

# МИКРОЭЛЕКТРОНИКА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПРОГНОЗЫ ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНЫХ ФОРУМОВ

## ЧАСТЬ 2

М.Макушин<sup>1</sup>, В.Мартынов, д.т.н., проф.<sup>2</sup>

УДК 621.382  
ВАК 05.27.00

Недавние международные мероприятия – Конференция по электронным приборам (IEDM, декабрь 2016 года), Симпозиум по промышленной политике (ISS, январь 2017-го) и Конференция по твердотельным ИС (ISSCC, февраль 2017-го) – показали некоторое замедление действия так называемого закона Мура (отдельные эксперты говорят о прекращении его действия на уровне 28-нм топологий). В первой части статьи\* большое внимание было уделено вопросам применения кремния на технологическом уровне менее 11/9 нм, использованию новых приборных структур, например плавниковых полевых транзисторов (FinFET) и структур на обедненном кремнии-на-изоляторе (FD-SOI). Во второй части статьи рассматриваются новые виды магнитной памяти (STT-MRAM), технология EUV-литографии и перспективные материалы.

### ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ЭФФЕКТЕ ВРАЩЕНИЯ СПИНА (STT-MRAM)

Значительное внимание на IEDM-2016 и ISSCC-2017 было уделено перспективной технологии STT-MRAM (spin-torque-transfer MRAM). Считается, что STT-MRAM могут заменить ДОЗУ и флеш-память, когда последние достигнут физических пределов масштабирования.

**Характеристики STT-MRAM.** Пионером в развитии технологии MRAM является корпорация Everspin Technologies (Чэндлер, штат Аризона), которая занимается данной тематикой более 20 лет и уже выпустила около 60 млн дискретных MRAM, в основном для кеш-буферизации и промышленной электроники. В последнее время с ней тесно сотрудничает корпорация GlobalFoundries, занимающая второе-третье места в рейтинге кремниевых заводов (контрактное производство ИС). Главная цель совместных работ – оптимизация технологического процесса формирования STT-MRAM. Благодаря сотрудничеству GlobalFoundries намерена в 2018 году приступить к выпуску STT-MRAM на платформе 22FDX (22-нм схемы с использованием технологии полностью обедненного кремния-на-изоляторе (FD-SOI)).

<sup>1</sup> АО "ЦНИИ "Электроника", mmackushin@gmail.com.

<sup>2</sup> АО "ЦНИИ "Электроника".

\* Макушин М., Мартынов В. Микроэлектроника на современном этапе: тенденции развития и прогнозы. По материалам международных форумов. Ч. 1 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 2. С. 110–118.

Активные работы в области MRAM и STT-MRAM также ведут компании Samsung, SK Hynix, TSMC, Sony и IBM. К слову, исследователи IBM первыми предложили STT-подход совершенствования MRAM и в настоящее время работают над технологией высокопроизводительных MRAM, предназначенных для серверов. Плотность (расположение элементов) MRAM ограничивается в основном размером транзисторов, необходимых для возбуждения тока, достаточного для того, чтобы магнитный туннельный переход поменял ориентацию. Это осложняет задачу замещения ДОЗУ схемами MRAM. Однако разработчики IBM считают, что MRAM уже можно применять в архитектурах памяти системного уровня, а также в технологии встраиваемой памяти. По некоторым данным, оборудование для производства STT-MRAM начала выпускать корпорация Intel.

Следующее поколение MRAM представлено схемами на основе эффекта изменения момента вращения орбиты спина<sup>\*</sup> (SOT-MRAM, spin-orbit-torque MRAM) и схемами, управляемыми напряжением (Voltage Controlled MRAM), способными конкурировать как с ДОЗУ, так и с СОЗУ. Однако, по оценкам аналитиков, быстрее удастся коммерчески освоить STT-MRAM, которые будут конкурировать с другими решениями в области встраиваемой памяти. Современные и будущие быстродействующие процессоры требуют высокопроизводительных подсистем памяти.

Быстродействие STT-MRAM позволяет заменить в перспективных процессорах кэши первого и второго уровней, которые сейчас в основном используют СОЗУ, а также ДОЗУ и флеш-память NAND-типа. MRAM способны заменить СОЗУ в системах с большим объемом памяти этого типа, так как обладают не только необходимым быстродействием, но и хорошими показателями сохранения данных и средней плотности (расположения элементов). Кроме того, размер ячейки MRAM меньше, чем 6-транзисторной ячейки СОЗУ. Проблема более высокой стоимости MRAM по сравнению с ДОЗУ несколько смягчается по мере того, как при масштабировании на уровнях менее 20 нм схем ДОЗУ производители сталкиваются с проблемой увеличения издержек вследствие перехода к более сложным конденсаторным структурам.

**Термовакuumное осаждение из паровой фазы и травление.** Для интеграции в логический процесс BEOL<sup>\*\*</sup> схемам MRAM требуется всего несколько дополнительных шаблонов. Однако сохраняются серьезные проблемы с производительностью этапов термовакuumного осаждения из паровой фазы (ТОПФ), необходи-

мых для послойного осаждения (получение этажерки) сложных материалов и контроля слоев на границе разделов. В рамках этапов ТОПФ необходимо сформировать приблизительно 30 слоев и контролировать их с точностью до нескольких ангстрем. При этом осаждение проводится в условиях очень низкого давления и в средах, свободных от воды и кислорода. В настоящее время поставщики инструментальных средств работают над созданием коммерчески доступных систем осаждения для производства MRAM на пластинах диаметром 300 мм. Перед ними стоят сложные задачи: сохранение под контролем достигнутых ранее показателей наличия загрязняющих частиц, минимизация циклов технического обслуживания и очистки камер.

Травление этажерок сложных материалов еще сложнее. На данный момент химическое реактивное ионное травление для MRAM не практично. Применение ионно-лучевого травления проблематично с точки зрения повторного осаждения материала, распыленного в процессе травления магнитных туннельных переходов.

По мере того как фирмы-производители переходят от НИОКР в области MRAM к серийному производству, проблемы у поставщиков инструментальных средств осаждения и травления усложняются.

Представители корпорации Samsung в рамках работ по оптимизации травления контактов используют ионно-лучевое травление на этапах формирования рисунка. Благодаря этому удалось снизить частоту отказов (вызванных коротким замыканием) и удерживать температуру обработки на уровне менее 350 °С.

Во многих представленных на IEDM-2016 и ISSCC-2017 докладах говорилось об улучшении ключевых параметров, таких как туннельное магнитное сопротивление, размер ячейки, срок хранения данных (20 лет и более), коэффициенты ошибок во время считывания при высокой температуре или низких значениях рабочего напряжения.

**Этапы очистки и герметизации.** Одна из проблем, характерных для технологии MRAM, заключается в необ-

\* орбитального углового момента и спина (электрон имеет спин = ½)

\*\* BEOL (back-end-of-line) – завершающие операции обработки полупроводниковых пластин, включая металлизацию.

ходимости избежать ухудшения магнитных свойств туннельного перехода при уменьшении размера ячейки и шага элементов. Для 28-нм логического процесса шаг элементов встраиваемой MRAM мог находиться в диапазоне 200 нм при критических размерах в 45 нм. Исследовательский центр IMEC представила ячейку 8-нм STT-MRAM, которую можно использовать в 10-нм логическом процессе. Реальный же шаг элементов MRAM характеризуется 100-нм диапазоном. В данной разработке IMEC принимали участие специалисты фирм GlobalFoundries, Micron, Qualcomm, Sony и TSMC.

На выбор материалов магнитного туннелированного перехода, помимо проблем с травлением, значительное влияние оказывают этапы обработки после формирования рисунка и процедура герметизации, так как одни металлы могут быть очищены сразу, а другие – нет. Для этажерок материалов, формирования рисунка (литография и травление) и очистки критическим фактором является совместная оптимизация этих процессов.

Химическое травление (реактивно-ионное) на этом этапе невозможно. Практически все поставщики оборудования работают над решением проблемы распыления частиц в процессе термокомпрессионного травления (ионно-лучевого) в целях ограничения уровня загрязнений.

Для обеспечения серийного производства MRAM поставщики оборудования должны улучшить такой показатель, как период работоспособного состояния оборудования, и сократить продолжительность циклов технического обслуживания. Существует определенная взаимосвязь между возникновением отказов/дефектов и состоянием (степенью чистоты) камер производственного оборудования – этапы очистки после травления крайне критичны для всей совокупности мер по улучшению рентабельности MRAM.

**Полный технологический процесс от Applied Materials.** Корпорация Applied Materials разработала полный технологический процесс производства MRAM, предусматривающий формирование около 20-ти различных слоев, из них примерно половина состоит из различных материалов. Вся эта структура осаждается в целях формирования магнитных туннельных переходов. Еще два года назад пропускная способность оборудования для формирования этажерки данных материалов была предельно малой. Благодаря новой многокатодной установке для ТОПФ компании Applied Materials, разработанной специально для осаждения структур MRAM, теперь есть возможность осаждения пленок толщиной в 5 Å в течение нескольких секунд. Производительность увеличилась до 20 пластин в час. Applied Materials создала принципиально новую установку, предназначенную для формирования структур STT-MRAM. Она отличается оптимизацией многокатодных решений, позво-

ляющих добиться улучшенного формирования стенок многослойной конструкции.

Новая система обеспечивает возможность осаждения различных металлов и других материалов на уровне промежуточного шаблона с дальнейшим переносом на основную пластину. Форма и структура камер осаждения подобраны так, чтобы при осаждении материалов исключить образование паров, которые могут стать основой формирования дефектов структуры.

**Применение MRAM.** Будут ли применимы MRAM в электронных системах очередного поколения? По мнению отраслевых специалистов, встраиваемые MRAM и STT-MRAM могут оказать значительное влияние на улучшение эксплуатационных характеристик промышленной и потребительской электроники благодаря присущим им свойствам энергонезависимой памяти. Очевидно, что MRAM/STT-MRAM имеют определенные рыночные ниши, в которых они могут заменить схемы ДОЗУ и СОЗУ, а в ряде применений и схемы флеш-памяти NOR-типа. Но в ближайшее время флеш-память останется одним из видов ЗУ большой и сверхбольшой емкости – пока MRAM не опередят ее по рентабельности [6].

## EUV-ЛИТОГРАФИЯ С ВЫСОКОЙ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ

Мировая микроэлектроника замерла на технологических уровнях 14–20 нм в ожидании реализации в промышленном производстве революционной технологии литографии – EUV. Ведущая мировая тройка Intel, Samsung и крупнейший тайваньский производитель TSMC более десяти лет тому назад сделали ставку именно на этот метод и связали с ним экономически целесообразное массовое производство СБИС с топологическими нормами 10 нм и менее.

В печати не сообщалось, но можно предположить, что первые попытки применения EUV для получения конкретных топологических масок СБИС с размерами элементов 5–7 нм показали ошибочность принятого конструктивного решения установки переноса изображения с низким значением апертуры и малым масштабом. Это привело к необходимости существенной модернизации метода – объявлено, что новое конструктивное решение будет основано на использовании метода анаморфной проекции.

В целях ускорения освоения в производстве интегральных схем EUV-литографии фирма ASML перешла к разработке систем с высокой числовой апертурой (NA). Новое оборудование со значением  $NA > 0,5$  будет способно формировать топологии с полушагом 8 нм, оно отличается использованием анаморфных зеркал для снижения эффекта затенения (экранирования) структур наноразмерных шаблонов. Новая конструкция зеркал

позволяет системе с числовой апертурой  $> 0,5$  достичь производительности, характерной для текущего поколения инструментальных средств ASML с  $NA=0,33$  при тех же величинах мощности источника излучения и чувствительности резиста.

Числовая апертура оптической системы – показатель, характеризующий диапазон углов излучения. Большие значения  $NA$  позволяют добиться более высокой разрешающей способности при более широком диапазоне этих углов. Поверхности зеркал, отражающие EUV-излучение, изготавливаются на основе двухслойной структуры, содержащей 50 атомарных слоев молибдена и кремния. Увеличение размера зеркал позволяет достичь больших значений углового распространения света, что способствует повышению четкости рисунков.

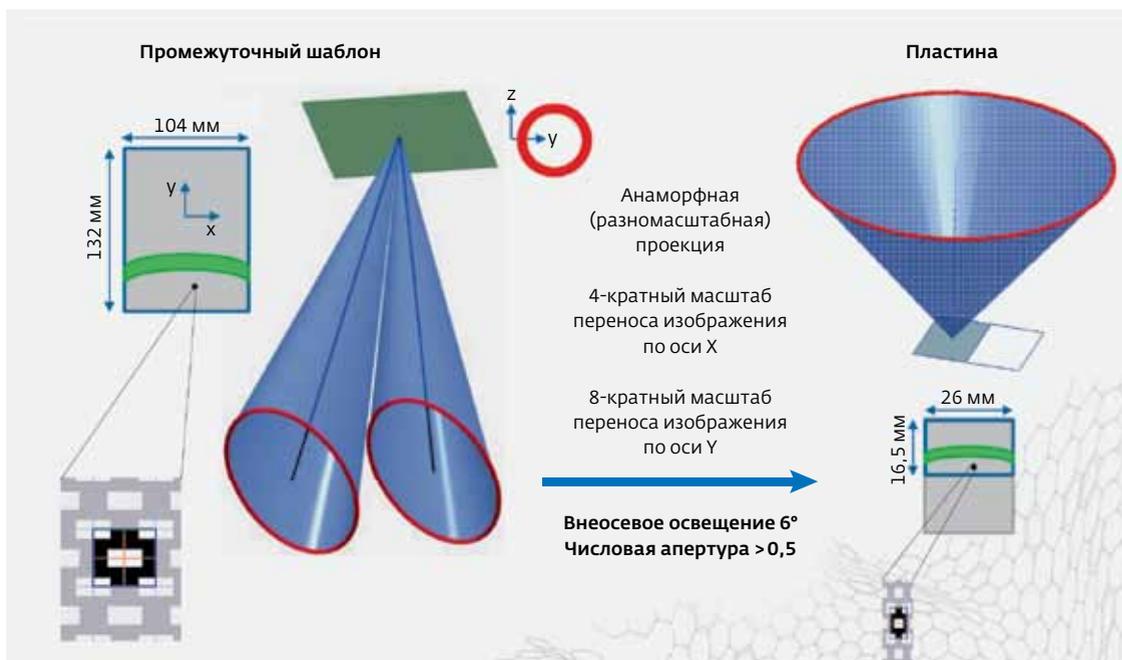
Для оптики с высоким значением  $NA$  топология увеличивается в четыре раза и, соответственно, использование полного размера поля в  $26 \times 32$  мм и шаблона диаметром 150 мм становится невозможным. Увеличение угла главного луча и более высокое значение  $NA$  на промежуточном шаблоне приводит к неприемлемым эффектам затенения шаблона. Подобные эффекты могут контролироваться только путем увеличения изображения, следовательно, снижается производительность системы или требуются большие размеры шаблона. Как было продемонстрировано, оптимальным компромиссом в плане формирования изображения, производительности и разделения поля является так называемое анаморфное увеличение и половинное поле  $26 \times 16,5$  мм (при использовании существующей шаблонной инфраструктуры).

Корпорация ASML планирует представить подобную систему после 2020 года. Ее производительность составит 185 пластин в час, а ошибка совмещения  $< 2$  нм. Представители фирмы также заявляют, что возможность использования  $NA > 0,5$  не будет воспроизводиться в инструментальных средствах с  $NA=0,33$ , так как "оптическая длина пути в первом случае больше и в случае  $NA=0,33$  потребуется новая платформа. Другими словами, расширение возможностей средств с  $NA=0,33$  за счет создания новой платформы экономически и технически бессмысленно. Для анаморфного формирования изображений также потребуются изменения на уровне описания топологии и формирования шаблонов".

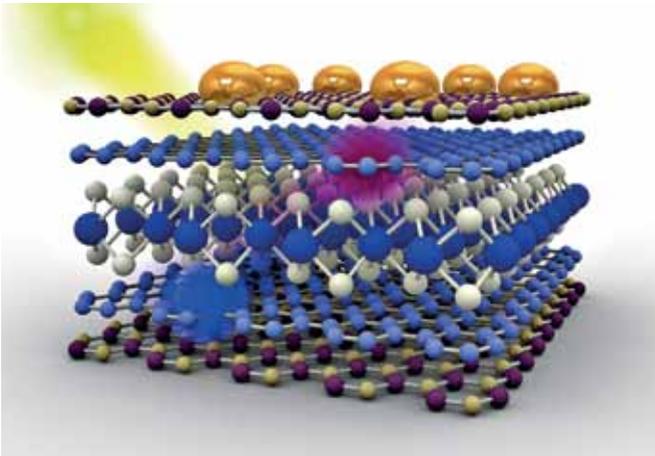
При формировании топологических элементов с полушагом 8 нм совмещение  $< 2$  нм станет критическим, особенно когда строчки линий располагаются между полуполями, формируемыми за одну операцию EUV-экспонирования.

Достижение высокой точности совмещения ( $< 2$  нм) также необходимо для обеспечения возможности использования EUV для обрезки линий сетки, первоначально формируемых разбивающим на полушаг иммерсионным источником излучения на AgF-лазере. В дополнение к созданию набора зеркал с высокой  $NA$  потребуется усовершенствовать многие части степпера, для того чтобы улучшить совмещение в 3 нм (т.е. получить совмещение  $\leq 3$  нм), которое характерно для степперов NXE:3400B с  $NA=0,33$  (ASML планирует начать их отгрузку в следующем году).

Достижение лучшего совмещения требует оптимизации этапов обработки пластины и использования промежуточного шаблона независимо от значения  $NA$ .



**Рис.7.** Анаморфная разномасштабная EUV-система, разрабатываемая ASML и Zeiss, требует увеличения рисунка шаблона в четыре раза по оси X и в восемь раз – по оси Y. Источник: Carl Zeiss SMT



**Рис.8.** Структура дихалькогенидов на переходных металлах. *Источник: Berkeley University of California*

Оптика – только один из многих компонентов, оказывающих влияние на совмещение. Интересно отметить, что в случае с иммерсионной ArF-литографией NA в течение нескольких поколений составляла 1,35, улучшить совмещение удалось благодаря совершенствованию платформ.

**Планы производственного освоения.** Анаморфные системы при необходимости перехода от  $NA=0,33$  к  $NA \geq 0,5$  требуют модернизации шаблонов (рис.7). Для сравнительно больших кристаллов ИС, экспонируемых последовательно с использованием двух различных анаморфных шаблонов, может потребоваться согласование структур этих шаблонов, обеспечение их одинакового размера поля с понижением разрешающей способности и приведением к одной числовой апертуре порядка 0,33. Очевидно, что подобное смежное воздействие на один слой должно быть выполнено на уровне проектирования, что дополнительно ограничивает развитие технологий инструментальных средств САПР.

Хотя формирование крупных кристаллов ИС требует вдвое большего числа полупольных шаблонов, выходом в данной ситуации может быть подход анаморфного формирования изображения. Специалисты корпораций ASML и Zeiss сообщили, что формирование "идеальных" отверстий, которые затеняют центры зеркал, может способствовать улучшению характеристик инструментальных средств с  $NA=0,33$ . Подобные отверстия позволяют зеркалам лучше отображать и выстраивать ряд отображений. Теоретически после каждого полупольного экспонирования с  $NA > 0,5$  новое отображение может экспонироваться со скоростью вдвое большей, чем при полнопольном отображении с  $NA=0,33$ . При этом, правда, удваивается число этапов технологического процесса, что приво-

дит к снижению производительности на несколько процентов.

Исследователи отмечают, что выполнение сдвоенных операций EUV-экспонирования с  $NA > 0,5$  – сложная задача. Факторы снижения производительности технологического процесса:

- двойное экспонирование полнопольного изображения с применением EUV с  $NA=0,33$ ;
- восьмикратное экспонирование полнопольного изображения с использованием иммерсионного ArF-источника;
- четырехкратное экспонирование с совмещенным использованием иммерсионного ArF-источника излучения и источника непосредственного формирования изображения электронным лучом (EbdW) или методикой непосредственной самосборки (DSA).

По оценкам специалистов, одна EUV-система для поточно-массового производства, предлагаемая компанией ASML, будет стоить не менее 100 млн долл. Производительность подобных систем составит около 45 тыс. пластин, обрабатываемых в месяц. Более того, для формирования 7-нм конструкций производителям придется приобрести 7–12 EUV-степперов, инвестиции в оборудование формирования критических литографических слоев могут превысить 1 млрд долл. Соответственно, из-за дальнейшего роста издержек при переходе к 5-нм топологиям иммерсионная ArF с  $NA > 0,5$  литография может оказаться нерентабельной [7].

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В последние годы исследователи начали проявлять интерес к **дихалькогенидам на основе переходных металлов (TMD)** (рис.8), которые превосходят по многим позициям графен (двумерные листы углерода атомарной толщины с гексагональной кристаллической структурой). Графен – очень хороший проводник, который отличается высокой подвижностью электронов. После открытия графена в 2004 году его активно изучали в качестве альтернативы стандартным полупроводниковым материалам транзисторов, материал может обеспечить масштабирование до намного меньших топологических норм.

Однако для использования в транзисторах одного этого мало, необходима возможность переключения состояний проводимости электрического тока (включено/выключено). С графеном это непросто, требуется специфическая дополнительная схмотехника, чем и обусловлен поиск других перспективных материалов.

**За пределами возможностей графена.** В поисках альтернатив исследователи обратились к TMD, которые также могут быть изготовлены в виде тонких двумерных полотен или монослоев толщиной всего в несколько молекул. TMD обладают рядом параме-

тров, которые у графена отсутствуют. В первую очередь это запрещенная (энергетическая) зона, позволяющая управлять потоком электронов, то есть переключать прибор между состояниями (включено / выключено). Поэтому TMD пригодны для использования в транзисторах. Кроме того, они хорошо поглощают свет с круговой поляризацией и могут использоваться в датчиках. По этим причинам упомянутые материалы – крайне популярная тема научно-исследовательских работ.

Тем не менее существуют и проблемы освоения TMD. Одна из них заключается в оптимизации и увеличении подвижности электронов в TMD-материалах, что является ключевым фактором для применения в транзисторах.

В предшествующих работах специалисты Гонконгского университета науки и технологии сформулировали теоретическое руководство послыонного формирования TMD-приборов, использовали магнитные поля в целях выявления механизма прохождения электронов сквозь данный прибор. Теоретически, в приборе каждый монослой TMD (толщиной в три молекулы) зажат между двумя листами нитрида бора (BN). Американские и гонконгские ученые отмечают, что характеристики подобных структур определяются поведением электронов. Задача исследователей – преодолеть трудности и создать эффективные методы значительного увеличения подвижности электронов.

Объединенная группа ученых из двух университетов обнаружила, что поведение электронов в TMD-материалах зависит не от количества слоев, а от того, четное или нечетное число слоев подобных материалов используется. Для разработчиков это открытие оказалось неожиданным.

**Физика электронов.** Поскольку TMD-материалы функционируют в масштабе отдельных атомов и электронов, в доклады ученых на конференциях были включены теоретические выкладки и наблюдения принципов квантовой физики.

В квантовом мире электроны ведут себя как волны (а не как поток частиц) – активная поперечная проводимость двумерного материала в присутствии магнитного поля не является непрерывным потоком, а изменяется дискретно. Это явление получило название квантовой холловской проводимости ( $3,874 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$ ). Она может изменяться поэтапно либо в последовательности два этапа ("ступеньки") через два этапа и т.д. Исследователи обнаружили, что если в приборе используется четное количество TMD-слоев, то наблюдается 12-этапная квантовая проводимость. Если приложить достаточно сильное поле, то возможно одноразовое изменение на шесть "ступенек".

В случае нечетного числа TMD-слоев в сочетании со слабым магнитным полем наблюдалась шестисту-

пенчатая квантовая холловская проводимость, однако стоило приложить более сильные магнитные поля – она менялась на трехступенчатую.

Исследователи утверждают, что тип квантовой холловской проводимости, который они прогнозировали и наблюдали в TMD-приборах, не удавалось обнаружить ни в каком другом материале. Полученные результаты не только раскрывают внутренние свойства TMD-материалов, но и демонстрируют достижение высокой подвижности электронов в созданных приборах. Можно надеяться, что когда-нибудь TMD-материалы будут использованы в транзисторах [8].

\* \* \*

Таким образом, можно рассчитывать, что в ближайшие годы на конференциях IEDM и ISSCC, на которых раньше сообщалось об очередных рекордах в отношении суперСБИС, основное внимание будет уделяться поиску новых приборных структур и материалов в рамках заранее выбранных направлений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. SEMI ISS2017 uncovers new growth, forecast upgrades. Solid State Technology. The Pulse. January 10. 2017.
2. **McGrath D.** No Sign of 450nm on the Horizon // EE Times, 1.13.2017.
3. **Happich J.** Uncertainty Grows For 5nm, 3nm // EE Times, 12.7.2016.
4. **Happich J.** Imec Stacks Gate-all-Around Si Nanowires Vertically in CMOS MOSFETs // EE Times, 12.7.2016.
5. **Happich J.** Leti's 5nm Node to Stack Si Nanowires // EE Times, 12.7.2016.
6. **Lammers D.** MRAM Takes Center Stage at IEDM 2016 // Solid State Technology. The Pulse. December 14.2016.
7. **Korczynski E.** High-NA EUV Lithography Investment // Solid State Technology. The Pulse. December 5.2016.
8. Physicists decipher electronic properties of materials in work that may change transistors // Solid State Technology. Wafer News, December.