

Производственные технологии микроэлектроники: проблемы развития

Часть 2

М. Макушин¹, В. Мартынов, д. т. н.²

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

В первой части статьи, опубликованной в третьем номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2020 год, рассматривались вопросы эволюции транзисторных структур, разработки новых классов 2,5D- / 3D-модулей и методик корпусирования, перспективы развития чиплетов. Вторая часть статьи посвящается некоторым аспектам развития технологических процессов.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ О важности снижения изменчивости параметров процессов

Дальнейшее развитие подходов «Больше Мура» и «Больше, чем Мур» требует снижения изменчивости параметров технологических процессов, причем по всей цепочке поставок полупроводникового производства. По мере того, как технологическое оборудование становится все более точным, благодаря более совершенным данным и аналитике, освоению новых технологий на различных этапах производственного цикла (контроль, метрология, осаждение, травление, литография и т. п.), облегчается и борьба с изменчивостью параметров процесса. Все это ведет к повышению уровня прогнозируемости и выхода годных, а также облегчению некоторых проектных ограничений.

При рассмотрении производственных процессов можно отметить, что между себестоимостью и продажной ценой полупроводниковых приборов существует достаточная маржа, обеспечивающая рентабельность производства. Правда, по мере масштабирования эта маржа сокращается, что создает экономические проблемы освоения новых технологических процессов с меньшими топологиями.

При переходе на каждый уровень масштабирования в соответствии с так называемым законом Мура, особенно после ухода за рубеж 16/14 нм, требуются новые подходы для снижения потребляемой мощности и повышения производительности полупроводниковых приборов и соотношения их площади и стоимости. Экономика закона

Мура становится не так убедительна, как в прошлом, когда кратность уменьшения топологических норм составляла 0,7. При этом стоимость разработки растет. Многие отраслевые специалисты считают, что действие закона Мура замедляется, некоторые даже говорят о прекращении его действия. Чтобы перейти к следующему технологическому уровню с меньшими топологическими нормами, разработчикам приходится улучшать маржу процесса.

Встает вопрос: «А как будут внедряться новые подходы – революционно или эволюционно?» Многие специалисты полагают, что эволюционно. Большое значение будут иметь новые структуры, такие как круговые затворы. Но между тем, это открывает возможность добиться «радикального» снижения изменчивости процессов. Однако при этом необходима совместная работа специалистов различного профиля. Речь идет о согласованности различных этапов технологического процесса, что позволяет пошагово исключать вариации процесса. Выигрыш от коллективных действий может быть существенным, он может принести столь необходимое облегчение для полупроводниковой промышленности в то время, когда затраты на разработку кристаллов ИС постоянно растут. Так, по оценкам Gartner, затраты на разработку технологии 5-нм ИС оцениваются, в зависимости от сложности конструкции, от 210 до 680 млн долл. Кроме того, разработка новых процессов обходится примерно в 1 млрд долл., а стоимость оснащения современного завода по обработке пластин составляет более 10 млрд долл.

В некоторых из современных технологических процессов преимущества в соотношении рабочих характеристик, габаритов и потребляемой мощности в значительной степени достигнуты за счет улучшения

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

² ФГБНУ «Аналитический центр», проф., Минобрнауки РФ, эксперт.

управления процессом, а не за счет масштабирования размеров элементов ИС.

Одним из больших изменений с точки зрения обобщения является повсеместное использование все большего количества датчиков, которые обеспечивают контроль производственного процесса в любой момент времени. Кроме того, современные датчики отличаются намного большим, чем ранее, быстродействием и значительно меньшими размерами. Сейчас полупроводниковая промышленность, да и многие другие обрабатывающие отрасли осуществляют полный переход к интеллектуальному производству, где в производственный процесс встроены глубокое обучение, глубокие нейронные сети и искусственный интеллект. В основном целями интеллектуального производства является управление доходностью, повышение уровня рентабельности. Но одновременно с этим реализуются мероприятия по повышению надежности. Это очень важный момент, так как при освоении новых технологий высок риск появления латентных дефектов. Это особенно важно, если предприятие производит гетерогенные приборы. В таких случаях необходимо выявить образование дефекта на как можно более ранних этапах, что, в свою очередь, должно быть связано с определенным опытом в конкретной области производства. Другими словами, задача состоит в том, чтобы подготовить контролируемые данные и знать, как с ними работать – фильтровать, манипулировать ими и преобразовывать во что-то полезное. Правильное использование этих данных может привести к значительным изменениям отраслевой экосистемы.

Возможность уменьшить вариативность процесса и быстрее использовать большие объемы данных позволит либо улучшить стоимостные предложения для перехода на следующий технологический уровень с меньшими топологиями, либо глубже использовать существующих технологий. Большая часть этого процесса будет реализовываться кремниевыми заводами и их крупнейшими клиентами, а также поставщиками СФ-блоков, которые должны будут выбирать наиболее выгодные для себя топологии, потому что они сами не могут разрабатывать СФ-блоки с разными функциональными характеристиками и разными топологиями [6].

ALD- и ХОПФ-процессы

По мере освоения новых технологических процессов с меньшими топологическими нормами в полупроводниковой промышленности усиливается популярность некоторых технологических процессов, включая осаждение атомарных слоев (atomic layer deposition, ALD) и химическое осаждение из паровой фазы (ХОПФ). Возрастает значение тестирования пластин, своевременного обнаружения дефектов (в том числе за счет программного

моделирования). Не менее важным требованием становится унификация верификации функциональной безопасности с целью сокращения сроков вывода новой продукции на рынок. Соответственно, повышается спрос на прекурсоры для ALD- и ХОПФ-процессов.

По данным консалтинговой фирмы TECHSET (специализация – электронные материалы), мировой рынок прекурсоров процессов ALD и ХОПФ продемонстрировал в 2019 году устойчивый рост, несмотря на проблемы рынка полупроводниковых приборов. Рост доходов в сфере ХОПФ в основном связан с расширением применения методик плазмохимического ХОПФ (PECVD) и ХОПФ-метода разложения металлоорганических соединений (MOCVD), используемых при производстве кремниевых ИС и других приборов, включая микродисплеи, РЧ ИС для 5G средств связи и сетей, а также фотоники. Совокупный рынок металлов-прекурсоров для ALD- и ХОПФ-процессов в 2019 году оценивается на уровне 582 млн долл., что на 6,3% больше по сравнению с предыдущим годом. Ожидается, в 2025 году он превысит 930 млн долл. (рис. 5).

На данный момент ~75% рынка прекурсоров приходится на трех ведущих поставщиков – ADEKA, Air Liquide и Versum. Однако недавно корпорация Merck поглотила Versum и благодаря этому с высокой вероятностью сможет стать крупнейшим поставщиком металлических прекурсоров, прекурсоров с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k) и диэлектрических прекурсоров. Рынок ХОПФ- и ALD-прекурсоров охватывает специальные газы (например, фторид вольфрама – WF₆), жидкие прекурсоры, а также значительный сегмент твердых прекурсоров (например, хлорид гафния – HfCl₄ и пентакис

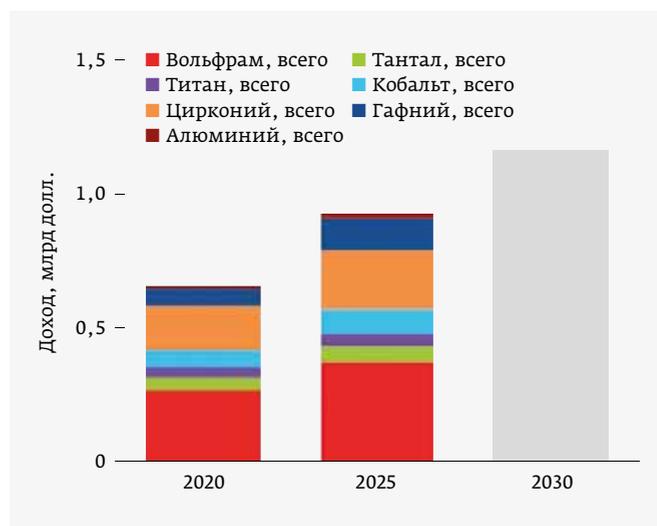


Рис. 5. Прогноз роста доходов от продаж ALD-/ХОПФ-прекурсоров в период до 2030 года (для производства ИС с топологическими нормами 65 нм и менее)

(диметиламид) тантала – PDMAT). Кроме того, существуют небольшие сегменты прекурсоров, объем продаж которых по-прежнему не превышает 5 млн долл., таких как рутений и другие редкоземельные элементы (РЗЭ) [7].

Одним из базовых процессов изготовления полупроводниковых приборов и ИС является эпитаксия, позволяющая формировать структуры, обладающие более широкими, чем «чисто» кремниевые структуры, возможностями. Оборудование эпитаксии, в частности MOCVD-системы, используется и при дальнейшем масштабировании ИС (тенденция «Больше Мура»), и при формировании 2,5D-/3D-приборов (тенденция «Больше, чем Мур»).

По данным исследовательской группы Yole Développement (Лион, Франция), продажи оборудования для выращивания эпитаксиальных структур в 2019 году составили 990 млн долл. В 2025 году, как ожидается, этот показатель превысит 6 млрд долл. (рис. 6).

С технической точки зрения, большая часть оборудования эпитаксии представлена технологией MOCVD, предназначенной для полупроводниковых соединений типа A^{III}B^V, таких как GaAs и GaN. Второй по популярности является высокотемпературное химическое осаждение из паровой фазы (HT CVD). Эта технология применяется главным образом в случае формирования приборов на основе кремния или карбида кремния (SiC). Третья основная технология – молекулярно-пучковая эпитаксия.

В полупроводниковой промышленности при формировании структур полупроводниковых приборов

традиционно доминируют кремниевые подложки – на сегодняшний день на них приходится более 80%. При этом изготовители, придерживающиеся подход «Больше, чем Мур», все активнее применяют альтернативные подложки, такие как GaAs, GaN, SiC и In P. Действительно, наряду с ужесточением требований к подложкам и изготавливаемым на их основе приборам появляются новые области применения, в которых кремниевые решения не способны обеспечить ожидаемую производительность. Соответственно, производители и разработчики полупроводниковых приборов все больше внимания уделяют инновационным материалам [8, 9].

Ионная имплантация

Совершенствование полупроводниковых приборов требует формирования все более разнообразных и сложных тонких пленок, поэтому ионная имплантация, несомненно, будет и дальше широко использоваться для внедрения (введения) в полупроводниковые структуры новых видов легирующих элементов и соединений. Современные процессы ионной имплантации используются для внедрения более чем 15 видов атомных частиц, и круг применений получившихся материалов весьма широк. Эволюцию имплантируемых частиц по мере их введения в массовое производство иллюстрирует рис. 7.

В чем основная проблема ионной имплантации? В том, что по мере масштабирования ИС появилась потребность в получении пучков молекулярных ионов, содержащих элементы с высокой химической агрессивностью (на-

пример, фтор), сокращающих срок службы ионных источников. Поэтому значительные усилия направлены на разработку газовых смесей, оптимальных с точки зрения минимизации разрушительного влияния на оборудование при одновременном повышении (или сохранении) величины ионного тока.

Одно из последних решений в этой области – разработанная фирмой Linde Electronics (Пуллах, ФРГ) смесь «тримикс» (B₂H₅, H₂ и VF₃), позволяющая существенно увеличить плотность ионного тока бора, снизить дефектность легированных слоев, увеличить срок службы ионного источника. Помимо этого, фирма предложила несколько новых источников легирующих веществ, повышающих производительность установок имплантации и обеспечивающих высокие параметры по всем ключевым показателям (табл. 1).

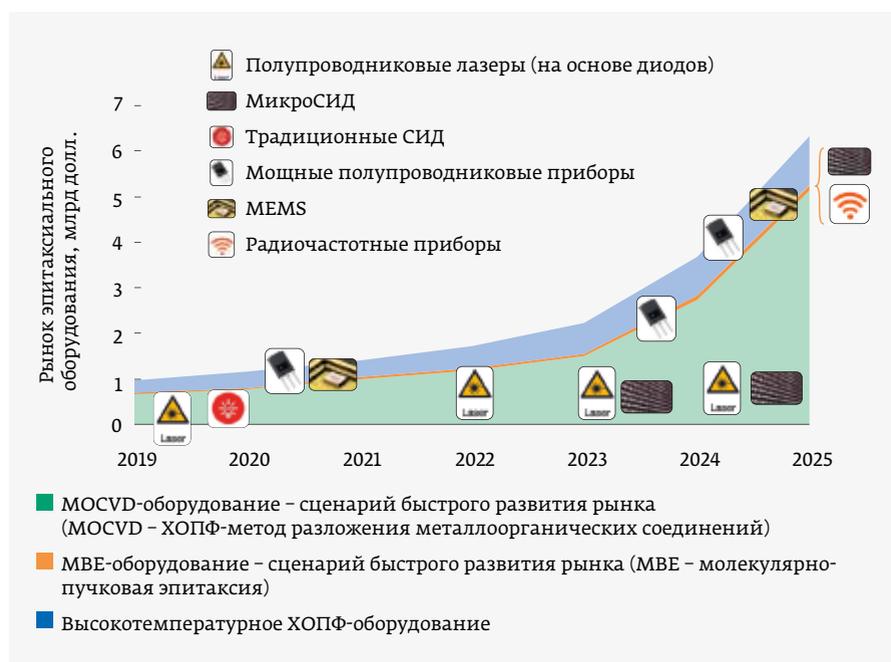


Рис. 6. Структура рынка эпитаксиального оборудования по конечному применению (2019 год – факт, 2020–2025 годы – прогноз)

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ «АРМИЯ-2020»

23–29 АВГУСТА ПАТРИОТ ЭКСПО

WWW.RUSARMYEXPO.RU

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ БАНК-
ПАРТНЕР



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ
ФИНАНСОВЫЙ ПАРТНЕР



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР
АВИАКЛАСТЕРА



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР



Также Linde Electronics сумела создать опытный баллонный источник газообразных ионов сурьмы взамен стандартных твердотельных источников, отличающихся громоздкостью и более длительным рабочим циклом [10].

EUV-литография

После более 20 лет работ и миллиардов затраченных долларов EUV-литография начала использоваться в массовом производстве. Одним из главных ее преимуществ считалась возможность отказа от методик многократного формирования рисунка, к которым микроэлектроника как отрасль промышленности пришла на уровне 193-нм литографии (на ArF-источниках излучения, как в «сухом», так и в иммерсионном вариантах). За счет формирования рисунка за один проход и отказа от значительного числа этапов технологического процесса предполагалось существенно сократить цикл и стоимость производства ИС. Однако оказалось, что проектные нормы 5 нм и менее потребуют методик многократного формирования рисунка, только теперь с использованием EUV-литографии. Так стоит ли овчинка выделки?

Таблица 1. Новые продукты семейства UpTime фирмы Linde Electronics, улучшающие производительность заводов по обработке пластин*

Импла- тируемые частицы	Традиционные источники имплан- тируемых частиц	Оптимизированные источники смесей и молекул
B, BF ₂	BF ₃	BF ₃ /B ₂ H ₆ /H ₂
Ce	CeF ₄	CeF ₄ /Xe/H ₂
Si	SiF ₄	SiF ₄ /Si ₂ H ₆
C	CO ₂	CO, CO/Xe/H ₂ , CO/CF ₄
Sb	Sb ₂ O ₃ (S)**, SbF ₃ (S)**	SbF ₅ (L)**
Se	SeO ₂	SeF ₆ (G)**

* Применимы как природные, так и изотопно-обогащенные аналоги.

** (S) – твердое состояние; (L) – жидкое состояние; (G) – газообразное состояние.

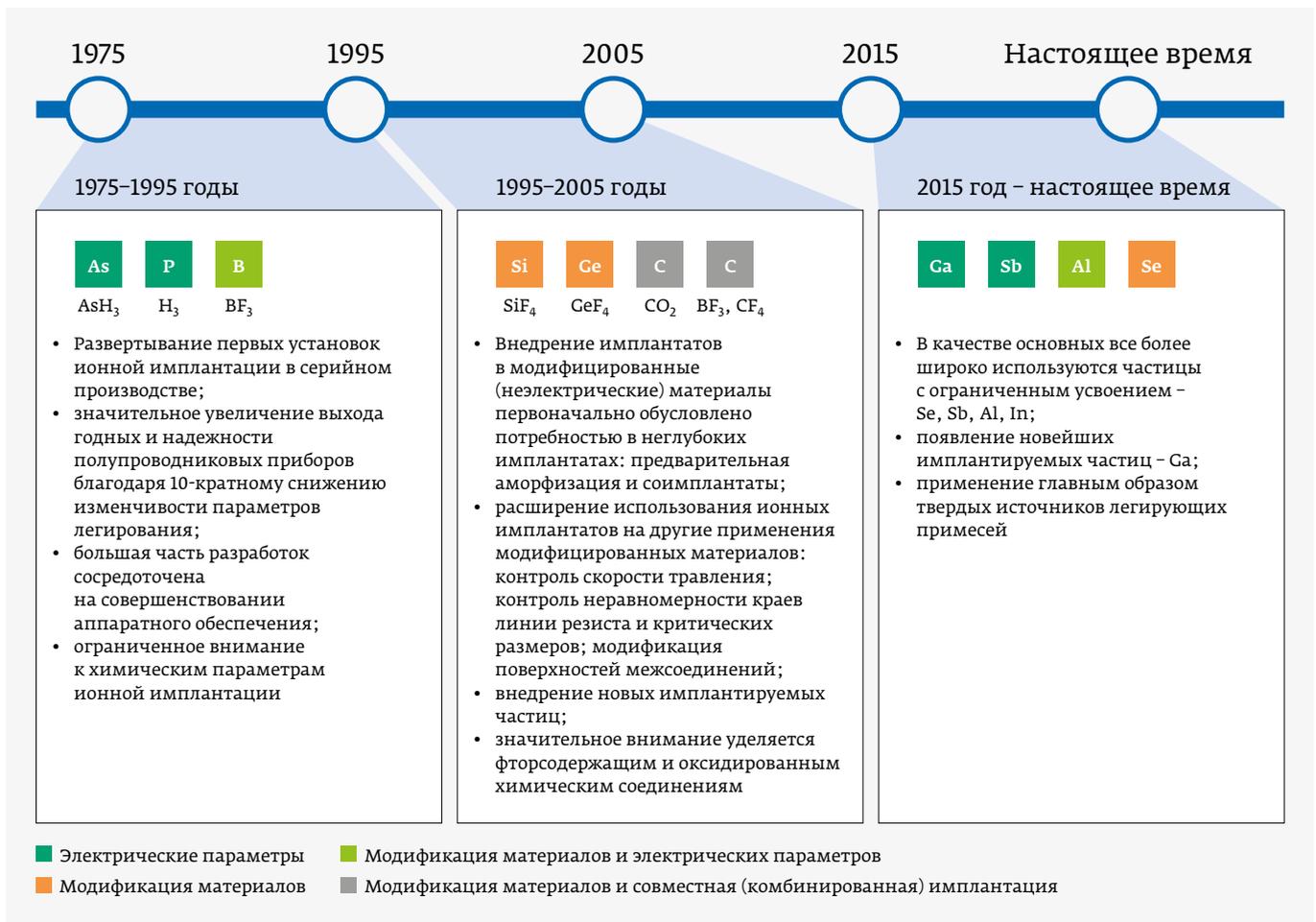


Рис. 7. Эволюция имплантируемых частиц и исходных материалов для ионной имплантации

Специалисты корпорации Applied Materials отмечают, что на первом и втором поколении 7-нм технологий все EUV-решения будут представлены подходом однократно-го формирования рисунка. Далее, с уменьшением топологических размеров, потребуются другие решения:

- двойное EUV-формирование рисунка, требующее двух этапов литографии и двух этапов травления;
- двойное EUV-формирование рисунка с самосовмещением, требующее одного этапа литографии, а также по одному этапу осаждения и травления;
- гибридный подход;
- EUV-литография, осуществляемая совместно с реализацией методики непосредственной самосборки (directed self-assembly, DSA), использующей блок-сополимеры, способные самостоятельно совмещаться и создавать рисунки [11].

Кроме того, никто не гарантирует, что двойное формирование с применением EUV-литографии не превратится в многократное.

Все вышеизложенное касается установок EUV-литографии с числовой апертурой (NA) 0,33. Специалисты корпорации ASML, пока что монопольного изготовителя EUV-установок, утверждают, что однократное формирование рисунка может осуществляться на топологиях до 2 нм, но для этого потребуются установки с NA=0,55. Появление промышленных образцов оборудования для 3-нм топологий ожидается в 2023 году. Они будут сложнее и дороже, чем установки с NA=0,33, несмотря на то, что для обоих типов установок пока предполагается использовать один источник излучения. Также опытные образцы установок с NA=0,55 пока демонстрируют меньшую (по сравнению с установками с NA=0,33) глубину фокусировки, худший контроль поляризации линз. Для EUV-установок с высокой NA также сложнее изготавливать шаблоны и требуется более чувствительный резист (для формирования структур с высоким аспектным отношением). Еще один текущий недостаток – производительность. Если сейчас установки с NA=0,33, используемые в серийном производстве ИС корпорацией Samsung, обрабатывают почти 180 пластин диаметром 300 мм в час, то у опытных установок с NA=0,55 этот показатель не превышает 135 пластин в час [12]. Вопрос о том, потребуется ли когда-нибудь использование методик многократного формирования рисунка при использовании EUV-установок с NA=0,55 пока не обсуждается в научном сообществе.

Совершенствование методик тестирования

Освоение каждого нового технологического поколения процессов и глубокая модернизация существующих процессов всегда нацелены на крупносерийное производство изделий с новыми, уникальными особенностями. Это порождает трудности в области не только изготовления, но и тестирования. В последние десятилетия были

продемонстрированы различные методы решения проблем тестирования пластин для ряда полупроводниковых приборов, например схем ДОЗУ. Современные пластины диаметром 300 мм со сформированными кристаллами ДОЗУ в настоящее время полностью проходят зондовый контроль за очень небольшое число касаний/опусканий датчиков на пластину, благодаря значительно усовершенствованной системе зондовых плат. Это способствовало снижению стоимости ДОЗУ и, следовательно, снижению стоимости изделий, в которых эти схемы используются. В области MEMS-датчиков также решен ряд проблем тестирования.

Совсем недавно полупроводниковая промышленность столкнулась с проблемами при тестировании и поддержке широкомасштабного развертывания подложек пластин типа «кремний-на-изоляторе» (КНИ / SOI) при производстве ИС для 5G-систем / средств связи и собственно самих этих ИС. Ожидается, что в ближайшие годы будет освоена и начнет производиться в больших объемах спинтронная память – магнитная память на эффекте переключения спинового момента электрона (spin-transfer torque MRAM / ОЗУ, STT-MRAM). Эта память является наиболее многообещающим типом для энергонезависимой встроенной памяти Интернета вещей, искусственного интеллекта и хорошим кандидатом для поддержки развертывания 5G на различных мобильных устройствах. STT-MRAM также может потенциально заменить традиционные схемы памяти, такие как ДОЗУ и СОЗУ, благодаря своей высокой скорости, низкому энергопотреблению и масштабируемости до очень низких технологических уровней (менее 20 нм).

При всем этом требования к технологиям тестирования постоянно ужесточаются. Требуется все более высокая пропускная способность тестирования пластин и как можно меньшее соответствующее время тестирования на одну ИС [13].

Традиционные подходы, основанные на встроенных в оборудование технологических линиях заводов по обработке пластин средствах контроля и PFA (анализ отказов физического уровня – Physical Failure Analysis), достаточно дороги. По этой причине их использование очень избирательно и ограничено.

Одной из новинок в области тестирования в последнее время стало введение в анализ механизма отказов (FMA) байесовского машинного обучения. Благодаря этому методу возникает еще одна диагностическая возможность комплексного объемного анализа. FMA обрабатывает совокупность результатов сканирования с целью отделения от диагностического шума истинных механизмов отказа, ограничивающих выход годных.

FMA кластеризирует популяцию диагностического сканирования по механизму отказа, который помогает производителю уточнять предмет анализа отказов, что

увеличивает шансы обнаружения различных ограничителей выхода годных с меньшим числом этапов PFA. Это обеспечивает значительную экономию затрат на PFA и сокращение времени цикла обнаружения полного спектра дефектов.

Данные наблюдений, необходимые для ввода в FMA, поступают из диагностических отчетов. Диагностические данные генерируются четырьмя факторами, описанными на рис. 8.

Механизм отказа Парето демонстрирует истинный механизм отказа, описывая физические атрибуты, связанные с неисправным прибором. Например, если предполагается, что дефект Парето содержит только один механизм отказа (из-за отклонений в технологическом процессе), механизм отказа в идеале должен сообщать только о причинном механизме.

Понятие «правильный кандидат» относится к диагностируемому объекту, который с наибольшей вероятностью из множества других объектов соответствует заданным требованиям.

Аномальность проекта – это показатель, при котором чем больше наблюдаемое значение (конкретного элемента) относительно типичных для проекта показателей, тем выше вероятность того, что именно этот элемент ответствен за дефект.

Область точной диагностики охватывает точность моделирования диагностируемых ошибок. В нее может

включаться неопределенность, вызванная различными метаданными диагностики.

Новый вариант анализа механизма отказов повышает ценность методов тестирования. Он, в частности, демонстрирует существенное увеличение роли ПО при тестировании. Кроме того, подобные методики способствуют сокращению затрат и повышению производительности операций тестирования [14].

* * *

Текущее развитие технологий микроэлектроники, в большей или меньшей степени, ведет к удорожанию процессов проектирования и производства новых типов приборов. Следование подходу «Больше Мура» приводит к сокращению числа фирм, способных самостоятельно производить новую продукцию. Налицо дальнейшее закрепление олигополии. Более того, в сфере разработок и изготовления новых материалов и производственного оборудования формируются «чистые» монополии. Так, производство установок EUV-литографии в настоящее время полностью монополизировано голландской фирмой ASML. Одним из результатов этой ситуации стало расширение возможностей блокировки доступа к передовым технологиям неудобным фирмам и странам. Например, нидерландское правительство под нажимом США фактически заморозило сделку ASML с крупнейшим кремниевым заводом КНР, фирмой SMIC, по поставке EUV-степперов [15]. Это серьезно затруднит китайской стороне возможности разработки технологических процессов с топологическими нормами 10 нм и менее.

В сфере подхода «Больше, чем Мур» ситуация легче, на рынке наблюдается большее число игроков. Гетерогенная интеграция существенно расширяет возможности разработчиков, но и здесь существуют тенденции роста издержек проектирования и производства – по мере развития технологий, ввода в оборот новых материалов, приборных структур, технологического оборудования.

Наконец, дальнейшее развитие технологических процессов сдерживается огромным парком установленно-го производственного оборудования. Именно поэтому разработчики новых процессов и приборов вынуждены ориентироваться на совместимость с существующим оборудованием. С этой точки зрения появление принципиально новых процессов, а точнее их реализация в массовом производстве, в ближайшие годы выглядит маловероятной.

Правда, значительные конкурентные преимущества в сложившейся обстановке может получить разработчик прорывного решения, совместимого с существующим оборудованием. Например, создатель голографического шаблона, способного заменить крупный комплект традиционных, дорогостоящих шаблонов. Но это – другая история...



Рис. 8. Упрощенный вид модели анализа механизма отказов (FMA)

ЛИТЕРАТУРА

6. **Sperling Ed.** Node Within A Node // Semiconductor Engineering. 2019. July 24th.
<https://semiengineering.com/node-within-a-node>
7. **Davis S.** Global Market Remains Strong for ALD & CVD Precursors in IC Fabs // Semiconductor Digest. News and Industry Trends. 2019. October 3th.
<https://www.semiconductor-digest.com/2019/10/03/global-market-remains-strong-for-ald-cvd-precursors-in-ic-fabs/>
8. Epitaxy equipment market blows up, pushed by VCSEL & disruptive LED devices // Yole Développement. 2020. February 2th. http://www.yole.fr/Epitaxy_Equipment_Materials-IndustryReview.aspx#.XlJdI017ljp
9. **LaPedus M.** MOCVD Vendors Eye New Apps // Semiconductor Engineering. 2020. February 20th.
<https://semiengineering.com/mocvd-vendors-eye-new-apps/>
10. **Ashwini S.** Source Materials Enable the Evolution of the Ion-Implantation Process // Semiconductor Digest. 2020. February 8th. <https://www.semiconductor-digest.com/2020/02/08/source-materials-enable-the-evolution-of-the-ion-implantation-process/>
11. **Макушин М., Мартынов В.** Освоение EUV-литографии в серийном производстве: перспективы и проблемы // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 9 (00190). С. 70–79.
DOI: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.70.79.
12. **Lapedus M.** Multi-Patterning EUV Vs. High-NA EUV. Semiconductor Engineering, December 4th, 2019.
<https://semiengineering.com/multi-patterning-euv-vs-high-na-euv/>
13. **Pete S.** Revolutionizing Wafer Testing to Bring New Technologies to Market // Semiconductor Digest. News and Industry Trends. 2019. September 24. <https://www.semiconductor-digest.com/2019/09/24/revolutionizing-wafer-testing-to-bring-new-technologies-to-market/>
14. **Babighian P., Palosh S., Pan Y. and Schuermyer C.** Application of Bayesian Machine Learning To Create A Low-Cost Silicon Failure Mechanism Pareto. 2019 30th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). Saratoga Springs, New York, USA. Conference Paper, May 2019. DOI: 10.1109/ASMC.2019.8791833.
<http://www.proceedings.com/48934.html>
15. Chinese ambassador warns Dutch government against restricting ASML supplies. Reuters, Technology News. 2020. January 15. <https://www.reuters.com/article/us-netherlands-asml-china-idUSKBN1ZE1Z8>

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1090 руб.

МОС-ГИДРИДНАЯ ЭПИТАКСИЯ В ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ ФОТониКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

Р. Х. Акчурин, А. А. Мармалюк

В книге рассмотрены теоретические и практические аспекты МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) – одного из наиболее гибких и производительных современных методов получения полупроводниковых структур. Кратко изложены физико-химические основы метода, приведено описание высокопроизводительного технологического оборудования для реализации МОСГЭ и методов контроля роста эпитаксиальных слоев *in situ*, затронуты вопросы моделирования процессов.

Практические аспекты реализации метода подробно рассмотрены на примере формирования эпитаксиальных структур полупроводников $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ и твердых растворов на их основе – основных материалов современной оптоэлектроники и ИК-техники. Значительное внимание уделено формированию наноразмерных эпитаксиальных структур и гетероструктур на основе нитридов элементов III группы, технология которых получила стремительное развитие в последние годы. Рассмотрены вопросы адаптации метода МОСГЭ к получению ряда новых материалов электронной техники.

Книга предназначена специалистам в области технологии полупроводниковых материалов, может быть полезна аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2018. – 488 с.,
ISBN 978-5-94836-521-3

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru