

Лекция 1. Программа и содержание дисциплины.

Современные требования к системе контроля качества при разработке и массовом производстве изделий микроэлектроники. Виды, методы и средства контроля

Целью дисциплины "Методы и оборудование диагностики и контроля полупроводниковых ИМС" является специальная подготовка студентов в области контроля качества при разработке и массовом производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, ознакомление их с современными методами и оборудованием автоматического контроля электрических параметров. В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- основные методы автоматического контроля электрических параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем различных типов,
- требования к программам диагностики и характеристикам контрольного и вспомогательного оборудования,
- структуру, функциональный состав и принцип действия типовой автоматизированной системы контроля электрических параметров полупроводниковых приборов и микросхем;

уметь:

- составлять программу контроля электрических параметров наиболее распространенных классов полупроводниковых приборов и интегральных схем,
- формулировать требования к основным параметрам контрольно-испытательного оборудования и программному обеспечению автоматизированной системы контроля,
- выбирать рациональный вариант технической реализации отдельных функциональных устройств системы контроля;

иметь представление:

- номенклатуре отечественного и зарубежного контрольно-испытательного оборудования, применяемого при разработке и производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, о схематехнике и элементной базе функциональных устройств общего назначения в составе систем автоматизированного контроля;
- об информационном обеспечении процесса контроля параметров при различных уровнях его автоматизации.

Современные требования к системе контроля качества при разработке и массовом производстве изделий микроэлектроники

Современные изделия электронной техники прошли путь развития от простейших полупроводниковых приборов до больших и сверхбольших интегральных схем. Особенностью производства полупроводниковых приборов и ИМС является применение в технологии изготовления групповых методов. При этом в объеме и на поверхности полупроводниковых подложек различными технологическими приемами формируют большое количество структур диодов, транзисторов или интегральных микросхем. Затем подложки разрезают на кристаллы и герметизируют в корпусах или пластмассой, получая готовые полупроводниковые приборы и ИМС, готовые для монтажа в электронную аппаратуру.

Изготовление изделий микроэлектроники для обеспечения их качества начинается с входного контроля используемых материалов и технологических сред, а в процессе производства производится послеоперационный контроль параметров структур.

Высокие требования в первую очередь к быстродействию и надежности изделий микроэлектроники привели к увеличению количества контрольных операций на всех этапах технологического процесса их изготовления, что потребовало разработки и создания высокопроизводительных автоматизированных измерительных приборов и систем.

Изготовленные изделия должны обладать высокими качествами и надежностью при воздействии на них различных механических и климатических факторов:

- ударов,
- вибрации,
- температуры,
- давления,
- влажности,
- радиации,
- электрической нагрузки.

Поэтому их подвергают испытаниям на воздействие этих факторов. Контроль качества готовых полупроводниковых приборов и ИМС и проверка их параметров на соответствие требованиям нормативно-технической документации проводятся службой технического контроля, осуществляющей квалификационные, приемно-сдаточные, периодические и другие виды испытаний. При испытаниях измеряют электрические параметры полупроводниковых приборов и ИМС, проверяют целостность конструкции и надежность, что позволяет прогнозировать их поведение в реальных условиях эксплуатации и хранения. Достоверность результатов измерения и испытаний зависит от точности и надежности контрольно-измерительного и испытательного оборудования. Сейчас в качестве такого оборудования широко используются измерительные автоматизированные информационные системы на основе микропроцессорной техники.

Сотрудники, занятые контролем качества изделий электронной техники должны знать назначение и правила эксплуатации контрольно-измерительного и испытательного оборудования, устройство и принцип работы полупроводниковых приборов и ИМС, методы измерения их параметров и виды испытаний, а также уметь статистически обрабатывать результаты.

В решении проблемы обеспечения качества изделий микроэлектроники значительная роль принадлежит их контролю и испытаниям в процессе разработки, изготовления и применения.

Совокупность свойств изделий, обуславливающих их пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с назначением, называют качеством.

Качество определяется как степень совершенства изделий, отвечающих требованиям, учитывающих запросы потребителей, а также возможности производства, и зависит от этапов их создания. Так, на этапе проектирования технические решения должны соответствовать техническому заданию (ТЗ). На этапе производства - требованиям технической документации (ТД), при применении - удовлетворять потребителей.

Основным единым комплексным показателем оценки качества является коэффициент качества. За высшую оценку условно принимают 1. Оценка качества полупроводниковых приборов и ИМС проводится по восьми группам свойств:

- назначению,
- надежности,

- стандартизации и унификации,
- технологичности,
- экономичности,
- эргономичности,
- эстетичности.

Виды, методы и средства контроля качества полупроводниковых приборов и ИМС

Разработка, производство и эксплуатация полупроводниковых приборов и ИМС сопровождаются большим количеством контрольно-измерительных операций. Несмотря на то что в основу этих операций положены одни и те же физические методы, назначение и методика их проведения на разных этапах создания и применения изделий микроэлектроники различны. В зависимости от этапа производства и применения изделий микроэлектроники используют различные виды контроля. На этапе эскизного проектирования - это контроль, с помощью которого обосновывается применимость технологического процесса для производства данных изделий и осуществляется выбор материалов. На этапе технического проектирования изделий - это контроль технической документации - электрической принципиальной или функциональной схемы на соответствие проектным нормам (технологическим и конструктивным и ограничениям) и требованиям ЕСКД. На этапе изготовления - это производственный контроль и контроль готовых изделий.

Производственный контроль качества является составной частью типового технологического процесса и сводится к определению двух составляющих: явных дефектов, характеризующих процент выхода годных изделий, и скрытых дефектов, снижающих надежность изделий. В обоих случаях контроль может носить как активный (диагностирующий) характер, так и пассивный. Контроль, при котором получают информацию о природе дефектов, позволяющую вносить необходимые коррективы в производство, называют диагностирующим (диагностикой). Контроль, при котором регистрируют только факт существования дефекта, не вскрывая его механизма, по принципу годно или негодно изделие, называют пассивным. При контроле качества по явным дефектам пассивный контроль сводится к сортировке, осуществляемой либо разделением изделий или полуфабрикатов на группы, либо по принципу 100%-ного отсева (годен - негоден). Целью производственного контроля является не только своевременная отбраковка дефектных изделий на различных этапах изготовления, но и получение требуемого их качества, которое обеспечивается контролем технологических операций и процессов. При этом измеряют параметры структур, сформированных в результате проведения технологических операций или процессов, а также контролируют их технологические режимы и параметры. Производственный контроль состоит из комплекса различных физических, химических и электрических методов измерений, предназначенных как для проверки параметров материалов, полуфабрикатов, структур и готовых изделий, так и технологических режимов и параметров отдельных операций и процессов, и подразделяется на входной, пооперационный (межоперационный) и финишный.

Входной контроль проводят для оценки качества материалов, полуфабрикатов, вспомогательных и комплектующих изделий, поступающих на данную операцию.

Пооперационный контроль производят для оценки качества выполняемых операций: очистки, эпитаксиального наращивания, окисления, диффузии, нанесения металлизации, напыления пленок, фотолитографии, разделения подложек на кристаллы, гонтажа и др. Пооперационный контроль проводят либо после выполнения технологической операции, либо в ходе ее. Причем контролируемые объектами являются как изготовленные структуры, так и технологические режимы и среды. Разновидностью пооперационного контроля является *ит* тестовый контроль, который выполняют по

тестовым схемам. Тестовая схема в виде тестовой ячейки, кристалла или платы - это, как правило, аналог реального полупроводникового прибора, ИМС или микросборки (МСБ) и содержит специальные структуры, предназначенные для получения информации о качестве технологических процессов и изделий. Различают три варианта тестового контроля:

- по тестовым ячейкам, встроенным в рабочие кристаллы (платы);
- по тестовым кристаллам (платам), занимающим определенные места - на подложке;
- по тестовым пластинам-спутникам, сопровождающим технологический процесс.

Выбор варианта тестового контроля зависит от необходимой информации и условий производства. Получение информации обусловлено назначением контроля (анализом конструкции изделия или управления технологией, контролем качества) и количеством контролируемых параметров. Поскольку качество готовых изделий микроэлектроники определяется главным образом электрофизическими свойствами сформированных слоев, соблюдением требуемых размеров и совершенством топологии (минимумом дефектов и повреждений), контролируемые при тестовом контроле параметры с подразделяют на электрофизические, геометрические и структурные.

Финишный контроль проводят для оценки параметров изделий по завершению определенного этапа их изготовления. При этом проверяют параметры пассивных элементов и коммутационных плат гибридных ИМС, полупроводниковые ИМС на функционирование на неразделенной подложке и др.

На завершающем этапе изготовления изделий финишный контроль совпадает с контролем готовых изделий. Контроль качества готовых изделий является завершающей контрольно-измерительной операцией в типовом технологическом процессе их изготовления. Кроме того, этот контроль применяют при использовании изделий микроэлектроники (например, перед их установкой в аппаратуру) или при их исследовании (например, при испытаниях и в процессе анализа отказов). Контроль качества изготовленных полупроводниковых приборов и ИМС состоит в измерении электрических параметров, характеризующих их функциональное назначение. Измерения выполняют либо при нормальных условиях окружающей среды или в режимах, имитирующих условия эксплуатации. Во втором случае электрические параметры изделий контролируют после испытаний.

Контроль качества готовых изделий может быть сплошным, при котором проверяют 100% изделий, или выборочным, при котором проверяют определенную часть изделий, а результаты статистически обрабатывают и переносят на всю партию.

К основным видам контрольных испытаний интегральных микросхем относятся:

- параметрический контроль,
- функциональный контроль,
- диагностический контроль.

Параметрический контроль. Используется для микросхем с малой интеграцией и включает в себя измерения основных параметров на постоянном токе. Кроме того, данный вид предусматривает проведение проверки правильности выполнения несложных логических функций, которая проводится одновременно с последовательным измерением выходных электрических сигналов после подачи определенной комбинации калиброванных сигналов тока или напряжения на входы интегральной схемы.

Следует отметить, что эффективность параметрического вида контроля с точки зрения оценки работоспособности микросхемы в целом с повышением степени интеграции уменьшается, а измерение некоторых процессов, таких, как время нарастания и спада сигнала, становится нецелесообразным.

Функциональный контроль. Используется для проверки интегральных схем с высокой степенью интеграции и включает в себя проведение статистических и динамических измерений на базе контрольной тестовой таблицы, составленной, например, с помощью ЭВМ с учетом минимизации количества входных кодовых комбинаций. Функциональный контроль позволяет проводить проверку больших интегральных микросхем в условиях, близких к эксплуатационным.

Диагностический контроль. Наиболее эффективен при проведении испытаний гибридных интегральных микросхем, в которых в принципе возможна замена неисправных элементов, расположенных на общей подложке. Сложность и многообразие программы функционального и диагностического контроля интегральных микросхем требуют обязательного использования ЭВМ и специальных автоматизированных систем.

Автоматизированные системы, используемые для контроля интегральных микросхем, характеризуются следующими основными параметрами: производительностью, максимальным числом выводов, максимальным числом разрядов кодовой комбинации, выдаваемой одной командой за один цикл управления, числом контрольных постов в системе, с которыми возможна одновременная работа, составом и универсальностью программного обеспечения, возможностью выполнения параметрического контроля.

Для проверки механической прочности соединений существует много приспособлений и установок, а также способов испытаний. Например, при испытании на срез структуру с подсоединенными выводами подвергают растяжению силой, действующей параллельно поверхности подложки. Если прочность соединения составляет менее 70% прочности примененной проволочки, соединение считается качественным. Испытание соединений на отрыв выполняется путем многократных изгибов вывода под углом 30, 45 и 90° относительно поверхности подложки (установка УКПМ-1). Прочность склеенных соединений определяют испытаниями на разрыв. Прочность клеевого соединения на разрыв должна быть не менее $(125 \dots 150) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Металлографический анализ заключается в обследовании поперечных или косых шлифов и позволяет выявить их внутреннюю структуру и обнаруживать не смоченные при пайке участки, проплавления, микротрещины, раковины, поры, интерметаллические включения, следы диффузии припоя по границам зерен.

Рентгеновская дефектоскопия с помощью расходящегося пучка позволяет обнаруживать внутренние дефекты и дает достаточную информацию о надежности соединений. В отличие от металлографического анализа этот метод неразрушающий.

Плоскость поверхностей деталей проверяют методом световой щели с помощью лекальной линейки. Глаз человека способен улавливать просвет в 0.003...0.004 мм.

Контроль на герметичность проводится дважды: после изготовления основания корпуса с изолированными выводами и после герметизации микросхем. Герметичность спаиваемых выводов с материалом основания или герметичность микросхемы в корпусе характеризуется скоростью натекания гелия. Для готовых микросхем за критерий герметичности принята скорость натекания гелия ($\text{см}^3/\text{с}$) при разности давлений снаружи и внутри корпуса 105 Па. Корпусы высокого качества имеют скорость натекания, не превышающую $10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$.

Проверка оснований корпусов на герметичность выполняется с помощью специальных приспособлений, позволяющих с помощью вакуумных уплотнений создавать объем, замкнутый на контролируемую деталь. Существует много методов контроля на герметичность. Наиболее часто применяются ит масс-спектрометрический, вакуум-жидкостный, компрессионно-термический метод и влажностный методы.

Масс-спектрометрический метод основан на индикации атомов гелия, вытекающих через имеющиеся в отдельных узлах или загерметизированных корпусах течи. Применение гелия для обнаружения течей объясняется тем, что он является самым подвижным газом и обладает высокой проникающей способностью. Гелий вводится в корпус микросхемы либо при герметизации, либо путем длительной выдержки уже загерметизированных микросхем в специальных герметических камерах-бомбах, заполненных после предварительной откачки гелием до давления $(3 \dots 5) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

За время выдержки (3...48ч) в бомбе в корпуса микросхем, имеющих течи, проникает гелий. Микросхемы извлекают из бомбы и помещают в стакан установки, например полуавтомата УКГМ-2 с трехпозиционной каруселью. Поворотом карусели стакан переходит в новую позицию, уплотняется и откачивается. После откачки объем стакана автоматически переключается на течеискатель, который преобразует истечение гелия в электрический сигнал. Если сигнал превышает установленное значение, ИМ бракуется. Масс-спектрометрический метод отличается высокой чувствительностью. К недостаткам относятся: низкая производительность (100...200 шт/ч), сложность обслуживания установок.

Вакуум-жидкостный метод основан на регистрации пузырьков воздуха, выходящих через течи корпуса в жидкость, над которой создают разряжение около 10...15 Па. Жидкость-керосин или уайт-спирит предварительно вакуумируют, т.е. выдерживают в течение часа при давлении 700 Па и при температуре 70...120°C. Микросхемы погружают в жидкость. Если в корпусе имеется течь, то за счет разницы давлений внутри и вне корпуса газ будет выходить наружу в виде струйки мелких пузырьков. Таким образом, при визуальном наблюдении обнаруживается место течи. Метод прост, оперативен, более производителен - до 700шт/ч, но менее чувствителен и поэтому позволяет обнаруживать только грубые течи. Метод применяется как предварительный для обработки корпусов с большими течами перед окончательным контролем масс-спектрометрическим методом.

Компрессионно-термический метод - разновидность предыдущего метода. Корпусы опускаются в нагретое обезвоженное силиконовое масло. Нагрев до 200°C повышает чувствительность метода.

Влажностный метод контроля наиболее прост, надежен и позволяет одновременно контролировать, кроме герметичности, стойкость покрытий корпусов на воздействие повышенной влажности. Микросхемы выдерживают в камерах тепла и влаги в течение нескольких суток в условиях повышенной влажности (95...98%) при температуре 40 °C. Критерием выбраковки является ухудшение электрических параметров вследствие проникновения влаги в корпуса. Однако в камерах тепла и влаги отбраковываются ИМ только с грубыми течами. Кроме того, камера не позволяет оперативно обнаруживать негерметичность ИМ с хорошо защищенными структурами. Проникновение влаги в корпус таких ИМ обнаруживается значительно позже, когда произойдет отказ, например, из-за коррозии интерметаллических соединений.

Контроль деталей после холодной штамповки выполняется визуальным осмотром.

Метод визуального контроля играет важную роль в производстве ИМС, несмотря на кажущуюся тривиальность. Он включает осмотр схем под оптическим микроскопом и использование различных средств визуализации - наблюдение термографии и др. Существенные данные о состоянии пластины можно получить визуальной проверкой с помощью микроскопа с большим увеличением - от 80х до 400х. При этом выявляются такие показатели, как состояние поверхности, избыточное или недостаточное травление, изменение толщины окисного слоя, правильность перехода и др.

Одним из наиболее опасных дефектов является пористость окисного слоя, легко обнаруживаемая при визуальной проверке схемы под микроскопом. Это - небольшие отверстия в окисном слое, вызванные либо пылью при нанесении фоторезиста, либо повреждением фотошаблона. Если этот дефект окажется в критической точке, то последующая диффузия примеси может вызвать короткое замыкание перехода и выход из строя всей микросхемы.

Одним из эффективных методов визуализации является использование сканирующего электронного микроскопа, позволяющего наблюдать топографический и электрический рельеф интегральной микросхемы. Это наблюдение обеспечивает неразрушающий характер контроля. Для наблюдения необходимо, чтобы поверхность микросхемы была открытой. Резкое изменение потенциала на поверхности вызывает изменение контраста изображения, формируемого вторичными электронами, и свидетельствует о разомкнутой электрической цепи или о перегретых участках. Этим методом можно легко обнаружить загрязнение перехода, частицы пыли, проколы в окисном слое и царапины на тонком слое металлизации. Нормальный градиент потенциала в резисторе можно наблюдать в виде равномерного изменения цвета от темного на одном конце резистора до светлого на другом его конце, при этом подложка имеет более высокое напряжение смещения, как это обычно бывает и ин-

тегральных микросхемах. Изображение резистора поэтому будет рельефным. Установив ряд таких изображений интегральных компонентов, соответствующих норме, можно судить на основании сравнения с этими эталонами об отклонениях и вызвавших их причинах. Увеличение энергии электронов в луче позволяет проникать в поверхностный слой для обнаружения таких дефектов, как трещины.

Для измерения термических профилей с выявлением перегретых участков разработан инфракрасный сканирующий микроскоп. Микроскоп включает ИК- детектор с высокой разрешающей способностью, объединенный с прецизионным сканирующим и записывающим устройствами. Чувствительным элементом является пластина антимонида индия, поддерживаемая при температуре жидкого азота. Такую аппаратуру используют для оценки качества конструкции данной микросхемы в отношении рассеяния тепла и мощности. Термосканирующий прибор имеет следующие достоинства: высокая разрешающая способность-порядка $1 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$, высокая чувствительность к изменению температуры - порядка 2°C , широкий температурный диапазон - от 30 до нескольких сотен градусов, высокая скорость срабатывания - единицы мкс, неразрушающее и бесконтактное измерение. В планарных структурах на поверхности схемы хорошо видны горячие участки, возникающие в результате наличия проколов в окисле и диффузионных каналов в полупроводнике. Отклонения от нормы обнаруживают путем сравнения с нормально функционирующими стандартами ИМС.

В последние годы широкое применение получили термографические системы, основанные на использовании термочувствительных красок. Пленки из термочувствительных красок, в том числе жидких кристаллов, нанесенные на поверхность интегральной микросхемы, поставленной под нагрузку, окрашиваются в различные цвета, что позволяет, наблюдая ИМС под микроскопом, фиксировать изменение температуры с точностью до 0.5°C .