

Скаттерометрия и перспективные полупроводниковые технологии

М. Макушин¹

УДК 621.37 | ВАК 05.11.01

По мере масштабирования ИС и расширения сферы их применения возрастает значение метрологии. Ее средства обеспечивают поддержание рентабельности производства и необходимого уровня выхода годных. Существенное увеличение сложности технологических процессов по мере масштабирования способствует ужесточению требований к метрологии. Одним из перспективных подходов в этом плане является оптическая метрология критических размеров на основе скаттерометрии (OCD-скаттерометрия).

Долгое время полупроводниковая промышленность успешно использовала методы оптической метрологии на основе анализа изображений. Эти неразрушающие методы отличаются высоким быстродействием. По мере масштабирования размеров топологических элементов эти методы замещались более чувствительными методами сканирующей электронной микроскопии (SEM). Для планарных структур это неразрушающий метод, но для электронной микроскопии поперечных сечений (3D) уже требуется дополнительная разрушающая подготовка. В дальнейшем, помимо SEM, стали использоваться и методы просвечивающей электронной микроскопии (TEM). Она на данный момент отличается, с одной стороны, наивысшей точностью (вплоть до атомарного уровня), а с другой – это разрушающий метод с длительным циклом. Соответственно, она малопригодна для управления технологическими процессами изготовления ИС.

Современные и перспективные полупроводниковые технологические процессы требуют точных средств метрологии с высоким быстродействием. Поэтому одним из направлений их создания стала модификация методов оптической метрологии с целью достижения высокой скорости неразрушающих измерений и высокой точности данных о форме, размере и составе исследуемых объектов.

МИРОВОЙ РЫНОК СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИИ

По данным ресурса Mordor Intelligence, объем рынка полупроводникового метрологического/контрольно-измерительного оборудования в 2020 году достиг 4,165 млрд долл. В 2026 году продажи на нем составят 5,248 млрд долл., а среднегодовые темпы прироста

в сложных процентах (CAGR) за период 2021–2026 годов ожидаются на уровне 4,26% [1]. При этом, по данным Ассоциации полупроводниковой промышленности США (SIA), в 2020 году продажи полупроводниковых приборов достигли 439,0 млрд долл. [2].

Современная ситуация на рынке средств метрологии определяется рядом факторов. Во-первых, по мере того как ИС внедряются во все большее число продуктов, растет спрос на более дешевые и высокопроизводительные устройства. Для обеспечения рентабельности проектирования и изготовления высокопроизводительной микросхемы необходимо контролировать различные параметры, связанные с производственным процессом, такие как толщина пленки, свойства материала, ширина токопроводящих дорожек и т. д. Кроме того, в ИС не должно быть дефектов, влияющих на выход годных. Таким образом, метрология полупроводниковых приборов является неотъемлемой частью управления процессами их производства.

Во-вторых, одной из движущих сил рынка средств метрологии является усиление тенденции к измерению многослойных структур из-за использования систем кластерного осаждения, где нет возможности послыслового измерения [3]. В-третьих, наблюдается тенденция роста спроса на средства метрологии тонких пленок. В-четвертых, по мере масштабирования ИС на заводах по обработке пластин повышается стоимость и увеличивается сложность операций метрологии/контроля. Это сказывается на продажах соответствующего оборудования. Так, за первые три квартала 2018 года доходы поставщиков оборудования начальных этапов обработки пластин (FEOL)* выросли на 19,4%, а поставщиков оборудования метрологии/контроля – на 26,7% [4]. В-пятых,

¹ АО «ЦНИИ «Электроника», главный специалист, mmackushin@gmail.com.

* FEOL (front-end-of-line) – начальные операции обработки полупроводниковых пластин, формирование транзисторной структуры.

крупнейшим рынком использования средств метрологии/контроля является Азиатско-Тихоокеанский регион, где расположены основные производственные мощности мировой полупроводниковой промышленности. Крупнейшим национальным рынком является рынок КНР [3].

Одним из наиболее интересных поставщиков средств метрологии является корпорация Onto Innovation (Уилмингтон, шт. Массачусетс). Она была образована в 2019 году слиянием корпораций Rudolph Technologies и Nanometrics. Ее доход в 2020 году достиг 556,5 млн долл. [5], что соответствует примерно 10,6% рынка полупроводникового метрологического/контрольно-измерительного оборудования.

НОВАЯ СОСТАВНАЯ МЕТРОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИМИ РАЗМЕРАМИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ ОТ ONTO INNOVATION

В конце 2020-го – начале 2021 года корпорация Onto Innovation (Уилмингтон, шт. Массачусетс) выпустила на рынок набор из трех метрологических решений для управления технологическими процессами. Этот набор оптических метрологических решений ориентирован на полупроводниковые приборы следующего поколения – 3D-схемы флеш-памяти NAND-типа, 5/3-нм логические приборы и перспективные ДОЗУ. При разработке новых метрологических решений корпорация использовала свой традиционный подход (рис. 1) и действовала в тесном взаимодействии с клиентами. Анализ данных, применяемый Onto Innovation, тесно связан

с метрологическими лабораторными стандартами ее клиентов, такими как контроль критических размеров (CD) при помощи SEM и TEM. Это означает, что они могут продолжать использовать быстродействующие оптические метрологические системы без необходимости использования рентгеновской технологии.

Для самых передовых 3D-схем флеш-памяти NAND-типа проблемы, связанные с измерением отверстий каналов с аспектным отношением, намного превышающим 80:1, вынуждают клиентов рассматривать рентгеновские инструментальные средства с меньшим (по сравнению с оптической метрологией) быстродействием и другие разрушающие методы измерения. Аналогично, для самых современных ДОЗУ и логических приборов, сложных транзисторных структур и новых материалов на топологиях 5/3 нм клиентам требуются новые методы метрологии для критических этапов формирования круговых затворов и нанолитов. Три платформы Onto Innovation выводят оптические технологии на новый уровень, обеспечивая преимущества как высокой чувствительности, так и высокой производительности, а также предоставляют клиентам информацию со скоростью и качеством, необходимыми для разработки процессов и массового производства.

Метрология 3D NAND, ДОЗУ и 3D-логики

Новая метрологическая система Atlas V предназначена для измерения нескольких ключевых этапов, включающих формирование заглубленных топологических элементов, невидимых CD-SEM и другими методами.



Рис. 1. Обобщенный метрологический процесс корпорации Onto Innovation

Чувствительность Atlas V позволяет измерять эти этапы с высокой точностью, расширяя возможности оптических решений для нового поколения приборов и устраняя необходимость в других более медленных методах управления процессом.

Технология Atlas V обеспечивает производительность, необходимую для разработки клиентами приборов с круговыми затворами, и в 100 раз большую, чем рентгеновские решения для этих структур. Утверждается, что достигнуты скорость и разрешение, которые когда-то считались лежащими за пределами возможностей оптических технологий.

Система IMPULSE V

Система IMPULSE V обеспечивает увеличенные производительность и улучшенные эксплуатационные характеристики интегрированной метрологии следующего поколения и отличается высокой надежностью. Она позволяет осуществлять бесперебойную совместную работу с системами химико-механической полировки (CMP). Также обеспечивается высокопроизводительный текущий контроль итоговых значений критических этапов технологического процесса. В целях непрерывной настройки и оптимизации производства предусмотрено взаимодействие систем IMPULSE V и Atlas V. Используя новейшую технологию машинного обучения, технология IMPULSE V поддерживает внутриприборную метрологию, обеспечивая широкую гибкость и высокий охват технологического процесса.

Перспективная метрология 3D NAND

Система Aspect является оптической платформой, предназначенной для современных и будущих задач контроля перспективных 3D-схем флеш-памяти NAND-типа. Емкость памяти увеличивается как при масштабировании пар слоев, так и на уровне этажерок памяти из более чем 200 пар слоев. Технология Aspect была разработана с учетом этих будущих архитектур и стратегий масштабирования. Производительность метрологии Aspect превосходит производительность рентгеновских систем применительно ко многим пользовательским приборам. Это достигается за счет ИК-оптической системы, обеспечивающей возможность полного профилирования и позволяющей контролировать критические измерения процессов травления и осаждения с необходимой скоростью.

Дифракционное моделирование на основе ИИ как основа набора метрологических решений

Основным компонентом всех трех входящих в набор метрологических решений является технология дифракционного моделирования на основе искусственного интеллекта. Это механизм анализа программного

обеспечения, лежащий в основе всех трех метрологических систем, позволяет решать задачи на 90% быстрее. Кроме того, технология дифракционного моделирования на основе искусственного интеллекта расширяет возможности популярного в отрасли ПО NanoDiffract® за счет использования широких возможностей машинного обучения и высокой точности моделирования. Результат – одновременное улучшение производительности метрологии и значительное сокращение цикла процесса [6].

OCD-СКАТТЕРОМЕТРИЯ GAA-ПРОЦЕССОВ

Дальнейшее развитие полупроводниковых технологий связано с переходом на новые приборные структуры. Одной из таких структур являются круговые затворы (gate-all-around, GAA), предлагающие значительное увеличение производительности на технологических уровнях с минимальными размерами топологических элементов. Однако при этом существенно увеличивается сложность технологического процесса. Все это делает точную метрологию производственных GAA-процессов как более важной, так и более сложной задачей.

При освоении нескольких последних поколений полупроводниковых технологий наиболее перспективной стала оптическая метрология критических размеров на основе скаттерометрии (OCD-скаттерометрия) – отчасти из-за ее способности измерять трехмерные формы и подповерхностные / вторичные характеристики. Последнее поколение самих OCD-систем обладает улучшенными параметрами отношения сигнал / шум, точности сигнала и перспективными возможностями машинного обучения, которые позволяют поддерживать самые сложные этапы GAA-процесса с повторяемостью измерений и высокой производительностью.

GAA-транзисторы по отношению к планарным транзисторам и FinFET

На протяжении большей части своей истории полупроводниковая промышленность была сосредоточена на планарных транзисторных архитектурах, в которых затвор, расположенный над каналом, управляет потоком тока через канал между истоком и стоком (рис. 2а). Исток, канал и сток являются копланарными, созданными на поверхности полупроводниковой пластины структурами, поверх которых формируется затвор. Увеличение вычислительной мощности интегральной схемы по существу связано с уменьшением ее размеров.

Когда номинальная длина затвора приблизилась к 20 нм, планарные приборы столкнулись с эффектами короткого канала, такими как увеличение токов утечки, что ухудшало их производительность. Для борьбы с этими эффектами производители перешли на полевые «плавниковые» транзисторы (FinFET), в которых канал

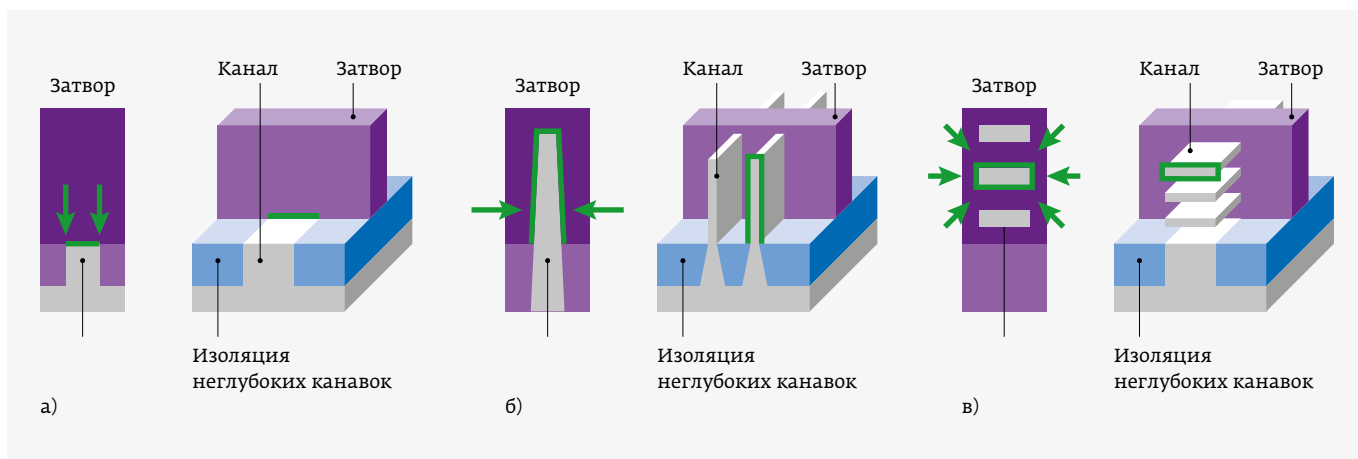


Рис. 2. Архитектуры полевых транзисторов с планарными (а), «плавниковыми» (б) и круговыми затворами (в)

имеет форму плавника (рыбы), окруженного с трех сторон затвором (рис. 2б). Это увеличивало эффективную площадь затвора в непосредственной близости от канала. FinFET-приборы позволили продолжить увеличение вычислительной мощности за счет уменьшения проектных норм – до уровня около 5 нм (при этом понятие node – технологический уровень, узел – больше не отражает точно длину затворов, а является скорее условностью, отражающей последовательные поколения с точки зрения увеличения плотности расположения устройств и вычислительной мощности). Затем производители столкнулись с ограничениями для FinFET и были вынуждены рассмотреть другие архитектуры. Некоторые из них выбрали конструкции с круговыми затворами, в которых, как следует из названия, затворы полностью окружают канал (рис. 2в). GAA-приборы обещают постоянное улучшение производительности, но из-за трехмерности сложность процесса их производства значительно повышается.

Управление технологическими процессами и оптическая метрология

Управление технологическим процессом, обеспечивающее надежное создание функциональных устройств с физическими и электрическими характеристиками, попадающими в заданные окна процесса*, является неотъемлемой частью любой операции по производству полупроводниковых приборов. Метрология как наука и практика измерения производительности технологических процессов обеспечивает основу для управления

технологическими процессами. Точно так же, как производственные процессы эволюционировали для создания более мелких и сложных устройств, измерительные технологии должны были измениться, чтобы контролировать новые процессы. Большая часть оптической метрологии на основе анализа изображений устарела, поскольку критические размеры сократились до субмикронного уровня еще десятилетия назад. Основной отраслью с тех пор стала сканирующая электронная микроскопия, специально разработанная для измерений критических размеров (CD-SEM). Этот подход является неразрушающим и обеспечивает нисходящие, двумерные измерения. Электронная микроскопия поперечных сечений (XSEM) дает трехмерную информацию, но за счет дополнительной, разрушающей подготовки образца. Поскольку масштабирование продолжалось, разрешающая способность SEM стала недостаточной и производители начали применять просвечивающую электронную микроскопию. Этот подход позволяет различать отдельные атомы, но только ценой длительной, разрушающей подготовки образца. ТЕМ остается золотым стандартом точности и эталонных измерений, но ее длительный цикл и низкая пропускная способность плохо подходят для приложений управления технологическими процессами.

Хотя критические размеры давным-давно вышли за пределы разрешающей способности методов оптического формирования изображений, осуществление неразрушающих измерений с большой скоростью и повторяемостью могут обеспечить модифицированные оптические методы. OCD-скаттерометрия позволяет получить информацию о форме, размерах и составе на основе диаграмм рассеяния, наблюдаемых в свете, взаимодействовавшим с образцом. Это требует правильного расположения схожих топологических элементов, но это широко распространено в интегральных схемах. Мишень

* Process window – окно процесса, набор значений параметров процесса, позволяющий изготавливать ИС и работающий при желаемых спецификациях. Например, окно процесса литографии обычно определяется как набор пунктов (фокус, экспозиция и т. д.) для контроля разбросов критических размеров в пределах 10%.

может быть встроенным в схему топологическим элементом, таким как линейная матрица, или специально разработанной измерительной мишенью, обычно расположенной в области между кристаллами на пластине.

Простейшей иллюстрацией OCD-измерения является интерференционная картина, возникающая при падении света на расположенную с правильными интервалами матрицу токопроводящих дорожек (проводников) и пространств между ними. Расстояние между интерференционными полосами зависит от длины волны света, конфигурации оптического тракта и расстояния между проводниками. Поскольку информация переносится в форме фазовых соотношений световых волн, метод не ограничен связанными с длиной волны дифракционными ограничениями на разрешающую способность изображения. По мере того как производители уходили ниже 20-нм проектных норм и осваивали архитектуры FinFET с критическими трехмерными топологическими элементами, скаттерометрия стала одним из основных методов метрологии управления технологическими процессами.

Скаттерометрия для управления полупроводниковым технологическим процессом производства основана на эллипсометрии. Эллипсометр измеряет влияние отражения (или пропускания) на поляризованный свет. Эллипсометрия уже давно используется в метрологии полупроводниковых приборов для определения характеристик тонких пленок в многослойных эталонках. Этот метод чрезвычайно чувствителен и точен, обладает способностью измерять пленки толщиной в один атомный слой. Для определения фундаментальных физических свойств материала эллипсометры измеряют комплексный показатель преломления материала или тензор диэлектрической проницаемости. Они могут быть использованы для определения таких характеристик, как толщина, состав, шероховатость (неравномерность), кристаллическая природа пленки, концентрация легирующих примесей в пленке, ее электропроводности и многого другого.

Стандартные эллипсометры анализируют поляризованный свет, отраженный от образца, и сравнивают его с известным состоянием поляризации падающего света. Это осуществляется для измерения комплексного коэффициента контрастности, состоящего из двух параметров: амплитудной составляющей (ψ) и разности фазовых сдвигов (Δ). Спектроскопические эллипсометры используют широкополосный источник света и измеряют эти параметры в зависимости от длины волны. При использовании для измерения тонких, не окрашенных пленок анализ обычно предполагает, что образец состоит из небольшого числа дискретных, четко определенных слоев, которые оптически однородны и изотропны. Эти предположения справедливы, и два параметра, ψ и Δ ,

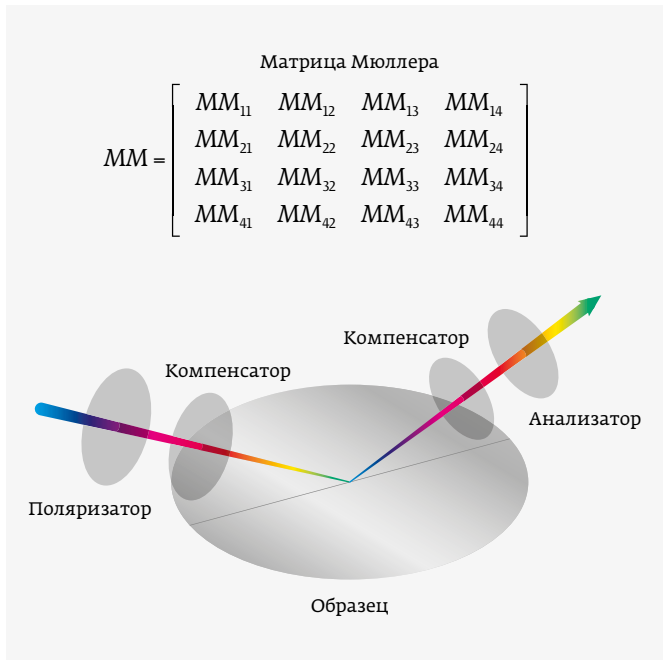


Рис. 3. Сопоставление падающего поляризованного и отраженного поляризованного света при помощи эллипсометра для определения структурности и свойств материала. Получение всех 16 элементов матрицы Мюллера, полностью описывающей отражение, достигается с помощью двух компенсаторов

являются достаточными для большинства применений тонких пленок.

Эти предположения не справедливы для скаттерометрических измерений сложных трехмерных топологических элементов. Обычная спектроскопическая эллипсометрия измеряет только количество падающего р-поляризованного (электрическое поле параллельно плоскости падения) света, который отражается как р-поляризованный свет, и количество падающего s-поляризованного (электрическое поле перпендикулярно плоскости падения) света, который отражается как s-поляризованный свет. Однако может также иметь место перекрестное поляризованное рассеяние, p/s и s/p. Матричная спектроскопическая эллипсометрия Мюллера (MMSE) охватывает полное описание поляризованного отражения, включая кросс-поляризацию и круговую поляризацию. Это осуществляется в матрице из 16 элементов на каждой длине волны. Перекрестная поляризация несет важную информацию о таких характеристиках, как симметрия, неравномерность краев и анизотропные оптические свойства. Это важно для характеристики трехмерных структур. Полная матрица Мюллера может быть измерена с помощью спектроскопического эллипсометра с двумя вращающимися компенсаторами (рис. 3), один из которых находится между



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Акционерное общество
«Научно-производственное предприятие
«Электронное специальное
технологическое оборудование»

124460, г. Москва, Зеленоград,
Георгиевский проспект, д.5, стр.1
тел.: (499) 729-7751, факс: (499) 479-1239
info@nppesto.ru www.nppesto.ru

СИСТЕМА GROOVY ICP –
ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО
Для критического травления
диэлектриков на основе уникального
узкоззорного индуктивного плазменного
реактора для массового производства

МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



Разработка АО «НПП «ЭСТО» при финансовой поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации

Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде



Оборудование для лазерной микрообработки:
резка, фрезерование, скрайбирование,
прошивка отверстий



Оборудование
для термических процессов



Оборудование для измерения физических
и геометрических параметров



Высокоточное оборудование
для дисковой резки

поляризатором и образцом, а другой – между образцом и анализатором.

Полезность и ценность полной эллипсометрии матрицы Мюллера варьируются в зависимости от приложения. В некоторых случаях это существенно, например измерение структурной анизотропии, такой как наклон и сдвиг наложения. В других случаях такие измерения сложных структур не нужны, но все же ценны – в тех случаях, когда дополнительная информация может помочь в декорреляции параметров. Наконец, дополнительная информация может быть не только потенциально ценной, но по существу бесплатной, например, когда двойные компенсаторы позволяют полностью собирать матрицу Мюллера без изменения угла положения анализатора.

Анализ данных – гармонический анализ связанных волн и машинное обучение

Методика OCD является методикой косвенного измерения. В ее рамках не существует аналитического решения для получения желаемых физических или материальных свойств непосредственно из измеренных параметров. Скорее, этот процесс основывается на разработке моделей и их сравнении с полученными данными. Классический процесс основан на гармоническом (строгом) анализе связанных волн (rigorous coupled wave analysis, RCWA), применяемом для генерации набора ожидаемых элементов матрицы Мюллера, основанных на теоретических взаимодействиях света с виртуальной моделью структуры, которая включает в себя форму, размеры, материал и оптические свойства и многое другое. Параметры модели варьируются, а результирующие элементы матрицы записываются. Регрессионный анализ направлен на выявление ключевых особенностей спектров матричных элементов, которые предсказуемо и однозначно изменяются в зависимости от интересующего параметра и поэтому могут служить надежными эталонными параметрами. Процесс моделирования может быть длительным, трудоемким и дорогостоящим. В его рамках для получения желаемого значения измерения фактические данные измерений сравниваются с моделируемыми данными.

Последние разработки в области искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения предлагают значительное сокращение затрат и времени на нахождение решения. Машинное обучение позволяет существенно автоматизировать этот процесс. При наличии соответствующего набора данных измеренных спектров MMSE и эталонных значений машинное обучение часто может найти характерные спектральные особенности и количественно оценить их связь с интересующими параметрами без физического моделирования или структурного регрессионного анализа. Решения на основе машинного

обучения вряд ли полностью заменят решения на основе моделей. Скорее, они обеспечат дополнительные возможности для ситуаций, где моделирование особенно сложно. Идеальным пространством для решений машинного обучения будут ситуации, при которых затраты на моделирование высоки из-за сложности структуры, ключевой параметр, представляющий интерес, имеет доминирующую или уникальную чувствительность в сигнале, а справочные данные доступны в изобилии.

GAA-процесс

Конструкция транзисторов с круговым затвором GAA состоит из нескольких вертикально расположенных нанолитовых каналов, проходящих через один затвор. Технологический процесс формирования GAA имеет некоторое сходство с процессами формирования FinFET. Сначала создается сверхрешетка – этажерка чередующихся, эпитаксиально осажденных слоев кремния и SiGe. Канавки, протравленные в решетке, создают плавниковообразные структуры, причем каждый плавник содержит три-четыре слоя кремниевых нанолитов, которые станут каналами транзистора. Слои кремния чередуются со слоями SiGe, которые в конечном итоге будут заменены материалами затвора. Поперек нанолитов-плавников осаждаются фиктивные поликремниевые затворы, а поверх всего этого конформно осаждается материал спейсера*. По обе стороны затвора вытравливаются исток и сток, прорезая и обнажая концы кремниевых каналов. На протяжении ряда критических этапов технологического процесса экспонированный SiGe между концами кремниевых каналов выборочно вытравливается для создания полостей для внутренних спейсеров, которые затем туда осаждаются (рис. 4). Эти топологические элементы весьма малы и все же их размеры критичны по нескольким причинам. Глубина полости/внутреннего спейсера определяет длину затвора, внутренний спейсер защищает впоследствии осаждаемую область истока/стока во время высвобождения слоя, когда фиктивный затвор вытравливается и заменяется материалами затвора, а спейсер подавляет паразитную емкость между областью истока/стока и затвором.

При масштабировании каждый последующий технологический уровень (с меньшими проектными нормами) FinFET требовал от OCD-систем примерно 30% улучшения отношения сигнал/шум (рис. 5). Переход к архитектурам с круговым затвором с исключительно небольшими, сложными топологическими элементами,

* Spacer – спейсер, в модулированно-легированной гетероструктуре нелегированный слой полупроводника с большой шириной запрещенной зоны, разделяющий двумерный электронный (дырочный) газ и легированный слой с донорами (акцепторами).



PEL-72040 Нагрузка электронная



GDM-79061 Вольтметр универсальный



LCR-76300 Измеритель RLC



AFG-73032 Генератор универсальный



GPP-74325 Источник питания
постоянного тока



GOM-7805 Миллиомметр



GPT-715004 Установка для проверки
параметров электрической безопасности



GDS-73654A Осциллограф цифровой



GSP-79330A Анализатор спектра



ASR-73400 Источник питания

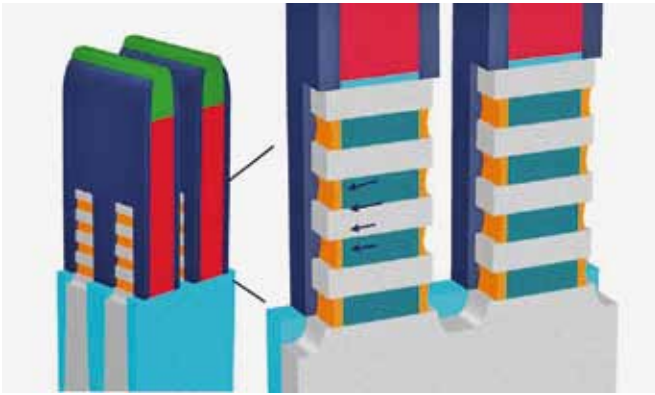


Рис. 4. Транзистор с круговым затвором: кремниевые каналы (серый) будут полностью окружены затворами после замещения SiGe (бирюзовый) и фиктивных (красный) затворов. Поперечное сечение (справа) проходит вдоль кремниевых каналов между истоком и стоком. Размеры внутренних спейсеров (оранжевые) имеют решающее значение для определения производительности устройства

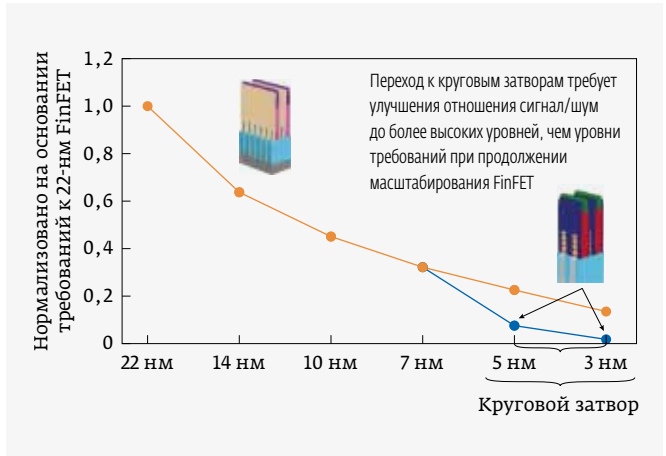


Рис. 5. Транзисторы с круговыми затворами (слева) обеспечивают лучшую, чем у FinFET, производительность. Но они более сложные и требуют значительно-го улучшения отношения сигнал / шум измерительных OCD-систем. Спектры справа показывают устойчивое улучшение отношения сигнал / шум на протяжении трех поколений метрологических OCD-систем

такими как внутренние спейсерные полости и внутренние спейсеры, требует дальнейшего улучшения отношения сигнал / шум. Тем не менее, OCD обладает основными возможностями, необходимыми для GAA-процессов. Корпорация Onto Innovation является одной из фирм, занимающихся разработкой OCD-решений для GAA-устройств. Для этого она предлагает системы семейства Atlas. Предлагаемая ранее система Atlas III при увеличении глубины корректирующего травления SiGe на 0,1 нм демонстрирует уровень шума, близкий к уровню сигнала, что ограничивает возможность измерения. Более современные системы, Atlas III+ и Atlas V, обеспечивают лучшее отношение сигнал / шум, что дает возможность измерять индивидуальные параметры корректирующего травления SiGe.

Получение данных об общем (среднем) значении параметров при травлении SiGe-полости полезно, но намного

важнее отдельное измерение параметров каждого спейсера, потому что производительность транзистора будет определяться «худшим» нанолитом. Поэтому важность совершенствования средств метрологии непрерывно увеличивается. В метрологической системе Atlas V используется недавно выпущенное программное OCD-решение на основе ИИ. Оно содержит возможности классического моделирования и перспективные возможности машинного обучения, благодаря которым индивидуальные измерения внутреннего спейсера по таким параметрам, как точность / допуск, были существенно улучшены по сравнению со средними показателями измерения внутреннего спейсера, сделанные системой Atlas III+.

Для некоторых этапов процесса формирования транзисторов с круговыми затворами производители изучают и другие технологии измерений. Большинство из которых основаны на использовании рентгеновского излучения. Так, например, для измерения тонких пленок в исходной сверхрешетке может использоваться рентгеновская рефлектометрия (X-ray reflectivity, XRR), хотя для эллипсометрии это достаточно простое измерение. В случае тонких монокристаллических пленок может оказаться полезным метод рентгеновской дифракции высокого разрешения (high resolution X-ray diffraction, HRXRD). Корпорация Onto Innovation занимается совершенствованием метода измерения критических размеров рассеянием рентгеновского излучения под малым углом (CD small-angle X-ray scattering, CD-SAXS). Этот метод, сходен с методом скаттерометрии, но в настоящее время он слишком дорогой и его быстродействие слишком мало. Еще

ООО
СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные
для поверхностного
компоненты
монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U.FL разъемы и pigtail со SMA

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

одним перспективным методом считается рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) – метод анализа поверхности, позволяющий измерять состав, химическое и электронное состояние элементов в тонких пленках.

Переход к GAA-транзисторам и значение метрологии

Транзисторы с круговым затвором являются наиболее вероятным кандидатом на замену FinFET, так как позволяют получить больше вычислительной мощности в меньшем пространстве. Они предлагают увеличенную производительность, но требуют применения более сложных процессов для создания небольших трехмерных структур. Управление этими процессами требует совершенствования метрологии. Необходимыми фундаментальными возможностями обладает OCD-скаттерометрия – ее системы текущего поколения продемонстрировали способность измерять внутренние спейсеры, являющиеся одними из наиболее сложных топологических элементов. Отраслевые специалисты отмечают, что высокоскоростная, неразрушающая OCD-скаттерометрия обладает базовыми параметрами, необходимыми для поддержки управления технологическим процессом формирования GAA-приборов [7].

* * *

Использование модифицированных методов оптической метрологии при формировании 5/3-нм 3D-структур рассматривается как многообещающее благодаря их быстройдействию. При этом по-прежнему важной задачей остается высокая точность измерений и надежность. Все большее значение приобретают разработки в области искусственного интеллекта и машинного обучения. Они способствуют сокращению затрат и времени, а также позволяют существенно автоматизировать процесс метрологии. Кроме того, эти подходы расширяют возможности моделирования. Таким образом, можно считать, что приемлемые метрологические решения для 5/3-нм

технологических процессов уже существуют. OCD-скаттерометрия является одним из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Semiconductor Metrology / Inspection Equipment Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021–2026). Mordor Intelligence. 2021.
<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/semiconductor-inspection-equipment-market>
2. Global Semiconductor Sales Increase 6.5% to \$439 billion in 2020 // Semiconductor Industry Association. Monday, Feb 01, 2021.
<https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-6-5-to-439-billion-in-2020/>
3. Semiconductor Metrology / Inspection Equipment Market – Growth, Trends, Forecasts (2020–2025). ReportLinker, July 2020. ID: 5948969.
https://www.reportlinker.com/p05948969/Semiconductor-Metrology-Inspection-Equipment-Market-Growth-Trends-Forecasts.html?utm_source=GNW
4. Metrology, Inspection, and Process Control in VLSI Manufacturing // The Information Network. June 2021.
<https://www.theinformationnet.com/product-page/metrology-inspection-and-process-control-in-vlsi-manufacturing>
5. 2020 Annual Report + 2021 Proxy. Onto Innovation Inc.
https://s24.q4cdn.com/480160064/files/doc_financials/2020/ar/Onto-2020-Annual-Report.pdf
6. Onto Innovation Announces Suite of Three New Metrology Systems for Complete Critical Dimension Process Control // Semiconductor Digest. June 9, 2020.
<https://www.semiconductor-digest.com/2020/06/09/onto-innovation-announces-suite-of-three-new-metrology-systems-for-complete-critical-dimension-process-control/>
7. **Keller N., Liu Z.** Metrology Solutions for Gate-All-Around Transistors in High Volume Manufacturing // Semiconductor Digest. October 1, 2020.
<https://www.semiconductor-digest.com/2020/10/01/metrology-solutions-for-gate-all-around-transistors-in-high-volume-manufacturing/>

ООО "КЕКО Р"

Производство и поставка технологических материалов для электронных компонентов на основе керамики:
LTCC система SK-47 (керамика, пасты), HTCC система (керамика, пасты).
Керамические и АМВ подложки на основе нитрида алюминия и нитрида кремния,
а также технологии и оборудование для производства LTCC/HTCC/MLCC/MLCI/PZT/SOFC.

WWW.KEKO-R.RU

+7 (499) 398 0770

INFO@KEKO-R.RU

