



## Замечания к использованию 2D-материалов

*Ключевые слова: 2D-материалы, архитектура, дихалькогениды, маршрутные карты, переходные металлы.*

*Во времена классического масштабирования Деннарда<sup>1</sup> разработчики привыкли думать о планарных транзисторах как о двумерных объектах. Однако по мере расширения использования двумерных материалов эти представления рухнули. Производители столкнулись с растущей сложностью физических аспектов полупроводниковых приборов, что отражается на подходах к их разработке, моделированию и производству.*

Масштабирование ИС потребовало перехода от планарных КМОП-архитектур к трехмерным архитектурам – с использованием технологии TriGate корпорации Intel и других разновидностей «плавниковых» полевых транзисторов (FinFET<sup>2</sup>), – получившим общее наименование «3D-транзисторы». При этом возникла необходимость, в частности, и переосмыслить некоторые термины – для их корректировки или адаптации к дальнейшему использованию. Например, термин «МОП полевые транзисторы», MOSFET (MOS – metal-oxide-semiconductor, «металл-окисел-полупроводник»), продолжает использоваться, несмотря на замену оксида кремния (O) на изолирующие материалы с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k). Ряд отраслевых обозревателей отмечает, что в сложившихся условиях предпочтительнее было бы заменить его термином «МИП полевые транзисторы», MISFET (MIS – metal-insulator-semiconductor, «металл-изолятор-полупроводник»), поскольку он более точен.

Одна из недавних статей в онлайн-журнале Nature дала представление о будущем полупроводниковых технологий и привлекла внимание редакторов еженедельника Electronic

Engineering Times. Очевидно, что кремниевая материальная система подошла к пределам своих возможностей, и в этом плане все больше внимания привлекают перспективы развития и использования 2D-транзисторов. Дело не только в том, что FinFET «выдыхаются» – их разновидность, транзисторы с круговыми затворами (gate-all-around – GAA), останутся востребованы и при переходе к топологиям 3 нм и менее. При этом будущие приборы окажутся достаточно тонкими (один или два монослоя), чтобы считаться двумерными – а, как известно, традиционные трехмерные полупроводники, такие как кремний, плохо работают в таких условиях. Подобная перспектива требует обратить пристальное внимание на такой класс материалов, как дихалькогениды на основе переходных металлов (transition metal dichalcogenides, TMD или TMDC): дисульфид молибдена (MoS<sub>2</sub>), диселенид молибдена (MoSe<sub>2</sub>), дителлурид молибдена (MoTe<sub>2</sub>), диселенид вольфрама (WSe<sub>2</sub>) и дисульфид вольфрама (WS<sub>2</sub>).

Ведущий автор публикации в журнале Nature, Сянфэн Дуань, работает в Калифорнском институте наносистем при Калифорний-

ском университете в Лос-Анджелесе (США). Другие авторы представляют Университет Хунань (Чанша, провинция Хунань, КНР) и Институт перспективных технологий корпорации

Samsung (SAIT, Сувон, провинция Кенгидо, Республика Корея). В своей статье они рассмотрели потенциал TMD-материалов для применения в 2D-транзисторах при производстве ИС.

## МАРШРУТНАЯ КАРТА

Прежде чем перейти к актуальной статье в Nature, следует рассмотреть другие источники прогнозирования. Когда речь заходит о долгосрочных перспективах технологического развития, одним из лучших таких источников можно считать Межуниверситетский центр микроэлектроники (IMEC, Левен, Бельгия). На последней Международной конференции по электронным приборам (International Electronic Devices Meeting, IEDM), состоявшейся в декабре 2020 г., его специалисты рассмотрели будущее масштабирования с нескольких точек зрения – от материалов до «деконструированных кристаллов ИС» (возможно, таким образом они пытались избежать использования термина «чиплет»).

Для предстоящего масштабирования стандартных ячеек логических приборов – чтобы получить структуру ниже четырехтрековой

ячейки – IMEC обращается к транзисторам на основе 2D-материалов. Его маршрутная карта развития включает в себя создание 2D-транзистора по технологии с проектными нормами 1 нм и менее. Это произойдет после эры нанолитовых структур, а также этажированных нанолитовых структур комплементарных полевых транзисторов (CFET), где для четырехтрековых ячеек будет использоваться 1,5-нм технология. Впечатляющий технологический сдвиг, и притом за довольно короткое время – всего за десятилетие или около того.

Можно с уверенностью предположить, что в качестве материала канала IMEC рассматривает  $WSi_2$ . Подход выглядит многообещающим – разработчики IMEC уже сообщили об изготовлении первых 2D-МОП-транзисторов на производственной линии по обработке 300-мм пластин (рис. 1).

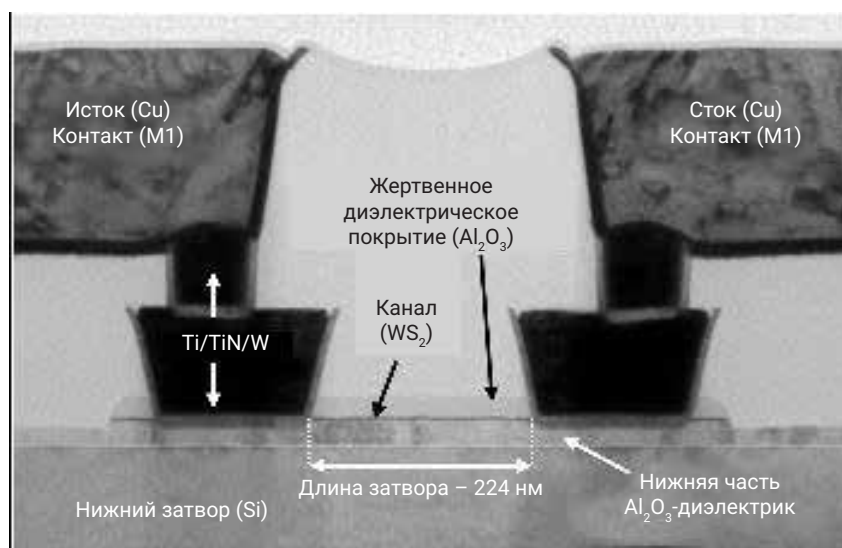


Рисунок 1. Транзистор с  $WS_2$ -каналом (IMEC)

Примечание: M1 – первый уровень металлизации.



В статье, опубликованной в журнале Nature, цитируется последнее издание Международной технологической маршрутной карты развития полупроводниковых приборов (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS), опубликованной в 2015 г. В ней предполагалось, что в 2021 г. максимум по току кремниевого КМОП-транзистора составит около 1500 мкА/мм. Сравним эти прогнозы с последней маршрутной картой.

Как известно, в свое время ITRS была заменена Международной маршрутной картой развития [полупроводниковых] приборов и систем (International Roadmap for Devices and Systems, IRDS), разработчики которой попытались взглянуть на развитие микроэлектроники более целостно. Последняя редакция IRDS была опубликована в 2020 г. Поскольку большая часть разработчиков ITRS осталась в команде IRDS, формат документа почти не изменился, однако несколько изменилось количество, а глав-

ное – направленность рабочих групп. С точки зрения 2D-материалов наиболее интересны маршрутные карты, основанные на концепциях «Больше Мура»<sup>3</sup> (More Moore) и «За пределами КМОП-технологии» (Beyond the CMOS).

Последняя маршрутная карта, основанная на концепции «Больше Мура», указывает, что максимальный ток во включенном состоянии для стандартного КМОП-прибора должен немного превышать 1700 мкА/мм. С использованием старой маршрутной карты (ITRS) значение тока возбуждения нового материала становится более подходящим для целей сравнения нового класса 2D-материалов с традиционной технологией, так как их диапазоны достаточно близки (рис. 2).

Специалисты, придерживающиеся концепции «За пределами КМОП-технологии», предполагают, что переход к 2D-материалам состоится в 2028 г., когда наступит время технологического уровня 1,5 нм.

## НЕМНОГО О МЕТРИКАХ

Авторы обзора 2D-транзисторов предполагают, что ряд метрик, используемых для определения пригодности или оценки прогресса новых материалов, тормозят их развитие. В конечном счете важна производительность, а не побивание лабораторных мировых рекордов по конкретным физическим свойствам.

Основной преградой на пути дальнейшего масштабирования в реальном мире является соотношение таких показателей, как потребляемая мощность, производительность, площадь кристалла ИС и стоимость (PPAC). Новые конструкции и материалы транзисторов будут использоваться в массовом производстве только в том случае, если этот баланс будет соответствовать требуемым значениям.

Для транзистора метрикой производительности является ток возбуждения (ток во включенном состоянии). Различают также ток возбуждения в режиме насыщения, он измеряется на единицу ширины прибора. Эталон-

ные единицы измерения тока во включенном состоянии – мкА/мм. Дуань и его коллеги предполагают, что другие общие показатели, такие как подвижность носителей заряда и контактное сопротивление (сопротивление контакта), не дают всей необходимой информации. Более того, использование только этих или преимущественно этих метрик может привести к «двусмысленным и иногда противоречивым утверждениям». В подтверждение своих слов авторы указывают на сообщения о случаях, когда высокая подвижность носителей или низкое контактное сопротивление не приводили к высокому току возбуждения. Они считают, что нет смысла концентрироваться на повышении подвижности носителей заряда или снижении контактного сопротивления – ведь зачастую из-за этого разработчики застревают на моделировании приборов, осуществляемом только для того, чтобы объяснить плотность тока, достигаемую этими

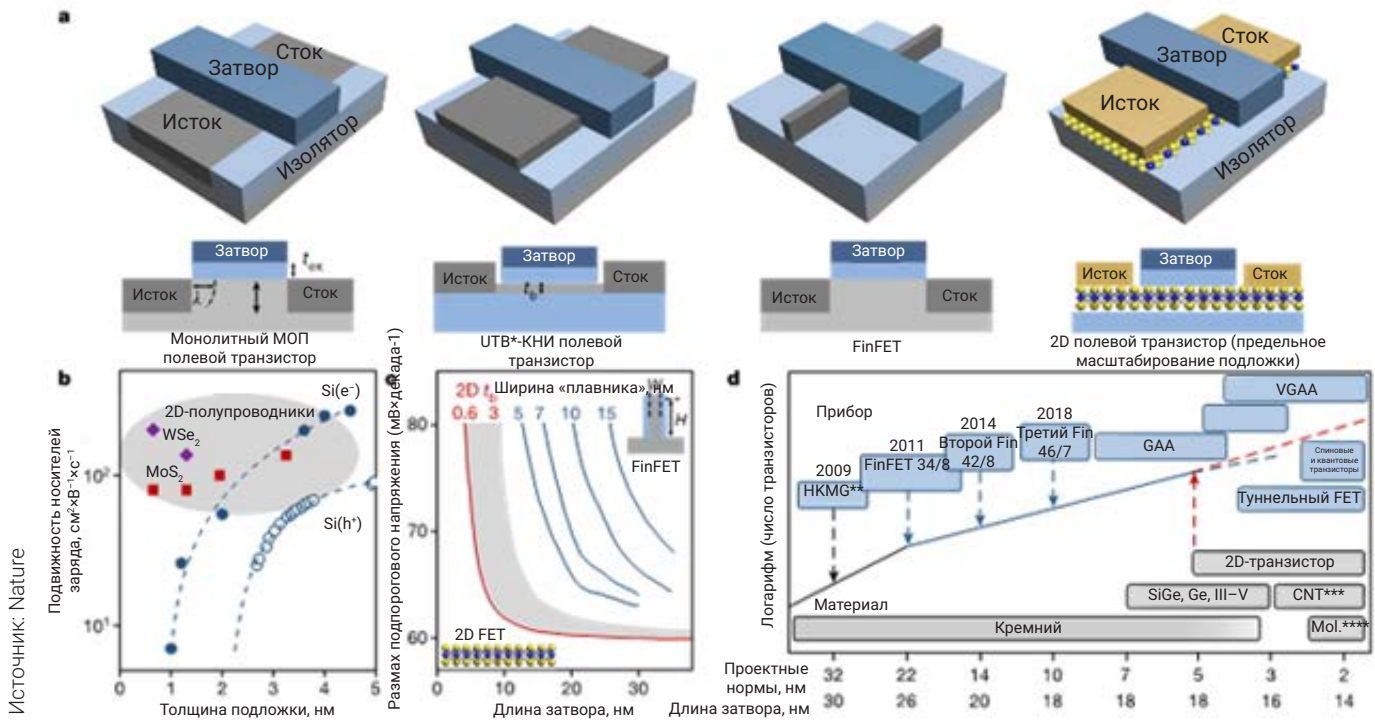


Рисунок 2. Маршрутная карта перехода от монолитных MOSFET к 2D MISFET

\* UTB (ultimate body scaling) – предельное масштабирование подложки.

\*\* НКМГ (high-k metal gate (process)) – процесс формирования ИС с металлическим затвором и высоким значением диэлектрической проницаемости диэлектрика.

\*\*\* CNT – углеродные нанотрубки.

\*\*\*\* Mol. – молекулярная электроника.

Примечание: Дробью обозначены отношения высота/ширина «плавника».

транзисторами. Дуань и его коллеги предлагают сравнивать 2D-транзисторы с обычными технологиями по одному показателю, использование которого приведет к появлению перспективного поколения высокопроизво-

дительных продуктов. Однако сейчас лучшие показатели 2D-транзисторов составляют около половины (или меньше – в зависимости от конкретного TMD-материала) показателей обычных кремниевых транзисторов.

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ

Проблема с масштабированием кремниевого канала заключается в том, что при уменьшении его толщины подвижность носителей быстро падает, особенно при выходе за рамки современной 5-нм технологии (толщина подложки менее 3 нм). В этом диапазоне 2D-TMD-материалы начинают демонстрировать конкурентные преимущества

по сравнению с кремнием, сохраняя необходимую подвижность носителей при толщине канала менее 1 нм.

Если говорить о кремнии, то параметры этого полупроводника точно определены, действующие механизмы, как и снижение подвижности носителей в тонких слоях, хорошо известны, причины этого понятны. Что же ка-



сается 2D-материалов, то совокупность знаний по ним в лучшем случае фрагментарна. Однако последовательное изменение подвижности заряда по мере утонения слоев до атомной толщины укладывается в общее представление о них. Это устойчивый показатель с точки зрения разработки 2D-материалов для производства, позволяющий объяснить физические аспекты их преимущества на перспективных технологических уровнях с меньшими размерами топологических элементов. Тем не менее 2028 г., дата внедрения 2D-транзисторов, предложенная в маршрутной карте IRDS, становится все ближе, а вопросы и проблемы никуда не деваются.

Возможность получить максимальную отдачу (наилучший ток возбуждения в режиме насыщения) от 2D-транзисторов зависит от четырех основных факторов: собственных свойств материала, контактного сопротивления, границы (поверхности) раздела между полупроводником и диэлектриком, тепловыделения. Для минимизации контактного сопротивления в современных транзисторах используются сильно легированные области истока и стока. Но эта технология не подойдет для атомарно тонкой 2D кристаллической решетки. Новые устройства требуют нового подхода.

Уже предложено несколько новых технологий формирования контактов – например, кромочные контакты. К ним относятся горизонтальные гетероструктуры металл–полупроводник – перспективные, интересные и пока малоизученные. Одной из наиболее перспективных методик, по мнению Дуана и его коллег, является формирование непосредственных контактов на основе ван-дер-ваальсовых сил<sup>4</sup>, что позволит обеспечить создание чистой границы раздела и перестраиваемого барьера металл–полупроводник. Подробнее об этих контактах написано в другой онлайн-публикации журнала Nature – «2D-материалы и их применения» (2D Materials and Applications).

Устройства, спроектированные на основе слоя толщиной от одного до нескольких ато-

мов, очевидно, потребуют в качестве основы соответствующего материала подложки. Здесь важным фактором оказываются тепловые характеристики, и с этой точки зрения большие перспективы продемонстрировал нитрид бора (BN). Так обеспечивается еще одно преимущество с точки зрения качества границы раздела, что, в свою очередь, облегчает интеграцию изолирующего слоя затвора с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k) в 2D-транзисторы (рис. 3).

Хотя в ключевых областях удалось добиться определенных успехов, важно отметить, что цель одновременной оптимизации материала канала, контакта, диэлектрика, теплового интерфейса и геометрии прибора не достигнута. Вопросов еще много, а времени мало. Как отмечают авторы, приз окончательного лидерства на технологическом уровне 1,5 нм будет, по всей видимости, разыгрываться между корпорациями Samsung или TSMC.

Далее в статье Дуань и его соавторы исследуют вопрос перехода от лабораторных условий к условиям промышленного производства. Так, хотя нитрид бора показал большие перспективы для производства подложек диаметром 300 мм, большинство попыток осаждения ТМД на них приводит к формированию не желаемого монокристаллического, а поликристаллического материала. Многие 2D-материалы к тому же имеют плохую адгезию с соседними слоями в этажерке, что делает структуры уязвимыми перед проникновением нежелательных химических примесей во время обработки – результатом становится расслаивание и выход прибора из строя во время или после изготовления. И все же, несмотря на наличие внушительных камней преткновения, оснований для пессимизма нет.

Почему корпорации Samsung и TSMC рассматриваются как важнейшие разработчики любых новых 2D-материалов или приборных архитектур? Потому что они превосходят другие полупроводниковые фирмы в области интеграции технологических процессов. Также надо отметить, что для широкого освоения

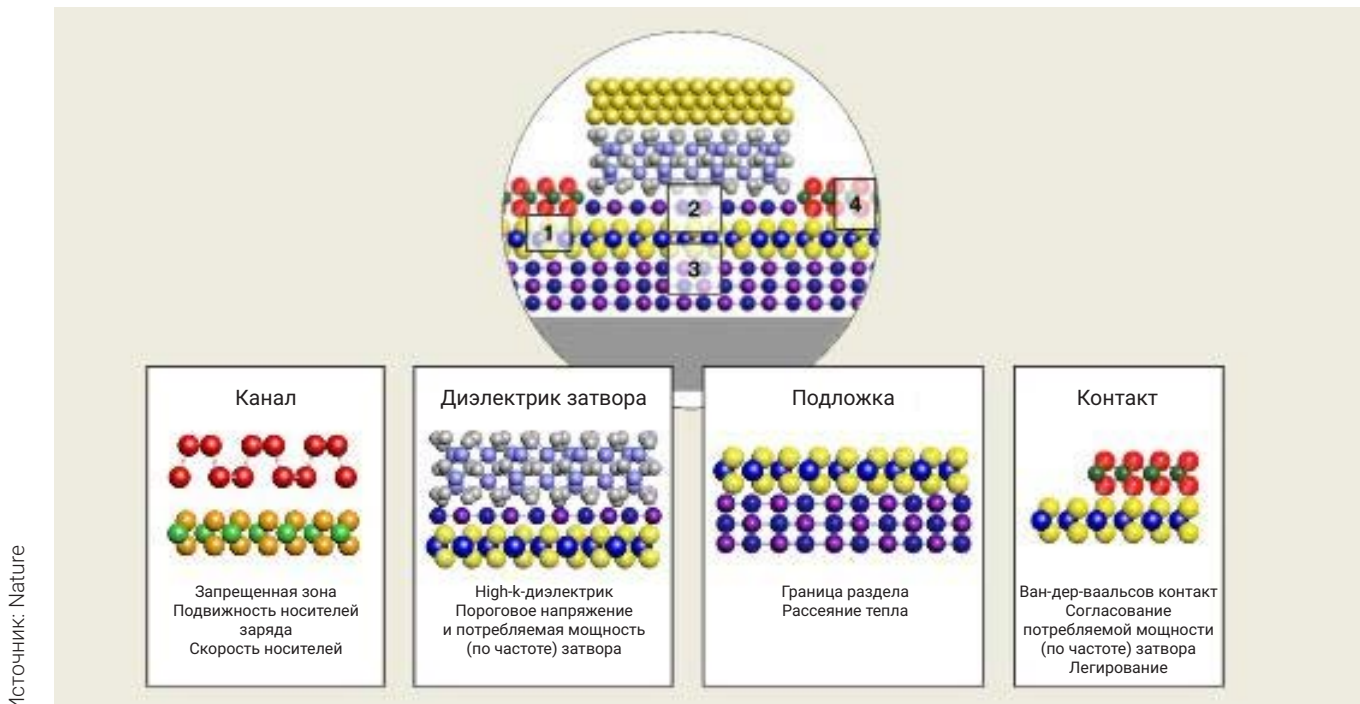


Рисунок 3. Четыре основных компонента теоретического 2D MISFET

2D-транзисторов в поточно-массовом производстве потребуются «захватчики рынка»<sup>5</sup>. При этом маловероятно, что 2D полупроводниковые приборы в обозримом будущем полностью заменят кремниевые. Наконец, авторы статьи в Nature напоминают, что до 2028 г. на самом деле осталось не так много времени. Соответственно, если заинтересованные в 2D-материалах и технологиях фирмы не рассчитывают хоть в чем-то обойти Samsung и TSMC, то им лучше присоединиться к этим гигантам (если получится).

В целом ответ на появившуюся проблему может лежать в 3D-интеграции. Только вместо интеграции 3D-систем, которая часто обсуждается как более чем простое решение при масштабировании, в этом случае речь идет о создании настоящих монокристаллических 3D интегральных схем.

Присущая 2D-кристаллам структурная автономность и отсутствие свободных (ненасыщенных) связей делает их хорошо подходящими для многоуровневой интеграции. Одна из главных трудностей с внедрением 2D-приборов была связана с подложками. Эта-

жирование таких приборов поверх обычных кремниевых подложек в рамках начальных операций обработки полупроводниковых пластин с формированием транзисторной структуры (front-end-of-line, FEOL) может решить одну из проблем.

Особо подчеркивается, что 2D-материалы могут быть получены при более низких температурах, чем обычно требуется при FEOL-операциях. Также 2D-материалы совместимы с современными завершающими операциями обработки полупроводниковых пластин, включая металлизацию (back-end-of-line, BEOL). Помимо возможности организовать этажирование слоев активных схем на одну и ту же пластину интеграция в рамках BEOL-операций открывает еще одну возможность – формирование нижнего затвора в 2D-канале, включенное непосредственно в технологический процесс, как продемонстрировали специалисты IMEC на примере своих  $WSi_2$ -транзисторов (рис. 4).

Еще одно потенциальное направление внедрения 2D-материалов представляет собой гибкая электроника. Гибкие приборы, как



Источник: IEEEE

Рисунок 4. 2D-транзистор IMEC с нижним затвором  $WS_2$ -канала, интегрированный в стандартный процесс металлизации

Примечание: M1, M2 – первый и второй уровни металлизации.

правило, основаны на органических полупроводниках, производительность которых на порядок ниже. В свою очередь, 2D-материалы являются не только высокоэффективными, но и гибкими, что в перспективе открывает целый ряд новых возможностей для создания высокоскоростных схем, которые в то же время будут гибкими, складными или конформными к нерегулярным поверхностям.

Дуань и его соавторы уверены, что, несмотря на отдельные трудности, нет никаких фундаментальных препятствий, мешающих внедрению 2D-материалов для формирования транзисторов ИС в промышленных масштабах. Переход на 2D-транзисторы представляется неизбежным. Всего несколько лет назад такое радикальное изменение было невыс-

лимо, но краткий экскурс по технологическим маршрутным картам и прогнозам демонстрирует быструю смену базовых технологий ИС в ближайшие годы. В этом контексте обилие таких материалов, как дителлурид молибдена ( $MoTe_2$ ), выглядит ничуть не удивительным.

Конечно, в перспективе всегда просматриваются следующие крупные технологические вызовы. Что будет дальше? Возможно, «отбрасывание» одного D и превращение 2D-технологий в 1D-технологии. «Технооракулы» уже предсказывают появление 1D-транзисторов из углеродных нанотрубок. Похоже, в области полупроводниковых технологий перемены становятся постоянным спутником разработчиков, проектировщиков и производителей.



Scansen Don. Chip Makers Must Learn New Ways to Play 'D'. EE Times, March 19, 2021: <https://www.eetimes.com/chip-makers-must-learn-new-ways-to-play-d/>