагниченности пленки ферромагнетика, и генерации спиновых волн. Эквивалентные схемы ввода-вывода спиновых волн представляют собой три $L_1C_1R_1$ -генератора, шины SWB – $L_0C_0R_0$ передающая линия (рис.1б). Взаимодействие с ферромагнитной пленкой обеспечивает электромагнитную связь генераторов. Изменение тока любого генератора приводит к возбуждению напряжения в двух других. В зависимости от фазы тока входных схем выходное индуцированное напряжение центральной схемы будет максимальным (совпадение по фазе) или минимальным (вне фазы). На основе структуры логического вентиля исследователями были реализованы схемы НЕ, И и ИЛИ. Было показано, что спиновые волны в NiFe-пленках могут переносить при комнатной температуре сигнал индуцированного напряжения в несколько милливольт на расстояние 50 мкм.

Для построения реконфигурируемых логических схем на спиновых волнах, сопоставимых по своим характеристикам с обычными электронными устройствами, в центре была разработана специальная методика конструирования NanoFabric [8]. Базовые элементы схемы – преобразователи напряжения в спиновую волну и спиновую волну в напряжение, спиновые волноводы, модулятор и ячейка магнитоэлектрического преобразователя. В качестве магнитоэлектрического преобразователя использовалась пьезоэлектрическая-пьезомагнитная система, модулирующая сигнал спиновой волны за счет вносимой электрическим полем анизотропии, индуцированной механическим напряжением. На основе базовых блоков были построены вентиль НЕ и мажоритарные логические вентили, а с использованием реконфигурируемых мажоритарных вентилях и схемы НЕ – логические вентили И, ИЛИ, НЕ И и НЕ ИЛИ. При этом для реализации логических вентилях по методологии NanoFabric требуется меньше элементов, чем для КМОП-схемы. Площадь мажоритарного вентиля составляет 0,1 мкм². По технологии NanoFabric были сформированы архитектуры клеточного автомата и программируемой вентилях матрицы (FPGA). Таким образом, технология NanoFabric перспективна для формирования блоков сопряжения электронных и спин логических схем, а также для создания логических блоков, дополняющих универсальные процессоры

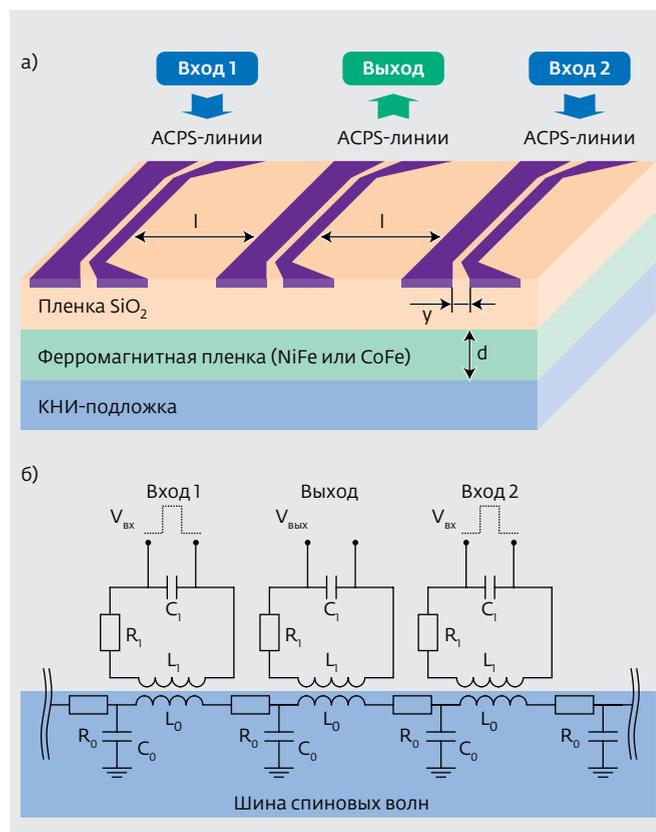


Рис.1. Структура опытного образца логической схемы (а); эквивалентная схема логического устройства, состоящего из трех генераторов (L_1, R_1, C_1) и передающей шины спиновых волн (L_0, R_0, C_0) (б)

преобразователей напряжения и систем распознавания речи.

Однако амплитуда спиновых волн при распространении экспоненциально уменьшается вследствие магнот-фононного, магнот-магнотного взаимодействий и других процессов

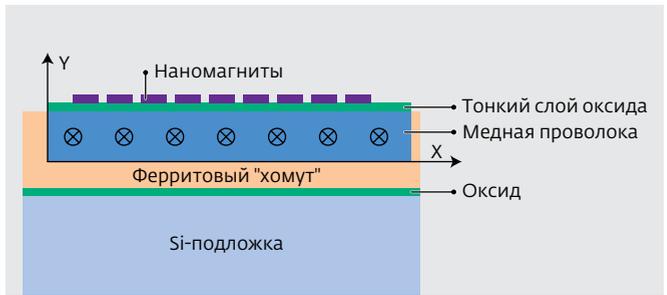
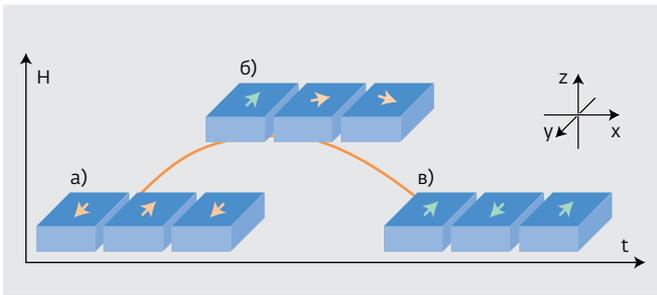


Рис.2. Действие тактового импульса: начальное упорядоченное состояние антиферромагнитно-связанных наномагнитов (а); поляризация вектора намагниченности вдоль трудной оси при подаче внешнего магнитного поля (б); переход наномагнитов линии в логически корректное состояние за счет взаимосвязи соседних магнитов при отключении магнитного поля (в)

Рис.3. Поперечная структура устройства генерации магнитного поля, реализуемого в MQCA-архитектуре

рассеяния. Поэтому для реализации ИС на спиновых волнах необходим и усилитель на спиновых волнах. Такой усилитель, предложенный центром WIN при участии компании Intel, использует магнитоэлектрическую связь в двухслойной структуре мультиферроика, формируемой пьезоэлектрическим и ферромагнитным материалами. Механическое напряжение, возникающее при подаче электрического поля на слой пьезоэлектрика, приводит к изменению направления вектора намагниченности ферромагнитного слоя и анизотропии поля. Скорость вращения оси легкого намагничивания та же, что и частота спиновой волны, распространяющейся в ферромагнитном слое. Результат этих двух процессов в зависимости от угла вращения оси – усиление амплитуды спиновой волны на несколько порядков [9].

внешним периодически генерируемым магнитным полем, возбуждающим первую точку и задающим благодаря взаимосвязи наномагнитов ее основное состояние (рис.2а). При установлении внешним магнитным полем горизонтального направления векторов магнитных моментов наномагнитов они переводятся в нейтральное логическое состояние по отношению к предпочтительной магнитной анизотропии (поляризации вектора намагниченности вдоль трудной оси) (рис.2б). Это состояние системы нестабильно и при удалении поля наномагниты возвращаются в исходное состояние с вектором намагниченности, направленным вдоль трудной оси намагничивания (рис.2в).

Логика на основе наномагнитов. Внимание привлекают и работы по реализации логических функций и передаче информации за счет взаимодействия наномагнитов. Так, в Нотр-Дамском университете на основе наномагнитов была создана архитектура, подобная магнитному ключевому автомату на квантовых точках (MQCA). Опытные вентили, преобразователи и проводящие линии наномагнитной логики (НМЛ) были изготовлены с помощью стандартных методов литографии. Проводящие линии формировали расположенные в ряд антиферромагнитные (магнитно-компенсированные) наномагниты (квантовые точки). Действие линии запускается

Для генерации локального задающего магнитного поля и управления НМЛ исследователями университета предложена встраиваемая в логическую схему структура, состоящая из обернутых по бокам и снизу ферромагнитным материалом медных проводов шириной 2 мкм и толщиной 0,2, на которых можно разместить до 20 наномагнитов (рис.3).

Структуру блока, задающего локальное магнитное поле, можно объединять с КМОП-логикой и тем самым создавать гибридные системы, в которых НМЛ выполняет функции маломощного сопроцессора, расположенного поверх КМОП-схемы. Согласно оценкам, если 10^{10} наномагнитов переключаются с частотой 10^8 Гц, рассеиваемая мощность составит ~0,1 Вт. По утверждению исследователей, с учетом рассеиваемой мощности схемы управления НМЛ-схемы по своим характеристикам будут идентичны КМОП-схемам с такими же размерами элементов [10, 11].

Изучается возможность создания реконфигурируемой матрицы магнитных автоматов (Reconfigurable Array of Magnetic Automata, RAMA)

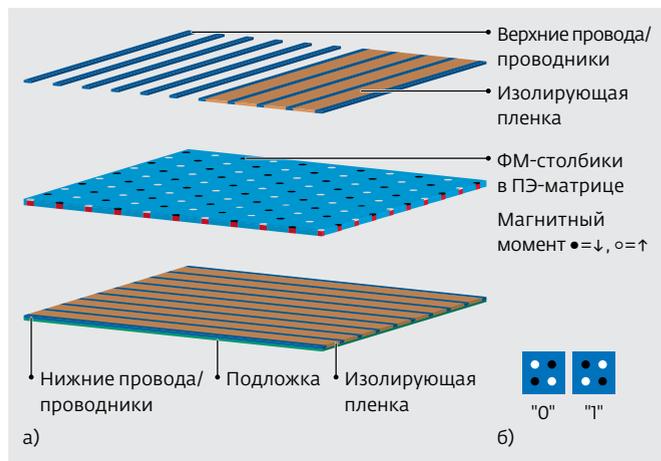


Рис.4. RAMA: структура (а) и представление разряда (б)

с использованием наномангнитного переключения в архитектуре с регулярной структурой [12]. RAMA представляет собой квадратную матрицу тонкопленочных наномангнитных столбиков, встроенных в ферромагнитную (ФМ) или пьезоэлектрическую (ПЭ) матрицу (рис.4а). Наностолбики находятся в точках пересечения расположенных над и под ними перпендикулярных проводников. Ферромагнитный материал и геометрия столбиков выбираются так, чтобы их магнитные моменты были направлены вверх или вниз перпендикулярно подложке. Разряды формируют четыре столбика с квадратной конфигурацией (рис.4б).

Достоинства RAMA-структуры:

- синхронизация импульсами электрического поля, для чего требуются меньшие энергетические затраты, чем для магнитного клеточного автомата;
- возможность самосборки полимеров "снизу-вверх", что экономически более эффективно, чем проводимые "сверху-вниз" методы литографии;
- энергонезависимость, поскольку ненужные для получения логических блоков столбики могут быть заблокированы путем подачи электрического поля, приводящего к перемещению вектора намагниченности в плоскость пленки;
- формирование как архитектуры логики, так и архитектуры памяти путем блокировки чередующихся столбиков, в результате чего оставшиеся "в живых" столбики могут служить блоками памяти и выполнять функции буфера или сдвигового регистра;

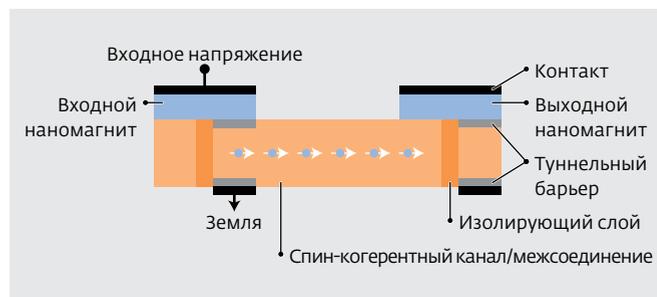


Рис.5. Структура полностью спиновой логики

- совместимость с КМОП-технологией.

В сравнении с параметрами, прогнозируемыми для КМОП-схем к 2020 году, плотность разрядов RAMA-структуры с размером ячейки 20 нм составит $\sim 10^{11}$ против 10^{10} , потребляемая энергия – $1 \cdot 10^{-20}$ Дж против $5 \cdot 10^{-18}$ Дж, скорость передачи – менее 1 нс против 0,1 пс.

Интерес представляет построение полностью спиновой логики (All-Spin Logic, ASL) на основе наномангнитов, степень намагниченности которых соответствует входной и выходной информации (рис.5). Обмен информацией осуществляется с помощью спиновых токов, а вращающий момент спина позволяет определять выходное состояние намагниченности.

На основе моделирования характеристик экспериментальной тестовой модели исследователи пришли к выводу, что прибор пригоден для изготовления и характеризуется основными свойствами, необходимыми для логических приложений: наличие взаимной причинной связи, нелинейность, отсутствие обратной связи, усиление и возможность исполнения набора логических операций [13].

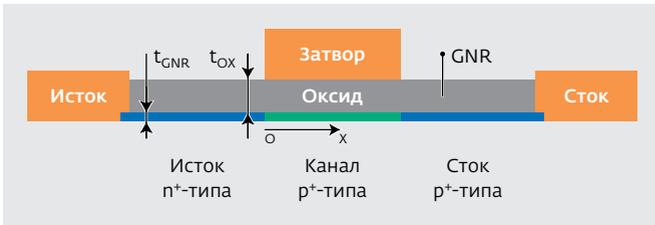


Рис.6. Структура р-канального GNR TFET

Приборы на графене, несомненно, привлекательны для пост-КМОП эры. Сегодня особый интерес вызывают туннельные полевые транзисторы на графеновых нанополосках (Graphene NanoRibbons, GNR TFETs), выдерживающие в сравнении с обычными ТПТ на полупроводниковых соединениях III-V более высокие токи возбуждения и характеризующиеся большим быстродействием, меньшей подпороговой крутизной (менее 60 мВ/декаду, где декада соответствует увеличению тока стока на порядок) и на несколько порядков более низкой рассеиваемой мощностью. Учеными Нотр-Дамского университета рассмотрены характеристики р- и п-канальных GNR TFET, выполненных на графеновых нанополосках шириной 3-10 нм с затвором длиной 20 нм и сильно легированными областями п⁺-истока

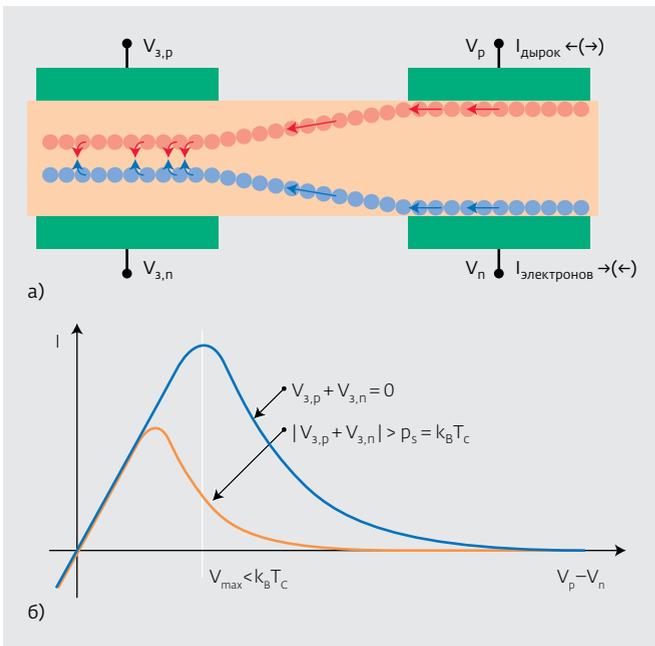


Рис.7. Схематическое представление BiSFET, состоящего из двух слоев графена, разделенных тонким оксидом (а) и ожидаемые характеристики транзистора (б)

и р⁺-стока, формирующими туннельный переход. Канал также представляет собой сильно легированную р⁺-область, которая при отсутствии напряжения на затворе полностью обеднена носителями, что исключает межзонное туннелирование (рис.6). При положительном смещении затвора возникает возможность межзонного туннелирования в области истока.

Сравнение характеристик п-канальных GNR TFET и МОП-транзисторов, которые должны были появиться в 2009 году, согласно версии ITRS 2007, показало, что по скорости переключения туннельные транзисторы почти в шесть раз превосходят МОП-приборы (11·10³ против 1961 ГГц). Их ток утечки в отключенном состоянии более чем на четыре порядка меньше (25·10⁻⁶ против 0,7 мкА/мкм), напряжение питания меньше на порядок (0,1 против 1 В). Плотность тока GNR TFET во включенном состоянии может составлять 2000 мкА/мкм [14].

Перспективен для создания пост-КМОП приборов и другой тип туннельного графенового транзистора – двухслойный псевдоспиновой полевой транзистор (Bilayer Pseudospin FET, BiSFET), предложенный учеными Техасского университета в Остине. Выполнен он на основе структуры, образованной двумя монослоями графена, разделенными тонким слоем диэлектрика (двухслойный графен) и отличающейся необычными характеристиками передачи информации (рис.7). Для объяснения принципа работы такой структуры степень свободы монослоев (верхнего и нижнего) рассматривается как псевдоспин, подобный спину (с верхней и нижней ориентацией) ферроэлектрика. Взаимодействие носителей заряда (электронов и дырок) слоев приводит к образованию электронно-дырочных пар/экситонов (бозонов), закорачиванию слоев и протеканию большого многочастичного туннельного тока. Теория предсказывает, что в соответствующем образом обработанных графеновых двойных слоях конденсация бозонов может быть достаточно устойчивой и при комнатной температуре, а конденсат проявлять транспортные характеристики, которые могли бы представлять интерес для реализации маломощных (на три порядка меньше, чем у КМОП-схем) переключений [15].

Исследователями университета была разработана функциональная модель BiSFET прибора и с помощью программы SPICE проведено

модулирование и оценка параметров логических элементов на его основе. Было получено, что средняя энергия BiSFET, потребляемая за такт переключения преобразователя (с нагрузочной способностью по входу и выходу, равной четырем), составляет $1 \cdot 10^{-20}$ Дж на частоте 100 ГГц (современные МОП-транзисторы потребляют $\sim 10^{-16}$ Дж на частоте около 5 ГГц, а в 2020 году, согласно ITRS, этот показатель составит $\sim 5 \cdot 10^{-18}$ Дж). Правда, эти расчеты не учитывают энергию, затрачиваемую на передачу тактового сигнала каждому транзистору.

Разработчики, учитывая неоднозначность теоретических предсказаний относительно стабильности эффекта многочастичного туннелирования двухслойных структур при комнатной температуре, а также возможность разрушения конденсата или существенного ухудшения его свойств при масштабировании, намерены активно продолжать эксперименты и теоретические исследования.

Другой новый тип транзистора, аналогичный ТПТ, – экситонный полевой транзистор (Excitonic FET, ExFET), предложенный исследователями Университета Пердью (рис.8) [16], отличается меньшей, чем у обычных КМОП-схем, подпороговой крутизной и, следовательно, меньшими проблемами энергопотребления. Работа транзистора основана на кулоновском взаимодействии электронов и дырок параллельных каналов электронной и дырочной проводимостей, приводящем при определенном напряжении затвора к экситонной связи. При формировании экситонного конденсата канал переходит из проводящего состояния ON в непроводящее состояние OFF, что приводит к резкому изменению подпорогового напряжения.

Сейчас изучаются условия получения экситонного конденсата в пространственно разделенных двухмерных структурах углеродных трубок.

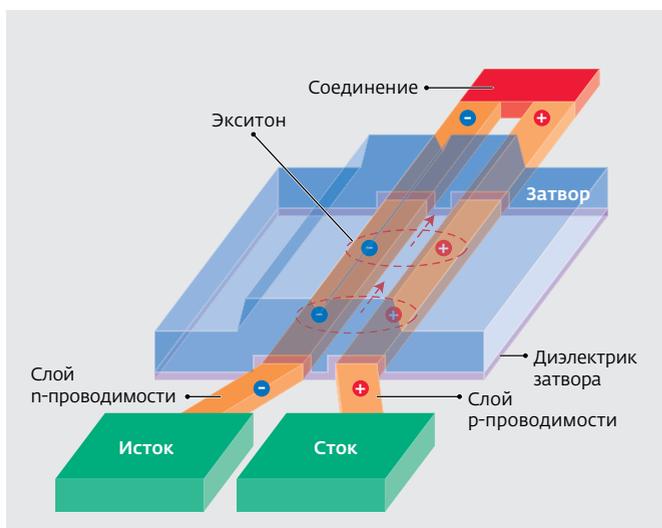


Рис.8. Структура экситонного полевого транзистора (ExFET)

Термические устройства на основе GNR изучаются в Университете Пердью. Расчетное значение теплопроводности симметричных нанополосок с зигзагообразными краями размером 1,5×5,7 нм составило ~2000 Вт/м·К при температуре 400К. Изучение хиральности краев показало, что теплопроводность нанополосок типа зигзага больше, чем полосок типа кресла с ручками. Для асимметричных трехгранных и трапециевидных полосок был получен существенный эффект термического выпрямления. Зависящий от размера полоски коэффициент выпрямления достаточно ощутимым (20–30%) при длине полоски 23 нм, несмотря на неровности края [17].

В рамках программ NRI изучаются принципы построения ключей и вентилях на основе экситонов, магнитных колец, фокусировки электромагнитного поля линзой Веселаго, переноса спинового момента, мультиферроиков и взаимодействия электрического поля со спинами. Но пока не получены результаты, позволяющие оценить характеристики приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bernstein K., Cavin R.K., Porod W. et al.** Devices and Architectures Outlook for Beyond CMOS Switches. – Proceedings of the IEEE, 2010, v.98, №2, p.2169–2184.
2. Nanoelectronics Research Initiative: Government-Industry Partnership on University Research. – www.choosetocompete.org/downloads/1-Pager_NRI.pdf
3. Nanoelectronics Research Initiative. – www.src.org/program/nri
4. **LaPedus M.** ISSCC: Expert picks winner for post-CMOS era – www.eetimes.com/electronics-news/4087533/ISSCC-Expert-picks-winner-for-post-CMOS-era.
5. **Юдинцев В.** Графен. Нанoeлектроника стремительно набирает силы. – Электроника: НТБ, 2009, №6, с.82–89.
6. **Han M.Y., Özyilmaz B., Zhang Y. and Kim P.** Energy Band Gap Engineering of Graphene Nanoribbons. – www.citebase.org/fulltext?format=application%2Fpdf&identifier=oai%3AarXiv.org%3Acond-mat%2F0702511
7. **Khitun A., Bao M., Lee J-Y. et al.** Inductively Coupled Circuits with Spin Wave Bus for Information Processing. – arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0705/0705.3864.pdf
8. **Khitun A., Bao M., Wang K.L.** Spin Wave Magnetic NanoFabric: A New Approach to Spin-based Logic Circuitry. – arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0709/0709.0521.pdf
9. **Khitun A., Nikonov D.E., Wang K.L.** Magnetolectric spin wave amplifier for spin wave logic circuits. – J. Appl. Phys., 2009, v.106.
10. **Csaba G., Imre A., Bernstein G.H. et al.** Nanocomputing by field-coupled nanomagnets – ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F7729%2F26427%2F01176966.pdf%3Farnumber%3D1176966&authDecision=-203.
11. **Alam M.T., Siddiq M.J., Bernstein G.H. et al.** On-chip Clocking for Nanomagnet Logic Devices. – www.nd.edu/~mniemier/Journals/2010/TNANO_Clocking.pdf
12. **Wolf S.A., Lu J., Stan M.R.** Beyond CMOS: RAMA A Revolutionary Approach to Logic and Storage. – www.virginia.edu/nanostar/images/research/Wolf_RAMA.pdf
13. **Behin-Aein B., Datta D., Salahuddin S., Datta S.** Proposal for an all-spin logic device with built-in memory. – www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20190748
14. **Zhang Q., Fang T., Xing H. et al.** Graphene Nanoribbon Tunnel Transistors. – nd.edu/~hxing/research_files/publications/08-Qin-edl-grapheneTunnelFET.pdf
15. **Banerjee S.K., Register L.F., Tutuc E. et al.** Bilayer PseudoSpin Field-Effect Transistor (BiSFET): A Proposed New Logic Device. – ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F55%2F4757318%2F04729616.pdf%3Farnumber%3D4729616&authDecision=-203
16. Excitonic FET – A Novel, Steep-Slope Alternative. – http://www.purdue.edu/discoverypark/nanotechnology/membership/Appenzeller/research_cnt.html
17. **Hu J., Ruan X., Chen Y.P.** Molecular Dynamics Study of Thermal Rectification in Graphene Nanoribbons. – www.physics.purdue.edu/quantum/files/2009.Boulder.IJT_v3.pdf