

Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда для производства полупроводниковых приборов и другой электронной аппаратуры

Введение

Руководства по охране окружающей среды, здоровья и труда (ОСЗТ) представляют собой технические справочники, содержащие примеры надлежащей международной отраслевой практики (НМОП)¹ как общего характера, так и относящиеся к конкретным отраслям. Если в реализации проекта участвует один член Группы организаций Всемирного банка или более, применение настоящего Руководства осуществляется в соответствии с принятыми в этих странах стандартами и политикой. Такие Руководства по ОСЗТ для различных отраслей промышленности следует применять в сочетании с **Общим руководством по ОСЗТ** – документом, в котором пользователи могут найти указания по общим вопросам ОСЗТ, потенциально применимым ко всем отраслям промышленности. При осуществлении комплексных проектов может возникнуть необходимость в использовании нескольких Руководств, касающихся различных отраслей промышленности. С полным перечнем Руководств для

¹ Определяется как применение профессиональных навыков и проявление старательности, благоразумия и предусмотрительности, чего следует с достаточным на то основанием ожидать от квалифицированного и опытного специалиста, занятого аналогичным видом деятельности в таких же или сходных условиях в любом регионе мира. При оценке применяемых в ходе реализации проекта способов предупреждения и предотвращения загрязнения окружающей среды квалифицированный и опытный специалист может выявить обстоятельства, такие, например, как различные уровни экологической деградации и ассимилирующей способности окружающей среды, а также различные уровни финансовой и технической осуществимости.

отраслей промышленности можно ознакомиться по адресу:
<http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>.

В Руководствах по ОСЗТ приводятся такие уровни и параметры эффективности, которые, как правило, считаются достижимыми на вновь введенных в эксплуатацию объектах при современном уровне технологии и приемлемых затратах. Применение положений Руководств по ОСЗТ к уже существующим объектам может потребовать разработки особых целевых показателей для каждого объекта и соответствующего графика их достижения.

Применение Руководства по ОСЗТ следует увязывать с факторами опасности и риска, определенными для каждого проекта на основе результатов экологической оценки, в ходе которой принимаются во внимание конкретные для каждого объекта переменные, такие как особенности страны реализации проекта, ассимилирующая способность окружающей среды и прочие факторы, связанные с намечаемой деятельностью. Порядок применения конкретных технических рекомендаций следует разрабатывать на основе экспертного мнения квалифицированных и опытных специалистов.

Если нормативные акты в стране реализации проекта предусматривают уровни и параметры, отличные от

содержащихся в Руководствах по ОСЗТ, то при реализации проекта надлежит в каждом случае руководствоваться более жестким из имеющихся вариантов. Если в силу особых условий реализации конкретного проекта целесообразно применение менее жестких уровней или параметров, нежели те, что представлены в настоящем Руководстве по ОСЗТ, в рамках экологической оценки по конкретному объекту надлежит представить подробное и исчерпывающее обоснование любых предлагаемых альтернатив. Такое обоснование должно продемонстрировать, что выбор любого из альтернативных уровней результативности обеспечит охрану здоровья населения и окружающей среды.

Применение

Руководство по ОСЗТ для производства полупроводниковых приборов и другой электронной аппаратуры содержит информацию, относящуюся к производству полупроводниковых приборов и другим проектам и оборудованию по производству электронной аппаратуры. В него не включена информация по получению сырья, сборке деталей общего применения, производству экранов для сборки компонентов, устанавливаемых внутри пластмассового корпуса, и по изготовлению стандартных разъемов. В приложении А приведено полное описание видов деятельности, используемых в данной отрасли. Настоящий документ состоит из следующих разделов:

- Раздел 1.0 – Характерные для отрасли виды неблагоприятного воздействия и борьба с ними
- Раздел 2.0 – Показатели эффективности и мониторинг
- Раздел 3.0 – Справочная литература и дополнительные источники информации

Приложение А – Общее описание видов деятельности, относящихся к данной отрасли

1.0 Характерные для отрасли виды неблагоприятного воздействия и борьба с ними

В этом разделе приводится обзор проблем ОСЗТ, связанных с объектами по производству полупроводниковых приборов и другой электронной аппаратуры, которые возникают на этапе эксплуатации, а также рекомендации по их решению. Рекомендации по решению проблем ОСЗТ, характерных для большинства крупных промышленных предприятий на этапе строительства или вывода из эксплуатации, содержатся в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

1.1 Охрана окружающей среды

Проблемы воздействия на окружающую среду при осуществлении проектов по производству полупроводниковых приборов и другой электронной аппаратуры прежде всего включают следующее:

- использование опасных материалов и сбор и обращение с отходами;
- атмосферные выбросы;
- сточные воды;
- использование энергии;
- изменения общих технологических процессов.

Опасные материалы и отходы

Почти все технологические процессы в ходе производства полупроводниковых приборов и другой электронной аппаратуры связаны с образованием опасных или потенциально опасных отходов, таких как отработанная деионизированная вода (содержащая неорганическую

кислоту), отработанные растворители и проявители (например, изопарафиновые углеводороды), отработанные моющие растворы, шламы, образовавшиеся при очистке сточных вод, отработанные эпоксидные материалы (при производстве печатных плат [ПП] и при производстве полупроводниковых приборов), отработанные растворы цианидов (гальванические покрытия), остатки флюса для пайки и остатки металлов (монтаж печатных плат [МПП]).

В дополнение к соответствующим мерам по обращению с опасными материалами, приведенным в **Общем руководстве по ОСЗТ**, специальные технологии предотвращения загрязнения предусматривают модификации и замену технологических процессов, которые перечислены ниже²:

- усовершенствование технологий или замена оборудования, включая³:
 - восстановление гальванических ванн путем фильтрации через активированный уголь для удаления накопившихся органических загрязнителей, что снижает количество подлежащих удалению гальванических ванн и уменьшает потребность в новых химических веществах;
 - использование автоматизированных систем газовых камер для управления

² Применение свинца, ртути, кадмия, хрома (Cr VI), полибромированных бифенилов и эфиров полибромированного бифенила должно быть ограничено или поэтапно прекращено согласно директивам Европейского союза (2003а и 2003б). Использование хлорфторуглеродов и трихлорэтилена должно быть поэтапно прекращено. Ограничения на использование сульфонатов перфтороктана могут быть введены путем внесения поправки в Директиву Совета ЕС 76/769/ЕЕС (COM/2005/0618 final – COD 2005/0244). Добровольные меры по ограничению использования и снижению выбросов сульфонатов перфтороктана приняты Всемирным советом по полупроводниковым приборам (WSC) и Ассоциацией североамериканских производителей оборудования и материалов для полупроводниковой промышленности (SEMI).

³ Дополнительная информация приводится в приложении А.

- неорганизованными выбросами газов из газовых баллонов, особенно во время их замены;
- использование заменителей свинцовых припоев, например сплавов на основе олова и других не содержащих свинец припоев;
 - замену или прекращение использования сырья, например замена цианидных растворов для нанесения покрытий (для электролитического золочения при производстве печатных плат) кислыми сульфатами меди и сульфитом золота и нанесение никелевых покрытий методом химического восстановления; замену гальванических ванн с шестивалентным хромом гальваническими ваннами с трехвалентным хромом (при производстве печатных плат, хотя использование хромовых ванн считается устаревшим способом);
 - выделение, разделение и подготовку опасных веществ и отходов, например выделение из осадка сточных вод металлических загрязнителей, способствующее рекуперации отходов; хранение используемых для металлизации химических веществ отдельно от несовместимых с ними веществ, например хранение цианидов отдельно от кислот и хранение окислителей отдельно от воспламеняющихся веществ;
 - восстановление и повторное использование металлов, прежде всего в секторах производства полупроводниковых приборов и монтажа печатных плат, например восстановление меди и драгоценных металлов с помощью электролитической технологии; удаление и восстановление меди и олова из печатных плат путем электролиза и химического осаждения; восстановление мышьяка и галлия путем обработки отходов арсенида галлия (GaAs) (используя тепловое разделение твердых отходов арсенида галлия и восстановление из отходов от полировки GaAs);

- сокращения выбросов сульфонатов перфтороктана (PFOS) при производстве полупроводников путем прекращения некритических видов использования веществ на основе PFOS, таких как некоторые смеси для травления, для которых имеется замена. Когда для критических видов применения PFOS нет никаких альтернатив замены, таких как технологии с применением волн меньшей длины, используемых при производстве полупроводниковых приборов, следует вести контроль обращения с отходами, особенно в случае сжигания⁴.

Обращение с опасными материалами обсуждается в **Общем руководстве по ОСЗТ**. Специальные меры для этой отрасли промышленности включают следующее:

- необходимо регулярно проверять места хранения используемых химических веществ с целью выявления их возможных утечек;
- в подземных трубопроводах необходимо использовать двойные трубы и средства выявления утечек из внутренней трубы;
- трубопроводы, по которым подаются опасные материалы, должны быть изготовлены из совместимых материалов, они должны быть достаточно прочно закреплены, четко помечены, иметь высококачественные соединения. Трубопровод должен быть сконструирован так, чтобы обеспечить слив в нижних точках, иметь вентили в верхних точках и

⁴ PFOS включены в список химических веществ, которые обладают токсическими свойствами, стойкостью и свойствами биологического накопления, поэтому рассматривается их включение в список стойких органических загрязнителей (СОЗ) Стокгольмской конвенции. Как уже отмечалось выше, в этой отрасли промышленности (WSC и SEMI) заключено добровольное глобальное соглашение, в котором говорится о ликвидации всех видов использования, кроме критических, и которое требует сжигания всех выбросов, которые содержат PFOS, кроме сбросов в сточные воды. Это соглашение можно найти на сайте http://www.sia-online.org/pre_stat.cfm?ID=294

изолирующие клапаны максимум через каждые 30 метров;

- необходимо использовать поддоны для сбора пролитых и рассыпанных отходов.

Обращение с твердыми и опасными отходами рассматривается в **Общем руководстве по ОСЗТ**. В настоящем разделе рассматриваются все отходы, обладающие опасными свойствами (среди прочих такие вещества, как отработанная деионизированная вода, отработанные растворители, отработанные очищающие растворы, шламы, полученные в процессе очистки сточных вод, отработанные эпоксидные материалы и отработанные растворы цианидов); они должны быть четко маркированы, должны храниться отдельно от общих отходов в химически стойкой герметичной таре в специальных зонах хранения. Безопасное хранение и герметизация являются важными факторами из-за высокой химической активности и токсичности промышленных отходов и побочных продуктов, о чем говорится в следующем разделе, посвященном охране труда и технике безопасности.

Атмосферные выбросы

Наибольшую тревогу вызывают выбросы, образующиеся в секторе производства полупроводниковых приборов и электронной аппаратуры, которые содержат парниковые газы, токсичные, химически активные и вызывающие коррозию вещества (например, пары кислот, легирующие примеси, чистящие газы и летучие органические соединения [ЛОС]), которые образуются в ходе процессов диффузии, очистки и травления⁵.

⁵ Агентство по охране окружающей среды США выявило приблизительно 30 опасных загрязнителей воздуха при производстве полупроводниковых приборов, однако, согласно оценкам, более 90% всех выбросов приходится на хлористый водород, фтористый водород, эфиры пропиленгликоля и их ацетаты, метанол и ксилолы.

Существуют три типа систем, которые используются для уменьшения выбросов токсичных и опасных газов:

- системы для очистки на месте использования (ОМИ) относительно небольшие по размеру, обычно они узко специализированы для определенного технологического инструмента. Эти системы способны удалять до 99,99% отходящих газов. Например, скруббер для ОМИ может снизить содержание арсина до менее чем 50 частей на миллиард. Для очистки на месте газообразных загрязнителей и загрязнителей, содержащих твердые частицы, используется шесть основных видов технологий (включая очистку от перфторуглеродов (ПФУ)):
 - мокрая очистка в скруббере при производстве полупроводниковых приборов, хотя спектр такой очистки ограничен. Кроме того, мокрые скрубберы используются для очистки кислотных газов и побочных продуктов, возникающих в результате горения/окислительной очистки;
 - горячие слои химических реактивов при производстве полупроводниковых приборов;
 - сжигание или окисление с использованием топливных горелок или камер с электрическим нагревом, которые часто используются вместе с мокрыми скрубберами (производство полупроводниковых приборов и МПП);
 - плазменные реакторы при производстве полупроводниковых приборов, хотя они обладают ограниченным спектром очистки и требуют установки дополнительного газоочистного оборудования;
 - холодные адсорберы в секторе МПП;
 - ловушки, фильтры, циклоны и пылеуловители в секторе МПП, используемые для удаления

твердых частиц и конденсации паров из потока отходящих газов;

- цеховые системы, которые имеют намного большие размеры и размещаются вне цеха (производства полупроводниковых приборов) и которые способны обрабатывать большие потоки отходов из различных источников;
- скрубберы для аварийных выбросов, пригодные для обработки больших внезапных выбросов токсичных газов, обычно имеют узкую специализацию и используются в системе вытяжной вентиляции складов газовых баллонов. Скрубберы для аварийных выбросов используются для предотвращения неуправляемых выбросов. Однако большинство токсичных газов можно ликвидировать в специальных камерах, содержимое которых очищают или выбрасывают в атмосферу после тщательного контроля за уровнем концентрации газов, чтобы гарантировать их безопасность для здоровья людей и окружающей среды.

Перфторуглероды и прочие парниковые газы

Перфторуглероды (ПФУ), которые включают CF_4 , C_2F_6 и C_3F_8 , трехфтористый азот (NF_3), HFC-23 (CHF_3) и гексафторид серы (SF_6), используются при производстве полупроводниковых приборов в качестве чистящих газов в системах химического газофазного осаждения (ГХО), при плазменном травлении и прежде всего при производстве тонкопленочных транзисторов для экранов жидкокристаллических дисплеев (TFT-LCD). Главная проблема защиты окружающей среды, связанная с ПФУ, – это их высокий потенциал вызывать глобальное потепление

(ПГП), что обусловлено их длительным периодом пребывания в атмосфере⁶.

Методы снижения и регулирования выбросов ПФУ включают⁷:

- оптимизацию технологических процессов, особенно процессов ГХО;
- замену химического реактива, например использование $c-C_4F_8$ или NF_3 в качестве адекватного альтернативного чистящего газа для камеры вместо C_2F_6 в модифицированной камере ГХО с целью сведения к минимуму выбросов в атмосферу;
- уменьшение, методом диссоциации молекул в не содержащие ПФУ побочные продукты, путем сжигания, каталитического разложения или с использованием плазменных систем разложения (последний способ применим только к установкам для травления подложек, диаметр которых не превышает 200 мм). Технологию термического разложения можно применять к процессам очистки камер и процессам травления внутри цеха (применение ОМИ) или в масштабе всего производства (очистка в месте выброса);
- улавливание и повторное использование ПФУ в потоках отходящих газов, однако этот процесс требует решения сложных технических и экономических проблем;

⁶ В мае 2005 года участники Всемирного совета по полупроводниковым приборам договорились снизить к 2010 году выбросы ПФУ минимум на 10% от базового уровня (уровня 1995 года для европейской, американской и японской ассоциаций, уровня 1997 года для корейской ассоциации и уровня 1998 года для Тайваня).

⁷ Дополнительная информация по сокращению выбросов ПФУ путем применения различных технологий контроля выбросов приведена в материалах Межправительственной комиссии по изменению климата (2000).

- дополнительная информация по управлению парниковыми газами приведена в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

Кислотные пары

Потенциальная эмиссия кислотных паров (главным образом паров соляной кислоты и плавиковой кислоты) связана со следующими процессами, используемыми при производстве полупроводников и в секторе МПП:

- операции очистки, травления и удаления фоторезиста при производстве полупроводниковых приборов;
- травление, во время которого могут выделяться пары хлорида водорода;
- очистка, подготовка поверхности, травление хлоридом меди и нанесение гальванических покрытий при производстве печатных плат.

Аэрозольные выбросы серной кислоты также связаны с обработкой плат смесями при травлении кислотой. Наиболее часто используется смесь, содержащая серную кислоту и перекись водорода.

Выбросы паров кислот уменьшаются при использовании горизонтальных (перекрестно-поточных) мокрых скрубберов или вертикальных (противоточных) мокрых скрубберов. Меры предотвращения загрязнений также включают:

- использование химического агента, снижающего формирование тумана на поверхностях раствора ванны и использование смачивающих веществ (поверхностно-активных веществ);
- переработку серной кислоты, использованной при производстве полупроводниковых пластин путем нагревания и дистилляции, чтобы очистить поток паров

кислот, который улавливают и снова перекачивают на мокрые участки;

- установку крышек на ванны для нанесения электролитических покрытий и установку сетчатых туманоуловителей.

Летучие органические соединения

Летучие органические соединения (ЛОС) используются прежде всего при производстве полупроводниковых приборов и в секторе МПП. ЛОС могут выделяться в ходе большинства процессов очистки и фотолитографии, во время сушки, проявления фоторезиста и во время операций по удалению фоторезиста. Обычно выделенные ЛОС поглощаются в системах, содержащих активированный уголь, для облегчения рекуперации и/или обработки термическими окислителями. Применяются следующие методы борьбы с загрязнением или дополнительное очистное оборудование для ограничения выбросов:

- регенеративные термические окислители, применение которых обычно целесообразно, если объемный расход вытяжной системы превышает приблизительно 85 м³ в минуту;
- цеолитовые вращающиеся концентраторы с рекуперативными термическими окислителями, которые используются для концентрации разбавленных потоков ЛОС перед подачей их в устройство уничтожения или рекуперации;
- адсорбция в неподвижном слое активированного угля с удалением пара для рекуперации ЛОС (повторное использование или повторное использование вне объекта);
- адсорбция в псевдооживленном слое активированного угля с горячей десорбцией азота и рекуперацией ЛОС

(повторное использование на предприятии или утилизация вне объекта);

- адсорбция в псевдооживленном слое полимеров с регенерацией горячим азотом и рекуперацией ЛОС (если это целесообразно) или с использованием рекуперативных термических окислителей.

Оксиды азота

Как и в других отраслях промышленности, выбросы NO_x при производстве полупроводников содержат побочные продукты процессов горения. Эти побочные продукты образуются в результате работы котлов систем подогрева, аварийных электрогенераторов и термических окислителей, которые уменьшают выбросы ЛОС. Соответствующие технологии предотвращения и контроля образования выбросов представлены в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

Пыль

Процессы сверления и формирования дорожек при производстве печатных плат приводят к образованию значительного количества пыли, в то время как производство полупроводниковых приборов и МПП не являются источниками значительных объемов пыли. Небольшие объемы пыли образуются в ходе лазерной резки, подгонки, химико-механической полировки и шлифования обратной поверхности пластины при производстве полупроводниковых приборов, а также при производстве магнитных устройств и пассивных компонентов. Рекомендуемые меры контроля включают:

- водные системы осаждения;
- уменьшение загрязнения с помощью рукавных фильтров или электростатических пылеуловителей.

Потребление энергии

Большое число термических процессов и высокомеханизированной обработки полупроводниковых пластин при производстве полупроводниковых приборов ведет к потреблению больших объемов энергии, в связи с чем необходима оптимизация энергопотребления. Следует использовать специализированное оборудование, которое сочетает улучшенные рабочие характеристики и энергоэффективность, например:

- оборудование для обработки воздуха, контролирующее влажность и температуру и позволяющее экономить до 25% энергии;
- высокоэффективные холодильные камеры; и
- регенерированное тепло от оснащенных теплообменниками конденсаторов воды может позволить современному промышленному объекту сэкономить до 40% его потребностей в энергии.

Разработка передовых технологий сокращения выбросов также приводит к созданию нового оборудования, обеспечивающего сокращение больших объемов выбросов и более низкое потребление энергии.

Сточные воды

Сточные воды производственных процессов

Отводимые сточные воды могут содержать органические и неорганические соединения, например металлы, кислоты и щелочи, цианиды и взвешенные твердые частицы. Чтобы свести к минимуму потребление воды и возможное воздействие сбросов, промывочную воду следует рекуперировать для повторного использования очищенной воды в производственном процессе.

Технологические стоки могут содержать органические соединения, прежде всего нехлорированные растворители (например, резисты на основе пиррола, амина, фтора или эфира, изопропиловый спирт и гидроксид тетраметиламмония), используемые на ряде этапов производства полупроводниковых приборов и МПП для очистки, сушки фоторезиста, проявления и удаления фоторезиста; металлы, используемые в процессах металлизации и химико-механического полирования; кислоты и щелочи в составе отработанных очищающих растворов, технологических операций, таких как травление, очистка, металлизация и т. д.; цианиды, используемые в процессе металлизации, и взвешенные твердые частицы остатков пленки и металлические частицы (полученные в процессах фотолитографии, металлизации, шлифования обратной стороны подложки и резки).

Очистка технологических стоков

Так как в технологических операциях при производстве полупроводниковых приборов и электронной аппаратуры используется широкий спектр сырья, химических веществ и процессов, обработка сточных вод может потребовать использования соответствующих типовых операций. Технологии обработки промышленных стоков, используемые в данной отрасли, включают i) выделение источника сильно загрязнённых стоков и предварительную очистку потоков сточных вод, содержащих высокие концентрации не поддающихся биохимическому разложению соединений, используя такие методы разделения фаз, как регенерация растворителя, отгонка воздухом, химическое окисление, адсорбционные процессы и т. д.; ii) снижение содержания тяжелых металлов с помощью химического осаждения, коагуляции и флокуляции, электрохимического восстановления, ионного обмена и т. д.; iii) химическое окисление цианидов; и

iv) обезвреживание и удаление отходов очистки стоков на специальные полигоны для опасных отходов. Могут потребоваться дополнительные меры инженерного контроля для i) дополнительного удаления металлов с помощью мембранной технологии или других физико-химических методов обработки, ii) извлечения неразлагаемых органических соединений и галогенсодержащих органических веществ, используя активированный уголь или усовершенствованное химическое окисление, iii) снижения токсичности частично очищенных сточных вод с помощью соответствующей технологии (например, обратного осмоса, ионного обмена, активированного угля и т. д.) и iv) улавливание летучих органических соединений, удаленных из различных типовых процессов в системе очистки сточных вод.

Обращение с промышленными сточными водами и примеры технологий очистки обсуждаются в **Общем руководстве по ОСЗТ**. При использовании этих технологий и методов надлежащей практики сбора и очистки сточных вод промышленные объекты должны соблюдать нормативы сброса сточных вод, приведенные в соответствующей таблице в разделе 2 настоящего документа для данной отрасли промышленности.

Другие источники сточных вод и потребление воды

Рекомендации по обращению с незагрязненными стоками вспомогательных установок, незагрязненных ливневых вод и хозяйственно-бытовых сточных вод содержатся в **Общем руководстве по ОСЗТ**. Загрязненные потоки должны направляться в систему очистки для технологических стоков. Рекомендации по снижению потребления воды, особенно в тех случаях, когда объемы этого природного

ресурса ограничены, предоставлены в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

Производство печатных плат (ПП)

Было разработано несколько мероприятий для предотвращения загрязнений в процессе производства печатных плат, описание которых приведено в приложении А. Примеры совершенствования процессов, при которых снижается негативное воздействие на окружающую среду, включают:

- *производство печатных плат*: использование технологии поверхностного монтажа (ПМ) вместо технологии металлизированных сквозных отверстий, литья под давлением и аддитивного электролитического осаждения;
- *очистку и подготовку поверхности*: использование очистителей, не образующих хелаты, повышение срока использования ванны, повышение эффективности промывки, противочная очистка и переработка/повторное использование растворов для очистки и жидкостей для промывки;
- *формирование рисунка и маскирование*: проявляемые в водных растворах фоторезисты, трафаретная печать вместо фотолитографии, струйная печать, сухой фоторезист, переработка/повторное использование установок для удаления фоторезиста, разделение потоков и извлечение металлов;
- *гальваническое покрытие и покрытие методом химического восстановления*: замена на механическое изготовление печатной платы, ванн, не использующих цианиды, повышение срока службы ванны, переработка/повторное использование очистителей и промывок, повышение эффективности промывки,

промывка в противотоке, выделение потоков и восстановление металлов;

- *травление*: использование дифференциальной металлизации, нехелатообразующих травильных растворов и бесхромовых травильных растворов, формирование рисунка вместо металлического покрытия, аддитивная технология вместо субтрактивного способа и повторное использование травильных растворов;
- выделение металлов путем регенеративного электрохимического извлечения и ионно-обменными технологиями приводит к почти нулевому сбросу сточных вод для отдельных потоков, содержащих металлы. Тяжелые металлы восстанавливаются в виде металлических пластин, при этом их содержание в осадке снижается на 95%. Содержащие металлы осадки, не обработанные с целью извлечения металлов, подлежат захоронению на экологически безопасных полигонах захоронения твёрдых отходов.

1.2 Охрана труда и техника безопасности

Охрана труда и техника безопасности и опасные производственные факторы при производстве полупроводниковых приборов и в прочих процессах электронных производств прежде всего включают следующее:

- воздействие материалов, выделяемых подложками во время технологической обработки или при механических операциях;
- воздействие опасных химических веществ, используемых в процессах, включая металлические порошки;

- физические опасные факторы и воздействие энергетических опасных факторов (кинетических, электрических, пневматических и гидравлических);
- воздействие ионизирующих и неионизирующих излучений и излучения лазера.

Подложки

Кремневые подложки полупроводниковых приборов (из диоксида кремния) не являются токсичными, однако пыль, образующаяся при их производстве и использовании, может быть опасной. Подложки из GaAs и фосфида индия (InP) оказывают более сильное воздействие на состояние здоровья, а также более сильные физические воздействия. Простейший путь попадания GaAs и InP в организм человека – это вдыхание соответствующих твердых частиц. Из-за высокой токсичности мышьяка и индия оба этих вещества имеют низкие предельно допустимые концентрации на рабочем месте. InP является легковоспламеняющимся веществом, он может вступать в реакцию с водяным паром и кислотами, образуя фосфин – токсичный, легковоспламеняющийся газ. GaAs представляет опасность при шлифовке, резке и полировке.

Для предотвращения этих опасностей и их контроля используют организационные и технические мероприятия по охране работников. Обычно используются следующие меры предосторожности:

- применение местной вытяжной вентиляции при шлифовке и мокрой полировке. Эти операции должны выполняться во влажном состоянии, а остатки должны тщательно смываться. Следует избегать сухой шлифовки или полировки GaAs;
- при всех процессах обработки этих подложек, включая операции резки, шлифовки, полировки и травления, должны использоваться вытяжка и вентиляция;
- необходимо периодически чистить одежду, чтобы предотвратить ее загрязнение, следует поощрять использование надлежащей практики производственной гигиены;
- следует тщательно избегать перегрева и возможного контакта с сильными кислотными восстановителями, потому что в этих случаях возможно образование очень токсичных газов – арсина или фосфина;
- исходное сырье для получения арсина и фосфина должно храниться в контейнерах при пониженном давлении.

Опасные химические вещества, используемые в технологических процессах

В процессе производства полупроводниковых приборов и электронной аппаратуры могут использоваться различные потенциально опасные химические вещества⁸. При производстве пассивных компонентов и магнитных приборов также могут использоваться металлические порошки. Необходимо разработать и реализовать специальные программы химической защиты от данного материала, что подробно описано в **Общем руководстве по ОСЗТ**. Рабочий должен быть защищен от воздействия при работе с химическими веществами, включая, помимо прочего, следующие вещества: кислоты, основания, растворители, металлические порошки и содержащие

⁸ Примерный список включает: азотную кислоту, аммиак, арсенид галлия, арсин, ацетон, водород, гидроксид аммония, диборан, дисилан, дихлорсилан, закись азота, метан, озон, оксид азота, оксихлорид фосфора, серную кислоту, силан, тетрагидрид германия, тетрафторметан, трехфтористый бор, трехфтористый хлор, триметилиндий, триметилмышьяк, трихлорсилан, фосфид индия, фосфин, фосфорную кислоту, фтор, фторид азота, фтористоводородную кислоту, хлорин двуокиси углерода и хлористоводородную кислоту.

металлы осадки, а также токсичные, криогенные и легковоспламеняющиеся газы. Дополнительные специальные рекомендации для данной отрасли промышленности включают:

- замену опасных веществ, таких как эфиры этиленгликоля, менее опасными материалами при производстве полупроводниковых приборов;
- если силан (SiH_4) или другие потенциально опасные газы (например, HF или H_2) используются при производстве полупроводниковых приборов, то необходимо установить комплексные системы аварийной сигнализации, имеющие систему газосигнализаторов и устройства аварийной сигнализации, настроенные на общие или отраслевые предельно допустимые концентрации газов;
- использование изолированных автоматизированных производственных систем для предотвращения воздействия на работников, если замена опасного химического реактива невозможна при производстве полупроводниковых приборов или при сборке печатных плат;
- в помещениях, где осуществляется производство полупроводниковых приборов и сборка печатных плат, должны применяться вытяжные и вентиляционные системы для удаления находящихся в воздухе частиц веществ с рабочего участка.

Физические и энергетические опасные факторы

Физические опасные факторы, потенциально присутствующие при производстве полупроводниковых приборов и электронной аппаратуры, включают перемещение тяжелых объектов, например кассет для больших полупроводниковых пластин (особенно для

полупроводниковых пластин с диаметром 300 мм) и готовых упакованных продуктов, а также работу вблизи автоматизированного оборудования. Общие рекомендации для предотвращения и управления физическими и энергетическими опасными факторами (включая кинетические, электрические, пневматические и гидравлические) на рабочем месте представлены в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

Ионизирующие и неионизирующие излучения и лазеры

Производственный процесс может включать использование источников ионизирующих излучений, таких как рентгеновские лучи, гамма-лучи, альфа- и бета-частицы, которые имеют короткую длину волны и обладают большой энергией. Потенциальные типы неионизирующего излучения в производственном процессе могут включать радиочастотное излучение (используется в оборудовании для создания плазмы), ультрафиолетовое излучение, инфракрасное излучение и видимый свет. Неионизирующее излучение может создаваться некоторыми типами нагревателей высокой мощности, испытательной аппаратуры и антеннами, рассчитанными на высокий уровень мощности.

Лазеры классифицируются по способности причинить вред глазам или коже. Если направить излучение лазера или его отражение на объект, то оно может частично поглощаться, повышать температуру и вызывать изменения в облучаемом материале.

Для предотвращения негативного воздействия источников излучения следует использовать защитные корпуса и устройства блокировки оборудования, имеющие источники излучения, а также проинформировать работников о важности использования этих корпусов и устройств

блокировки и обучить работе с ними. Дополнительная информация о воздействии радиации представлена в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

Для предотвращения опасности использования лазеров необходимо использовать системы инженерного контроля, например защитный кожух с блокировкой, установить защитные фильтры и блокировки системы.

1.3 Охрана здоровья и обеспечение безопасности местного населения

Меры по охране здоровья местного населения и воздействие на безопасность во время эксплуатации, строительства и вывода из эксплуатации заводов по производству полупроводниковых приборов и другой электронной аппаратуры аналогичны мерам, принимаемым в отношении большей части промышленных предприятий, и обсуждаются в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

2.0 Показатели эффективности и мониторинг

2.1 Охрана окружающей среды

Нормативы выбросов и сбросов

В таблицах 1 и 2 приведены нормативы сбросов для данной отрасли. Значения нормативов для технологических выбросов и сбросов в данной отрасли соответствуют надлежащей международной отраслевой практике, которая зафиксирована в соответствующих стандартах стран с общепризнанной нормативно-правовой базой. Эти нормативы выполнимы при нормальном режиме работы в надлежащим образом спланированных и эксплуатируемых

помещениях с использованием методов предотвращения загрязнения и контроля, описанных в предыдущих разделах настоящего документа. Указанные уровни должны обеспечиваться без разбавления и поддерживаться в течение не менее 95% времени эксплуатации установки или предприятия, рассчитываемого как доля рабочих часов в год. Отклонение от этих уровней с учетом конкретных местных условий проекта необходимо обосновать при проведении экологической оценки.

Нормативы сбросов применимы к прямым сбросам очищенных стоков в поверхностные воды общего пользования. Уровни сброса для конкретного участка можно установить в зависимости от наличия и состояния канализационных и очистных систем общего пользования либо при сбросе непосредственно в поверхностные воды в зависимости от классификации использования водоприемников, как описано в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

Нормативы выбросов применимы к технологическим выбросам. Нормативы выбросов от источников сжигания, связанного с производством пара и электроэнергии источниками общей мощностью не более 50 МВт тепл., приводятся в **Общем руководстве по ОСЗТ**, а выбросов из источников с более высокой мощностью – в **Руководстве по ОСЗТ для тепловых электростанций**. Указания в отношении фоновых параметров окружающей среды с учетом общей нагрузки выбросов представлены в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

Таблица 1. Нормативы по сбросам сточных вод

Загрязнители	Единицы	Нормативное значение
рН	–	6–9
ХПК (химическое потребление кислорода)	мг/л	160
БПК ₅ (биохимическое потребление кислорода)	мг/л	50
Общее содержание взвешенных частиц	мг/л	50
Нефтепродукты	мг/л	10
Фосфор общее содержание	мг/л	2
Фтор	мг/л	5
Аммиак	мг/л	10
Цианиды, общее содержание	мг/л	1
Цианиды (свободные)	мг/л	0,1
Адсорбируемые органически связанные галогены	мг/л	0,5
Мышьяк	мг/л	0,1
Хром (шестивалентный)	мг/л	0,1
Хром, общее содержание	мг/л	0,5
Кадмий	мг/л	0,1
Медь	мг/л	0,5
Свинец	мг/л	0,1
Ртуть	мг/л	0,01
Никель	мг/л	0,5
Олово	мг/л	2
Серебро	мг/л	0,1
Селен	мг/л	1
Цинк	мг/л	2
Повышение температуры	°С	<3 ^а

^а На границе научно установленной области смешивания с учетом качества воды в источнике, вида водопользования, возможных потребителей воды и ассимилирующей способности водного объекта

Таблица 2. Уровни выбросов в атмосферу^с

Загрязнители	Единицы	Нормативное значение
ЛОС ^а	мг/Нм ³	20
Органические ОЗВ ^б	миллионная часть на ед. объема	20
Неорганические ОЗВ ^б	миллионная часть на ед. объема	0,42
НСI	мг/Нм ³	10
HF	мг/Нм ³	5
Фосфин	мг/Нм ³	0,5
Арсин и соединения мышьяка	мг/Нм ³	0,5
Аммиак	мг/Нм ³	30
Ацетон	мг/Нм ³	150

ПРИМЕЧАНИЯ:
^а Применимо к процессам очистки поверхности.
^б Характерные для отрасли опасные загрязнители воздуха (ОЗВ) включают соединения сурьмы, соединения мышьяка, арсин, тетрахлорид углерода, катехин, хлор, соединения хрома, этилакрилат, этилбензол, этиленгликоль, хлористоводородную кислоту, фтористоводородную кислоту, соединения свинца, метанол, метилизобутилкетон, хлорид метилена, соединения никеля, перхлорэтилен, фосфин, фосфор, толуол, 1,1,1-трихлорэтан, трихлорэтилен (больше не используется), ксилолы. В настоящее время в отрасли не используются этилбензол, толуол, ксилол, метилхлорид, тетрахлорид углерода, соединения хрома, перхлорэтилен, 1,1,1-трихлорэтан и трихлорэтилен.
^с При 3% O₂.

Использование ресурсов и образование отходов

В таблице 3 приведены примеры показателей потребления энергии и воды в данной отрасли, а также образующихся в нем отходов. Отраслевые контрольные показатели даны исключительно для сравнения, и при реализации каждого отдельного проекта необходимо стремиться к постоянному улучшению этих показателей.

Таблица 3. Потребление воды и энергии и образование отходов

Потребление на единицу продукции	Единица измерения	Отраслевой контрольный показатель
Вода Использование воды высшей степени очистки	л/проход подложки диаметром 300 мм	42
Потребление воды высшей степени очистки	л/подложка диаметром 200 мм	4 000–8 000
Общее потребление воды	л/см ²	8–10
Потребление воды высшей степени очистки в цехе	л/см ²	4–6
Энергия Общее потребление цеховыми установками	кВт.ч/см ² готовой подложки	0,3–0,4
Общее потребление цеховыми системами обеспечения		0,5–0,6
Отходы на единицу продукции	Единица измерения	Отраслевой контрольный показатель
Отходы ^a Повторное использование опасных жидких отходов	%	80
Повторное использование опасных твердых отходов	%	85
ПРИМЕЧАНИЯ: ^a Производители полупроводниковых приборов должны стремиться к реализации завода с "нулевыми отходами". Источник: International Technology Roadmap for Semiconductors (2005).		

Мониторинг состояния окружающей среды

Программы мониторинга состояния окружающей среды для данной отрасли следует разрабатывать с учетом необходимости охвата всех видов деятельности, которые потенциально могут оказать существенное воздействие на состояние окружающей среды при их осуществлении как в нормальном, так и нештатном режиме. Мониторинг

состояния окружающей среды следует вести по прямым или косвенным показателям выбросов, сбросов и использования ресурсов, применимым к данному проекту.

Частота проведения мониторинга должна быть достаточной для получения репрезентативных данных по параметру, мониторинг которого проводится. Мониторинг должны осуществлять специально подготовленные лица в соответствии с процедурами мониторинга и учета данных с использованием оборудования, прошедшего надлежащее тарирование и техническое обслуживание. Данные мониторинга следует регулярно анализировать и изучать, сопоставляя их с действующими стандартами в целях принятия при необходимости мер по исправлению ситуации. Дополнительные указания по программам мониторинга содержатся в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

2.2 Охрана труда и техника безопасности

Указания по охране труда и технике безопасности

Соблюдение норм охраны труда и техники безопасности следует оценивать на основании опубликованных международных рекомендаций по показателям воздействия вредных производственных факторов, примерами которых являются, в частности, указания по пороговым предельным значениям (TLV®) воздействия на рабочем месте и показателям биологического воздействия (BEIS®), публикуемые Американской конференцией государственных специалистов по гигиене труда (ACGIH)⁹, Карманный справочник по источникам химической опасности, публикуемый Национальным институтом гигиены и охраны

⁹ См. <http://www.acgih.org/TLV/> и <http://www.acgih.org/store/>

труда (NIOSH) Соединенных Штатов Америки¹⁰, показатели допустимых уровней воздействия (PELs), публикуемые Управлением охраны труда (OSHA) Соединенных Штатов Америки¹¹, индикативные показатели предельно допустимой концентрации в воздухе рабочей зоны, публикуемые странами – членами Европейского союза¹², или данные из иных аналогичных источников.

Показатели травматизма и частота несчастных случаев со смертельным исходом

Исполнителям проектов следует стремиться к полному искоренению несчастных случаев на производстве с участием занятых в проекте работников (нанятых непосредственно исполнителями проекта либо субподрядчиками), особенно несчастных случаев, способных привести к потере рабочего времени, инвалидности различной степени тяжести или даже смертельному исходу. Показатели частоты несчастных случаев на объекте можно сопоставлять с опубликованными показателями предприятий данной отрасли в развитых странах, которые можно получить из таких источников, как, например, Бюро трудовой статистики США и Инспекция по промышленной гигиене и охране труда Соединенного Королевства¹³.

Мониторинг соблюдения норм охраны труда и техники безопасности

Следует вести мониторинг рабочей среды на наличие вредных производственных факторов, характерных для данного проекта. Процесс мониторинга должны

разрабатывать и осуществлять уполномоченные специалисты¹⁴ в рамках программы мониторинга соблюдения норм охраны труда и техники безопасности. Предприятиям следует также вести журналы учета случаев производственного травматизма и профессиональных заболеваний, а также опасных происшествий и несчастных случаев. Дополнительные указания по программам мониторинга соблюдения норм охраны труда и техники безопасности содержатся в **Общем руководстве по ОСЗТ**.

¹⁰ См. <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

¹¹ См. http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDAR DS&p_id=9992

¹² См. http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

¹³ См. <http://www.bls.gov/iif/> и <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

¹⁴ К таким уполномоченным специалистам могут относиться сертифицированные специалисты по промышленной гигиене, дипломированные специалисты по гигиене труда, сертифицированные специалисты по охране труда или специалисты аналогичной квалификации.

3.0 Справочная литература и дополнительные источники информации

Australian National Pollutant Inventory. 1999. Emission Estimation Technique Manual for the Electronics and Computer Industry. Queensland, Australia.

Eastern Research Group. 1999. Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emissions from Semiconductors Manufacturing. Prepared for US EPA, Point Sources Committee. Morrisville, North Carolina.

European Commission. 2005. Reference Document on Best Available Techniques for Surface Treatment of Metals and Plastics. Sevilla, Spain.

European Union. 2003a. Directive 2002/95/EC on Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment. Brussels, Belgium.

European Union. 2003b. Directive 2002/96/EC on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Brussels, Belgium.

Geng, Hwaiyu. 2005. Semiconductor Manufacturing Handbook. McGraw-Hill. New York, New York.

German Federal Government. 2002. First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Immission Control Act (Technical Instructions on Air Quality Control – TA Luft). Berlin, Germany.

German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. 2004. Promulgation of the New Version of the Ordinance on Requirements for the Discharge of Waste Water into Waters (Waste Water Ordinance – AbwV) of 17. June 2004. Berlin, Germany.

Harper, C.A. 1997. Passive Electronic Component Handbook. McGraw-Hill. New York, New York.

Helsinki Commission (Helcom). 2002. Reduction of Discharges and Emissions from the Metal Surface Treatment. Recommendation 23/7. Helsinki, Finland.

Intel. 2004. Environmental, Health and Safety Report. Доступно по адресу: <http://www.intel.com/intel/other/ehs/> (по состоянию на март 2006 г.).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. Good Practice and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Доступно по адресу: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/> (по состоянию на июнь 2006 г.).

International Technology Roadmap for Semiconductors. 2005. Environmental, Safety and Health. Доступно по адресу: <http://public.itrs.net/> (по состоянию на март 2006 г.).

Ireland Environmental Protection Agency. 1996. Integrated Pollution Control Licensing. Batneec Guidance Note for the Manufacture of Integrated Circuits and Printed Circuit Boards. Ardavan, Ireland.

McLyman, Colonel Wm. T. 2002. High Reliability Magnetic Devices: Design and Fabrication. CRC Edition. London, United Kingdom.

New York State Department of Environmental Conservation, Pollution Prevention Unit. 1999. Environmental Compliance and Pollution Prevention Guide for the Electronics and Computer Industry. New York, New York.

Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). Guideline F5-90. Guide for Gaseous Exhaust Emissions. Доступно по адресу: <http://wps2a.semi.org/wps/portal/pagr/118/pa.118/190> (по состоянию на март 2006 г.).

Semiconductor Industry Association. 2000. Occupational Health System 2000 Annual Survey of Work Injuries and Illnesses. San Jose, California.

US Environmental Protection Agency (EPA). 1995. Electronic and Computer Industry, Sector Notebook Project. Washington, DC.

US EPA. 1998. Reduction of Arsenic Wastes in the Semiconductor Industry. EPA/600/R-02/089. Washington, DC.

US EPA. 2001. Proposed Air Toxics Rule for Semiconductor Manufacturing. Fact Sheet. Washington, DC.

US EPA. 2002. 40 CFR Part 63 National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Semiconductor Manufacturing. Washington, DC.

US EPA. Design of the Environment. Printed Wiring Board. Section A, Clean Air Act Requirements. Washington, DC. Доступно по адресу: <http://www.epa.gov/oppt/efe/pubs/index.htm#pwb> (по состоянию на март 2006 г.).

US EPA. 40 CFR Part 413. Electroplating Point Source Category. Washington, DC.

US EPA. 40 CFR Part 433. Metal Finishing Point Source Category. Washington, DC.

US EPA. 40 CFR Part 469. Electrical and Electronic Components Point Source Category. Washington, DC.

World Semiconductor Council (WCS). 1999. Position Paper Regarding PFC Emissions Reduction Goal. April 26, 1999. Fiuggi, Italy.

World Semiconductor Council (WCS). 2005. Joint Statement on the Ninth Meeting. May 19, 2005, Kyoto, Japan.

WSC and SEMI. 2006. Agreement for PFOS. Voluntary Semiconductor Industry Commitment. Доступно по адресу: http://www.sia-online.org/pre_stat.cfm?ID=294 (по состоянию на апрель 2007 г.).

Приложение А. Общее описание видов деятельности, относящихся к данной отрасли

Промышленность по производству электронной аппаратуры включает производство полупроводниковых приборов, печатных плат (ПП), печатных схем с навесными элементами, экранов, пассивных компонентов и магнитных устройств.

Производство полупроводниковых приборов

При производстве полупроводниковых приборов используются кремний, карбид кремния (SiC), арсенид галлия (GaAs), металлы, химические реактивы, вода и электроэнергия. Степень очистки всех материалов должна быть очень высокой, поэтому важно использовать специальные газовые системы, автоматизированные системы транспортировки химических веществ и системы очистки сухого воздуха в чистых комнатах, особенно при фотолитографии. Также необходима система высшей степени очистки воды, поскольку при производстве полупроводниковых приборов требуется много сверхчистой воды, прежде всего для процессов влажной очистки, а также при травлении кислотой, в процессах с использованием растворителей и при очистке установок. Во многих новых производствах потребление воды снижается путем повторного использования значительной части сточных вод, которые были получены на этапах промывки. Этот процесс существенно не увеличивает загрязнение воды. Поскольку размеры интегральных схем постоянно уменьшаются, возрастает роль снижения вибраций и проектирования фундаментов.

Производственный процесс включает сотни операций, которые выполняются слой за слоем на твердом кристаллическом материале, чаще всего на кремнии, а в последние годы – и на карбиде кремния (SiC). Арсенид

галлия (GaAs) часто используется для военных и промышленных целей, включая лазеры, светоизлучающие диоды (СИД) и устройства связи (например, в сотовых телефонах в качестве генераторов сверхвысокой частоты используются микросхемы на основе GaAs).

Производство полупроводников включает две основные последовательности операций: производство полупроводниковых пластин и сборку, упаковку и испытания – этап, который представляет собой сборку пластин в годные к употреблению интегральные схемы.

На *рис. А.1* (на последней странице) показаны основные этапы производства полупроводниковых приборов, причем основное внимание уделяется вводу химических реактивов и других жидкостей, а также точкам образования выбросов, стоков и прочих отходов.

Для производства полупроводниковых пластин требуется однородная кристаллическая многослойная структура кремния (кремниевая пластина), которую получают, используя контролируемые методы, такие как химическое осаждение из газовой фазы (ГХО) или молекулярно-лучевую эпитаксию. Затем на кремниевой пластине путем термообработки в высокотемпературной печи (от 900 до 1200°C) формируют тонкий слой диоксида кремния, который изолирует и защищает кремний. После этого на пластину наносят тонкий однородный слой светочувствительного материала, который называется фоторезистом (позитивным или негативным), и подвергают ее облучению ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами, проходящими через предварительно созданную стеклянную маску или трафарет, на которую нанесен рисунок схемы.

Позитивный фоторезист становится растворимым на облученных участках, и его можно удалить с помощью химических проявителей; при этом вскрывается рисунок фоторезиста, нанесенный с помощью фотошаблона на диоксид кремния (проявление). Затем диоксид кремния удаляют методом жидкостного или сухого травления; в первом случае при обработке используются кислоты, щелочи или щелочные растворы; во втором, который также называют плазменным травлением, используется химически активный ионизированный газ, при этом обеспечивается более высокое разрешение и сокращается объем отходов. Наконец, избыток фоторезиста удаляют с помощью растворителя либо методом плазменного удаления. Благодаря повторению этих этапов (до 25–30 раз) – от окисления кремния и удаления фоторезиста до использования различных фотошаблонов – в слоях формируются различные области, изолированные друг от друга. В совокупности эта технология называется фотолитографией или микролитографией.

Использование сухого процесса (плазменного травления нитрида кремния в технологии структуры металл–оксид–полупроводник (МОП)) позволяет заменить мокрый процесс, в котором используется горячая коррозионно активная фосфорная кислота (H_3PO_4), снизить объем образующихся отходов и повысить безопасность рабочих, одновременно сокращая число этапов обработки.

Для изменения удельной проводимости кремниевых областей в них вводят легирующие примеси, используя диффузию или ионное легирование. Диффузия может вестись из газовой фазы или не из газовой фазы и производится при высокой температуре. Ионное легирование заключается в бомбардировке открытых областей кремния ускоренными ионами. Избирательные электрические межсоединения различных областей и слоев

на полупроводниковой пластине получают путем металлизации: диэлектрический материал осаждается и формируется рисунок, как при инкрустации; затем элементы заполняются алюминиевыми сплавами в вакууме или медью в процессе формирования гальванического покрытия или при электрохимическом осаждении (ЭХО). Излишки меди удаляют с помощью химико-механического полирования или планаризации (выравнивания). Другие методы металлизации, особенно при использовании меди, включают термовакuumное осаждение из газовой фазы и нанесение атомного слоя (НАС). Наконец, для обеспечения герметизации и защиты схемы на поверхность платы с помощью метода пассивации наносят поверхностный слой оксида или полиамида.

Для новых областей применения требуются очень тонкие полупроводниковые приборы, поэтому толщину подложки уменьшают путем шлифования задней поверхности или снятием внутреннего напряжения. Одна готовая подложка может содержать сотни микросхем, каждая из которых подвергается электрическим испытаниям (измерению); затем подложку разрезают на отдельные микросхемы, используя ультратонкий диск с алмазной режущей кромкой (резка пластины на кристаллы), и маркируют. После электрических испытаний каждая микросхема устанавливается на металлической или керамической рамке, соединяется тонкими золотыми проволоками и герметизируется для механической опоры и защиты от воздействия внешней среды. Готовый корпус может содержать одну или несколько соединенных микросхем.

Нанотехнологии и микроэлектромеханические системы

Нанотехнологии подразумевают создание функциональных структур с атомной или молекулярной степенью интеграции,

в которых по крайней мере один характерный размер измеряется в нанометрах. При испарении небольших навесок порошков оксидов металлов (ZnO, Ga₂O₃, SnO₂ и т. д.) при высокой температуре можно синтезировать нанопояса и нанопроволоки из тех же металлических оксидов. Получающиеся полупроводники обычно используются в качестве датчиков, преобразователей или в качестве других деталей электронных и оптоэлектронных приборов.

Как правило, микроэлектромеханические системы (МЭМС) имеют микропреобразователи (например, микродатчики температуры, давления, химических веществ и излучения). Технологии их производства подобны тем, что используются при производстве микросхем. При изготовлении МЭМС применяются разнообразные материалы, обладающие особыми электрическими свойствами, а также отличными механическими, тепловыми или химическими свойствами. Чаще всего используется кремний.

Наиболее часто практикуемая технология изготовления устройств МЭМС включает нанесение рисунка слоя диоксида кремния, после чего наносят рисунок слоя поликристаллического кремния и снимают оксидную пленку, при этом слой поликристаллического кремния перемещается как консоль. Обычно эти операции производятся в смесях фтористоводородной кислоты.

Процессы резки и выделения чрезвычайно важны, поскольку подвижные части устройства МЭМС являются весьма хрупкими. Испытание устройства зависит от его применения, и к сборке устройств МЭМС обычно предъявляются высокие требования из-за их хрупкости. Упаковка тоже зависит от применения, при этом любая упаковка призвана защитить кристалл от внешнего влияния

без блокировки доступа к параметрам окружающей среды, что существенно для правильной работы системы (например, применение в качестве датчика давления в воздушных подушках безопасности). Устройства МЭМС используются во многих отраслях промышленности, включая, среди прочего, автомобилестроение, управление производственными процессами, производство офисного оборудования, авиационно-космическую промышленность, медицинскую промышленность и производство средств связи.

Производство печатных плат (ПП)

Производство ПП связано с травлением и металлизацией рисунка схем на материале основы, который часто является многослойным. ПП могут быть односторонними, двухсторонними, многослойными и гибкими. Можно использовать аддитивные, полуаддитивные или субтрактивные технологии, хотя чаще всего используется субтрактивная технология. Подготовка платы состоит из очистки, ламинирования и сверления отверстий; перед нанесением покрытия методом химического восстановления требуется произвести химическую и механическую очистку. Этап формирования рисунка позволяет перенести рисунок схемы на плату, при этом используется процесс фотолитографии или трафаретная печать; затем наносят гальваническое покрытие (обычно медь), чтобы повысить толщину проводящих слоев и защитить их от коррозии и эрозии. При покрытии припоем (или при выравнивании поверхности воздушным ножом) печатную плату опускают в расплавленный припой (обычно легкоплавкий сплав, например бессвинцовый сплав на основе олова). Избыток припоя удаляют, выравнивая поверхность горячим воздухом. Производство ПП включает заключительные этапы, во время которых производятся

электрические испытания, контроль размеров и визуальный осмотр, упаковка и маркировка.

Монтаж печатных плат (МПП)

Печатные платы состоят в основном из подложки, которая изготовлена из спрессованной эпоксидной смолы, тефлона™, стекловолна или керамики, на которой установлены полупроводники (сформированные на подложке из кремния, карбида кремния или GaAs) и пассивные компоненты. Особые электрические компоненты устанавливаются на печатных платах и припаиваются к ним. Обычно используется химический флюс, чтобы очистить плату и облегчить формирование паяных соединений. Пайку можно производить различными методами, включая пайку волной припоя, технологию поверхностного монтажа (ПМ) и ручную пайку. В процессе МПП можно выбрать вариант очистки смонтированной печатной платы, при которых не выделяются вещества, способствующие разрушению озонового слоя атмосферы, например при использовании других органических растворителей, смеси углеводородов/поверхностно-активных веществ, спиртов и смеси органических растворителей, а также водных и полуводных процессов. В настоящее время остатки флюса удаляют с помощью деионизированной воды; ранее для этого использовали фреон-113 (CFC-113) и трихлорэтан (TCA), применение которых теперь запрещено. Накопленный в отрасли опыт доказал, что даже сложные ПП можно собирать без очистки при использовании малых остатков флюсов, которые загрязняют платы весьма незначительно.

Производство экранов

Плоскопанельные дисплеи подразделяются на группу проекционных экранов и группу экранов прямого наблюдения, которая далее подразделяется на

эмиссионные (излучающие) и неизлучающие экраны. Наиболее популярный плоскопанельный дисплей – это жидкокристаллический дисплей (LCD), в котором состоянием жидкого кристалла управляют с помощью электрического поля. Видимое изображение зависит от размещения молекул жидкого кристалла. Цветной фильтр и тонкопленочный транзистор (TFT) ориентируют параллельно и герметизируют их совместно, помещая между ними прокладку; затем вводят жидкие кристаллы и производят герметизацию. Наконец, собирают поляризатор, корпуса на ленточном носителе, электронику, лампы подсветки и шасси.

Дисплеи на основе органических светоизлучающих диодов (OLED) имеют простую структуру – это твердотельные дисплеи, поскольку в них не используется вакуум, жидкости и газы. В OLED используются небольшие молекулы люминесцентного материала, которые нанесены методом вакуумного напыления. В полимерных светоизлучающих диодах (ПСИД) используются полимерные люминесцентные материалы, обычно наносимые методом струйной печати или центрифугированием. Чтобы улучшить их характеристики, добавляют TFT. Дисплеи на основе органических светоизлучающих диодов имеют свои преимущества, к которым относятся простой процесс производства, высокая оптическая эффективность и низкие напряжения, но в то же время у них малый срок службы.

Производство пассивных компонентов

Основная технология, используемая при производстве пассивных компонентов, – это прессование и/или спекание порошков – оксида алюминия (Al_2O_3), нитрида алюминия (AlN) и т. д. – для получения керамики, обладающей изолирующими, проводящими или пьезоэлектрическими свойствами. Самая распространенная практика – это

производство керамических изоляционных подложек (из Al_2O_3 , AlN) для интегральных схем.

Для получения подложек компонентов, рассеивающих большую мощность, используют AlSiC или CuSiC, чтобы получить повышенную по сравнению со стандартным Al_2O_3 теплопроводность. При введении добавок в основу из углерода или SiC получают резисторы любых размеров, имеющие любое сопротивление. Пьезоэлектрические свойства используются прежде всего во всех областях применения датчиков давления (автомобили), в датчиках напряжения и ультразвуковых очистителях в промышленности или для формирования ультразвука при эхографии. Специальная керамика из оксида цинка (ZnO) используется для ограничения перенапряжений (варисторы).

Производство магнитных устройств

В основе процессов производства магнитных устройств лежит смешивание магнитных порошков (железа или редкоземельных элементов) с целью получения магнитных пленок или лент для хранения данных в носителях данных либо керамики или металлокерамики с улучшенными магнитными свойствами, используемой для производства сердечников небольших импульсных трансформаторов, специальных сверхсильных магнитов для автомобильной промышленности или оборудования для получения статического магнитного резонанса.

Рисунок А.1. Схема процесса производства полупроводниковых приборов

