Министерство образования Республики Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и

радиоэлектроники

кафедра РЭС

РЕФЕРАТ

на тему:

«Радиоволновые, радиационные методы контроля РЭСИ. Методы электронной микроскопии»

МИНСК, 2008

Радиоволновый метод

 Радиоволновые методы основаны на взаимодействии электромагнитного поля в диапазоне длин волн от 1 до 100 мм с объектом контроля, преобразовании параметров поля в параметры электрического сигнала и передаче на регистри­рующий прибор или средства обработки информации.

По первичному информативному параметру различают следующие СВЧ-методы: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый, геометрический, времен­ной, спектральный, поляризационный, голографический. Область применения СВЧ-методов радиоволнового вида неразрушающего контроля приведен в таблице 1 и в ГОСТ 23480-79.

Табл. 1 –

Радиоволновые методы неразрушающего контроля

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Название метода | Область применения | Факторы, огра­ничивающие область приме­нения | Контролируе­мые параметры | Чувствитель­ность | По­греш­ность |
| Ампли- тудный | Толщинометрия полуфабрикатов, изделий из радиопрозрачных материалов | Сложная кон­фигурация. Из­менение зазорамежду антеной преобразователя и поверхностью конт-роля. | Толщина до 100 мм | 1 – 3 мм | 5% |
| Дефектоскопия полуфабрикатов, изделий и конст­рукций из ди­электрика | Дефекты: тре­щины, рас­слоения, недопрес-совки | Трещины бо­лее 0,1 – 1 мм |  |
| Фазовый | Толщинометрия листовых мате­риалов и полу­фабрикатов, слоистых изделий и конструкций из диэлектрика. | Волнистость профиля или поверхности объекта контро­ля при шаге менее 10L. От­стройка от влияния ампли­туды сигнала | Толщина до 0,5 мм | 5 – 3 мм | 1% |
|  | Контроль «элек­трической» (фа­зовой) толщины |  | Толщина до 0,5 мм | 0,1 мм |  |
| Ампли-тудно -фазовый | Толщинометрия материалов, по­луфабрикатов, изделий и конст­рукций из ди­электриков, кон­троль изменения толщины. | Неоднознач­ность отсчета при изменении толщины более 0,5А,Е Измене­ние диэлектри­ческих свойств материала объек-тов контроля величиной бо­лее 2%. Толщи­на более 50 мм. | Толщина 0 –50 мм | 0,05 мм | ±0,1 мм |
| Ампли-тудно -фазовый | Дефектоскопия слоистых мате­риалов и изделий из диэлектрика и полупроводника толщиной до 50 мм | Изменение за­зора между ан­тенной преобра­зователя и по­верхностью объ­екта контроля. | Расслоения, включения, трещины, из­менения плот­ности, нерав­номер-ное рас­пре-деление составных компонентов | Включения порядка 0,05А,Е. Трещины с раскрывом порядка 0,05 мм.Разноплот-ность порядка 0,05 г/см3 |  |
| Геомет­рический | Толщинометря изделий и конст­рукций из ди­электриков: кон­троль абсолют­ных значений толщины, оста­точной толщины | Сложная кон­фигурация объ­ектов контроля; непараллель­ность поверхно­стей. Толщина более 500 мм | Толщина 0 -500 мм | 1,0 мм | 3-5% |
|  | Дефектоскопия полуфабрикатов и изделий: контроль раковин, расслоений, инородных включений в изделиях из диэлектриче­ских материалов | Сложная кон­фигурация объ­ектов контроля | Определение глубины зале­гания дефек­тов в пределах до 500 мм | 1,0 мм | 1 –3% |
| Времен- | Толщинометрия конструкций и сред, являющих­ся диэлектрика­ми | Наличие «мерт­вой» зоны. На-носекундная техника. При- | Толщина более 500 мм | 5—10 мм | 5% |
| ной | Дефектоскопия сред из диэлек­триков | менение генера­торов мощно­стью более 100 мВт | Определение глубины зале­гания дефек­тов в пределах до 500 мм | 5 — 10 мм | 5% |
| Спек­тральный | Дефектоскопия полуфабрикатов и изделий из ра­диопрозрачных материалов | Стабильность частоты генера­тора более 10-6 . Наличие источ­ника магнитно­го поля. Слож­ность создания чувствительного тракта в диапа­зоне перестрой­ки частоты бо­лее 10% | Изменения в структуре и физико-химических свойствах ма­териалов объ­ектов контро­ля, включения | Микродефек­ты и микронеоднород-ности значительно меньшие рабо­чей длины волны. | - |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Поляри­зацион­ный | Дефектоскопия полуфабрикатов, изделий и конст­рукций из ди­электрических материалов. | Сложная кон­фигурация. Толщина более 100 мм. | Дефекты структуры и технологии, вызывающие анизотропию свойств мате­риалов (анизо­тропия, меха­нические и термические напряжения, технологиче­ские наруше­ния упорядо­ченности структуры) | Дефекты пло­щадью более 0,5 – 1,0 см2. | *-* |
| Гологра-фичес-кий | Дефектоскопия полуфабрикатов, изделий и конст­рукций из ди­электрических и полупроводнико­вых материалов с созданием ви­димого (объемно­го) изображения | Стабильность частоты генера­тора более 10-6. Сложность соз­дания опорного пучка или поля с равномерны­ми амплитудно -фазовыми ха­рактеристика­ми. Сложность и высокая стоимость ап­паратуры. | Включения, расслоения, разнотолщин-ность. Изме­нения формы объектов. | Трещины с раскрывом 0,05 мм | *-* |

Примечание: *λ* – длина волны в контролируемом объект; *L* – размер раскрыва ан­тенны в направлении волнистости.

 Необходимым условием применения СВЧ-методов является соблюдение сле­дующих требований:

 - отношение наименьшего размера (кроме толщины) контролируемого объекта к наибольшему размеру раскрыва антенны преобразователя должно быть не ме­нее единицы;

 - наименьший размер минимально выявляемых дефектов должен не менее чем в три раза превышать величину шероховатости поверхности контролируе­мых объектов;

 - резонансные частоты спектра отраженного (рассеянного) излучения или напряженности магнитных полей материалов объекта и дефекта должны иметь различие, определяемое выбором конкретных типов регистрирующих устройств.

 Варианты схем расположения антенн преобразователя по отношению к объек­ту контроля приведены в таблице 1.

 Методы этого вида контроля позволяют определять толщину и обнару­жить внутренние и поверхностные дефекты в изделиях преимущественно из неметаллических материалов. Радиоволновая дефектоскопия дает возмож­ность с высокой точностью и производительностью измерять толщину диэ­лектрических покрытий на металлической подложке. В этом случае ампли­туда зондирующего сигнала представляет собой основной информационный параметр. Амплитуда проходящего через материал излучения уменьшается из-за многих причин, в том числе из-за наличия дефектов. Кроме этого, изменяются длина волны и ее фаза.

 Существуют три группы методов радиоволновой дефектоскопии: на прохож­дение, отражение и на рассеяние.

 Аппаратура радиоволнового метода обычно содержит генератор, работаю­щий в непрерывном или импульсном режиме, рупорные антенны, предназна­ченные для ввода энергии в изделие и прием прошедший или отраженной вол­ны, усилитель принятых сигналов и устройства для выработки командных сиг­налов, управляющих различного рода механизмами.

 При контроле фольгированных диэлектриков производят сканирование поверх­ности проверяемого образца направленным пучком микроволн с длиной волны 2 мм.

 В зависимости от информационно используемого параметра микроволн де­фектоскопы подразделяют на фазовые, амплитудно-фазовые, геометрические, поляризационные.

 Изменение относительно амплитуды волны отсчитывается на эталонном из­делии. Амплитудные дефектоскопы наиболее просты с точки зрения настройки и эксплуатации, но их применяют только для обнаружения достаточно больших дефектов, значительно влияющих на уровень принятого сигнала.

 Амплитудно-фазовые дефектоскопы позволяют обнаруживать дефекты, из­меняющие как амплитуду волны, так и ее фазу. Такие дефектоскопы способны давать достаточно полную информацию, например, о качестве заготовок фоль­гированных диэлектриков, предназначенных для изготовления отдельных слоев многослойных печатных плат.

 В поляризационных дефектоскопах фиксируют изменение плоскости поля­ризации волны при ее взаимодействии с различными неоднородностями. Эти дефектоскопы могут быть использованы для обнаружения скрытых дефектов в самих различных материалах, например, для исследования диэлектрической ани­зотропии и внутренних напряжений в диэлектрических материалах.

Радиационные методы

 Под радиационными методами неразрушающего контроля понимается вид не­разрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. В основе радиационных методов лежит получение дефектоскопичес­кой информации об объекте с помощью ионизирующего излучения, прохожде­ние которого через вещество сопровождается ионизацией атомов и молекул сре­ды. Результаты контроля определяются природой и свойствами используемого ионизирующего излучения, физико-химическими характеристиками контроли­руемых изделий, типом и свойствами детектора (регистратора), технологией кон­троля и квалификацией дефектоскопистов.

 Радиационные методы неразрушающего контроля предназначены для обна­ружения микроскопических нарушений сплошности материала контролируемых объектов, возникающих при их изготовлении (трещины, овалы, включения, ра­ковины и др.)

 Классификация радиационных МНК представлена на рис1.

Методы электронной микроскопии (ЭМ)

 Электронная микроскопия основывается на взаимодействии электронов с энер­гиями 0,5 - 50 кэВ с веществом, при этом они претерпевают упругие и неупру­гие столкновения.

 Рассмотрим основные способы использования электронов при контроле тон­копленочных структур (см. рис.2)

Таблица 1 –

Схемы расположения антенн преобразователей по отношению к объекту контроля.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Схема расположения антенн преобра­зователя | Возможный метод контроля | Примечание |
| 1 | 2 | 3 |
|  | Амплитудный, спек­тральный, поляриза­ционный | - |
|  | Фазовый, амплитуд­но-фазовый, вре­менной, спектраль­ный | - |
|  | Амплитудный, гео­метрический, спек­тральный, поляриза­ционный | - |
|  | Фазовый, амплитуд­но-фазовый, гео­метрический, вре­менной, спектраль­ный | - |
|  | Амплитудный, спек­тральный, поляриза­ционный. | - |
|  | Амплитудный, поля­ризационный, голо-графический. | В качестве прием­ной используется моноэлементная антенна. |
|  | Амплитудный, голо-графический. | В качестве прием­ной используется многоэлементная антенна. |
|  | Амплитудный, ам­плитудно-фазовый , временной, поляри­зационный | - |
|  | Амплитудный, фазо­вый, амплитудно-фазовый, спектраль­ный. | Функции пере­дающей (излу­чающей) и при-емнои антенн со­вмещены в одной антенне. |

|  |
| --- |
| 123Амплитудно-фазовый, спектраль­ный- качестве прие-мо-передающих антенн использу­ются две одинако­вые антенны.Амплитудно-фазовый, геометри­ческий, временной, поляризационный -Амплитудный, голо-графический.В качестве прием­ной используется многоэлементная антенна. |

 Обозначения: - антенна преобразователя;

 - нагрузка.



1 – СВЧ-генератор; 2 – объект контроля; 3 – СВЧ-приемник; 4 – линза для создания (квази) плоского фронта волны; 5 – линза для формирования радио-изображения; 6 – опорное (эталонное) плечо мостовых схем.

 Примечание: допускается применение комбинаций схем расположения антенн преобра­зователя по отношению к объекту контроля.

 Растровая электронная микроскопия (РЭМ). Сфокусированный пучок элект­ронов 1 (рис. 2) диаметром 2-10 нм с помощью отклоняющей системы 2 перемещается по поверхности образца, (либо диэлектрической пленки З1, либо полупроводника З-11.) Синхронно с этим пучком электронный пучок перемеща­ется по экрану электронно-лучевой трубки. Интенсивность электронного луча моделируется сигналом, поступающим с образца. Строчная и кадровая разверт­ка пучка электронов позволяют наблюдать на экране ЭЛТ определенную пло­щадь исследуемого образца. В качестве модулирующего сигнала можно исполь­зовать вторичные и отражательные электроны.

Рисунок 1 – Классификация радиационных методов

Рисунок 2 – Режимы работы растровой электронной микроскопии

а) контраст в прошедших электронах; б) контраст во вторичных и отраженных электронах; в) контраст в наведенном токе (З11 - ус­ловно вынесен за пределы прибора). 1 – сфокусированный луч; 2 – отклоняющая система; 3 – объект исследования - диэлектричес­кая пленка; 4 - детектор вторичных и отраженных электронов; 5 -усилитель; 6 - генератор развертки; 7 - ЭЛТ; 8 - сетка детектора; 9 -отраженные электроны; 10 - вторичные электроны.

 Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) основана на поглоще­нии, дифракции электронов взаимодействия с атомами вещества. При этом про­шедший через пленку сигнал снимается с сопротивления, включаемого после­довательно с образцом З1. Для получения изображения на экране используются мощные линзы, располагаемые за образцом. Стороны образца должны быть плос­копараллельными, чистыми. Толщина образца должна быть много меньше дли­ны свободного пробега электронов и должна составлять 10.. 100 нм.

 ПЭМ позволяет определить: формы и размеры дислокаций, толщину образцов и профиль пленок. В настоящее время существуют ПЭ микроскопы до 3 МэВ.

*Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ).*

 Изображение формируется как за счет вторичных электронов, так и за счет отраженных электронов (рис. 2). Вторичные электроны позволяют определить химический состав образца, а отраженные – морфологию его поверхности. При подаче отрицательного потенциала - 50 В происходит запирание малоэнергетичных вторичных электронов и изображение на экране становится контрастным, поскольку грани, расположенные под отрицательным углом к детектору, не про­сматриваются вообще. Если на сетку детектора подать положительный потенци­ал (+250 В), то вторичные электроны собираются с поверхности всего образца, что смягчает контрастность изображения. Метод позволяет получить информа­цию о:

 - топологии исследуемой поверхности;

 - геометрическом рельефе;

 - структуре исследуемой поверхности;

 - коэффициенте вторичной эмиссии;

 - об изменении проводимости;

 - о местоположении и высоте потенциальных барьеров;

 - о распределении потенциала по поверхности и в поверхности (за счет заряда по поверхности при облучении электронами) при попадании сканирующего луча на поверхность полупроводниковых приборов в ней наводятся токи и напряжения, которые изменяют траектории вторичных электронов. Элементы ИМС с положительным потенциалом по сравнению с участками, имеющими более низкий потенциал, выглядят темными. Это обуславливается наличием замедляющих по­ лей над участками образца с положительным потенциалом, которые приводят к уменьшению сигнала вторичных электронов. Потенциально-контрастные измерения дают только качественные результаты из-за того, что замедляющие поля зависят не только от геометрии и напряжения пятна, но и от распределения напряжения по всей поверхности образца;

 - большого разброса скоростей вторичных электронов;

 - потенциальный контраст накладывается на топографический и на кон­ траст, связанный с неоднородностью состава материала образца.

 *Режим наведенного (индуцированного электронно-лучевого тока).*

 Электронный луч с большой энергией фокусируется на маленькой площади микросхемы и проникает через несколько слоев ее структуры, в результате в полупроводнике генерируются электронно-дырочные пары. Схема включения образца представлена на (рис.2, в). При соответствующих внешних напряжениях, приложенных к ИМС, измеряются токи обусловленные вновь рожденны­ми носителями заряда. Этот метод позволяет:

- определить периметр р-n перехода. Форма периметра оказывает влияние на пробивные напряжения и токи утечки. Первичный электронный луч (2) (рис. 3 и 4) движется по поверхности образца (1) в направлениях х, и в зависимости от направления перемещения меняется значение индуцированного тока в р-n переходе. По фотографиям р-n перехода можно определить искажения периметра р-n перехода (рис.5).

- определить места локального пробоя р-n перехода. При образовании локального пробоя р-n перехода в месте пробоя образуется лавинное умножение носителей тока (рис.6) Если первичный пучок электронов (1) попадает в эту область (3), то генерированные первичными электронами электронно-дырочные пары также умножаются в р-n переходе, в результате чего в данной точке будет зафиксировано увеличение сигнала и соответственно появление светлого пятна на изображении. Изменяя обратное смещение на р-n переходе, можно выявить момент образования пробоя, а проведя выявление структурных дефектов например с помощью селективного травления или с ПЭМ, можно сопоставить область пробоя с тем или иным дефектом.

Рисунок 3 – Схема прохождения электронного луча

Рисунок 4 – Изображение торцевого р-п-перехода с целью

определения его периметра

1 – торцевой р-n переход; 2 – электронный луч;

 3 – область генерации электронно-дырочных пар.

Рисунок 4 – Изображение планарного р-п-перехода с целью

определения его периметра

1 - планарный р-n переход; 2 - электронный луч;

3 - область генерации электронно-дырочных пар.

Рисунок 5 – Искажения периметра планарного p-n-перехода сверху

- наблюдать дефекты. Если в области р-n перехода находится дефект (4) (рис. 6), то при попадании первичного пучка электронов в область дефекта некоторая часть генерированных пар рекомбинирует на дефекте, и соответственно до границы р-n перехода дойдет меньшее число носителей, что уменьшит ток во внешней цепи. На фотографии р-n перехода эта область будет выглядеть более темной, чем остальной фон. Изменяя соотношение между глубиной залегания р-n перехода и проникновением первичных электронов можно зондировать элек­трическую активность дефектов, располагающихся на разной глубине. Наблю­дение дефектов можно проводить при обратных и прямых смещениях р-n пере­хода.

 *Электронная оже-спектроскопия (ЭОС).*

 Она состоит в получении и анализе спектра электронов, испускаемых атома­ми поверхностей при воздействии на него электронным лучом. Такие спектры несут информацию:

 - о химическом (элементном) составе и состоянии атомов поверхностных слоев;

 - о кристаллической структуре вещества;

 - о распределении примесей по поверхности и диффузионных слоях; Установка для оже-спектроскопии состоит из электронной пушки, энергоанализатора оже-электронов регистрирующей аппаратуры и вакуумной системы.

Рисунок 6 – Изображение планарного p-n-перехода с целью определения про­боя и выявления дефекта.

1 – эелектронный луч; 2 – планарный р-п-переход; 3 – металлическая примесь; 4 – дефект.

 Электронная пушка обеспечивает фокусировку электрического пучка на об­разце и его сканирование. Диаметр пучка в установках с локальным оже-анализом составляет 0,07... 1 мкм. Энергия первичных электронов изменяется преде­лах 0,5... 30 кэВ. В установках оже-спектроскопии обычно в качестве энергоана­лизатора употребляется анализатор типа цилиндрического зеркала.

 Регистрирующее устройство с помощью двухкоординатного самописца фик­сирует зависимость , где: *N* – число электронов, попадающих на коллек­тор;

*Ек*– кинетическая энергия оже-электронов.

 Вакуумная система установки ЭОС должна обеспечивать давление не более 107 – 108Па. При худшем вакууме остаточные газы взаимодействуют с поверх­ностью образца и искажают анализ.

Из отечественных установок ЭОС следует отметить растровый оже-спекто-рометр 09 ИОС - 10 - 005 Оже-локальностью в растровом режиме 10 мкм.

На (рис. 7) показан оже-спектр загрязненной поверхности GaAs из кото­рого видно, что наряду с основными спектрами GaAs, в пленке присутствуют примесные атомы S, О и С. Регистрируя значения энергий оже-электронов, эмитируемыми атомами при их возбуждении и сравнивая эти значения с табу­лированными, определяют химическую природу атомов, из которых эти элект­роны были эмитированы.

Рисунок 7 – Оже-спектр загрязненной поверхности GaAs

 Примечание: метод получил свое название по имени французского физика Пьера Оже, который в 1925 г. открыл эффект испускания электронов атомами вещества в результате возбуждения их внут­реннего уровня рентгеновскими квантами. Эти электроны получили название оже-электронов.

 *Эмиссионная электронная микроскопия (ЭЭМ).*

 При специальных условиях поверхность образца может испускать электро­ны, т.е. являться катодом: при приложении сильного электрического поля к поверхности (автоэлектронная эмиссия) или под действием бомбардировки по­верхности частицами.

 В эмиссионном микроскопе показанном на рис. 8, поверхность образца является электродом системы, образующей с анодом электронную линзу.

 Применение ЭЭМ возможно для материалов, которые имеют малую работу выхода. Исследуемое изделие является как бы составной частью электронно-оптической системы ЭЭМ, и в этом его принципиальное отличие от РЭМ.

 ЭЭМ используют для визуализации микрополей. Если р-п-переход (1) (рис. 9) поместить в однородное электрическое поле (2) и подать на него запираю­щее напряжение, то поле, создаваемое р-п-переходом (3) (при больших токах утечки), будет искривлять линии основного поля.

 Искривление линий позволяет определить распределение потенциала по по­верхности образца.

 *Электронно-отражательная спектроскопия (ЭОС).*

 В ЭОС поверхность наблюдаемого образца поддерживается при таком потен­циале, что все или большая часть облучающих электронов не попадают на по­верхность образца.

 Принцип его работы показан на рис. 10. Коллимированный электронный луч направлен на поверхность образца перпендикулярно к ней. Электроны,

Рисунок 8 – Принцип работы эмиссионного микроскопа

Рисунок 9 – Визуализация p-n-перехода с помощью ЭЭМ

- p-n-переход, включенный в обратном направлении;- электронные

траектории поля р-п-перехода.

Пролетевшие через последнюю апертуру линз, быстро замедляются и поворачи­ваются обратно в точке, определяемой потенциалом поверхности образца отно­сительно катода и напряженностью электрического поля на поверхности образ­ца. После поворота электроны вновь ускоряются, пролетая обратно через лин­зы, и увеличенное изображение проецируется на катодолюминесцентный эк­ран. Дополнительное увеличение можно получить, отделяя выходящий пучок от входящего в слабом магнитном поле и используя дополнительные увеличитель­ные линзы на пути выходящего пучка.

 Контрастность в выходящем пучке определяется топологией поверхности и изменениями электрического потенциала и магнитных полей на ней.

Напряжение на образце

Рисунок 10 – Принцип работы электронного отражательного микроскопа

ЛИТЕРАТУРА

1. Глудкин О.П. Методы и устройства испытания РЭС и ЭВС. – М.: Высш. школа., 2001 – 335 с
2. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование/ под ред. А.И.Коробова М.: Радио и связь, 2002 – 272 с.
3. Млицкий В.Д., Беглария В.Х., Дубицкий Л.Г. Испытание аппаратуры и средства измерений на воздействие внешних факторов. М.: Машиностроение, 2003 – 567 с
4. Национальная система сертификации Республики Беларусь. Мн.: Госстандарт, 2007
5. Федоров В., Сергеев Н., Кондрашин А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств – Техносфера, 2005. – 504с.