

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Д. А. Котов, А. Г. Черных

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И АНАЛИЗА
В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь по образованию в области информатики и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования по специальностям «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы» и «Квантовые информационные системы»

Минск БГУИР 2010

УДК 621.3.049.77(076)
ББК 32.844.1я73
К73

Р е ц е н з е н т ы :

ректор Минского государственного высшего радиотехнического колледжа,
профессор Н. А. Цырельчук;

заведующий кафедрой интеллектуальных систем
Белорусского национального технического университета,
профессор, доктор технических наук В. М. Колешко

Котов, Д. А.

К73 Методы контроля и анализа в технологии изготовления интегральных микросхем : учеб.-метод. пособие / Д. А. Котов, А. Г. Черных. – Минск : БГУИР, 2010. – 48 с. : ил.
ISBN 978-985-488-499-8.

Систематизированы физические методы исследования структуры, фазового состава, электрофизических свойств материалов и многослойных тонкопленочных структур, используемых в микроэлектронике для создания интегральных микросхем (ИМС), а также для тестового контроля микросхем. Изложены результаты по применению методов контроля и анализа на различных этапах разработки изделий электронной техники, показано их место в технологической цепочке создания ИМС.

**УДК 621.3.049.77(076)
ББК 32.844.1я73**

ISBN 978-985-488-499-8

© Котов Д. А., Черных А. Г., 2010
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	5
1.1 Электрофизические методы контроля	5
1.1.1 Зондовые методы измерений	5
1.1.2 Тестовый контроль	12
1.2 Оптические методы контроля.....	20
1.2.1 Оптическая микроскопия.....	20
1.2.2 Метод оптической эллипсометрии.....	22
2. МЕТОДЫ ЭЛЕМЕНТНОГО И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КРИСТАЛЛОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.....	25
2.1 Просвечивающая электронная микроскопия.....	25
2.2 Растровая электронная микроскопия	40
2.3 Оже-электронная спектроскопия.....	43
2.4 Вторичная ионная масс-спектрометрия	45
ЛИТЕРАТУРА.....	47

ВВЕДЕНИЕ

Составной частью процессов разработки и изготовления интегральных микросхем (ИМС) являются электрофизические и оптические методы контроля, направленные на оценку качества и правильности выполнения различных технологических этапов формирования ИМС. Например, измерение удельного сопротивления на тестовых подложках используется для проверки и настройки оборудования для ионной имплантации, а также для контроля процессов осаждения тонких пленок. Толщина окисла контролируется путем проведения измерений МОП-структур и методом эллипсометрии. Измерение вольт-фарадных характеристик обычно используется в пленках окислов для контроля содержания подвижных ионов, которые могут попадать в структуру в процессе обработки пластин.

Визуальный контроль формируемых структур ИМС (контроль внешнего вида) на основных этапах процессов фотолитографии и травления также является составной частью процесса изготовления ИМС. Такой вид контроля позволяет определить источники, снижающие выход годных изделий: осадки, образующиеся из-за плохой очистки используемых растворов; твердые частицы, возникающие в оборудовании; случайные изменения в осажденных слоях и топологических рисунках.

Помимо таких методов межоперационного контроля ряд измерений выполняется на тестовых модулях, которые расположены в нескольких местах пластины, содержащей рабочие кристаллы ИМС. Тестовые модули проектируются для измерения электрических характеристик различных структур и привязываются к конкретной технологии, в частности, для измерения параметров МОП-структур, барьерной емкости и площади *p-n*-переходов, поверхностных сопротивлений и характеристик сформированных транзисторов. Характеристики как паразитных, так и активных транзисторов обычно контролируются с помощью автоматизированной системы сбора и обработки данных. Информация, получаемая при контроле полупроводниковых приборов, используется также для создания системы параметров, образующих модель элементов ИМС. Впоследствии с помощью этой модели при использовании САПР прогнозируют характеристики ИМС, формируемых по конкретной технологии. Результаты таких измерений можно представить в виде карты или гистограммы их распределения по поверхности пластины.

Для проведения анализа элементов ИМС на различных стадиях их формирования можно выделить три направления: исследование морфологии, изучение кристаллографической структуры и элементный анализ. В настоящее время существует большое количество методов анализа полупроводниковой структуры ИМС. В пособии рассмотрены основные методы, применяемые при разработке и производстве ИМС. В первом разделе пособия рассмотрены методы контроля технологического процесса изготовления ИМС; во втором – методы элементного и структурно-морфологического анализа полупроводниковой структуры элементов ИМС.

1 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1 Электрофизические методы контроля

1.1.1 Зондовые методы измерений

Кремниевые пластины в процессе изготовления ИМС характеризуются большим числом электрофизических параметров, таких, как тип проводимости пластин, удельное сопротивление, поверхностное сопротивление (R_s), пробивное напряжение p - n -перехода, вольт-амперные характеристики, профиль легирования примеси по глубине и др. Особенностью этих параметров является то, что большинство из них может быть измерено с применением зондовых методов контроля.

Наиболее широкое применение при разработке и серийном изготовлении ИМС нашли следующие зондовые методы: четырехзондовый; трехзондовый, основанный на измерении пробоя точечного контакта металл – полупроводник; метод, основанный на измерении сопротивления растекания точечного контакта. Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных методов зондовых измерений.

Четырехзондовый метод. Данный метод вследствие своих высоких метрологических показателей и простоты измерительной аппаратуры является самым распространенным зондовым методом контроля. К достоинствам этого метода следует отнести его универсальность, обеспечивающую возможность измерения удельного сопротивления полупроводников не только в виде объемных материалов, но и в различных слоистых структурах, в частности ионно-легированных и эпитаксиальных слоев.

Принцип измерения четырехзондовым методом удельного сопротивления объемного монокристалла заключается в следующем. На поверхности измеряемого образца размещают четыре зонда, расположенных вдоль одной линии на равном расстоянии S друг от друга (рисунок 1). Через крайние зонды пропускают электрический ток I , а между двумя внутренними зондами измеряют разность потенциалов U .

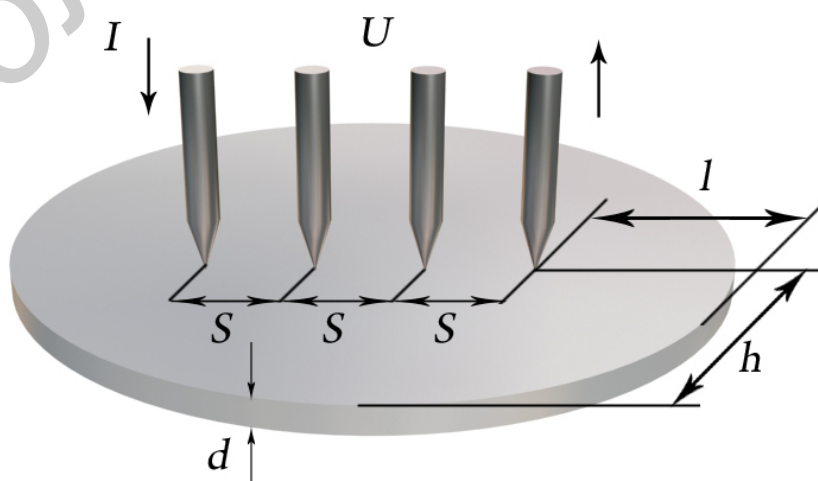


Рисунок 1 – Измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом

Для полубесконечного образца, когда $d, l, h \gg S$, удельное сопротивление определяется из выражения

$$\rho = 2\pi SU/I. \quad (1)$$

На практике приходится в основном измерять образцы ограниченных размеров, когда толщина d и расстояния l, h соизмеримы с межзондовым расстоянием S . В этом случае необходимо учитывать влияние границы образца на измеряемое значение удельного сопротивления. Это достигается введением поправочного множителя F в выражение (1), т. е. значение удельного сопротивления будет равно

$$\rho = 2\pi SUF/I. \quad (2)$$

Значение функции F зависит от выбора граничных условий, при которых проводятся измерения. Как правило, поправочная функция F для некоторых граничных условий, наиболее часто встречающихся на практике, учитывается автоматически измерительной аппаратурой.

В четырехзондовом методе расположение зондов может быть не только линейным, но и по вершинам квадрата (рисунок 2). В этом случае ток пропускают через зонды, образующие одну из сторон квадрата, например 1 и 2, а напряжение измеряют на другой паре зондов 3 и 4. Удельное сопротивление в этом случае определяется из соотношения

$$\rho = 2\pi SUF[I(2 - 2^{1/2})]^{-1}. \quad (3)$$

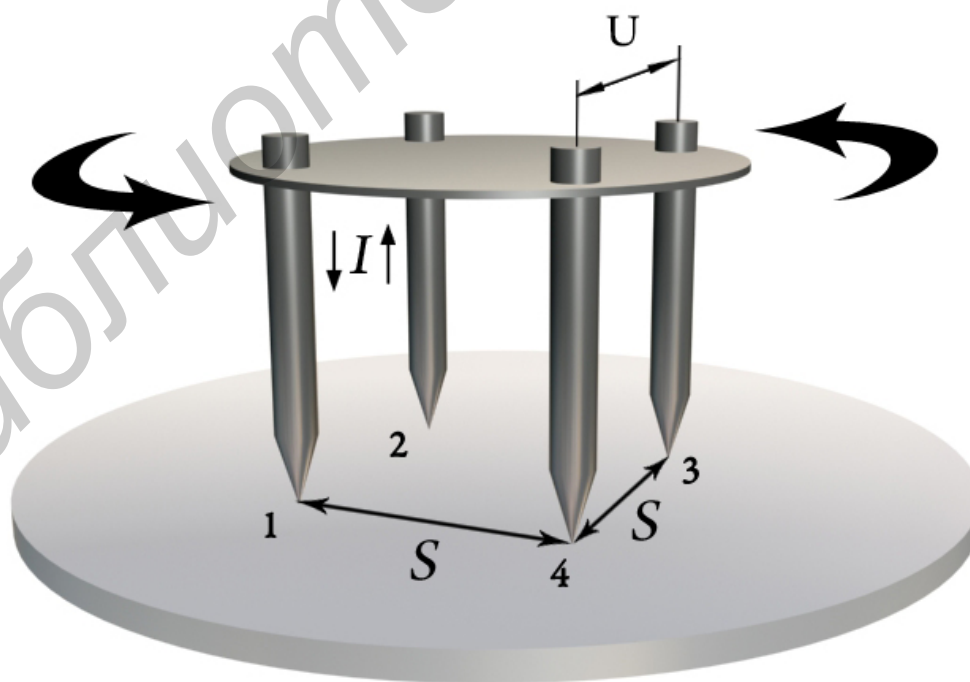


Рисунок 2 – Измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом при расположении зондов по вершинам квадрата

Такая конструкция зондовой головки удобна тем, что обеспечивает дополнительную возможность повышения точности измерений за счет их кратности. Коммутируя направление тока последовательно через каждую пару контактов по контуру квадрата, измеряя четыре значения напряжения и усредняя полученные значения удельного сопротивления, можно снизить уровень случайных ошибок в два раза. Метод применяется для измерения удельного сопротивления в широком диапазоне от 10^{-4} до $5 \cdot 10^3$ Ом·см. Основная погрешность для четырехзондового метода определяется ошибками измерений напряжения, которые могут появиться из-за утечек и падения напряжения на контактных сопротивлениях.

Следует отметить, что контактные сопротивления являются одной из основных причин, ограничивающих применение четырехзондового метода. Для широкозонных полупроводников типа $A_{III}B_V$ ($A^{III}B^V$) и $A_{II}B_{VI}$ ($A^{II}B^{VI}$) механический контакт с металлическим зондом имеет такое большое переходное сопротивление, что зондовые методы измерения параметров таких материалов практически не реализуются.

Выражение (2) получено в предположении, что контакт зонда с поверхностью образца точечный. Это условие соблюдается, если радиус контактирующей площадки много меньше межзондового расстояния. Для этого необходимо обеспечить определенный режим работы зондовой головки, который исключал бы случайную поломку и быстрое изнашивание острия зондов. Рекомендуется, чтобы нагрузка на каждый зонд осуществлялась независимо и не превышала определенной величины, а сами зонды изготавливались из твердых сплавов, например карбида вольфрама.

Источниками случайной погрешности могут служить фотопроводимость и фотоЭДС на контактных сопротивлениях, особенно сильно проявляющиеся на высокоомных образцах. Поэтому измерения следует проводить в затемненной камере. Чтобы исключить эффект нагрева образца при прохождении тока через зонды и влияние термоЭДС, рабочий ток выбирается минимально возможным, обеспечивающим заданную точность измерения. Отсчет потенциала на зондах производят при двух полярностях тока, а полученные значения усредняются.

На точность измерений существенное влияние может оказывать инжекция неосновных носителей при пропускании тока через зонды. В полупроводниках с большим временем жизни неосновных носителей это приводит к модуляции проводимости на больших расстояниях от зондов и уменьшению измеряемого значения удельного сопротивления. Для ограничения инжекции рекомендуется проводить измерения при минимальных токах через зонды. Выполнение всех мер по ограничению источников ошибок обеспечивает случайную погрешность измерений ± 4 %.

При определенных условиях четырехзондовый метод может быть применен и для контроля слоистых полупроводниковых структур, например, ионно-легированного слоя в приповерхностной области полупроводниковой пластины

или эпитаксиальной пленки на подложке с отличающейся величиной или типом проводимости. Измерение удельного сопротивления эпитаксиального слоя толщиной d_1 и электропроводностью σ_1 на ионно-легированном слое толщиной d_2 и электропроводностью σ_2 четырехзондовым методом показано на рисунке 3. При изготовлении ИМС обычно имеют дело с достаточно тонкими слоями, так что легко реализуется условие $d_1, d_2 < S$. В этом случае оба слоя по отношению к зондам оказываются включенными параллельно, и для расположения зондов в линию выполняется равенство

$$\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2 = (U/I) \ln(2/\pi). \quad (4)$$

Если концентрация легирующей примеси в верхнем слое настолько велика, что $\sigma_2 d_2 \ll \sigma_1 d_1$, то нижний слой пластины не будет оказывать влияния на протекание тока в структуре, и удельное сопротивление верхнего слоя может быть определено на основании выражения

$$\rho_1 = (U/I)(\pi/\ln 2)d_1 \approx 4,53(U/I)d_1 = 4,53R_s d_1, \quad (5)$$

где R_s – поверхностное сопротивление.

Если слои имеют разный тип проводимости и образующийся на границе между ними p - n -переход будет изолировать их друг от друга, то ток будет протекать только через верхний слой, и в этом случае получается тонкая пластина полупроводника с изолирующей границей. Удельное сопротивление верхнего слоя будет также определяться из выражения (5).

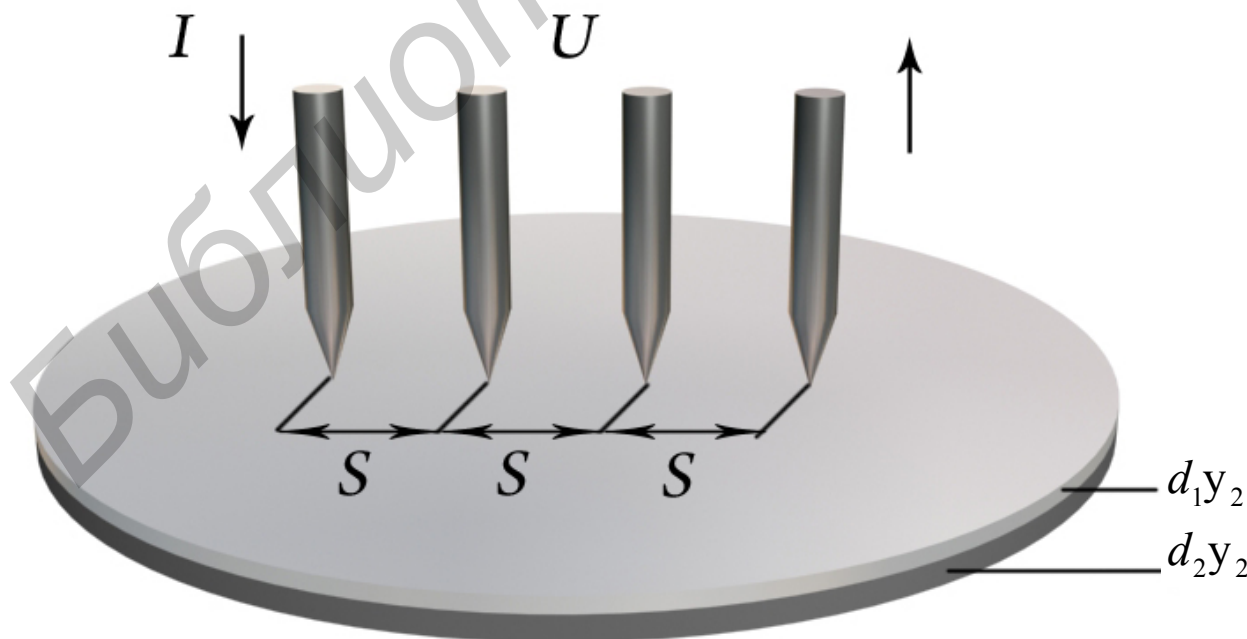


Рисунок 3 – Измерение удельного сопротивления эпитаксиального слоя четырехзондовым методом

При измерении слоистых структур ограниченных размеров необходимо учитывать поправочный множитель и принимать во внимание все описанные выше источники погрешностей, свойственные четырехзондовому методу. Особенно это касается эпитаксиальных слоев, так как они более высокоомные, чем, например, ионно-легированные слои, и поэтому влияние фотопроводимости, инъекции неосновных носителей и температурные эффекты будут проявляться наиболее сильно.

Критическое значение рабочего тока зависит также от совершенства структуры границы раздела эпитаксиальная пленка – подложка. Всякого рода структурные дефекты, пересекающие p - n -переход, служат потенциальными источниками возникновения каналов утечки. Это обстоятельство не дает возможности установить универсальные критерии на величину допустимого рабочего тока. Поэтому, чтобы избежать ошибок в измерениях из-за утечки через изолирующий переход, практически удобно пользоваться экспериментально определенными зависимостями критических значений рабочего тока от величины удельного сопротивления эпитаксиального слоя для фиксированных значений толщин слоя и удельного сопротивления подложки данного типа эпитаксиальных структур.

Трехзондовый метод. Особые трудности при контроле качества эпитаксиальных структур вызывает измерение удельного сопротивления эпитаксиальных пленок, выращенных на сильнолегированной подложке, поскольку четырехзондовый метод для этих целей непригоден. Определенными преимуществами для контроля структур n - n^+ - и p - p^+ -типа обладает трехзондовый метод, основанный на измерении пробивного напряжения точечного контакта металл – полупроводник, которое зависит от удельного сопротивления полупроводника.

На поверхность образца устанавливаются три зонда, материал которых выбирается таким образом, чтобы зонды 1 и 2 образовывали с полупроводником омический контакт, а зонд 3 создавал контактный барьер, напряжение пробоя которого подлежит измерению (рисунок 4).

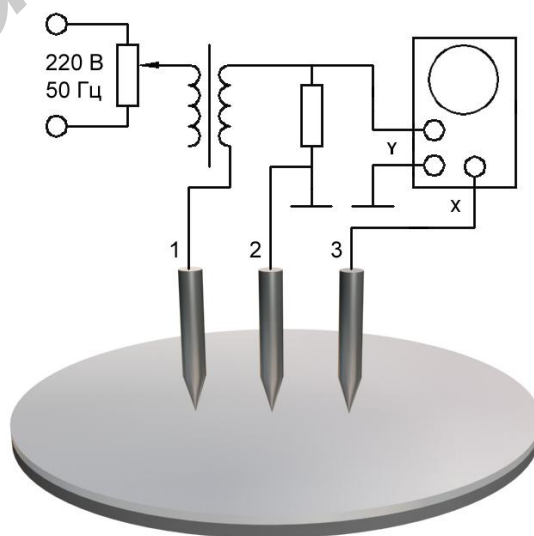


Рисунок 4 – Измерение удельного сопротивления эпитаксиального слоя трехзондовым методом

К зондам 1 – 3 прикладывают пульсирующее напряжение с полярностью, соответствующей смещению контактного барьера 3 в обратном направлении. Так как контакт 1 не строго омический, на нем может наблюдаться большее падение напряжения за счет протекания тока. В результате точность отсчета пробивного напряжения резко снижается. Чтобы исключить эту погрешность, измерение напряжения на контактном барьере 3 осуществляется с помощью зонда 2 с использованием вольтметра с большим входным сопротивлением. Ток в цепи контактов 2, 3 мал, и падение напряжения на контакте 2 незначительно. Вольт-амперную характеристику барьера 3 наблюдают на осциллографе, и по точке ее изгиба при переходе к участку отрицательного сопротивления определяют напряжение пробоя. Трехзондовый метод является эмпирическим и требует градуировки по калибровочным образцам. Для калибровки выбирают образцы с известным удельным сопротивлением, измеренным независимым методом, например четырехзондовым. По результатам измерения таких образцов трехзондовым методом строится калибровочная кривая.

Рабочий диапазон измеряемых значений удельного сопротивления лежит в интервале 0,1–4 Ом·см. За пределами этого диапазона вид вольт-амперной характеристики точечного контакта ухудшается и воспроизводимость измеряемых значений пробивных напряжений резко падает, особенно при увеличении верхнего предела. Вольт-амперная характеристика точечного контакта должна позволять точно фиксировать момент пробоя, что в первую очередь определяет точность отсчета пробивного напряжения. Достигается это соответствующим выбором материала зондов, формой контактирующей площадки и нагрузкой на нее. Трехзондовый метод не требует знания толщины эпитаксиального слоя, как, например, четырехзондовый метод. В этом состоит одно из его основных преимуществ.

Метод сопротивления растекания. Данный метод получил широкое применение в силу таких достоинств, как большой диапазон измеряемых удельных сопротивлений, высокая локальность, возможность применения для контроля эпитаксиальных структур разных типов (включая $p-n$, $n-n^+$, $p-p^+$), а также многослойных. Сущность метода заключается в следующем. Если металлический зонд имеет с поверхностью полупроводника омический контакт с известным радиусом r контактирующей площадки, его сопротивление растекания R однозначно связано с удельным сопротивлением полупроводника ρ . Для полубесконечного образца $R = \rho(4r)^{-1}$. Измеряя падение напряжения на таком контакте при пропускании через него тока, можно определять удельное сопротивление образца:

$$\rho = 4rU/I. \quad (6)$$

Обычно измерения проводят с помощью трех зондов (рисунок 5). Через два зонда 2 и 3 пропускают ток, а напряжение измеряют между парой зондов 1 и 2 вольтметром с большим входным сопротивлением. При такой схеме измерения определяется падение напряжения на сопротивлении растекания центрального зонда, а падение напряжения на другом токовом зонде исключается.

При измерении эпитаксиальных слоев необходимо учитывать влияние подложки на характер растекания тока. Для этого в выражение (6) вводится поправочный множитель F , тогда истинное значение $\rho = 4rFU/I$.

Метод используется для измерения удельного сопротивления в широком диапазоне при очень высокой локальности измерений. Объем области, в которой определяется удельное сопротивление, может составлять 10^{-10} см^{-3} .

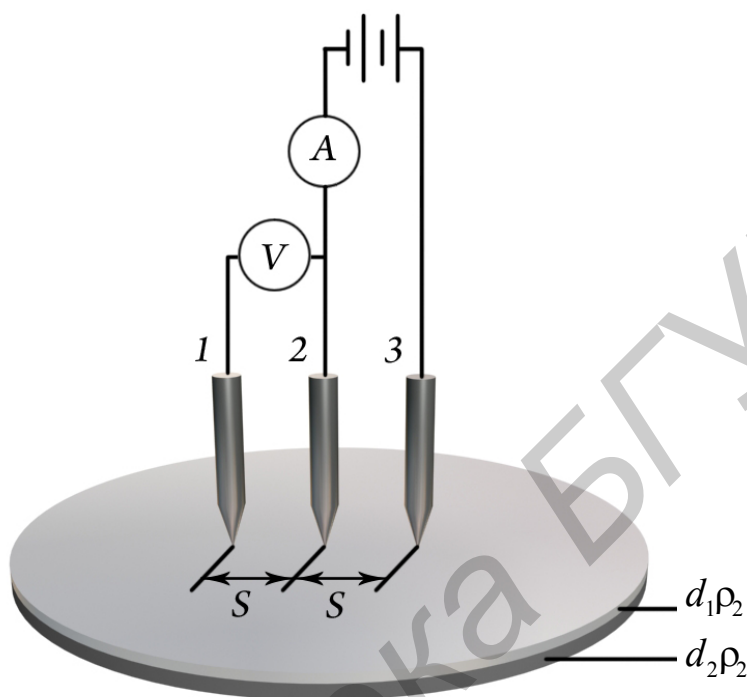


Рисунок 5 – Измерение удельного сопротивления эпитаксиального слоя методом сопротивления растекания

Наибольшая составляющая погрешности метода связана с невоспроизводимостью геометрических размеров контакта, что в сильной степени зависит от качества обработки поверхности зонда и полупроводника, нагрузки на зонд и механической системы зондового манипулятора. Еще одним источником ошибок является то, что контакт не омический, из чего следует наличие дополнительного контактного сопротивления, обусловленного окисным слоем на поверхности полупроводника. Погрешность можно уменьшить, выбрав специальный материал для зонда и нагрузку на него. Как правило, зонд изготавливается из твердого сплава типа карбида вольфрама или осмия. При определенном давлении острие зонда прокалывает окисный слой и создается контакт с образцом. Если контакт не омический, измерения проводят при малых значениях тока, равных $10^{-4} - 10^{-7} \text{ А}$. Как показывает опыт, при таких слабых токах сопротивление точечного контакта не зависит от его величины и направления. Уменьшение тока способствует также устранению нежелательных тепловых эффектов, вызванных разогревом приконтактной области.

Данный метод нашел широкое применение для определения профилей распределения удельного сопротивления в сложных многослойных структурах в случае, когда остальные методы неприемлемы.

1.1.2 Тестовый контроль

Задачи тестового контроля. Применение тестового контроля в производстве интегральных схем обусловлено возможностью реализации автоматизированных неразрушающих измерений, достижения практически любой локальности и высокой оперативности измерений. Наиболее эффективно метод тестового контроля может быть использован при решении следующих задач:

- анализ брака продукции кристалльного производства ИМС;
- аттестация технологических процессов и оборудования формирования физической структуры интегральных схем;
- снабжение исходными данными разработчика ИМС (параметры структуры, проектные нормы, дефектность структуры и технологических процессов);
- разработка технологии и технологического оборудования (стабильность, воспроизводимость, однородность технологических процессов и оборудования, закономерности работы установок).

Контроль на основе тестовых структур может использоваться на всех этапах создания ИМС (проектирование элементной базы и технологических маршрутов, отработка технологических операций и оценка параметров ИМС, организация межоперационного контроля и установление корреляционных взаимосвязей, анализ устойчивости технологического процесса и исследование механизмов отказов и т. п.).

Первый этап связан непосредственно с проектированием технологического маршрута изготовления ИМС, на котором прежде всего необходимо задать уровень технологии, используемой для формирования структуры ИМС. Для его определения применяются такие тестовые структуры, которые позволяют измерять параметры технологических слоев ИМС, оценивать стабильность и настроенность технологического оборудования и проводить анализ надежности изготавливаемых приборов. Здесь необходим набор статистических данных о воспроизводимости параметров тестовых структур, распределении дефектности элементов ИМС для оценки влияния технологических факторов на работоспособность разрабатываемой ИМС.

По мере накопления статистической информации и увеличения степени отработанности технологических операций определяется объем контроля, его периодичность, а также устанавливаются оптимальные значения параметров тестовых структур, при которых достигается максимальный процент выхода годных. Для формирования выборки большого объема целесообразно вначале использовать пластины, содержащие только тестовые структуры, а затем пластины с кристаллами ИМС и тестовых структур в одном фотолитографическом модуле. При таком подходе обеспечивается объем информации, позволяющий оптимизировать номенклатуру и исключать малоинформативные тестовые структуры.

Проектирование технологического процесса заканчивается выбором таких параметров тестовых структур, поддержание которых в определенных пределах обеспечивает стабильное воспроизведение технологического процесса.

На этапах статистического контроля и анализа технологического процесса проводится обработка межоперационного статистического причинного анализа взаимосвязей исследуемых параметров тестовых структур и ИМС в условиях низкого, среднего и высокого процентов выхода годных. Параметры тестовых структур должны характеризовать уровень настройки и точность выполнения отдельных технологических операций, распределение дефектности по пластине и отражать их статистическую взаимосвязь с параметрами ИМС. На этих этапах решаются также задачи определения технологических ограничений и норм параметров для контроля точности выполнения технологических операций, направленных на поддержание высокого процента выхода годных и высокой надежности изготавливаемых по данной технологии ИМС.

В условиях автоматизированного статистического контроля и анализа технологического процесса в реальном масштабе времени наиболее приемлемым вариантом является равномерное впечатывание тестового модуля (кристалла), содержащего сотни и тысячи различных тестовых структур, в рабочую пластину. В этом случае сохраняется корреляция между параметрами тестовых структур и ИМС; появляется возможность оценивать однородность распределения параметров тестовых структур в пределах пластины и партий. Измерение производится одновременно с проверкой функционирования ИМС на одной многозондовой установке. При изготовлении рабочих и тестовых кристаллов на одних и тех же пластинах из-за группового характера формирования их свойств возникают предпосылки для эффективной диагностики состояния отдельных элементов и блоков ИМС и качества связей между ними.

Для изучения технологических маршрутов и отдельных операций предложены два типа тестовых структур. Первый предназначен для оценки стабильности, настроенности и анализа брака, второй – для аттестации технологических процессов, исследования технологического оборудования, моделирования выхода годных и анализа дефектов. На этапе изготовления ИМС с помощью тестовых структур можно получить информацию, необходимую для выявления и своевременного устранения причин возникновения технологических сбоев. По результатам контроля параметров тестовых структур можно судить не только о качестве изготовленных ИМС, но и об оптимальности режимов работы оборудования, стабильности технологических операций, характере производственной среды (плотности взвешенных частиц, степени остаточной химической загрязненности технологических сред и др.).

Тестовые структуры (ТС) должны обеспечивать анализ всех отказов, встречающихся в ИМС. При этом каждый вид отказа исследуется с помощью специальной ТС, которая выявляет только определенный механизм отказа. С точки зрения контролируемых параметров ТС можно разделить на пять групп.

Первая группа – ТС для контроля удельного поверхностного сопротивления (R_S). Это необходимо для оценки пространственной однородности легированных, а также проводящих и эпитаксиальных слоев. Относительная простота определения R_S делает его полезным при оценке характеристик технологических операций и технологического процесса. Наиболее распространенной ТС является классический резистор Ван дер Пау, позволяющий контролировать R_S областей, размеры которых ограничены только разрешающей способностью процесса литографии. На базе этой ТС создан ряд модификаций (греческий крест, квадратный крест, скомпенсированный квадратный крест и др.). Разнообразие ТС этого типа объясняется стремлением получить более точную оценку R_S по эмпирической формуле Ван дер Пау, учитывающей геометрию ТС.

Вторая группа – ТС для контроля ширины линии. В результате многократного повторения процесса литографии фактические размеры топологических элементов могут отличаться от проектных. Поэтому необходимо контролировать такой параметр, как ширина сформированных линий (W). Он используется и для оценки характеристик литографического оборудования, точности соблюдения режимов технологических операций процесса литографии.

Третья группа – ТС для проверки качества совмещения рисунков при формировании двух последовательных топологических слоев или двух последовательно используемых фотошаблонов в комплекте. Эта группа ТС используется для оценки характеристик технологических операций, например проекционных систем совмещения и установок пошаговой мультипликации. Оценка качества совмещения топологических слоев, получаемая с помощью ТС для количественной оценки качества совмещения рисунков по осям X и Y одновременно, не зависит от величины подтравы, боковой диффузии или изменения геометрических размеров фотошаблонов.

Четвертая и пятая группы – ТС для оценки таких дефектов, как короткое замыкание металлизированных линий, отсутствие контакта металл-полупроводник и т. п. Подобные ТС обеспечивают необходимую информацию для выбора оптимального набора проектных норм, оценки выхода годных приборов.

Измерение поверхностных сопротивлений производится двумя методами: мостовым и методом Ван дер Пау. Мостовой метод основан на измерении сопротивления резистора без учета контактного сопротивления (для чего используются потенциальные отводы). В этом случае поверхностное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_S = \left(\frac{U}{I}\right) \cdot \left(\frac{W}{L}\right), \quad (7)$$

где R_S – поверхностное сопротивление, Ом·м;
 U – падение напряжения на потенциальных отводах, В;

I – протекающий по телу резистора ток, А;
 W – ширина резистора, м;
 L – длина резистора, м.

Метод Ван дер Пау реализуется на тестовой структуре, показанной на рисунке 6.

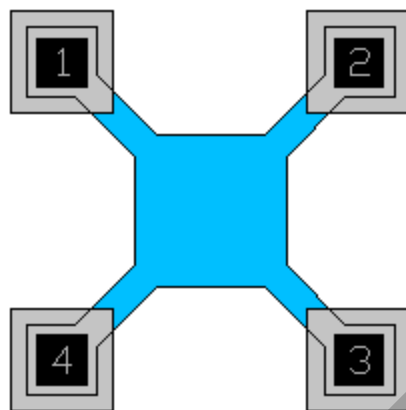


Рисунок 6 – Тестовая структура измерения R_s по методу Ван дер Пау

Поверхностное сопротивление определяется тогда по формуле

$$R_s = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \cdot \left(\frac{U}{I} \right), \quad (8)$$

где U – падение напряжения на потенциальных отводах 3, 4, В;
 I – протекающий через токовые отводы 1, 2 ток, А.

Измерение ширины проводящих областей и зазоров между ними. Для измерения этих параметров используется ТС, представляющая собой комбинацию двух методов: Ван дер Пау и мостового (рисунок 7). Для измерения ширины линии сначала методом Ван дер Пау измеряется поверхностное сопротивление проводящего слоя R_s , затем – сопротивление резистора в мостовой части R (исключая при этом влияние переходных контактных сопротивлений), после чего вычисляется ширина линии проводящего слоя в области мостовой части по формуле

$$W = \frac{R_s \cdot l}{R}, \quad (9)$$

где W – ширина мостовой части структуры, м;
 R_s – поверхностное сопротивление, Ом·м;
 l – длина резистора в области мостовой части структуры, м;
 R – сопротивление резистора в мостовой части, Ом.

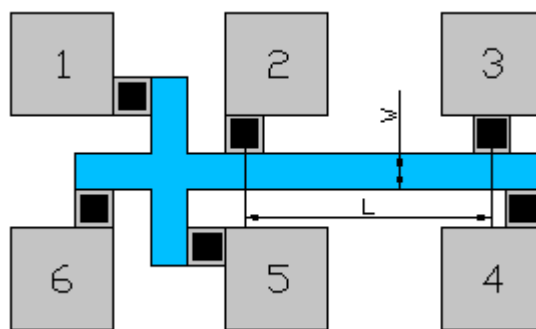


Рисунок 7 – Тестовая структура измерения ширины проводящих областей и зазоров между ними

Измерение рассовмещения топологических слоев. Для оценки качества литографии при проведении операций совмещения используется ряд ТС. Оценка качества совмещения проводящего слоя с контактными окнами проводится с помощью ТС, показанной на рисунке 8.

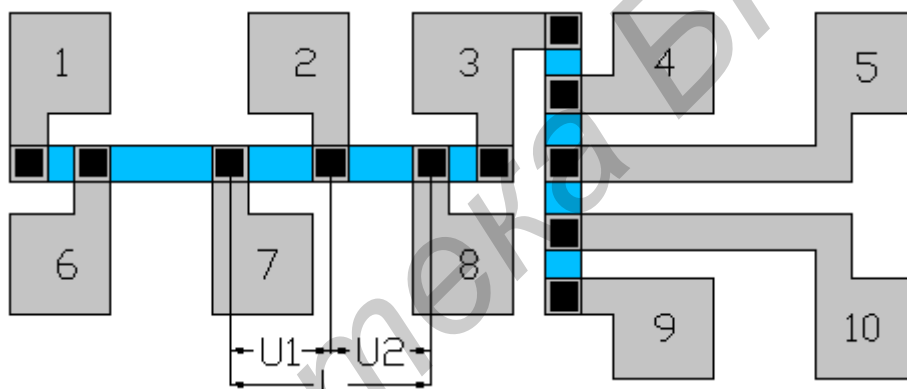


Рисунок 8 – Тестовая структура измерения рассовмещения проводящего слоя с контактными окнами

ТС состоит из двух расположенных во взаимно перпендикулярном направлении мостовых резисторов. В центре каждого из них на равном расстоянии от потенциальных выводов топологически закладывается контактное окно, от которого имеется вывод на отдельную контактную площадку. При проведении операции совмещения на установке литографии за счет рассовмещения контактное окно сдвигается из центрального положения, что приводит к различию в величинах падения напряжения в областях между контактными окнами и правым, левым (верхним, нижним) потенциальными отводами при пропускании электрического тока через мост. Рассовмещение вдоль направления течения электрического тока рассчитывается по формуле

$$r = \frac{l(U_1 - U_2)}{2(U_1 + U_2)}, \quad (10)$$

где l – длина мостовой части между потенциальными отводами, мм;
 U_1 – падение напряжения между одним из потенциальных отводов и центральным контактным окном, В;
 U_2 – падение напряжения между другим потенциальным отводом и контактным окном, В.

Широкое распространение при построении векторных полей рассовмещения получил метод, позволяющий разделить ошибки литографического оборудования. Здесь для оценки рассовмещения предлагается использовать ТС, напоминающую нанесенную шкалу, выполненную на основе проводящего слоя (рисунок 9).

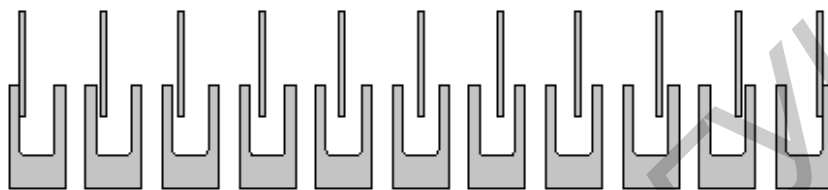


Рисунок 9 – Тестовая структура измерения рассовмещения проводящих слоев

Указанная структура позволяет одновременно производить оценки с помощью электрических измерений и визуальным способом, что дает возможность не включать специальные фигуры визуального контроля.

Измерение контактного сопротивления. Известны два основных способа измерения переходного контактного сопротивления. В первом способе (метод Кельвина) измерение R_k производится при задании тока в контакте и снятии величины падения напряжения непосредственно на контакте (рисунок 10). Ток задается в площадки 1, 3, падение напряжения снимается с контактов 2, 4. Контактное сопротивление вычисляется по формуле

$$R_k = \frac{U_{2,4}}{I_{1,3}}. \quad (11)$$

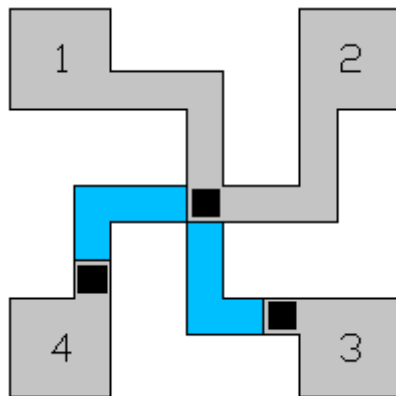


Рисунок 10 – Тестовая структура измерения переходного контактного сопротивления

Данный метод соответствует одномерной модели контакта, используемого в элементах схемы. Для реализации другого метода измерения контактного сопротивления используется тестовая структура, представляющая собой прямолинейный проводник, к которому формируются несколько контактных окон, находящихся друг от друга на расстояниях, которые удовлетворяют соотношению $1 : 2 : 3 : \dots : n$, где n – количество сформированных контактов. R_k вычисляется с использованием исходного уравнения по формуле

$$R = 2R_k + \frac{R_s \cdot L}{W}, \quad (12)$$

где R – сопротивление резистора, Ом;
 R_k – контактное сопротивление, Ом;
 R_s – поверхностное сопротивление, Ом·м;
 L – длина резистора, м;
 W – ширина структуры, м.

Измеряемые величины $R(L)$ содержат постоянное слагаемое $2R_k$, откуда легко можно вычислить R_k , используя метод наименьших квадратов. При этом также вычисляется R_s слоя, на основе которого сформирован проводник. Точность измерения R_k зависит от конструкции и модификации применяемой тестовой структуры. Экспериментально показано, что четырехзондовый метод Кельвина может быть использован при условиях, когда поверхностное сопротивление нижней области, к которой производится контакт, меньше или равно сопротивлению контакта, а также когда расстояние от края контакта до края области под контактом стремится к нулю. Рассмотрено несколько модификаций тестовых структур, показано, что оптимальной является структура с переменной длиной области проводника.

Контроль случайной дефектности проводится с помощью либо тестовых структур, объединяющих большое количество тестовых компонентов, соединенных последовательно или параллельно, либо одной структуры с геометрическими размерами, соизмеримыми с размерами самой схемы или ее узлов. Тестовые структуры для контроля случайных дефектов конструируются таким образом, что выход из строя одного из элементов или небольшой части тестовой структуры резко измерял контролируемые параметры всей тестовой структуры. Таким образом построена сборка МОП-транзисторов, предназначенная для оценки дефектности элементов ИМС. Затворы сборки соединены по строкам, истоки по столбцам, а стоки закорочены на землю. Это дает возможность просканировать каждый транзистор в отдельности, что позволяет анализировать распределение по их видам. Подобную матрицу можно построить для КМОП-транзисторов. Если объединить все затворы и истоки, можно проектировать тестовые структуры с любым количеством транзисторов, т. е. с любой чувствительностью к случайным дефектам.

Другой распространенной ТС контроля случайных дефектов является ТС, изображенная на рисунке 11. Она представляет собой меандр из проводящего слоя с двумя вложенными в него гребенками. ТС формируется с помощью литографии. При пропускании тока через сформированный меандр определяется наличие обрыва, а при смещении напряжения на одной из гребенок относительно меандра определяется наличие короткого замыкания (закороток). При этом критичным является длина периметра, ширина меандра и зазор между ним и гребенкой. Данную ТС можно сформировать на рельефе одного из технологических слоев, что позволяет оценить уровень обрывов на ступеньках. Методология проектирования подобных ТС применима к КМОП-технологиям.

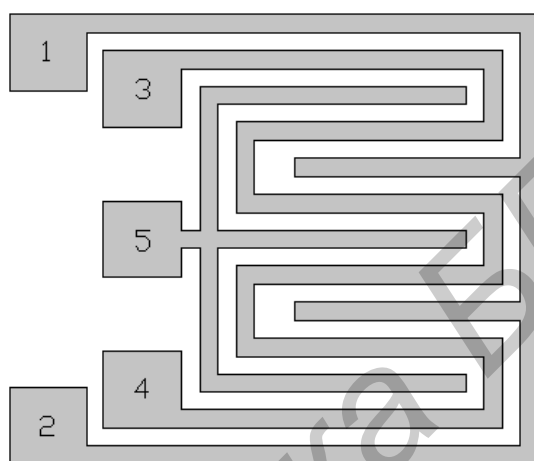


Рисунок 11 – Тестовая структура контроля случайных дефектов

Большое применение имеют ТС для контроля обрывов и определения дефектности в переходных контактных областях. Такие ТС представляют собой цепочки контактов между различными областями (рисунок 12).

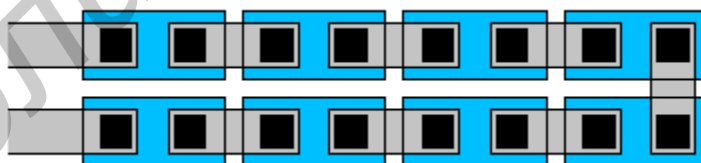


Рисунок 12 – Тестовая структура контроля обрывов и определения дефектности в переходных контактных областях

1.2 Оптические методы контроля

1.2.1 Оптическая микроскопия

Оптическая микроскопия нашла широкое применение в микроэлектронике на различных этапах разработки и изготовления ИМС. Одним из начальных объектов исследования большинства диагностических методов являются геометрические характеристики анализируемых элементов: резкость границ рисунка, расстояние между элементами, степень рассовмещения и др.

В основе оптической микроскопии лежит, как правило, способность различных участков исследуемого объекта в различной степени абсорбировать свет. Метод исследования в поляризованном свете применяется для изучения анизотропных объектов, т. е. объектов, у которых оптические свойства не одинаковы по различным направлениям. Фазово-контрастный метод применяется для исследования оптически прозрачных объектов, а также измерения высоты элементов топологии ИМС и тонких пленок.

Оптическая микроскопия светлого и темного поля. Подавляющее большинство объектов микроэлектроники, исследуемых под микроскопом, являются несамосветящимися; такие объекты следует освещать посторонним источником света.

Освещение объекта по методу светлого поля осуществляется посредством лучей, которые, выйдя из осветительной системы и пройдя через прозрачный объект (проходящий свет) или отразившись от поверхности непрозрачного объекта (отраженный свет) по закону геометрической оптики, поступили в отверстие объектива, создав изображение менее прозрачных элементов объекта в виде темных участков на светлом фоне.

Темное поле создается в тех случаях, когда в объектив микроскопа проходят лишь рассеянные (диффузно отраженные) от объекта лучи или лучи, отраженные элементами поверхности, имеющими надлежащий наклон по отношению к оптической оси объектива; вследствие этого картина в изображении кажется противоположной той, какая наблюдается при освещении на светлом поле: поверхность объекта представляется более или менее темной с ярко освещенными определенными деталями на ней.

На рисунке 13 показаны схематически границы освещения объектов по методу светлого и темного полей в случае применения в микроскопе падающего и проходящего света [2]. Как видно из рисунка, освещение объектов по методу светлого поля можно осуществить, направив лучи в объектив микроскопа непосредственно снизу (проходящий свет) или сверху (отраженный свет).

По методу темного поля непрозрачные объекты освещаются со стороны объектива лучами, идущими вне объектива, или лучами, направленными на прозрачный объект со стороны конденсора. Современные конструкции осветительных устройств позволяют осуществить различные наблюдения объектов, освещая их по методу светлого или темного поля.

Освещение по методу темного поля дает светящееся изображение мелких элементов объекта на темном фоне, у более крупных деталей видны только светлые контуры изображения. Благодаря действию контраста мелкие детали объекта различаются лучше, чем при освещении по методу светлого поля.



Рисунок 13 – Границы освещения по методу светлого и темного полей

Для наблюдения по методу темного поля особенно подходят, например, такие объекты, как риски на поверхности исследуемых образцов, точечные объекты, размеры которых сравнимы с длиной волны света или меньше ее.

Оптическая микроскопия в режиме интерференционного контраста.

Основной областью этого метода является применение его для определения толщин металлических пленок на кристаллах ИМС, аттестация технологических процессов напыления пленок различных материалов, измерения углов косых шлифов и других целей.

Принцип действия интерференционного микроскопа (микроинтерферометра) основан на явлении интерференции света. На практике для получения двух систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением пучка лучей, исходящих из одной точки источника света, на два когерентных световых луча. В микроинтерферометре в качестве разделяющей системы используется наклонная плоскопараллельная пластинка, имеющая полупрозрачное светоделительное покрытие. Половину падающего на нее света пластинка отражает, половину пропускает, вследствие чего образуются две системы волн, способные интерферировать. В результате интерференции двух систем волн в фокальной плоскости окуляра наблюдаются интерференционные полосы. Данная методика позволяет наблюдать неровности высотой 20 нм.

В поле зрения микроинтерферометра наблюдаются одновременно интерференционные полосы и исследуемая поверхность. Перемещение исследуемой поверхности вверх или вниз на какую-либо малую величину вызывает изменение хода лучей на двойную величину перемещения поверхности, так как свет проходит это расстояние дважды. Изменение хода лучей в одной ветви микроинтерферометра вызывает изменение разности хода интерферирующих лучей, в результате чего полосы в поле зрения сместятся (рисунок 14). При смещении исследуемой поверхности по высоте на величину, соответствующую половине длины световой волны $\lambda/2$, полосы в поле зрения сместятся на один интервал.

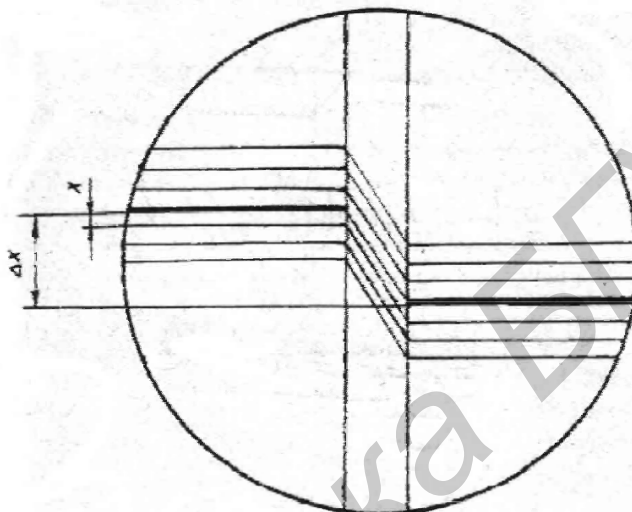


Рисунок 14 – Изображение смещения интерференционных полос вызванные изменением разности хода лучей

Если на исследуемой поверхности имеется ступенька рельефа, например шина металлизации ИМС или впадина, то в этом месте изменяется разность хода, и, следовательно, полосы смещаются. Так, высота ступеньки на поверхности в 0,27 мкм вызовет смещение полосы в поле зрения микроинтерферометра на величину всего интервала между полосами (на одну полосу). При измерении величину смещения выражают в долях интервала между интерференционными полосами. Зная длину волны света, можно получить высоту ступеньки в микрометрах.

Таким образом, изображения интерференционных полос и исследуемой поверхности получаются в фокальной плоскости окуляра и налагаются друг на друга.

1.2.2 Метод оптической эллипсометрии

Эллипсометрия обладает очень высоким разрешением как при определении толщины и показателей преломления оптически прозрачных тонких пленок на подложках, так и при нахождении оптических констант отражающих поверхностей.

Схематически эллипсометр представляет собой двухлучный оптический прибор, в котором свет от источника **S** (рисунки 15, 16), пройдя через монохроматический фильтр **F** и коллиматор **C**, линейно поляризуется призмой **P**, отражается от образца **M** (см. рисунок 15, *a*) или преломляется в нем (см. рисунок 15, *б*), проходит через анализатор **A** (линейно поляризующее устройство, аналогичное **P**) и регистрируется либо визуально, либо фотоэлектрически (**D**).

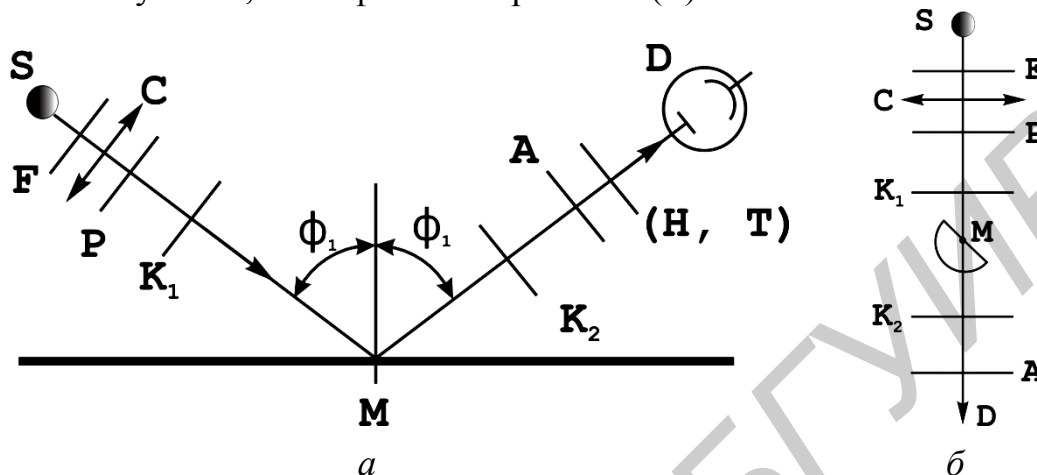


Рисунок 15 – Схема расположения элементов эллипсометра при работе в отраженном (*a*) и проходящем свете (*б*)

Между поляризатором **P** и анализатором **A** устанавливается компенсатор **K**, изменяющий соответствующий фазовый сдвиг между *p*- и *s*-компонентами. Ориентация элементов **P**, **K**, **A** задается с помощью азимута, который по определению равен углу между плоскостью падения и характерным направлением данного элемента, отсчитываемым наблюдателем, смотрящим навстречу лучу, против часовой стрелки. Для **P** и **A** такими направлениями служат направления пропускания, для компенсатора – **F**-направление.

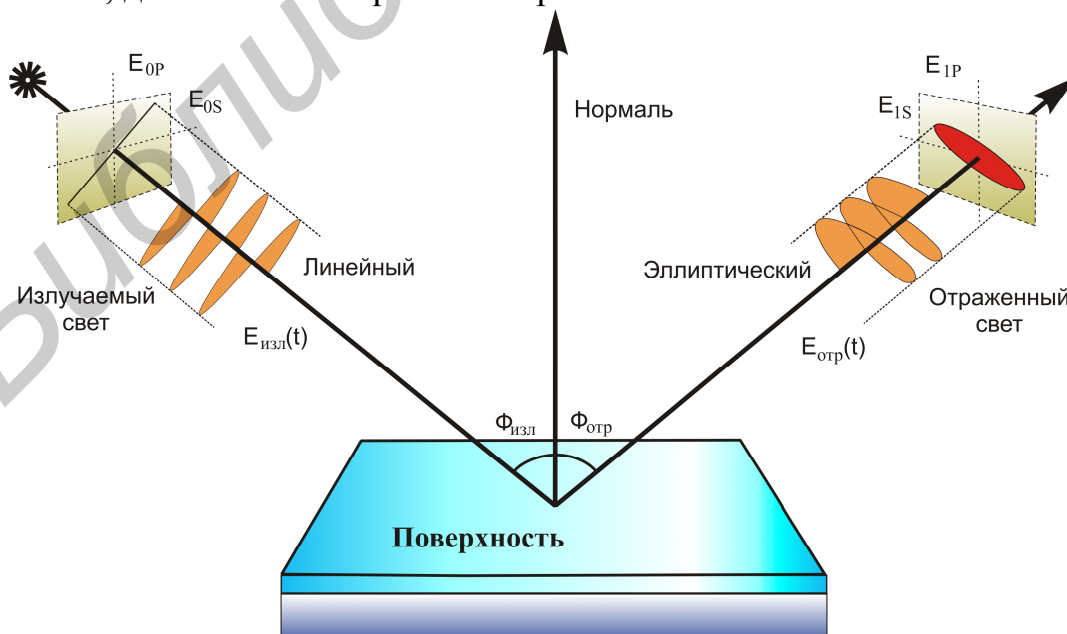


Рисунок 16 – Схема, демонстрирующая принцип работы эллипсометра

Все поляризующие элементы крепятся в градуированных оправках для измерения азимутов. Компенсатор может быть установлен как до, так и после образца. Измерения параметров эллипса поляризации осуществляется вращением двух из трех поляризующих элементов при фиксированном третьем элементе (вращение **Р** и **А** при фиксированном **К**, вращение **К** и **Р** или **А** при фиксированном **А** или **Р** соответственно). При визуальной регистрации вместе с анализатором вводятся (для повышения точности) полутеневые устройства **Н**, а наблюдение ведется через телескопическое устройство **Т**.

Таким образом, непосредственно измеряемыми величинами служат азимуты поляризующих элементов, от которых можно перейти к параметрам изменения поляризации светового потока. На этом этапе точность результатов определяется исключительно точностью эксперимента.

Следующим наиболее ответственным этапом является выбор модели отражающей (преломляющей) поверхности. Использование определенной модели необходимо потому, что два независимых параметра Δ и ψ неоднозначно зависят от оптических параметров и толщин поверхностных слоев, т. е. одна и та же пара значений Δ и ψ может наблюдаться при отражении от совершенно различных поверхностей. Поэтому для определения Δ и ψ используют несколько методов [8]. Первый метод заключается в том, что при фиксированном угле падения изменяется эллиптичность падающего на исследуемую поверхность луча до тех пор, пока отраженный свет не станет линейно поляризованным. Во втором методе при фиксированном угле падения изменяются эллиптичность и азимут падающего на исследуемую поверхность луча, пока отраженный свет не станет линейно поляризованным. В третьем методе при фиксированном угле падения определяются эллиптичность и азимут отраженного света, когда на исследуемую поверхность падает линейно поляризованный луч переменного азимута.

Четвертый метод заключается в том, что при фиксированном угле падения определяются эллиптичность и азимут отраженного света, когда на исследуемую поверхность падает линейно поляризованный луч с постоянным азимутом. Все вышеперечисленные методы применяются для определения толщин и показателей преломления тонких пленок и оптических констант показателя преломления и коэффициент поглощения чистых поверхностей образцов.

Никогда нельзя быть уверенным в справедливости выбранной модели, поэтому необходим контроль – повторное определение параметров системы при иных условиях. Если выбранная модель справедлива, то результаты, получаемые при различных условиях, должны совпадать в пределах допустимых ошибок, и наоборот. Фактически подобная многократная проверка представляет собой итерационный процесс, позволяющий определить более двух параметров исследуемой поверхности.

Эллипсометрия может применяться для определения качества обработки материалов. Оптически отличной становится поверхность полупроводниковых материалов после проведения диффузии [8]. Высокая чувствительность метода позволяет применять эллипсометрию для изучения процессов адсорбции и десорбции из жидкостей и газов.

2 МЕТОДЫ ЭЛЕМЕНТНОГО И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КРИСТАЛЛОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

2.1 Просвечивающая электронная микроскопия

Метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) основан на использовании в качестве диагностического пучка и носителя информации электронного зонда. Электронный микроскоп по принципу построения аналогичен оптическому микроскопу. Электронно-оптическая схема просвечивающего электронного микроскопа в режиме изображения приведена на рисунке 17.

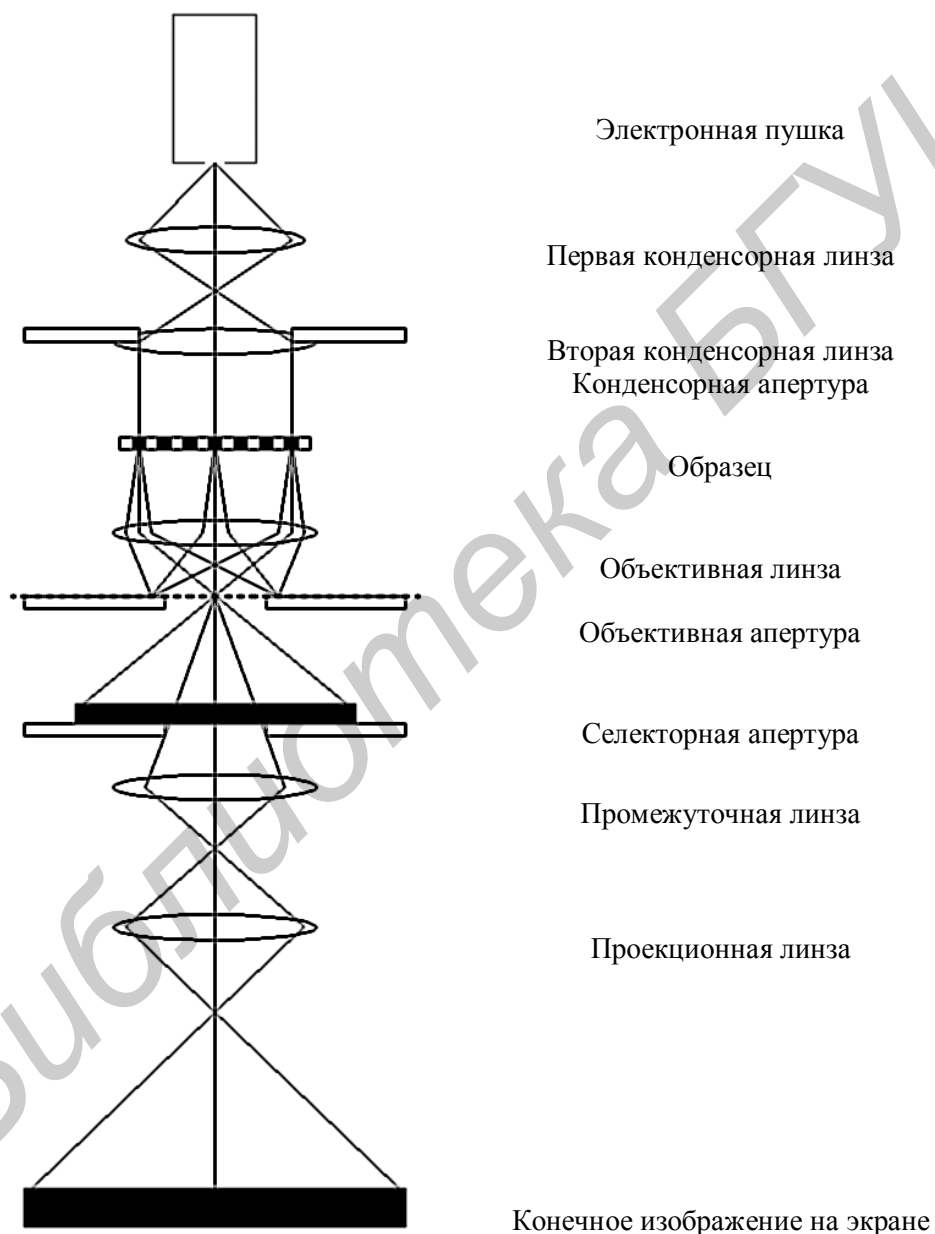


Рисунок 17 – Электронно-оптическая схема просвечивающего электронного микроскопа в режиме изображения

В микроскопе электронный зонд формируется с помощью конденсорных линз из потока электронов, генерируемых электронной пушкой при приложении определенного ускоряющего напряжения. Размер электронного зонда (пятна), падающего на образец, контролируется первой конденсорной линзой, а с помощью второй конденсорной линзы пучок можно изменять от широко дисперсного до точечного. Апертурная конденсорная диафрагма ограничивает пучок, задерживая электроны, находящиеся далеко от оптической оси.

Далее пучок попадает на образец и при прохождении через него испытывает превращения в результате абсорбции и дифракции. Прошедшие через образец электроны фокусируются с помощью объективной линзы в изображение. Введение на оптическую ось объективной апертуры позволяет усиливать контраст изображения благодаря блокированию высокоугловых электронов, которые претерпели дифракцию при прохождении через образец. Используя селективную диафрагму, можно получить изображение со строго определенного фрагмента наблюдаемого поля зрения. Затем изображение передается вниз по колонне через промежуточную и проекционную линзы. Промежуточная линза используется, чтобы управлять увеличением, проекционная линза формирует реальное изображение на флуоресцентном экране микроскопа.

Дифракции быстрых электронов. Методика предназначена для анализа кристаллического состояния и фазового состава тонких пленок различных материалов. Электронографический анализ, являющийся одним из методов просвечивающей микроскопии, основан на взаимодействии вещества с потоком быстрых электронов. В результате такого взаимодействия происходит рассеяние электронов под действием электростатического потенциала, создаваемого ядрами атомов и их электронными оболочками.

В зависимости от кристаллического состояния вещества рассеяние носит абсорбционный или дифракционный характер. После прохождения через образец наблюдаемое распределение энергии электронного излучения представляет собой дифракционную картину, которую в некотором приближении можно рассматривать как прямое изображение плоского сечения обратной решетки кристалла. Дифрагированные (рассеянные) электроны формируют пучки, образующие с падающим лучом электронов малые углы ($\sim 1-2^\circ$). Объективная линза фокусирует эти пучки в виде электронной дифракционной картины. Изменяя оптическую силу промежуточной линзы, можно получить на экране дифракционную картину. Дифракционную картину, зарегистрированную на экране, называют электронограммой.

Основные технические характеристики метода:

– анализируемый образец должен быть прозрачным для электронного пучка, это требование в зависимости от атомного строения вещества (его атомного номера) и используемого ускоряющего напряжения электронной пушки выполняется обычно при толщине образца 0,1–0,3 мкм. Например, Si будет прозрачен для электронного пучка с ускоряющим напряжением 50 кВ при толщине ~ 1000 Å. В современных микроскопах, позволяющих развивать ускоряющее напряжение до 1000 кВ, можно изучать «на просвет» Si толщиной до 2–3 мкм;

- для получения отчетливых и интенсивных рефлексов количество анализируемой фракции вещества должно быть не менее 12 г;
- локальность метода 2 мкм, при использовании селекторных диафрагм предельно достигаемая локальность составляет 0,5 мкм.

В методике используется процесс утонения исходных образцов до заданной толщины (0,1–0,3 мкм) с применением прецизионной механической обработки и финишного травления ионным пучком. Способ подготовки образцов является универсальным для широкого класса материалов и дает высокие результаты при утонении сложных образцов, представляющих собой многослойные композиции (рисунок 18).

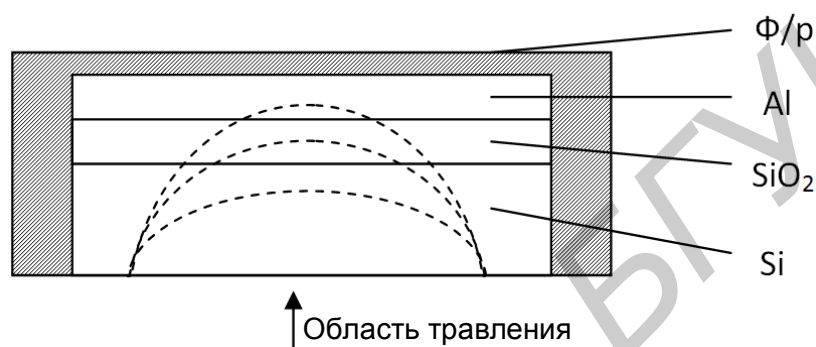


Рисунок 18 – Препарирование образца для ПЭМ-исследований

Обработка результатов: по дифракционной картине может быть установлена степень кристалличности вещества:

- 1) от аморфного вещества получают диффузно рассеянное пятно (рисунок 19);
- 2) от поликристаллического вещества получают кольцевую электронограмму (рисунок 20);
- 3) от монокристаллического вещества получают точечную электронограмму (рисунок 21).

Картины электронной дифракции аналогичны дифракции рентгеновских лучей, и положение дифракционного максимума относительно центра пятна жестко связано с периодом решетки:

$$R = \frac{\lambda \cdot Z}{d}, \quad (13)$$

где R – расстояние от центра пятна до дифракционного максимума (рисунок 22);
 λ – длина волны электрона при различном ускоряющем напряжении;
 Z – расстояние от объекта до плоскости изображения дифракционной картины;
 d – соответствующее межплоскостное расстояние (d_{hkl}).

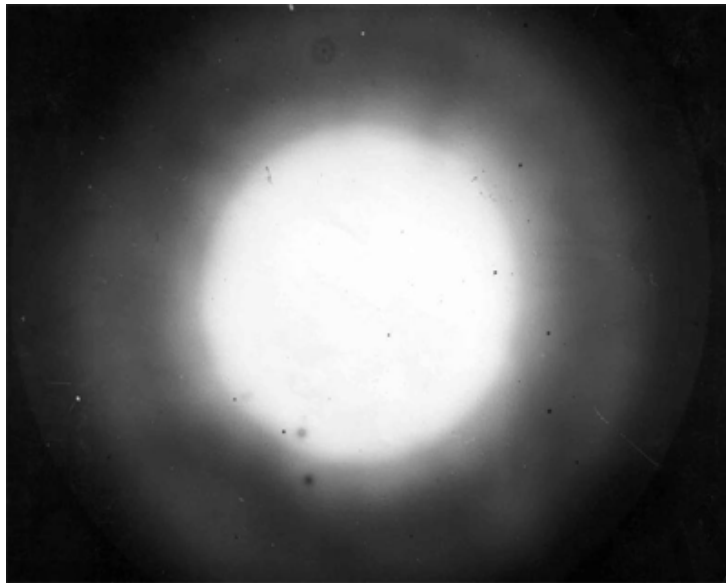


Рисунок 19 – Электронограмма диэлектрической пленки

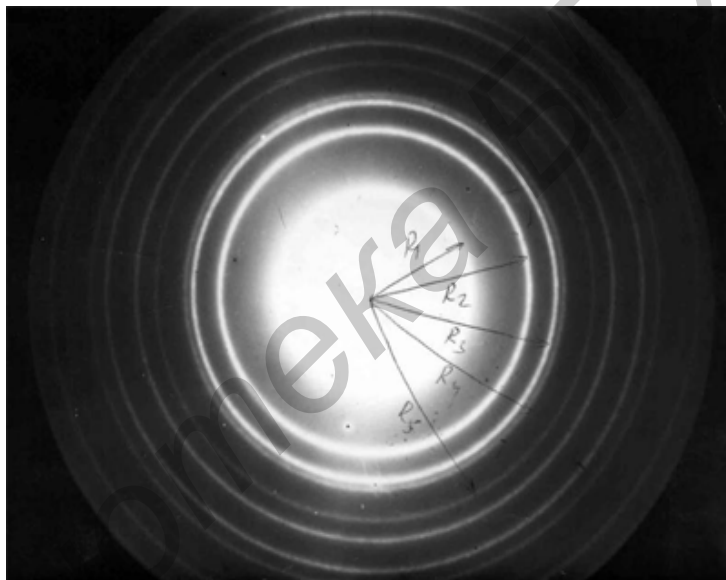


Рисунок 20 – Электронограмма поликристаллической пленки

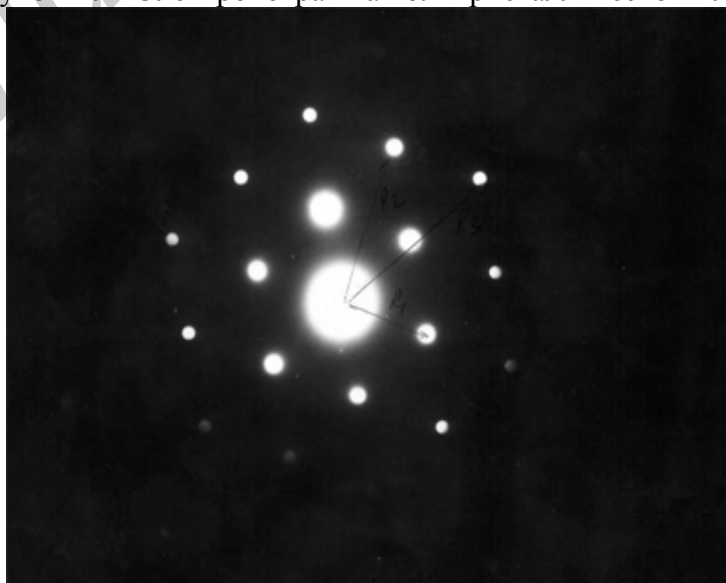


Рисунок 21 – Электронограмма металлической пленки

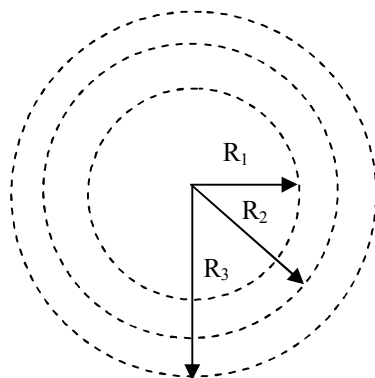


Рисунок 22 – Определение на электронограмме расстояния от центра пятна до дифракционного максимума

Поскольку влияние Z зависит от режима работы различных линз, которые могут различаться для разных приборов, то для каждого конкретного микроскопа определена постоянная прибора, равная λZ .

Это влияние определяется с помощью эталонного вещества. То есть, зная значение d_{hkl} для эталонного вещества, определяя величины R для дифракционного максимума, используя выражения $Rd = \lambda Z$, определяют постоянную прибора.

При анализе неизвестного вещества решают обратную задачу: зная постоянную прибора (λZ) и определяя по электронограмме R для дифракционного максимума, рассчитывают d_{hkl} .

Полученный набор значений d_{hkl} сопоставляют с табельными данными d_{hkl} для различных материалов и при их совпадении определяют искомое вещество.

Вторичная дифракция электронов (Кикучи-линии). При определении фокусировки конденсора может оказаться, что образец интенсивно освещен расходящимся электронным пучком. При этом формируется определенный тип дифракционной картины, известной под названием Кикучи-линий. Подобный эффект вызван вторичной дифракцией электронов. Картина состоит их групп параллельных светлых и темных полос, расстояние между которыми определяется периодом дифракционной решетки.

При съемке объектов в режиме «дифракции на отражение» объект устанавливается под очень малым углом к электронному пучку, по характеру образовавшихся Кикучи-линий оценивают степень совершенства тонкого поверхностного слоя монокристаллического вещества (рисунок 23).

Протяженные четкие Кикучи-линии свидетельствуют о высоком совершенстве поверхностного слоя вещества (рисунок 24).

Появление сетки, штрихов указывает на мозаичный, блочный характер поверхности. Наблюдаемые на электронограмме полукольца свидетельствуют о том, что на поверхности имеется тонкий поликристаллический слой (рисунок 25).

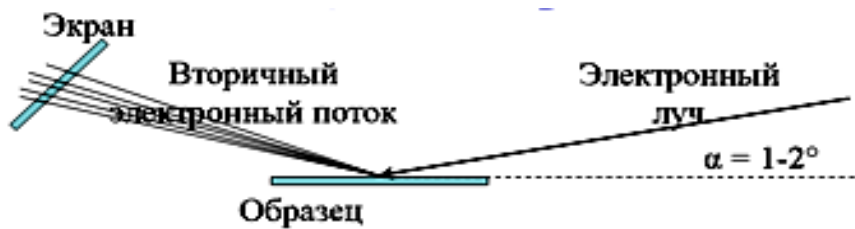


Рисунок 23 – Схема образования Кикучи-линий



Рисунок 24 – Электроннограмма, свидетельствующая о высоком совершенстве поверхностного слоя вещества



Рисунок 25 – Электроннограмма, свидетельствующая о том, что на поверхности имеется тонкий поликристаллический слой

Метод просвечивающей электронной микроскопии («на просвет») предназначен для исследования структурных (распределение дислокаций, включений, выделений и т. д.) и топологических свойств, а также особенностей межфазных границ раздела твердофазных материалов и их многослойных композиций в горизонтальном (planar) и вертикальном (cross-section) сечениях.

Метод просвечивающей электронной микроскопии основан на использовании в качестве зонда для наблюдения объекта – пучка электронов. При прохождении через твердофазный материал электронный пучок испытывает превращения в результате процессов абсорбции или дифракции. Результат исследования получается в виде изображения, которое формируется дифракционным максимумом нулевого порядка (центральным пучком). Факторы, определяющие интенсивность электронного пучка после прохождения через объект, различны для аморфных и кристаллических материалов. Для аморфных материалов определяющим является процесс абсорбции электронов. Коэффициент абсорбции является медленно возрастающей функцией величины атомного номера элемента и зависит от плотности и толщины материала. Для кристаллических материалов определяющим является процесс дифракции электронов.

При работе микроскопа в режиме формирования визуального изображения вводится апертурная диафрагма, которая отсекает отраженные электроны, дающие изображение дифракции. Экрана достигает только формирующий изображение прямой пучок электронов (см. рисунок 17).

Во всех точках объекта, в которых в соответствии с законами физики возникает дифракция на пространственной решетке, из центрального пучка отводится и затем задерживается апертурной диафрагмой часть энергии, а прошедший пучок электронов формирует изображение.

В методике ПЭМ-исследований как горизонтальных (planar), так и вертикальных (cross-section) сечений используется общий подход к процессу утонения образцов до заданной толщины (0,1–0,3 мкм), основанный на последовательном применении различных прецизионных механических обработок и финишного травления ионным пучком.

Дифракционный контраст чувствителен к изменению ориентации и толщины, а также к смещению атомов из их нормальных положений, обусловленному несовершенством решетки. В результате структурные дефекты, включения, инородные образования в кристаллическом материале вызывают изменения в условиях дифракции, а это, следовательно, становится видимым по изменению интенсивности прошедшего потока электронов. На рисунках 26, 27 показаны структуры металлических пленок, а на рисунке 28 – структурные дефекты в кремнии после ионного легирования.

Более информативными для данной методики являются исследования вертикальных сечений структуры элементов ИМС. Так называемые ПЭМ-сколы могут использоваться как уникальный способ для получения характеристик вертикальных сечений структур ИМС, что позволяет получать информацию, которую сложно, а иногда и невозможно получить другими методами исследований.

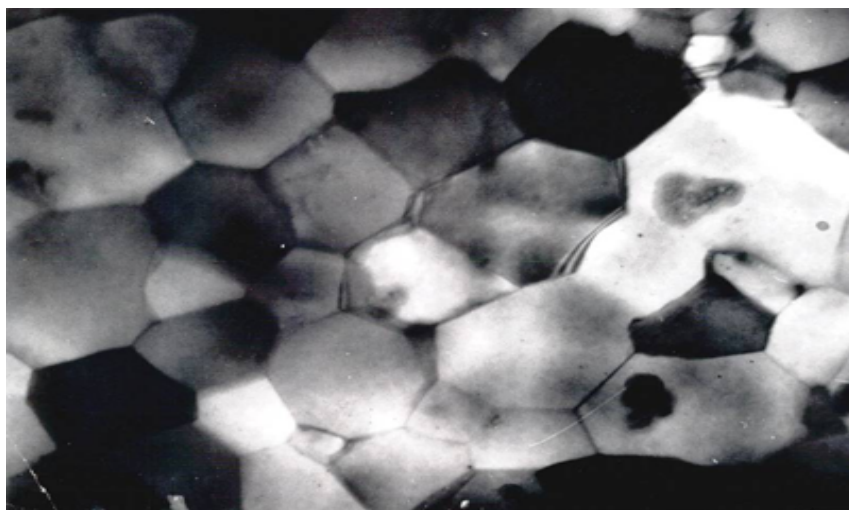


Рисунок 26 – Структура пленки алюминия

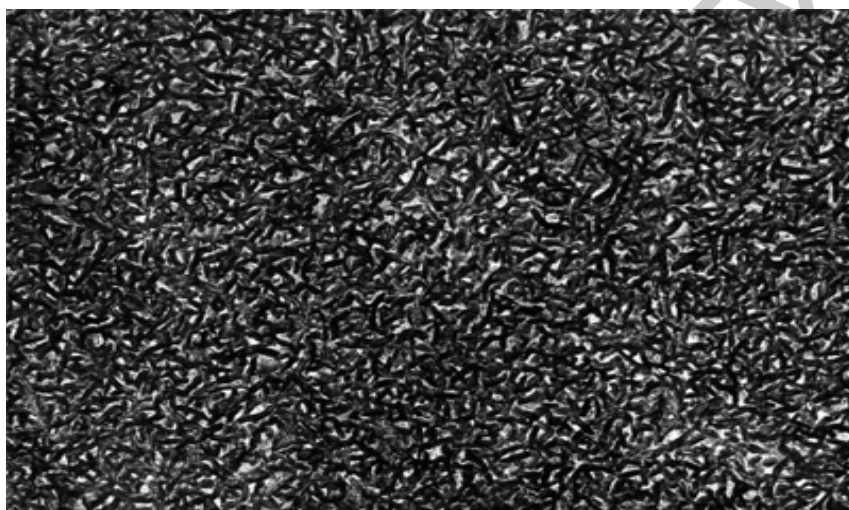


Рисунок 27 – Структура пленки молибдена

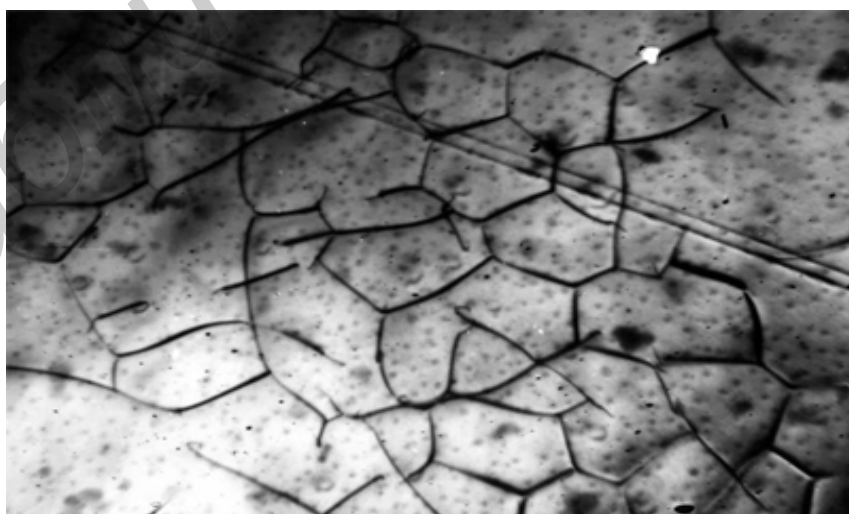


Рисунок 28 – Структура кремния после ионного легирования на границе раздела пленка – подложка

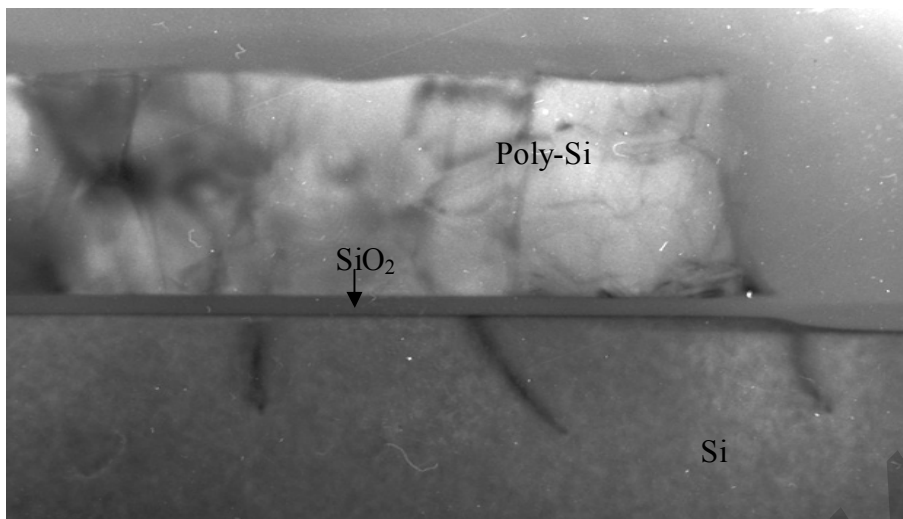
Рисунок 29 иллюстрирует возможности ПЭМ-скола для выявления и прямого наблюдения дефектов, связанных со структурными нарушениями в Si: в области подзатворного диэлектрика в МОП-транзисторной структуре, и в областях, сопряженных с разделительным термическим окислом LOCOS.

ПЭМ-сколы, приведенные на рисунке 30, наглядно иллюстрирует дефекты, выявленные в контактных областях при анализе технологического брака. Так, на рисунке 30, *а* видно, что в зоне контакта металла и кремния в приграничной области бинарного сплава металлизации (Al + 4% Si) образовалась тонкая прослойка преципитатов Si, которая может быть причиной повышения контактного сопротивления. Напротив, на рисунке 30, *б* отчетливо выявлены в зоне контакта ямки травления в Si, обусловленные процессами твердофазного взаимодействия на границе раздела Al и Si при термообработке, последствием этого являются «прямые закоротки» в области контакта. Кроме того, на этих рисунках в приконтактной поверхностной области Si отчетливо наблюдаются зоны повышенной структурной дефектности. Это свидетельствует о том, что при легировании Si в контактной области возникают дефекты, которые трудно отжечь. На рисунке 30, *в* виден тонкий слой «недотравленного» SiO₂, следствием чего является отсутствие омического контакта.

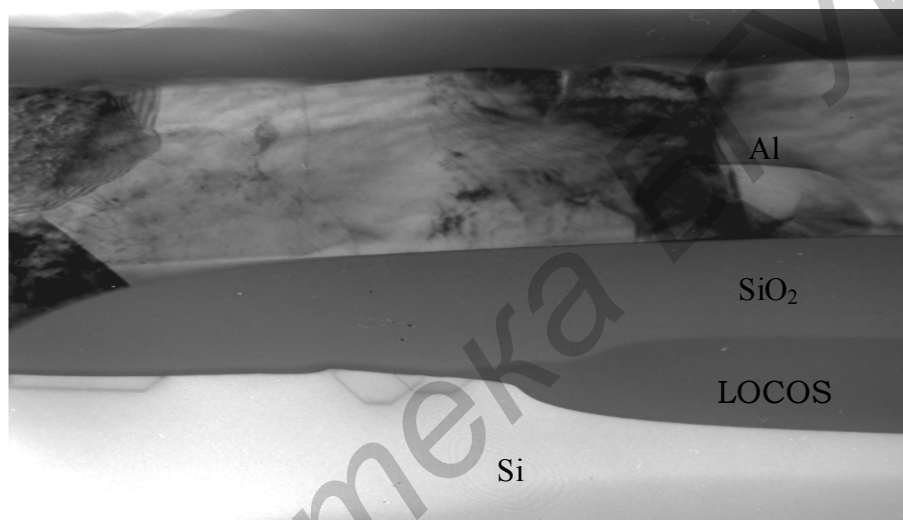
Рисунок 31 демонстрирует особенности формирования барьерного слоя на основе Pt_xSi_y в блоке металлизации. Прямое наблюдение выявленных слоев позволяет оценить с высокой точностью не только конечную толщину образующегося слоя Pt_xSi_y, но и толщину слоя Si, участвующего в процессе силицидообразования. Видно также, что ниже границы силицидного слоя наблюдается область Si с диффузными вкраплениями силицидных включений.

На рисунке 32 показан фрагмент металлизации ИМС, где нижний уровень металлизации представляет собой Al с подслоем Ta, а верхний уровень состоит из двух слоев Al. Полученные ПЭМ-сколы позволяют оценить не только толщины слоев многокомпозиционной металлизации, но и выявить, что при формировании рисунка нижнего уровня металлизации имеется «недотрав» подслоя Ta, а при поэтапном нанесении верхнего уровня металлизации между двумя слоями наблюдается тонкая прослойка окисла алюминия.

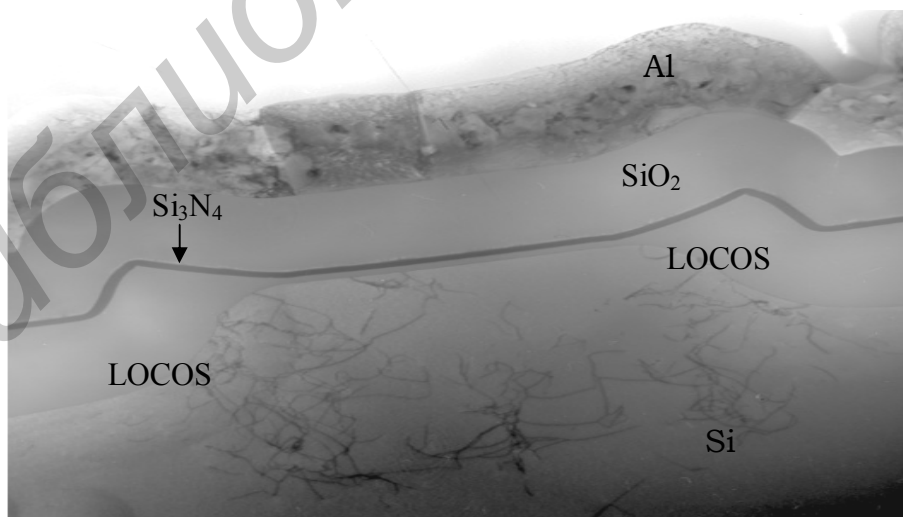
На рисунке 33 приведены элементы конденсаторных структур двух типов. На рисунке 33, *а* обкладки конденсаторов выполнены из поликристаллического кремния, а конденсаторным диэлектриком является монослой SiO₂, флуктуации толщины которого можно оценить. На рисунке 33, *б* нижняя обкладка выполнена из поликристаллического кремния, верхняя – из Al, конденсаторный диэлектрик представляет собой двухслойную композицию, состоящую из SiO₂ и Si₃N₄. Также отчетливо видно, что поликристаллический слой нижней обкладки нанесен в три этапа, и толщина каждого подслоя может быть точно оценена. Характерной структурной особенностью AL-шины является то, что слой Al однокристаллитный по толщине, причем зерна имеют пластинчатый габитус, их размеры в основании значительно превосходят вертикальный размер.



a

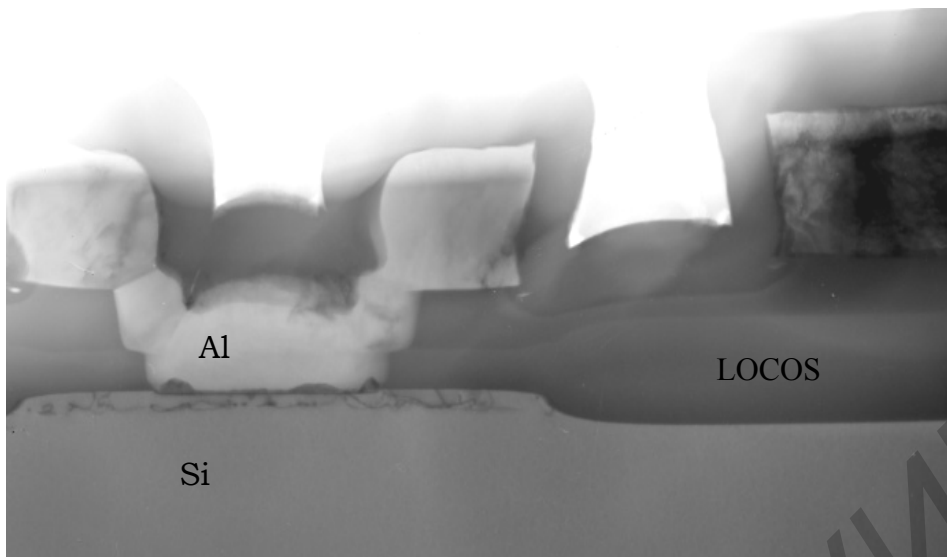


б



в

a – область подзатворного диэлектрика (75 000 крат);
б, в – области, сопряженные с изоляцией LOCOS (30 000 и 20 000 крат)
 Рисунок 29 – Структурные несовершенства в Si



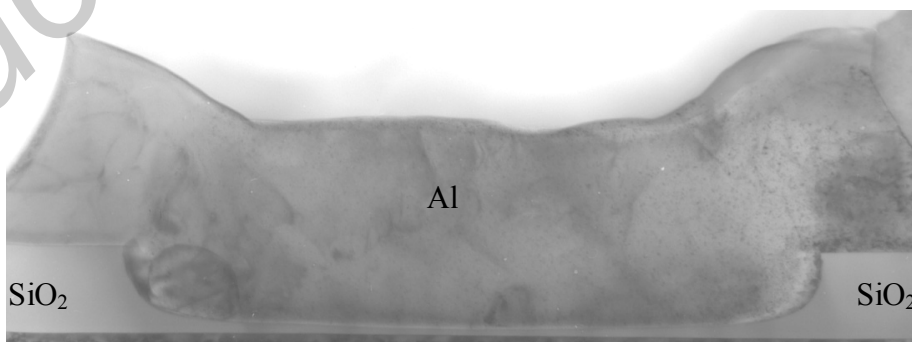
x12 000

a



x20 000

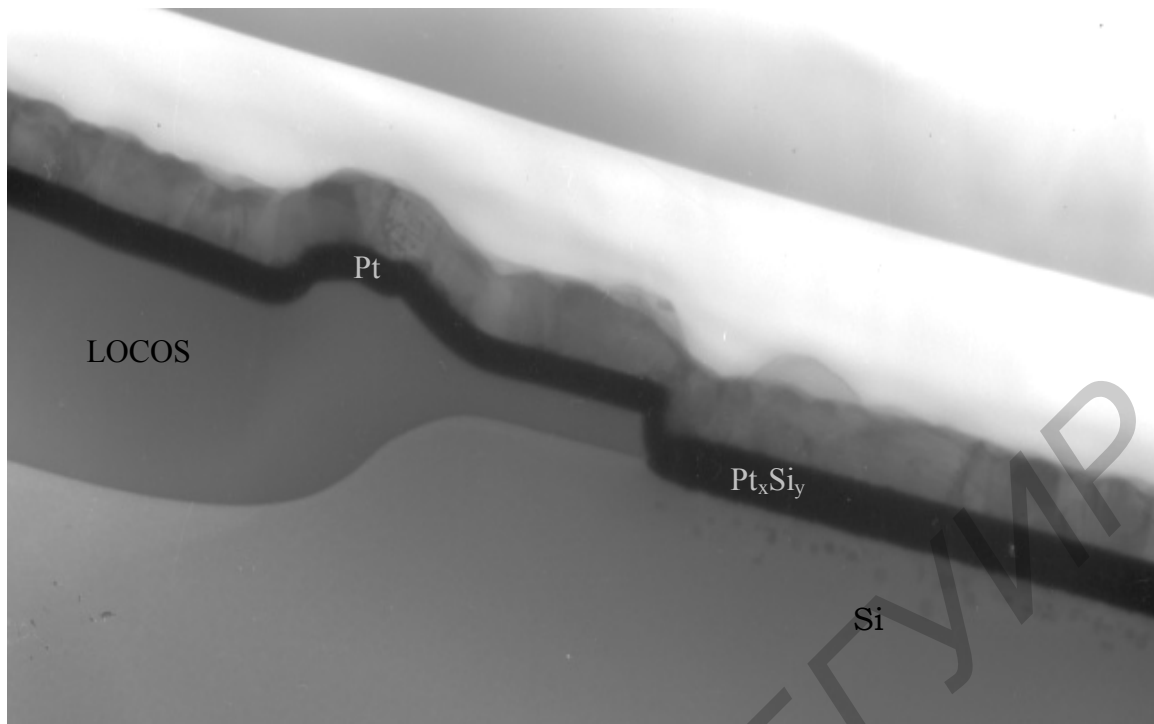
б



x20 000

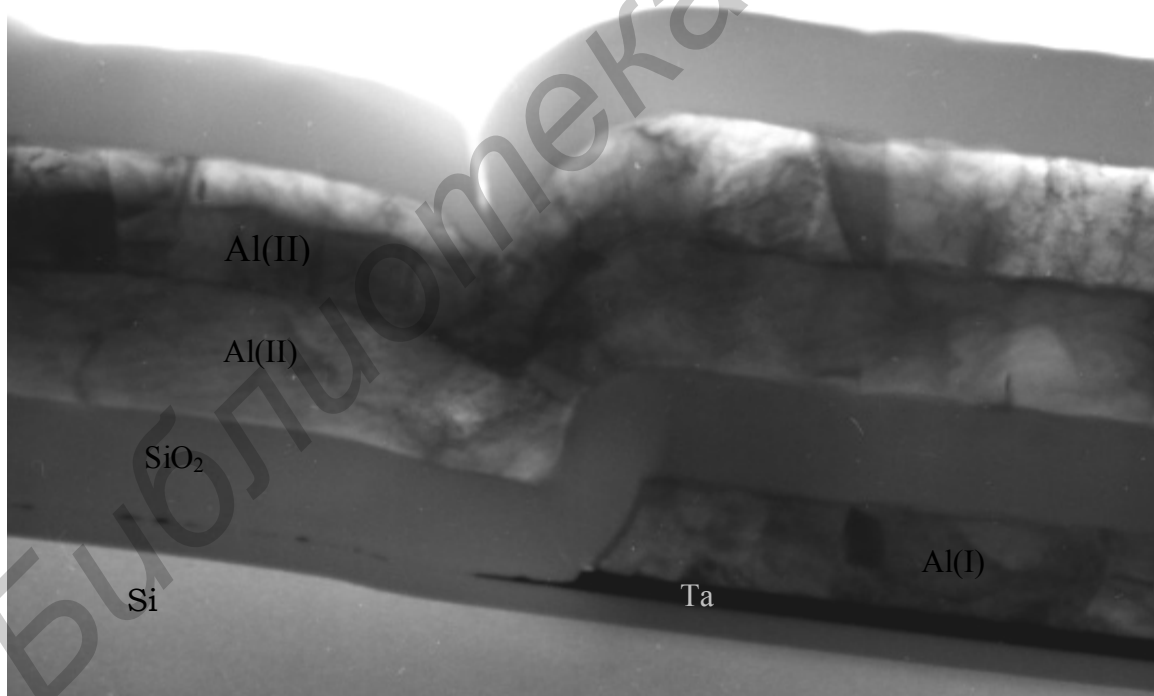
в

Рисунок 30 – ПЭМ-сколы в области контактов Al – Si



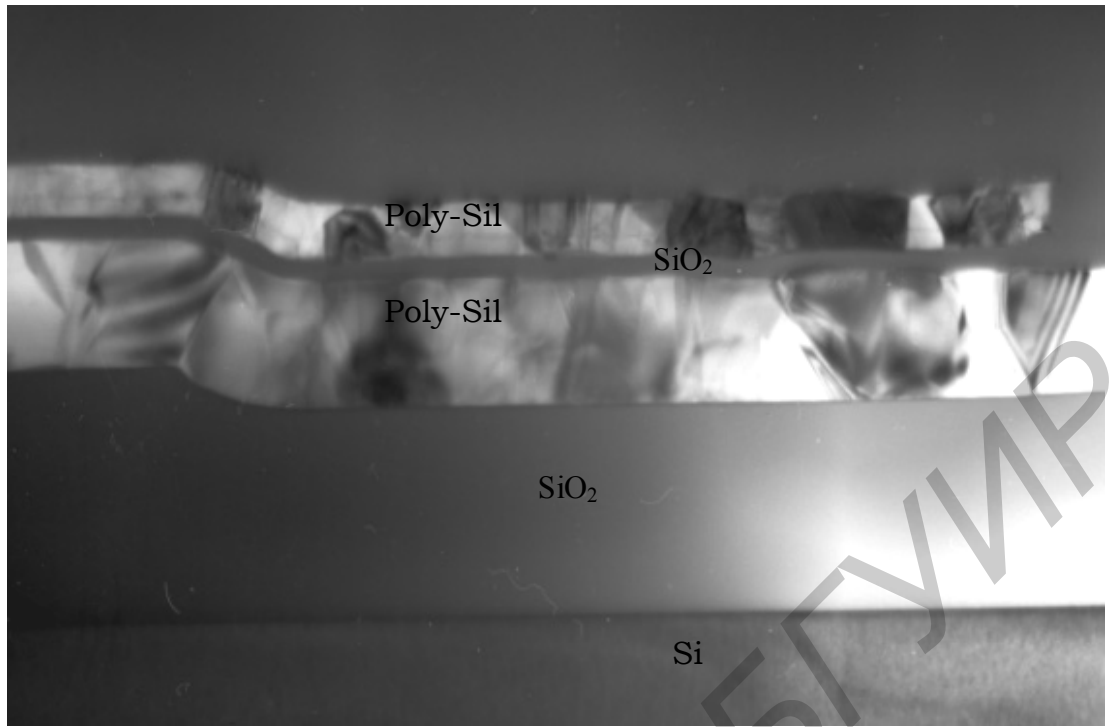
x12 000

Рисунок 31 – Формирование барьерного слоя Pt_xSi_y



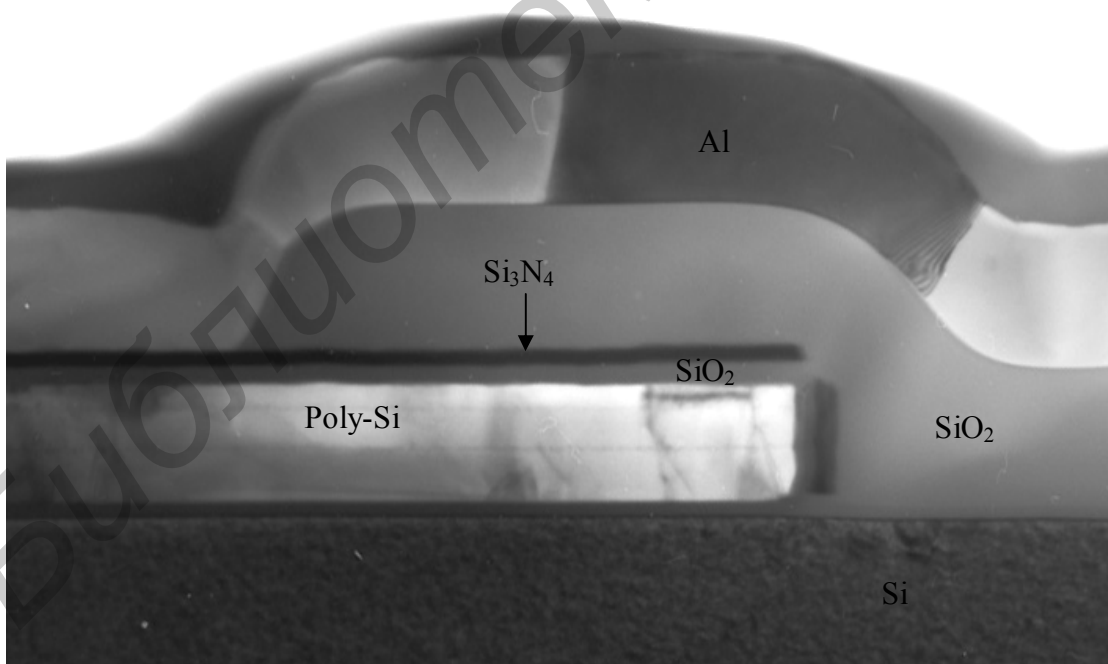
x10 000

Рисунок 32 – Фрагмент двухуровневой металлизации ИМС:
 нижний уровень представляет собой Al с подслоем Ta;
 верхний уровень – 2-слойный Al



x35 000

a



x30 000

б

Рисунок 33 – Элементы конденсаторных структур, выполненные из различных материалов

Метод реплик. В электронной микроскопии различают прямые и косвенные методы исследований.

Под прямыми методами подразумевают исследования «на просвет» непосредственно самих объектов. Метод реплик относится к косвенным методам исследований. При косвенном методе исследований получают информацию о микрорельефе поверхности объектов.

Для этого на объект наносят тонкую прочную пленку (так называемую реплику), которую затем отделяют от образца и наблюдают в электронном микроскопе.

Реплика должна отвечать ряду требований:

- 1) быть прозрачной для электронного пучка;
- 2) не разрушаться под электронным пучком;
- 3) являться бесструктурной и точно передавать детали морфологии поверхности.

Среди известных материалов, используемых в качестве реплик (SiO_2 , органические материалы, угольные пленки), в наибольшей мере указанным требованиям отвечают угольные пленки. Их получают в вакуумных установках при распылении угольных стержней.

Образованную реплику отделяют от поверхности образца либо механически с помощью желатина или липкой ленты, либо химическим подтравливанием образца в соответствующих травителях. Чаще всего угольную реплику отделяют химическим путем, так как она устойчива к действию кислот и щелочей.

Отделившуюся реплику наносят на поддерживающую медную сеточку и оттеняют тяжелые металлы (Cr, Pt) под косым углом для увеличения контраста изображения.

По величине наблюдаемой тени можно определить высоту неровностей поверхности (рисунок 34):

$$y = atg\alpha.$$

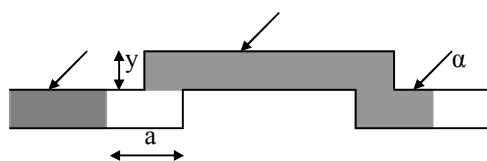


Рисунок 34 – Схематическое изображение реплики

На рисунках 35, 36, 37 показан рельеф поверхности пленочных элементов, полученный методом реплик.

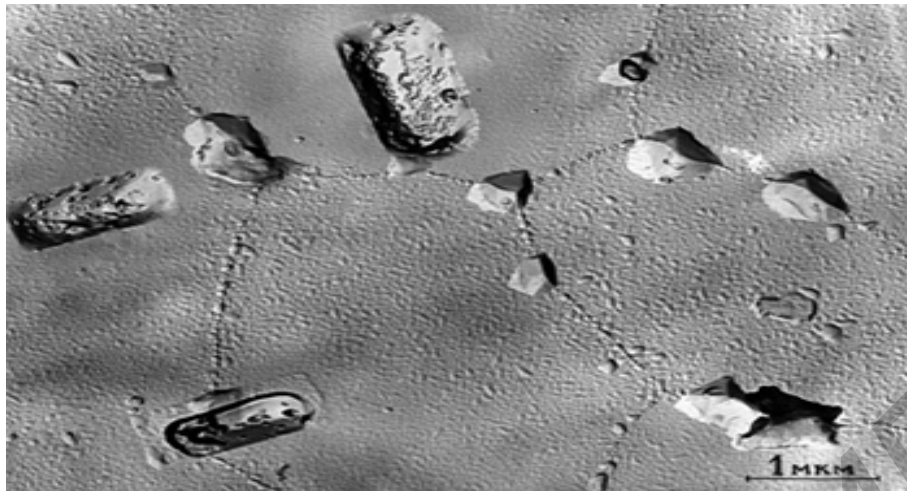


Рисунок 35 – Поверхность кремния на границе раздела Si – Al после удаления пленки Al

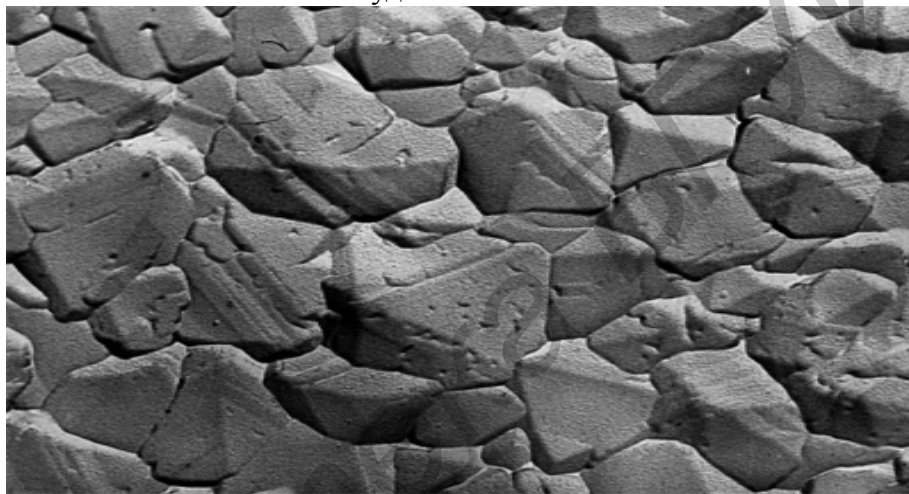


Рисунок 36 – Микрорельеф поверхности пленки поликристаллического кремния

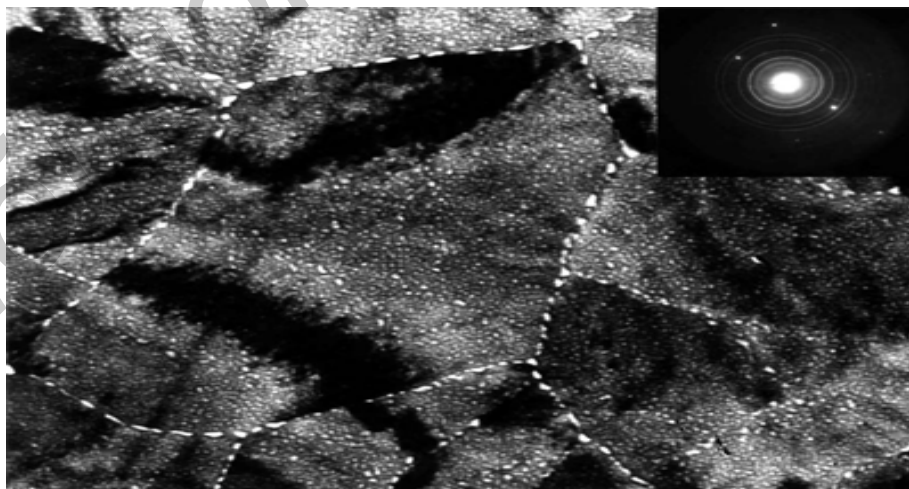


Рисунок 37 – Структура и электронограмма пленки Ta_2O_5 , полученная окислением Ta

2.2 Растровая электронная микроскопия

Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ), широко применяемый при исследовании ИМС, характеризуется по сравнению с оптической микроскопией более высокими значениями пространственного разрешения и глубиной резкости, а также возможностью проведения химического анализа на основе регистрации спектра рентгеновского излучения, генерируемого при облучении поверхности образца электронным пучком.

На рисунке 38 представлена схема растрового электронного микроскопа. Электроны, испускаемые электронной пушкой, ускоряются до приобретения энергии 5–50 кэВ. Набор магнитных линз и отклоняющих катушек сканирования формирует электронный пучок малого диаметра, разворачиваемый в растр на поверхности образца. При облучении этой поверхности электронами возбуждаются три типа излучения, несущего полезную информацию, – рентгеновские лучи, вторичные электроны и отраженные (обратнорассеянные) электроны.

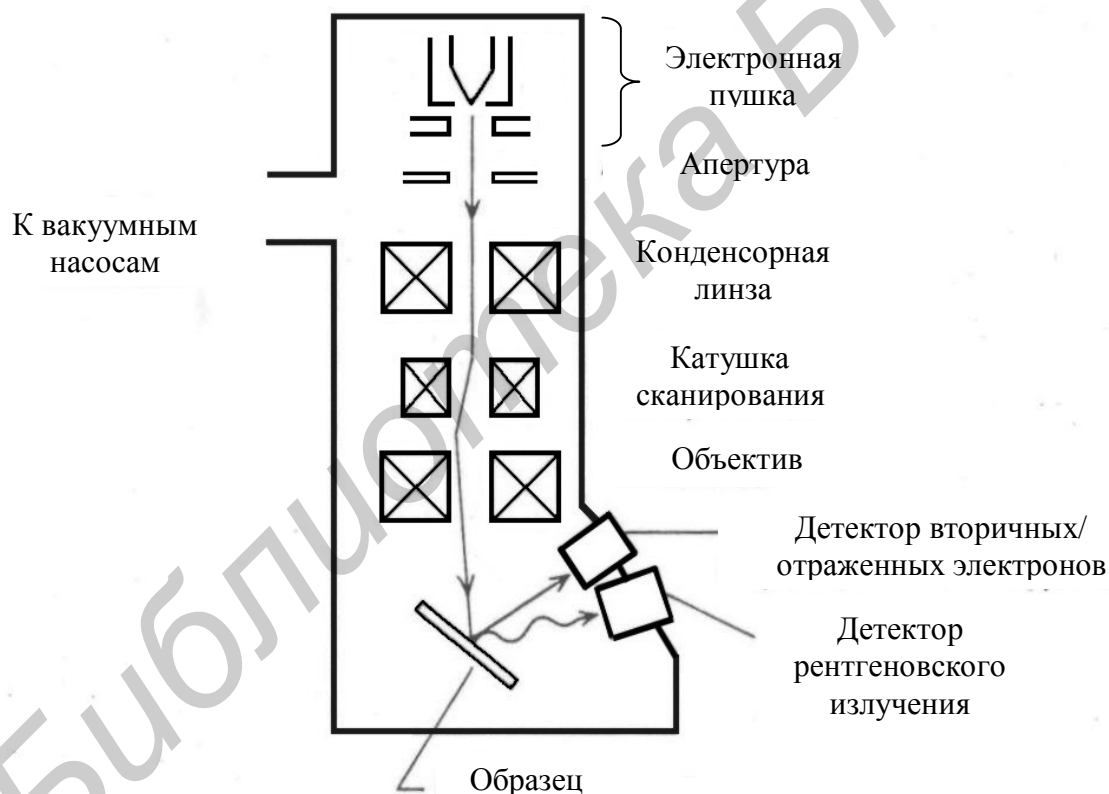


Рисунок 38 – Схема растрового электронного микроскопа

Ток вторичных или обратнорассеянных электронов используется для модуляции интенсивности электронного пучка на экране. Поскольку развертка электронного луча синхронизирована с разверткой первичного электронного пучка растрового электронного микроскопа, на экране формируется изображение поверхности образца, яркость отдельных элементов которого определяется изменениями интенсивности вторичных или отраженных электронов.

Контраст изображений, формируемых отраженными и вторичными электронами, зависит от вариаций потока электронов, попадающего на детектор. Выход отраженных электронов повышается с возрастанием атомного номера материала образца. Поскольку выход зависит от атомного номера, на изображениях, формируемых отраженными электронами, наблюдается контраст между областями материалов с различными атомными номерами.

Выход вторичных электронов зависит от атомного номера в меньшей степени, чем выход отраженных электронов. Выход вторичных электронов определяется работой выхода электронов из данного вещества. Для окислов и других материалов с большой шириной запрещенной зоны он существенно выше, чем для кремния. Это обстоятельство обуславливает преимущества анализа изображений, сформированных вторичными электронами, при исследовании ИМС, так как области металлизации, окисла и кремния легко различимы. Вторым фактором, определяющим контраст изображений, формируемых вторичными электронами, является зависимость выхода электронов от кривизны анализируемой поверхности. Поток вторичных электронов от поверхности переменной кривизны пропорционален углу наклона касательной к неровностям поверхности, поэтому на изображениях различаются участки поверхностей с изменяющимся профилем.

Метод растровой электронной микроскопии широко используется при контроле структурно-морфологических характеристик кристаллов ИМС. На рисунках 39, 40 показана поверхность кристалла ИМС после различных технологических операций. Для получения изображения вертикального сечения пленочной структуры изготавливают образцы – сколы кристалла, которые подвергают избирательному травлению. На рисунках 41, 42 показаны фрагменты кристаллов ИМС.

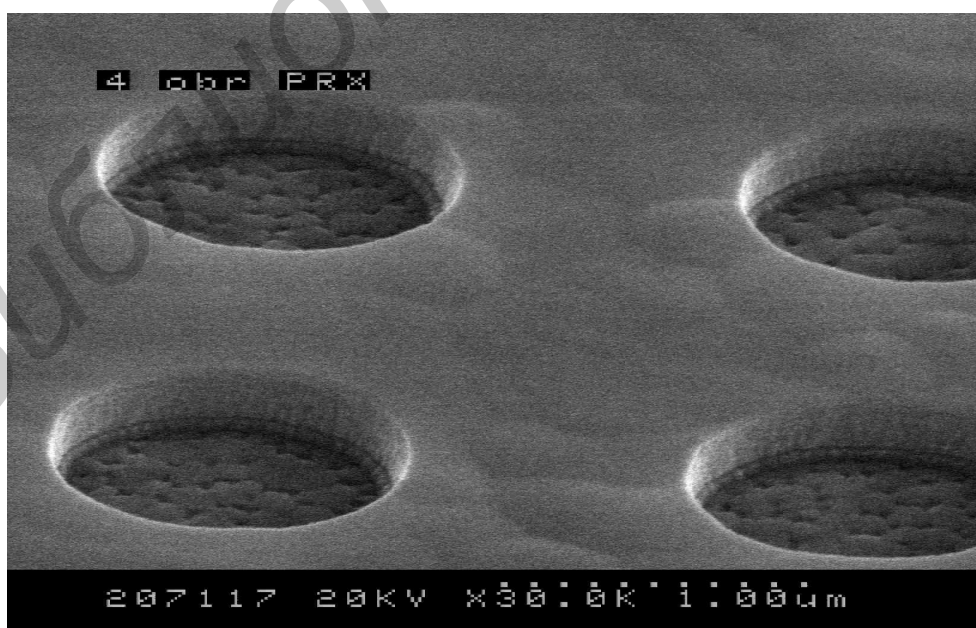


Рисунок 39 – Поверхность кристалла ИМС после травления контактных окон

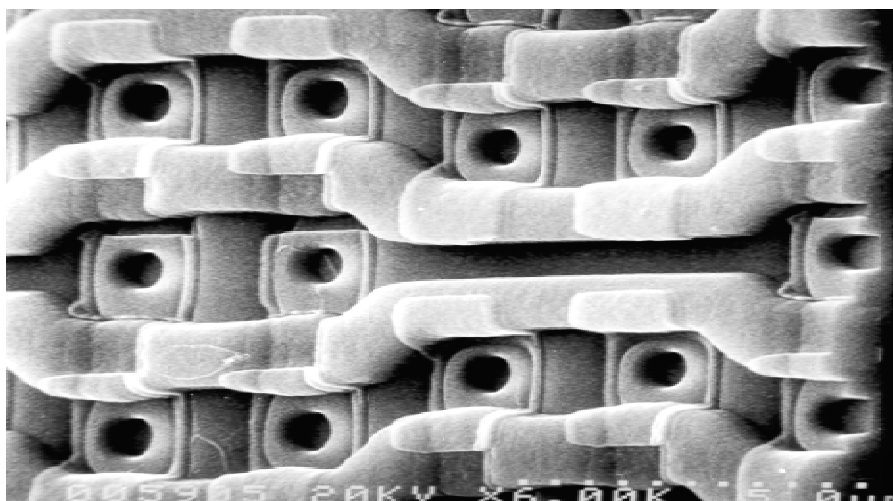


Рисунок 40 – Поверхность кристалла ИМС ДОЗУ

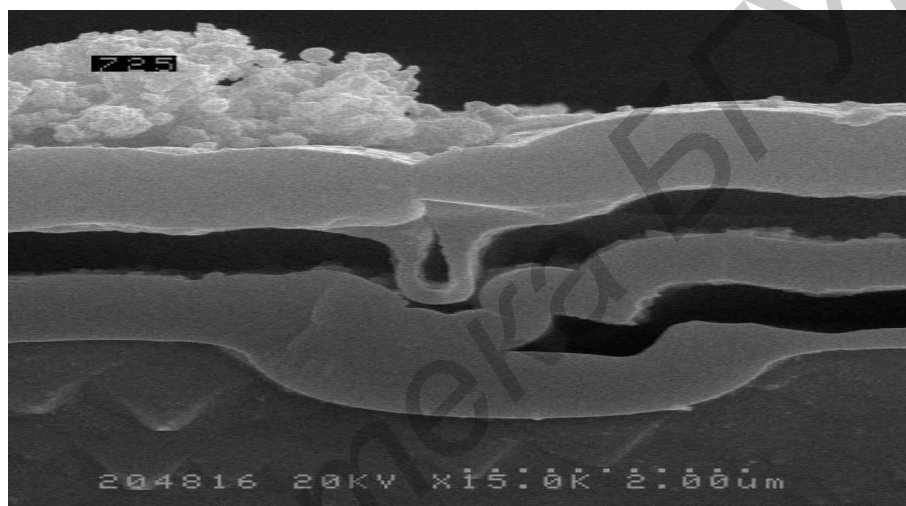


Рисунок 41 – Дефект металлизации ИМС

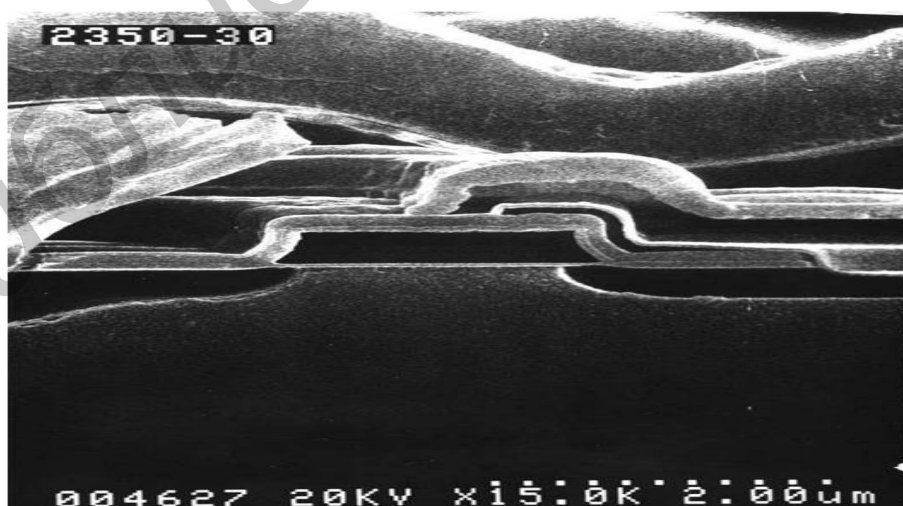


Рисунок 42 – Фрагмент кристалла с МОП-структурой

2.3 Оже-электронная спектроскопия

Оже-электронная спектроскопия – метод, основанный на анализе электронов определенного вида, называемых оже-электронами, которые возбуждаются при облучении поверхности образца электронным пучком. Оже-электроны возбуждаются в результате ионизации внутренних электронных оболочек атомов. Как показано на рисунке 43, падающий электрон, обладающий достаточной энергией, способен выбить электрон с K -оболочки атома облучаемого вещества (в данном случае подразумевается, что это вещество кремний), а образующаяся вакансия заполняется другим электроном, осуществляется так называемый оже-переход. В результате этого перехода освобождается энергия, которая передается другому электрону (на L_2). Этот электрон выходит в вакуум и регистрируется как оже-электрон. Энергия оже-электронов является характеристикой материала мишени и не зависит от энергии падающего пучка. Таким образом, с помощью метода оже-электронной спектроскопии можно обнаруживать и анализировать такие легирующие примеси в кремнии, как мышьяк, фосфор, бор, а также кислород, углерод, следы резиста, различные компоненты металлизации.

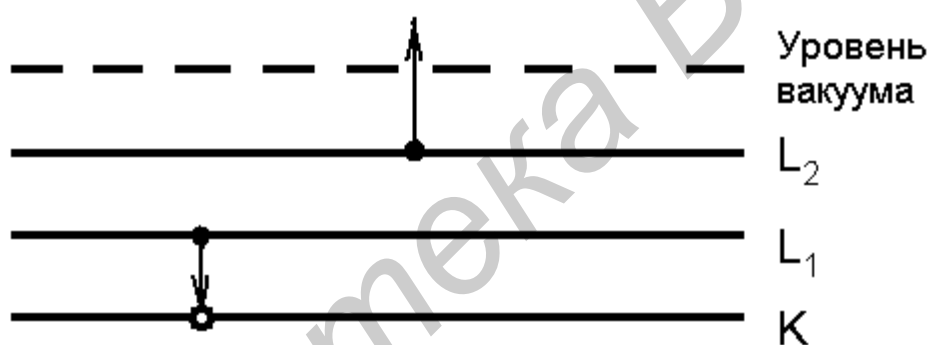
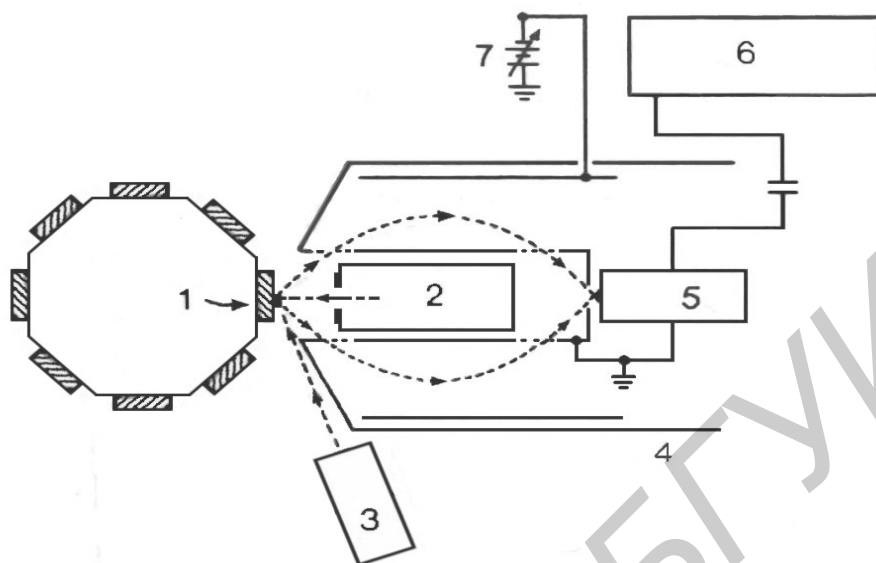


Рисунок 43 – Схематическое представление процессов оже-перехода

Первичный электронный пучок, энергия которого обычно лежит в интервале от 2 до 10 кэВ, проникает в образец на малую глубину. Большинство оже-электронов имеют энергию 20–2000 эВ и занимают в электронном спектре промежуточное положение между пиками электронов низкой энергии (вторичных электронов) и высокой энергии (отраженных электронов). Глубина выхода оже-электронов, как правило, меньше 5 нм и уменьшается при понижении энергии перехода. Поэтому данные оже-электронной спектроскопии позволяют анализировать элементный состав поверхностной области. На рисунке 44 показана схема оже-электронного спектрометра.

При использовании оже-электронной спектроскопии для решения некоторых диагностических проблем необходимо проводить химический анализ слоев, глубина залегания которых превышает глубину выхода. С этой целью выполняют послойное ионно-плазменное травление поверхности. Анализ химического состава в этом случае проводится либо поэтапно после стравливания слоев заданной толщины, либо непрерывно в процессе травления. При этом строят график зависимости высоты

пиков спектра оже-электронов от времени травления или толщины стравленного слоя. Таким образом, анализируется профиль распределения исследуемых элементов по глубине (рисунок 45).



1 – мишень; 2 – электронная пушка; 3 – пушка для ионного распыления;
4 – магнитная защита; 5 – детектор электронов; 6 – накопитель данных;
7 – управление разверткой

Рисунок 44 – Схема оже-электронного спектрометра

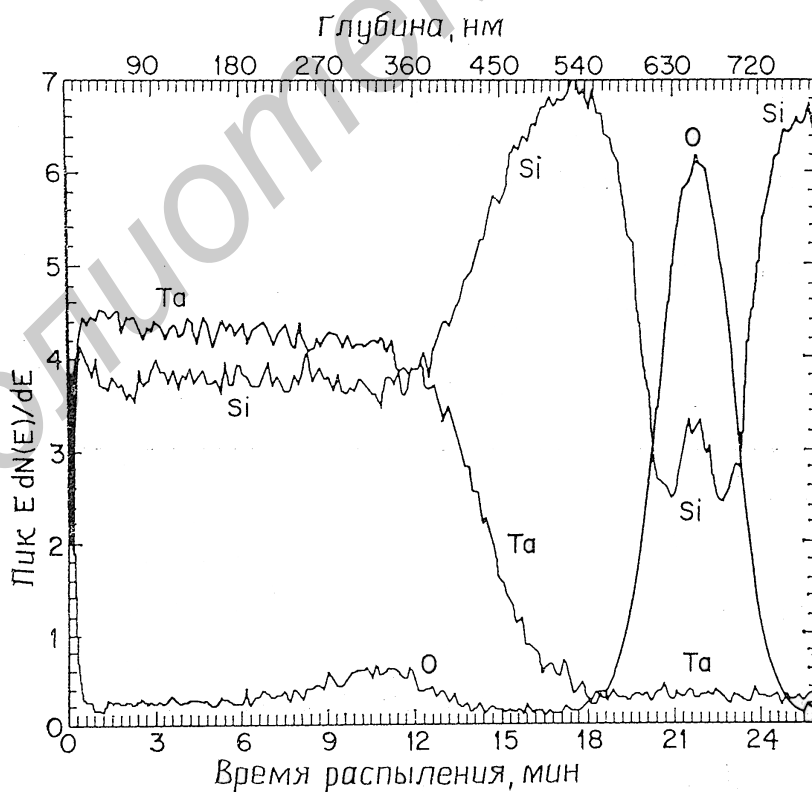


Рисунок 45 – Профиль распределения элементов по глубине в структуре $TaSi_x$ -polySi-SiO₂-Si

2.4 Вторичная ионная масс-спектропия

В методе вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС) материал с поверхности образца распыляется ионным пучком. Образующиеся при распылении ионные компоненты регистрируются и анализируются по массе (рисунок 46). Источник ионов формирует ионный пучок, который разворачивается в растр на поверхности образца и распыляет материал с этой поверхности. Ионизированные компоненты распыленного вещества анализируются по массе, и результаты анализа отображаются в виде силы тока вторичного ионного пучка в зависимости от массы иона или двумерного изображения распределения вторичного пучка по массе ионов. Проведение анализа методом ВИМС в сочетании с ионно-плазменным травлением поверхности позволяет регистрировать профили распределения примеси по глубине образца.

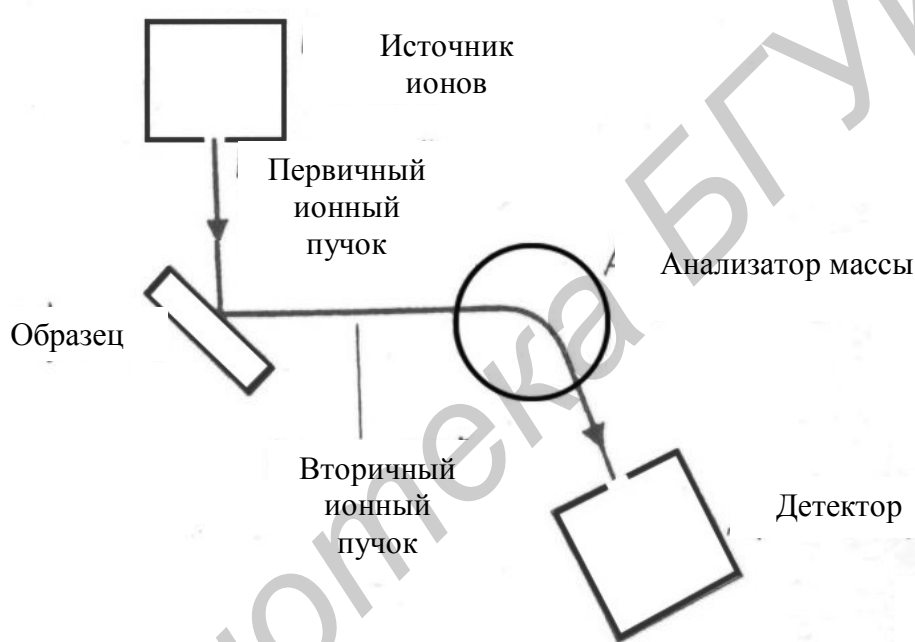
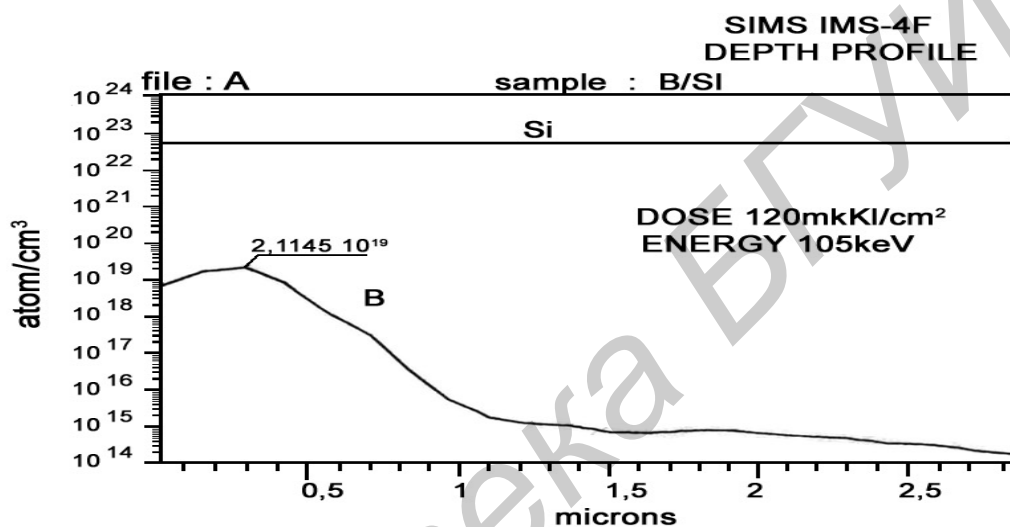


Рисунок 46 – Схема масс-спектрометра вторичных ионов

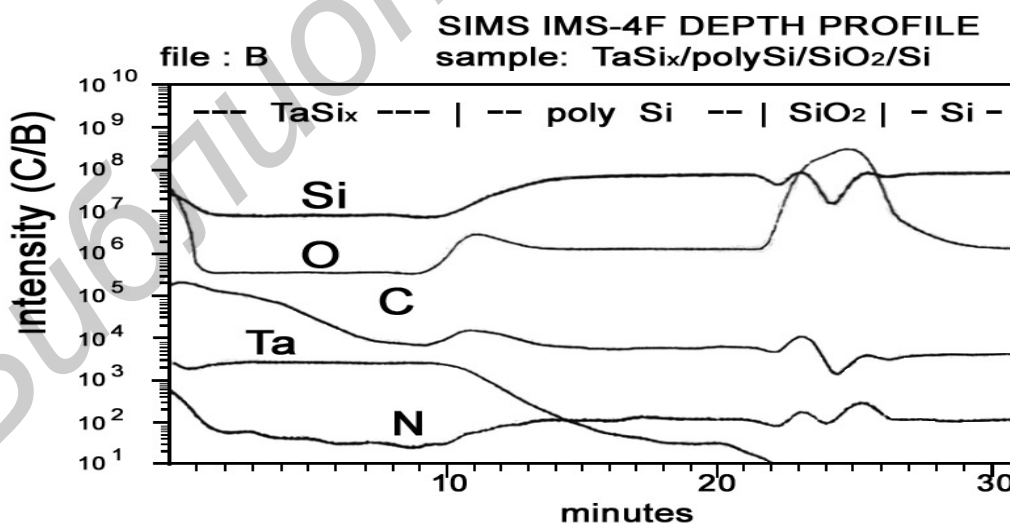
Применяются как положительно, так и отрицательно заряженные ионы с энергией 5–15 кэВ. Поскольку только ионизированные компоненты распыляемого материала анализируются методом ВИМС, используются ионные пучки, позволяющие получить максимальный выход (вторичную эмиссию) ионов исследуемых химических элементов. Обычно применяются первичные пучки положительных ионов цезия, обеспечивающие высокий выход отрицательных ионов электроотрицательных компонентов мишени, и пучки ионов O_2^+ , обеспечивающие высокий выход ионов электроположительных компонентов.

Первичный пучок разворачивается в растр на участке поверхности образца небольшой площади, в результате чего образуется воронка с почти плоским дном. Масс-спектроскопическому анализу подвергаются лишь ионизированные компоненты материала, испаряемого с центральной области дна воронки. Ис-

пользование очень малых токов первичного пучка позволяет достичь скоростей распыления достаточно низких для обеспечения получения информации с нескольких атомных монослоев, что позволяет проводить химический анализ поверхности образца. Для исследования профилей распределения примесей по глубине образца применяют первичные пучки с более высокими токами. Разрешение в плоскости определяется типом используемой ионной оптики. Повышение разрешения достигается за счет уменьшения чувствительности анализа. При исследованиях методом ВИМС можно обеспечить разрешение в плоскости до 0,5 мкм, что позволяет анализировать отдельные топологические элементы ИМС. На рисунке 47 показаны профили распределения элементов по глубине образцов.



a



б

Рисунок 47 – Профили легирования ионов бора в кремнии (а) и распределения элементов в структуре TaSi_x-polySi-SiO₂-Si (б)

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Зи, С. Технология СБИС. В 2 т. / С. Зи. – М. : Мир, 1986.
- 2 Физические измерения в микроэлектронике / В. А. Пилипенко [и др.]. – Минск : БГУ, 2003. – 171 с.
- 3 Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М. : Техносфера, 2006. – 378 с.
- 4 Рындин, Е. А. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование / Е. А. Рындин, Б. Г. Коноплев. – Таганрог, 2001. – 146 с.
- 5 Синдо, Д. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для материаловедения / Д. Синдо, Т. Оикава. – М. : Техносфера, 2005. – 260 с.
- 6 Пул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М. : Техносфера, 2005. – 286 с.
- 7 Campbell, S. The science and engineering of microelectronic fabrication / S. Campbell. – New York : Oxford university press, 2001. – 603 p.
- 8 Rabaey, J. Digital Integrated Circuits: a Design Perspective / J. Rabaey, A. Chandrakasan, B. Nikolic. – second edition – New York : Prentice Hall, 2003. – 747 p.
- 9 Handbook of nanoscience, engineering, and technology / W. A. Goddard. – New York : CRC Press, 2003. – 709 p.
- 10 Bhushan, B. Handbook of nanotechnology / B. Bhushan. – Berlin : Springer-Verlag, 2004. – 1222 p.

Учебное издание

Котов Дмитрий Анатольевич
Черных Александр Георгиевич

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И АНАЛИЗА В ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Е. Н. Батурчик*
Корректор *Л. А. Шичко*
Компьютерная верстка *Е. Г. Бабичева*

Подписано в печать 14.09.2010. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 2,91. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 100 экз. Заказ 220.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6