

XORS-200A – базовый модуль травления для массовых производств 65–32 нм

Г. Виноградов, к. х. н.¹, К. Медников²

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

Проанализировано развитие технологии травления оксида кремния и других диэлектриков. Показано, что разработанный компанией АО «НПП «ЭСТО» узкоззорный планарный модуль травления диэлектриков XORS-200A представляет собой универсальный базовый реактор травления 200 мм для массового кремниевого производства с ключевыми параметрами уровня систем 300 мм и позволяет осуществлять как высокоаспектное травление диэлектриков, так и процессы мультипаттернинга.

Плазменное оборудование травления и осаждения слоев составляет до половины стоимости полупроводниковых производственных линий («фабрик»). И около половины этой стоимости относится к критическим процессам травления диэлектриков, осуществляемых на самом дорогом и сложном оборудовании. Его производство сосредоточено в настоящее время у двух гигантов полупроводникового машиностроения, компаний LAM Research USA (LAM) и Tokyo Electron Japan (TEL). Третий, самый крупный производитель оборудования для полупроводниковых производств, американская компания Applied Material (AMAT), не сумела удержать позицию в этой почетной и доходной рыночной нише.

На всех передовых полупроводниковых предприятиях (основные фабрики Samsung, INTEL, TSMC, SK HYNIX, Toshiba и др.) используются системы критического травления (Exelan Flex, Vigus и др.) обеих корпораций LAM и TEL. Оба производителя поставляют планарные узкоззорные емкостные реакторы, различающиеся не столько геометрией, сколько способами генерации и управления плазмой и высоковольтными электрическими слоями подложка-плазма, обусловленными, в основном, историей компаний и разработки этих систем во взаимодействии с массовыми производствами. Только на массовых полупроводниковых производствах производственное оборудование доводится до совершенства качества выпускаемых изделий, и именно полупроводниковое производство в истории человечества стало самым массовым, наукоемким, сложным и дорогим. Объем мирового рынка собственно полупроводниковых чипов (элементов) составляет около 500 млрд долл., а рынок оборудования более 60 млрд.

Критериями качества оборудования травления диэлектриков уровня *front-end* (первые слои на пластине с самыми малыми размерами структур) является его способность обеспечить целый комплекс структурных и динамических характеристик процесса для заданной технологической нормы. Главным и наиболее сложным тестовым процессом считается высокоаспектное травление оксида кремния или чередующихся слоев **ONO** (оксид-нитрид-оксид). Аспектное отношение характеризует ширину и глубину травимой канавки или отверстия. В современных устройствах динамической или флеш-памяти аспекты, отношение глубины к ширине, доходят до 30–50 и более. Другим, важным, но более легким, процессом является травление спейсеров затворов транзисторов первого слоя, которое характеризуется, главным образом, чрезвычайно высокой точностью контроля и аккуратностью проведения процесса. Весьма высокие аспектные требования начинают предъявляться и к травлению волноводов из оксида кремния в сложных устройствах фотоники.

Дороговизна процессов травления высокоаспектных диэлектрических структур **HARC** (High Aspect Ratio Contact) и **UHAR** (Ultra-High Aspect Ratio) обусловлена сложностью физико-химического механизма травления, который контролируется тонким балансом между осаждением тяжелых фторполимеров на поверхность пластины и удалением продуктов их реакций с травимым материалом (оксидом). Процесс настраивается таким образом, что оказывается чувствительным к материалу поверхности. Травится практически только оксид, а на остальной поверхности происходит осаждение полимера. Таким образом, достигается даже бесконечная селективность травления оксида по отношению к фоторезисту на горизонтальных поверхностях при весьма высокой энергии положительных ионов, бомбардирующих поверхность и производящих физическое распыление любых материалов, особенно на фацетах. Селективность травления фоторезиста на фацетах маски при типичном

¹ АО «НПП «ЭСТО», генеральный конструктор, vinogradov@nppesto.ru.

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, зав. сектором плазмохимического травления отдела Тестирования сложных систем.

высокоаспектном травлении не превышает значения 5–7. При этом часть распыляемого материала переосаждается на поверхности самой обрабатываемой структуры, маскируя боковую поверхность структуры.

Именно этим обусловлена сложность контроля химии процесса и трудность контроля профиля травления и однородности нескольких параметров по площади пластины. Именно эта критичность механизма травления и является практическим запретом на применение объемных индуктивных плазменных источников **ICP** (inductively coupled plasma) для критического травления оксида. Объемные источники не обеспечивают достаточного малого времени пребывания газа в реакторе, чтобы провести необходимый контроль процессов на начальных стадиях химической кинетики превращений исходных газов, и не позволяют исключить вторичные реакции исходных компонентов, которые приводят к образованию множества неконтролируемых тяжелых соединений.

Индуктивные источники, тем не менее, обладают рядом преимуществ по отношению к емкостным. Однако длительное время никому не удавалось объединить преимущества индуктивных и планарных емкостных узкозазорных источников. Изобретение плоской конфигурации планарного индукционного источника типа **TCP** (Transformer Coupled Plasma, LAM Research) приблизило реализацию такого реактора, однако, его объем все-таки в три-четыре раза превышает объем планарных узкозазорных емкостных реакторов, описанных выше, и поэтому не достигает цели, а потому и не применяется для травления высокоаспектных структур диэлектриков, хотя и используется вполне успешно в других процессах травления (кремний, металл).

Первый в мире узкозазорный планарный индуктивный реактор был разработан и доведен до уровня фабричного кластерного автомата японской компанией **FOI Corporation (Future Oriented Instruments)** при непосредственном участии автора статьи в качестве руководителя отделения исследований и разработок. Реактор изначально разрабатывался не только как принципиальная альтернатива емкостным реакторам критического травления, но и как более широкодиапазонная и предельно гибкая в управлении система травления, универсальный базовый реактор [1]. Таким реактором стал **Groovy ICP**, способный локально контролировать как физику плазмы, так и химический состав газа по радиусу обрабатываемой пластины в узком газоразрядном зазоре – таком же, как и у планарных емкостных разрядов. Таким образом, наиболее сильные качества индуктивных и емкостных реакторов были объединены в одном устройстве [2].

Компанией АО «НПП «ЭСТО» разработан модуль XORS-200A (рис. 1) критического травления диэлектриков 65–32 нм (субсидия Минпромторга России) на пластинах диаметром 200 мм с использованием



Рис. 1. Кластерная система XORS-200A с вакуумным перегрузчиком на три процессных модуля, лазерным ориентатором пластин и кассетным шлюзовым отсеком с элеватором

передовых технологий травления современных 300-мм фабрик. Затем «НПП «ЭСТО» разработало и изготовило и кластерный вариант системы с центральным вакуумным перегрузчиком, ориентатором пластин и шлюзом с кассетным элеватором. По ключевым технологическим параметрам сам модуль превосходит все известные в мире 200-мм системы независимо от их типа. Поскольку **XORS-200A** является масштабированной копией аналогичной 300-мм процессной камеры, воспроизводятся не только все технологии современной 300-мм системы, но и более высокий уровень всех параметров травления по стандартам 300-мм производства, включая чистоту производства.

Проблемой оказалось проведение опытных работ по травлению структур, используемых на отечественных предприятиях. Их размеры существенно превышают целевой диапазон технологических норм разработанного модуля: 65–32 нм. Поэтому тестирование проводилось на имеющихся отечественных образцах, показанных на рис. 2. Здесь представлены канавки, столбики, отверстия со слоями фоторезиста, контактными окнами. Показано травление не только оксида, но и поликремния. Проводилось также и глубокое травление монокристаллического кремния со сверхвысокими скоростями (до 20–30 мкм/мин) и гладкой стенкой без использования Bosch-технологии.

Благодаря возможности независимого локального управления физикой и химией процессов по радиусу пластины, а также широчайшему диапазону давления и мощности, характерному для источников **ICP**, модуль **XORS-200A** позволяет разрабатывать новые рецептуры значительно проще и быстрее, чем на современных

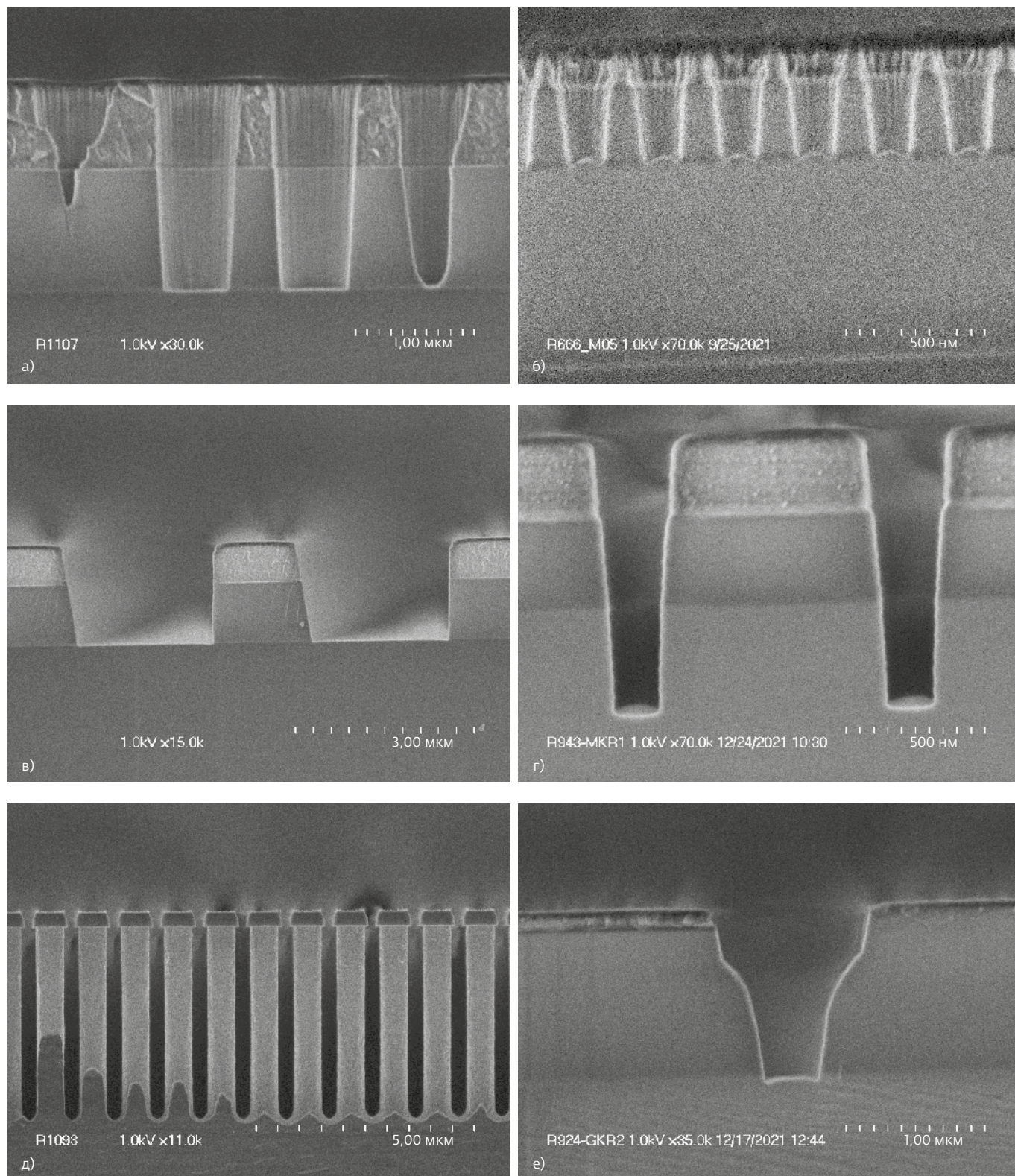


Рис. 2. Примеры травления различных простых структур: а – контактное окно PR-SiO₂ via, фоторезист не удален; б – контактные окна размером 90–100 нм, PR-SiO₂, фоторезист без УФ-дублирования; в – канавки PR-SiO₂, фоторезист не удален; г – травление оксидного контактного окна и кремния PR-SiO₂-Si, фоторезист не удален; д – травление кремниевых столбиков, оксидная маска подтравлена; е – травление контактных площадок типа wineglass в одном процессном цикле без использования камеры изотропного травления

планарных системах ведущих иностранных производителей. Локальный независимый контроль параметров по радиусу позволяет разорвать самосогласованность плазменной рабочей среды, когда меняются все локальные параметры плазмы при изменении лишь одного внешнего параметра разряда, и принципиально расширить диапазон оптимизации процесса. Появляется возможность разорвать жесткую связь между однородностью процесса по пластине, его скоростью и качеством травления.

Более того, модуль **XORS-200A** значительно перекрывает возможности современного оборудования травления 200 мм вплоть до 300 мм технологических норм 16–10 нм, что было реально проверено на соответствующих тестовых образцах, полученных с передовой 300-мм фабрики (регион ЮВА), в процессах формирования жестких масок так называемого мультипаттернинга (*quadruple self-aligned multipatterning*).

Мы имеем в настоящее время в своем распоряжении тестовые структуры современного уровня и предполагаем в ближайшее время продолжить работу с ними на предмет высокоаспектного травления твердых масок аморфного углерода, которые используются при травлении ультравысокоаспектных оксидных и **ONO**-слоев цилиндрических ячеек конденсаторов в современных устройствах DRAM и флеш-памяти.

Особенностью модуля **XORS-200A** является также его способность достигать атомно-слоевой точности, требуемой при травлении спейсеров транзисторов фронтального слоя. Это достигается за счет того, что реактор Groovy ICP генерирует однородную плазму с близким к нулю потенциалом плазмы, что принципиально не достижимо в емкостных планарных реакторах. За счет этого возможен тонкий контроль энергии положительных ионов, обрабатывающих поверхность пластины вблизи пороговых значений, и, следовательно, скорости, однородности травления и качества процесса по нескольким параметрам структуры [3]. Оказалось, емкостные планарные реакторы не подходят для точного низкоскоростного травления спейсеров. Скорость травления, при которой обеспечивается качество процесса, невозможно снизить в них до необходимого уровня контроля.

С другой стороны, точность высокоскоростных (более 1,5–2 мкм/мин) процессов типа etch-back в травлении, например, площадок оксидных предохранителей (fuse pad) должна достигать примерно одного-двух процентов (3σ) для обеспечения приемлемого ($\sim \pm(10-15)\%$) разброса характеристик предохранителей после стравливания $\sim 90\%$ их исходной толщины. Такие процессы были реализованы в реакторе Groovy ICP 300 мм в производстве памяти на фабрике **RexChip** на Тайване (принадлежит **Micron Technology**, США, в настоящее время). Скорость травления оксида в таком процессе была доведена до 2,8 мкм/мин – это очень высокий предел [3].

В целом, процессный модуль **XORS-200A**, полностью воспроизводящий характеристики 300-мм машины, обеспечивает не только основные технологии критического травления диэлектриков в массовом полупроводниковом производстве (высокоаспектное травление оксида, ONO, low-k, нитрида, аморфного углерода, полимеров и др.) уровня front-end, но также глубокое сверхскоростное высокоаспектное травление кремния с гладкой стенкой для 2,5D- и 3D-интеграции без использования Bosch-процесса.

Травление контактных окон для российских пользователей, показанных на рис. 2, производится с использованием фоторезистивных масок. Возможно травление ультравысокоаспектных (UHAR) оксидных отверстий вплоть до отношений (глубина / ширина) 50–60, соответствующих современным устройствам памяти. Такие процессы осуществляются в современном производстве исключительно с использованием жестких масок (hard mask). Типичными материалами масок служат нитрид кремния, поликремний и аморфный углерод. Последний материал весьма распространен в последнее время и наносится в основном разливом с центрифугированием, как и фоторезист, что имеет высокую экономическую эффективность по сравнению с сухим нанесением. Твердые маски широко применяются в современных производствах также для улучшения качества литографического рисунка, улучшения равномерности линий (LER, line edge roughness), подавления извилистости (line wiggling) фоторезиста.

Следует учесть, что надежная отработка и серийный выпуск критического оборудования *front-end* возможны только совместно с предприятиями массового производства полупроводников, которых в России для пластин диаметром 200 мм пока нет. Квалификация линии массового кремниевого производства предполагает производительность не менее 10–15 тыс. пластин (не чипов) в месяц. Иначе не достигается даже минимальная экономическая эффективность. Отсутствие массового производства накладывает принципиальные ограничения на развитие отечественного машиностроения и объясняет, почему в РФ его практически нет и пока не предвидится, несмотря на наличие многочисленных программ развития. Более тридцати лет разрухи отечественной микроэлектроники, как это отмечено А. Брыкиным в серии публикаций [4], привели к ситуации, когда говорить нужно не о восстановлении микроэлектроники, которая утрачена, а о создании вновь, как это было в пятидесятые-шестидесятые годы в СССР, интегрированного комплекса полупроводниковой промышленности как отрасли, включающей выпуск современных полупроводниковых чипов (процессоров, контроллеров, аналоговых ИС, дискретов и пр.), основного критического производственного оборудования, эксплуатационных газов и жидкостей, фоторезистов, требуемых материалов и оснастки. Также

как и в шестидесятые-семидесятые годы необходим перенос передовых достижений вместе с ключевыми специалистами – носителями знаний и производственного опыта. Последним примером подобного переноса технологий было массовое привлечение в двухтысячных годах японских специалистов по плоским дисплейным панелям **FPD** (flat panel display) в Южную Корею. А предыдущим историческим примером был перенос технологий полупроводниковых производств из Тайваня в Китай, из США в Японию. Это исключительно важная задача, решение которой необходимо и нам в ближайшей перспективе. Падение глобальных рынков полупроводников в связи с резким изменением модели потребления неизбежно приведет к закрытию многих производств и высвобождению специалистов, с одной стороны. С другой стороны, возможно и изменение производственных моделей, опирающихся сегодня на суперпроизводительные гигафабы типа 17-й линии Самсунга (г. Хвасон) огромной площади с двумя производственными этажами (обычно на фабрике лишь один этаж с производственным оборудованием, остальные этажи вспомогательные и офисные). Модели потребления изделий короткого жизненного цикла будут заменяться на модели потребления изделий длительного времени жизни. Вследствие этого будет неизбежно уменьшена и серийность массового производства полупроводников и ограничено переполнение рынка постоянно сменяемыми «гаджетами», что существенным образом скажется на экономической эффективности производства, повлияет на структуру его организации, степень интеграции и глубину специализации.

Наиболее реальной возможностью восстановить минимальные производственные мощности у нас можно считать запуск 200 мм производства на бывшем «Ангстрем-Т», который срывался уже несколько раз. Работа по модулю травления предполагала поставку опытной системы для отладки и доводки нашей машины на «Ангстрем-Т». Поскольку «Ангстрем-Т» не состоялся, НПП «ЭСТО» пришлось заниматься менее продвинутыми производствами на 150- и даже 100-мм пластинах. А ведь дальнейшее развитие технологических модулей на базе Groovy ICP позволяет в кратчайшие сроки реализовать серийное производство унифицированных технологических камер практически для всех технологических процессов травления вплоть до уровня в единицы нанометров на пластинах и 200, и 300 мм. Работающие автоматические 300 мм кластеры на основе Groovy ICP были продемонстрированы в 2010 году в Японии представителям делегации РОСНАНО, АФК «Система», ПАО «НИИМЭ-Микрон». Но тогда развитие российской микроэлектроники мыслилось лишь как очередной бизнес-проект и потоки субсидий. Хотелось бы надеяться на то, что государственный подход к развитию этой критической отрасли станет более разумным.

В случае запуска производства НМ-ТЕХ возможна организация там площадки отдельного технологического центра разработки и испытаний отечественного оборудования. Только в кооперации с квалифицированным производителем полупроводников возможно развитие отечественного машиностроения. Обычная практика Японии и Южной Кореи состоит в обязательных совместных проектах «фабрика – машиностроитель», субсидируемых государством (**JDP – Joint Development Project**). Опыт расцвета японской и затем много позднее корейской полупроводниковой промышленности учит тому, как нужно переносить передовые технологии и затем развивать их. Обе страны добивались великолепных результатов, захватывая более половины мирового рынка производства устройств памяти. А Южная Корея в настоящее время – это тотально доминирующий производитель в лице двух корпораций: Samsung и SK Hynix, оттеснивший и японскую – Toshiba, и американский Micron Technology, несмотря на то, что последний поглотил в последние десятилетия таких крупных производителей, как Elpida Memory (Japan), PSC (PowerChip Semiconductor Company, Taiwan). Главное – постановка реалистических целей производства в физическом выражении и конкретной всем понятной номенклатуре продукции. В России, к сожалению, целеполагание как категория мыслительности была вытравлена идеологами Перестройки и до сих пор не вернулась на свое место в управлении экономикой.

В заключение следует отметить, что современная полупроводниковая промышленность уже второе десятилетие, как вошла в фазу зрелости. Впервые доклады на эту тему автор настоящей статьи слышал в 2003 году на конференции ULSI Technology Seminar, Osaka, Japan [5]. Именно по причине входа в фазу зрелости, по-видимому, так и не состоялся переход на стандарт 450 мм в кремниевом производстве. Хотя это могло быть и следствием методологических ошибок в навязывании нереальных производственных стандартов со стороны SEMI для нового поколения процессов: сохранение не удельных, а абсолютных параметров 300-мм производств на стандарте 450 мм.

Копировать в целом структуру существующих в мире производств поэтому не целесообразно для России. Требуется новые более экономичные подходы с гарантированным экономически эффективным собственным производством ключевого критического оборудования при том, что все дополняющее оборудование можно будет приобретать, например, в Китае, где производится уже довольно много типов современного оборудования 300 мм, включая литографы.

В любом случае, разработка оборудования требует концентрации усилий и создания интегральных центров производства полупроводников, оборудования и технологий. Окончательная отработка оборудования возможна



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) – объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

Обучение специалистов заказчика

Технологический аудит производства

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

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

124460, Москва, Зеленоград,
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1
тел.: (499) 729-77-51,
(499) 479-12-39
info@nppesto.ru
www.nppesto.ru



только в сплит-процессах, когда поток производственных изделий частично перенаправляется на новое оборудование, а результат сверяется с существующей продукцией по выходу годных. И тому есть надежные примеры и опыт.

Внутренняя корпоративная разработка собственно критического оборудования хорошо известна в Японии. Так, например, полупроводниковые предприятия известной компании Fujitsu оборудование травления ферроэлектрической (FeRAM) памяти (травление платины, PZT, оксидов) получали от собственных разработчиков производителей этого оборудования. Причем эксплуатационные параметры их оборудования существенно превосходили параметры аналога (AMAT) на мировом рынке как по производительности, так и по качеству процесса травления. В этой же корпорации выпускалось и собственное оборудование удаления фоторезиста. Производственные линии основного в восьмидесятые-девяностые годы мирового производителя устройств памяти Toshiba получали системы удаления фоторезиста также с собственного предприятия Shibaura Mechatronics, дочерней компании Toshiba. Известны и весьма популярные в девяностые-двухтысячные годы ECR этчеры компании Hitachi, так же внутренняя разработка производителя полупроводников. Также и успешная разработка 200-мм ашера (стриппера) фоторезиста на основе новейшего Лямбда-резонаторного (полноволнового) источника плазмы (Lambda-200C), вытеснившая из страны американского производителя Mattson Technology, была инициирована и профинансирована компанией Hitachi.

Подобная форма разработки и производства оборудования внутри предприятий полного цикла производства

полупроводников тем более целесообразна и актуальна в Российской Федерации в настоящее время, поскольку существенно отставшие от современного уровня машиностроители не имеют шансов самостоятельно выйти на современный уровень оборудования. Эффективность государственного управления современными разработками и производством убедительно продемонстрирована в последние два десятилетия российским ОПК. Именно такая практика понадобится в ближайшее время и при воссоздании полупроводниковой отрасли в Российской Федерации, включая специальное электронное машиностроение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vinogradov G. K. and Takeda Masaharu.** Plasma etching using an ICP etcher // Solid State Electronics. April 2005. Online, www.solid-state.com.
2. **Vinogradov G. K.** Recent Trends in 300-mm Plasma Equipment // 8th International Symposium «Plasma- and Process-Induced Damage (P2ID)». Paris, Corbeil-Essonnes, Altis Semiconductor, invited talk. 2003 24–25 April. 2003. PP. 168–173.
3. **Vinogradov G. K. and Jung W. Y.** Angstrom-order Etching Rate Control using Groovy ICP // International Symposium on Dry Processes DPS2008. Nagoya. Japan. 2008. (<http://www.plasma.engg.nagoya-u.ac.jp/DPS/dps2008.html>).
4. **Брыкин А.** Причины системных проблем в развитии радиоэлектронной и электронной промышленности России. Часть 4. Конец 1970-х – начало 2000-х годов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 7. С. 82–94.
5. **Goodall Randy.** Industry Economic Modeling // SEMI Forum. Japan 2002. ULSI Technology Seminar. Osaka. Japan.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 760 руб.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ: Учеб. пособие

Кондрашин А. А., Лямин А. Н., Слепцов В. В. 2-е изд., испр. и доп.

Данное учебное пособие является первой книгой по технологиям изготовления, сканирования и визуализации трехмерных электронных устройств. Во второй книге будут рассмотрены технологии сканирования трехмерных электронных устройств различных диапазонов, в том числе нанометрового диапазона. Третья книга будет посвящена технологиям визуализации (средствам отображения информации) для контроля параметров ТЭУ, создания новых ТЭУ и технологий реинжиниринга ТЭУ.

Учебное пособие может быть рекомендовано бакалаврам и магистрам высших учебных заведений.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 210 с.,
ISBN 978-5-94836-504-6

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

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

Testing&Control

25–27 октября 2022
Москва, Крокус Экспо

19-я Международная выставка
испытательного и контрольно-
измерительного оборудования



testing-control.ru



Измерительное
и метрологическое
оборудование



Оборудование
для лабораторного
контроля



Испытательное
оборудование



Оборудование
для неразрушающего
контроля и технической
диагностики



Производственный
контроль и машинное
зрение



Системы диагностики
и мониторинга

Забронируйте стенд
testing-control.ru



Организатор

MVK

Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru