

УДК 537.533

Локальные методы диагностики и оборудование для контроля за технологическими процессами изготовления приборов ИК-техники

Б. Н. Васичев

Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет),
Москва, Россия

А. М. Филачев, В. П. Пономаренко, Г. И. Фатьянова

Федеральное государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"» — ГНЦ РФ, Москва, Россия

Рассмотрены основные методы анализа на отказ и работоспособность полупроводниковых ИК-структур и электронно-лучевое оборудование, адаптированное для работы в технологических линиях.

Электронно-ионно-лучевые методы и оборудование обладают рядом достоинств, которые дают возможность улучшить основной показатель производства — выход годных изделий ИК-техники, т. е. повысить эффективность производства и за счет бесконтактной диагностики и коррекции технологических операций на его промежуточных стадиях, повысить надежность

приборов микрофотоэлектроники. Бесконтактный контроль функциональных показателей позволяет на ранних стадиях выявлять брак и исправлять погрешности производства или исключать из производственного цикла изделия с отклонениями от технологических требований. Оперативный контроль за качеством выполняемого технологического процесса дает возмож-

ность вносить коррекцию в технологический процесс, не прерывая его. Для выполнения таких операций используются специализированные устройства, легко перестраиваемые на различные виды контрольно-аналитических операций, адаптированные к условиям производства. Такое оборудование и физические методы контроля создаются специально для применения их в жестких технологических рамках. Электронно-ионно-лучевое оборудование давно используется и в самом технологическом процессе для осуществления ряда операций, например таких как электронная литография на больших площадях с большой глубиной резкости и высокой разрешающей способностью, ионное легирование, автоматизированная микросварка выводов к контактными площадкам, испарительное осаждение тонких пленок, ионно-плазменная очистка, травление и многие другие операции.

Основными показателями такого оборудования являются производительность, эффективность технологической операции, показатель уровня привносимой дефектности, влияние на цикличность производства, увеличение выхода годных изделий за счет использования этого оборудования.

Электронно-лучевые методы и специализированные электронно-зондовые системы с точечным принципом формирования электронных изображений на базе растровых электронных микроскопов обладают большими информационными возможностями, чем традиционные просвечивающие электронные микроскопы и тем более оптические микроскопы. Электронно-зондовые системы и наличие детекторов, регистрирующих различные по своей природе сигналы, позволяют извлечь богатейшую информацию об объекте. Кроме того, они обладают большой глубиной фокуса (на 2—3 порядка выше, чем у светового микроскопа). В сочетании с хорошей наглядностью изображения во вторичных электронах эта уникальная способность электронно-зондовых систем сделала их незаменимыми при исследованиях массивных объектов с ярко выраженным рельефом поверхности.

Интерес к электронно-зондовому оборудованию вызван прежде всего тем, что оно позволяет:

осуществлять бесконтактный контроль микроструктур и электрофизических параметров;

осуществлять контроль на промежуточных стадиях изготовления изделий, когда он невозможен другими средствами;

сокращать производственные затраты за счет оперативного вмешательства в процесс и исправлять возникающие отклонения;

повышать надежность изделий ИК-техники;

повышать выход годных изделий;

осуществлять контроль изделий с глубоким рельефом поверхности за счет большой глубины резкости;

обнаруживать неоднородности, включения, дефекты малых размеров за счет большого увеличения;

иметь высокую разрешающую способность.

В растровом режиме формирования изображения поверхности контролируемого объекта возможно:

наблюдать морфологию поверхностного слоя подложки или изделия на всех промежуточных стадиях его изготовления;

наблюдать контраст магнитных и электрических микрополей, возникающих над поверхностью полупроводникового объекта, и следить за их перемещениями при функционировании полупроводникового прибора. Появилась возможность наблюдать распределение потенциалов, а также измерять локальные потенциалы при исследовании объектов полупроводниковой микроэлектроники;

контролировать кристаллическое строение материала, распределение примесных атомов, качество и чистоту поверхности, сплошность пленок, качество трехмерных структур;

проверять многоэлементные структуры на однородность;

контролировать распределения потенциалов; осуществлять контроль электрофизических параметров изделий.

Проникновение электронно-микроскопических методов исследования, в частности растровой электронной микроскопии, в различные области науки и техники привело к созданию количественных методов электронно-лучевого контроля вещества и выявлению дефектов микроструктур на промежуточных стадиях изготовления изделий микроэлектроники.

В последние годы одним из актуальных направлений в контроле полупроводниковых структур становится прицельное электронно-зондовое и фото- и экзоэмиссионные исследования.

По зарубежным данным, доля участия средств стандартной электронной микроскопии на различных стадиях разработки и изготовления микроэлектронных приборов составляет 25—70 %. Это обстоятельство привело к появлению на мировом рынке отдельных растровых электронных микроскопов, предназначенных для решения задач микроэлектроники и выпускаемых в США, Японии, Англии, Германии, Франции и Голландии. В связи с указанной тенденцией возрос объем методических исследований и производственного контроля в этой области, отражающий разнообразие создаваемых микроэлектронных приборов.

Однако установок, специализированных для использования в технологическом процессе изготовления приборов микрофотоэлектроники, нет.

Все это говорит о необходимости целенаправленного создания специализированного электронно-лучевого оборудования с многофункциональной системой регистрации сигнала наведенного тока и ЭДС, а также фото- и экзоэмиссии, способного функционировать с учетом специфики технологических условий производства и исследования полупроводниковых устройств ИК-техники.

При изготовлении структур с заданным изменением состава и электрических свойств меняются и требования ко всем методам измерения различных свойств приборов ИК-техники, особенно к методам измерения параметров в локальных областях. Например, нижний предел измерения концентрации примеси составляет 10^{12} ат/см³, относительная точность измерения градиентов напряженности 10^{-6} - 10^{-7} , при этом расстояние их друг от друга не более 10 нм (шаг измерения).

Разработаны разнообразные методы исследования микроструктур, электро-физических и других локальных параметров полупроводниковых материалов, структур и приборов микрофотоэлектроники. Локальность в большинстве случаев определяется свойствами установки и редко бывает изотропной. Пределы чувствительности любого метода обусловлены квантовыми пределами.

Методы локальной диагностики полупроводниковых материалов изделий ИК-техники

Метод наведенного тока (НТ) на базе растровой электронной микроскопии является одним из наиболее эффективных методов получения как качественной, так и количественной информации о составе и электрофизических свойствах полупроводниковых структур в локализованных участках объекта. С помощью этого метода можно визуально наблюдать местонахождение *p-n*-переходов, оценивать профиль области пространственного заряда, выявлять различные дефекты в области *p-n*-перехода, а также проводить измерения параметров, таких как диффузионная длина и время жизни неосновных носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации и т. д.

Однако имеющиеся растровые электронные микроскопы (РЭМ) не позволяют в полной мере реализовать возможности метода наведенного тока.

На сегодня существует большое количество РЭМ и других электронных микроскопов, которые используются в научных исследованиях. Некоторые из них приспособлены для исследования полупроводниковых объектов и больших кремниевых пластин. С их помощью получен огромный научный материал. Их используют в широких масштабах при производстве изделий микрофотоэлектроники, но для оперативного контроля за качеством технологических процессов — весьма ограничено. Это ограничение является следствием того, что они не адаптированы к условиям технологических процессов и часто представляют собой разрушающие методы контроля. Большинство электронных микроскопов предназначено для общенаучных исследований и не адаптировано к выполнению частных, но очень важных задач контроля в процессе изготовления изделий ИК-техники. Для решения таких задач необходимо специализированное электронно-зондовое оборудование, адаптированное к условиям работы непосредственно в цеховых условиях.

При создании специализированных электронно- и ионно-лучевых установок учитывают специфику исследования и диагностики приборов микрофотоэлектроники, связанные с необходимостью подачи напряжения на отдельные элементы fotocувствительных приборов в режимах, близких к рабочим, со съемом сигнала; с вероятностью возникновения микроплазменных пробоев в зоне *p-n*-переходов; влиянием потока электронов электронного зонда; влиянием температуры и другими особенностями этого класса объектов.

Развитие различных методик исследования и разнообразие объектов привели к созданию специализированных электронных микроскопов. Отечественная промышленность в настоящее время не производит специализированных электронно-зондовых устройств для исследования и диагностики полупроводниковых приборов. Отсутствует производство специализированного оборудования для промышленного использования в технологических линиях.

Полупроводниковые объекты микрофотоэлектроники имеют специфические особенности, накладывающие особые требования на оборудование при исследовании и диагностике fotocувствительных элементов электронно-зондовым методом.

Для анализа свойств и характеристик *p-n*-переходов, а также некоторых параметров полупроводниковых материалов часто применяется метод индуцированного, или НТ. С его помощью можно визуально наблюдать местонахождение *p-n*-перехода, оценивать профиль

области пространственного заряда, выявлять различные эффекты и дислокации в области $p-n$ -перехода, а также измерять такие параметры, как диффузионная длина и время жизни неосновных носителей, скорость поверхностной рекомбинации, энергия образования электронно-дырочных пар.

Под действием первичных электронов зонда из-за ионизации атомов полупроводника в его объеме образуются электронно-дырочные пары. В результате разделения избыточных носителей в цепи, подключенной к образцу (эта цепь также называется короткозамкнутой), появляется электрический ток. Индуцированный ток, измеряемый в короткозамкнутой цепи, усиливается и используется для моделирования напряжения, приложенного к управляющему электроду электронно-лучевой трубки видеоконтрольного устройства.

Рассмотрим некоторые случаи использования метода НТ для исследования различных полупроводниковых структур, а также схемы "короткозамкнутых" цепей для измерения НТ в этих случаях.

Если в кристалле нет встроенных энергетических барьеров, то генерированные электронным зондом неравновесные носители разделяются внешним критическим полем, создаваемым источником напряжения.

Если величина электрического поля, приложенного к образцу, меньше критической, то НТ формируется в основном за счет процесса диффузии носителей. Этот процесс практически изотропен, и регистрируемый сигнал постоянен, за исключением областей вблизи электродов.

Если приложенное поле больше критического, то процесс становится более анизотропным. По полученным значениям НТ строятся зависимости, по которым легко определить диффузионную длину и время жизни неосновных носителей.

При необходимости подавить постоянную составляющую тока, протекающего через образец, измеряемый сигнал подается на вход усилителя через разделительный конденсатор, однако при этом могут возникнуть неоднородности, вызванные изменением локальной проводимости.

Наиболее важной является оценка на надежность $p-n$ -перехода. В этом случае регистрируемым сигналом является ток, разделенный $p-n$ -переходом неосновных носителей.

При облучении полупроводников электромагнитными или карпускулярными пучками изменяется его электропроводность, возникают электродвижущие силы (ЭДС). Общая причина их возникновения заключается в диффузии генерированных электронов и дырок. Диффунди-

руя от места своего возникновения, неравновесные носители заряда создают направленные потоки, что эквивалентно появлению сил некулоновского происхождения, характеризующихся вентильной ЭДС. Физическая причина возникновения вентильной ЭДС заключается в том, что потенциальный барьер $p-n$ -перехода разделяет потоки электронов и дырок.

Индуцированная (наведенная) электронным пучком ЭДС подобна хорошо известной фото-ЭДС (облучение образца электронным пучком подобно экспозиции его видимым светом). Если освещается n -область, то при разомкнутой цепи основные носители-электроны не успевают рекомбинировать на поверхности и в объеме, и достигшие $p-n$ -перехода не пройдут в p -область, так как для них существует потенциальный барьер. Для неосновных носителей — дырок потенциального барьера нет, и все достигшие перехода дырки будут затягиваться полем, создавая ток дрейфа, в результате которого p -область будет заряжаться положительно, а n -область — отрицательно. Ток насыщения зависит от скорости тепловой генерации неосновных носителей в объеме и в результате облучения. Дрейфовый ток и индуцированная ЭДС увеличиваются с ростом поглощаемой мощности электронного пучка, но не более, чем до контактной разности потенциалов между p -и n -областями.

Максимального значения ток достигает в момент попадания пучка в центр обедненной зоны. Когда пучок проходит за переход, все меньше носителей заряда будет разделяться, и величина тока уменьшится. Таким образом, сигнал во внешней цепи определенным образом зависит от расстояния от области попадания пучка на поверхность полупроводника до середины $p-n$ -перехода.

При постоянном токе имеет место динамическое равновесие образованных электронным пучком носителей заряда в данной точке.

Так как сигнал является функцией внутреннего электрического поля, то он представляет собой характеристику реально функционирующего $p-n$ -перехода, а не границы распределения материалов с различным типом проводимости.

Очевидно, что значение результирующего сигнала зависит от ширины и глубины перехода, от атомных номеров веществ, находящихся под и над переходом, от времени жизни и диффузионной длины неосновных носителей в этих веществах.

В зависимости от величины тока утечки на переходе по отношению к среднему значению индуцированного тока для детектирования используются различные схемы внешних цепей.

При исследовании электронным пучком структур металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) вблизи границы диэлектрик—полупроводник внешним смещением индуцируется инверсный слой. Поле этого слоя разделяют носители, которые генерируются в полупроводнике первичными электронами зонда, прошедшими через металлический электрод и окисел SiO_2 . Ток, наведенный первичными электронами пучка, может быть измерен между металлом и полупроводником при наличии в окисле электрического поля (обычно соответствующего разности потенциалов между металлом и полупроводником). Измеряемый ток соответствует току поля и зависит от числа носителей, генерированных в окисле.

Применение метода НТ для анализа приборов, созданных по МДП-технологии, требует учета ряда их особенностей. Для предотвращения зарядки диэлектрического слоя и деградации структуры при работе на больших токах пучка (это связано с получением приемлемого соотношения сигнал/шум) необходимо стробирование электронного пучка.

Другая особенность применения метода НТ для анализа МДП-структур связана с тем, что граница раздела диэлектрик—полупроводник является блокирующим контактом, что приводит к дифференцированию сигнала и как результат — к зависимости контраста в режиме НТ от скорости сканирования и градиента изменений электронных свойств по поверхности. Отсутствие инжекционного тока из подложки через этот барьер резко ограничивает возможность получения информации о локальных электрофизических свойствах подложки и дает возможность получить только качественные данные о локальной структуре и свойствах полупроводниковой подложки МДП-структур. Однако применение модуляции по интенсивности электронного зонда приводит к переменному НТ в полупроводниковой подложке МДП-структур и позволяет детектировать вклад в сигнал полупроводника.

Все детекторы, влияющие на генерацию и рекомбинацию носителей, а также на их диффузию независимо от того, с полем или без поля проводник, приводят к формированию контраста.

Факторы, влияющие на контраст изображения при контроле полупроводника: локальное увеличение рекомбинации поверхностных носителей индуцирует рекомбинацию носителей диффундирующих к переходу, что приводит к локальному уменьшению сигнала; локализованные дефекты (микротрещины, нагар, выделения) могут вызвать изменение сигнала за счет рекомбинации и изменения коэффициента обратного

рассеяния электронов; сетка дислокаций, образовавшаяся, например, при планарной диффузии, вызывает локальные изменения уровня рекомбинации, тогда как нагромождение дислокаций, возникшее в результате аномальной диффузии, приводит к изменению глубины перехода; ловушки могут располагаться в самой зоне пространственного заряда.

Распределение легирующих примесей и определение мест аномально высокого или низкого легирования является важной характеристикой, влияющей на функционирование полупроводниковых приборов.

В настоящее время широкое распространение получили методы интегрального определения концентрации носителей в полупроводниковых приборах, основанные на измерении его вольтафарадных характеристик и эффекте Холла. Однако эти методы дают интегральную оценку уровня легирования, но не способны оценить локальные вариации уровня легирования и диффузионной длины. В связи с этим хорошим дополнением к ним могут служить методы исследования образцов с использованием режима НТ, которые, хотя и не дают численных значений, способны быстро давать качественные картины распределения легирующих примесей, определять места аномально высокого или низкого легирования.

В основе методик анализа распределения легирующих примесей методами НТ лежит тот факт, что ширина обедненной зоны в полупроводнике зависит от концентрации свободных носителей заряда (уровня легирования).

В свою очередь сигнал НТ определяется эффективностью сбора носителей заряда, которая сильно зависит от ширины обедненного слоя.

При попадании электронного луча на поверхность образца часть электронно-дырочных пар генерируется в обедненном слое, возникающем на границе металл—полупроводник, и практически без рекомбинации дрейфуют в поле барьера к контактам. Другая часть электронно-дырочных пар рождается за пределами обедненной зоны и достигает ее в процессе диффузии. Очевидно, что на этот процесс оказывает влияние рекомбинация носителей, которая уменьшает количество электронно-дырочных пар, достигших обедненного слоя. Величина диффузионной компоненты НТ характеризуется длиной диффузии. Таким образом, сигнал наведенного тока состоит из двух компонент: дрейфовой (определяется шириной обедненного слоя); диффузионной (определяется длиной диффузии неосновных носителей).

Методика построения профилей легирования основана на различии механизмов формирова-

ния контраста в НТ в зависимости от уровня легирования и диффузионной длины неосновных носителей.

При низком уровне легирования ширина обедненной зоны очень чувствительна к изменениям его уровня. Вклад диффузионной компоненты в НТ пренебрежимо мал, так как все пары носителей, родившиеся вне обедненной зоны, рекомбинируют, не успевая его достичь. Поэтому контраст изображения определяется в основном дрейфовой составляющей, т. е. флуктуацией легирующей примеси.

В области, характеризующейся очень высоким уровнем легирования, обедненный слой очень тонок, и его размеры изменяются незначительно с изменением уровня легирования. Здесь контраст изображения обусловлен пунктуациями диффузионной длины.

Пространственное разрешение при низких уровнях легирования определяется размерами области генерации пар носителей, т. е. практически размерами первичного пучка. При высоком уровне легирования разрешение имеет порядок диффузионной длины неосновных носителей.

Таким образом, методика применима в области низких уровней легирования $10^{13} \div 10^{17}$ ат/см³. Она базируется на ряде следующих предположений: размеры контакта Шоттки много больше диффузионной длины; толщина образца много больше диффузионной длины; генерация носителей осуществляется по закону Гаусса, и все носители, образовавшиеся в обедненной зоне, собираются барьером Шоттки. Контраст изображения в НТ зависит также от соотношения между шириной обедненной зоны и длиной свободного пробега электрона первичного пучка.

В зависимости от глубины проникновения электронов первичного пучка (эффективной длиной пробега $R_{эф}$) определяются три механизма формирования контраста. В случае, когда $R_{эф} > W$ (W — внутренний квантовый выход рекомбинационного излучения), контраст определяется распределением легирующей примеси, т. е. при сравнимых значениях ширины обедненной зоны и длины пролета электронов эффективность сбора носителей постоянна и контраст исчезает. Если $R_{эф} < W$, эффективность сбора носителей максимальна и не зависит от ширины обедненной зоны. Однако при высокой интенсивности первичного пучка (высокий уровень инжекции) контраст снова появится, правда, в инвертируемом виде и наибольшей амплитуде НТ соответствует концентрация примеси.

Таким образом, метод НТ дает возможность получать профили распределения примеси в слабо легированных материалах, для которых

классические методы распределенного сопротивления и травления не чувствительны; получать профили распределения примесей в сильно легированных образцах с высоким пространственным разрешением.

К недостаткам перечисленных методик можно отнести: невозможность получения точных численных значений; специальный вид образца; сложную процедуру подготовки материалов для исследования.

Разработаны относительно новые методы исследования полупроводниковых приборов в РЭМ: метод индукционно-зарядовой ЭДС [1], в котором регистрируется изменение емкости на небольшом электроде, располагаемом над объектом исследования.

Методом регистрации СВЧ-сигнала в резонаторе с щелью, над которой расположен зондируемый пучком электронов объект [2], можно визуализировать и исследовать разнообразные дефекты в полупроводниковых материалах и приборах.

По данным исследований, разрешающую способность РЭМ при очень малых ускоряющих напряжениях можно довести до единиц и даже долей нанометра. Так, при 5 кВ она составляет 0,5 нм [3], при 2,5 эВ — 5 нм [4]. Реальное разрешение, как было указано выше, зависит от размеров области генерации вторичных электронов.

Получил широкое применение метод микрофотографии для изучения внутренней структуры, свойств микрообъектов, в частности, в РЭМ [5].

Используется РЭМ для изучения распределения потенциалов над полупроводниковыми приборами. Локальный минимальный потенциал, который может быть зафиксирован в РЭМ, — до 1 мВ.

Метод растровой электронной термоакустической микроскопии (РЭТАМ) разработан еще в 80-х годах прошлого века. Пучок первичных электронов модулируется по плотности или во времени. Он генерирует в объекте исследования быстро затухающие тепловые волны, которые в свою очередь, возбуждают акустические волны, которые переносят информацию о дефектах в приповерхностной области объекта через весь его объем и регистрируются пьезодатчиком на тыльной стороне [6, 7]. Разрешающая способность этого метода определяется в основном характерной длиной затухания тепловой волны, т. е. величиной порядка единиц десятков мкм, а не длиной акустической волны, величина которой составляет миллиметры.

РЭТАМ применяется для исследования полупроводниковых приборов и микросхем для обнаружения таких дефектов, как микротрещины,

дефекты диффузии, нарушение микроструктуры, электрически активные неоднородности $p-n$ переходов и др.

Известный метод Оже-спектроскопии [8] обладает невысокой чувствительностью (на уровне 0,1–1,0 %), что связано с малым (порядка 10^{-2} – 10^{-3} %) коэффициентом преобразования энергии падающих на образец электронов в потоке Оже-электронов. Повышение чувствительности связано с увеличением дозы облучения и ограничено допустимой величиной радиационной нагрузки на испытуемый образец (объект). Формирование видеосигналов — это сложный физический процесс. Разрешающая способность, локальность метода и его чувствительность зависят не только от свойств и размеров зонда, но и от параметров самого анализируемого объекта.

Метод локальной катодоллюминесценции в растровом электронном микроскопе [9], например в РЭМ-50-01, также определяется, главным образом, не размерами электронного зонда и даже не "размывающим" действием диффузии неравновесных носителей заряда, обеспечивающих излучательную рекомбинацию, а скоростью поверхностной рекомбинации и степенью поглощения излучения в объекте исследования.

Другим, не менее эффективным, методом является рентгеновский микроанализ с помощью тонкофокусированного электронного зонда. Применяя специальные методы регистрации рентгеновского излучения, удается с высокой точностью определять элементный состав гетерогенных образцов, на срезах и вблизи фазовых границ. Это удается благодаря разработке метода [10] и аппаратуры [11], обеспечивающих регистрацию характеристического рентгеновского излучения в двух взаимно противоположных направлениях в любом азимутальном направлении по отношению к точке анализа. Такой метод и аппаратное его обеспечение не применяются до сих пор другими фирмами. Это наше ноу-хау. Чувствительность метода 10^{-9} % в объеме 100 мкм^3 . Абсолютная чувствительность составляет 10^{-17} – 10^{-18} г. Локальность колеблется от 1 мкм до сотен мкм и зависит как от ускоряющего напряжения, так и от атомного номера атомов в зоне облучения для массивных образцов из-за больших размеров области генерации рентгеновских квантов, но для тонкопленочных образцов может быть доведена до десятков нм [12, 13].

Метод отражательной электронной микроскопии позволяет исследовать объект под малым углом скольжения электронного пучка к поверхности. Этот метод используется уже более 60 лет [14]. Методом растровой отражательной мик-

роскопии получены изображения моноатомных ступенек эпитаксиальных пленок [15].

Метод спектроскопии характеристических потерь энергии электронов представляет собой анализ спектров потерь энергии электронов, прошедших через тонкий образец в просвечивающем или растровом электронном микроскопе [13, 16]. Метод позволяет определять массу до 10^{-17} – 10^{-20} г, обнаруживать наличие химических элементов с атомным номером более 3 и концентрациями до 10^{-9} % в микрообъемах с размерами менее 100 мкм.

Фотоэмиссионный и экзоэмиссионные методы контроля позволяют при слабом воздействии на испытуемый образец квантами света контролировать чистоту и однородность поверхности объектов контроля. Воздействие квантов излучения на объект исследования вследствие их малой энергии (5 эВ) значительно слабее, нежели используемых для контроля за качеством поверхности квантов рентгеновского излучения или электронных пучков (обычный диапазон энергий 0,1–50 кэВ). Объект облучается квантами, энергия которых меньше работы выхода исследуемого материала. Вследствие этого эмиссия на основной части поверхности отсутствует, и становятся заметными центры фотоэмиссии, связанные с различными локальными дефектами объекта, в результате чего образуются дополнительные локальные уровни, обеспечивающие выход фотоэлектронов.

Метод обладает высокими поперечным (пространственным, 0,1 мкм) и продольным (по глубине, 1–5 нм) разрешениями. Чувствительность его составляет доли атомного слоя чужеродных атомов на поверхности. Метод позволяет обнаруживать адсорбированные и окисленные слои с эффективной толщиной до 0,01 монослоя.

Исследования применимости метода в технологическом процессе изготовления микрофотоприемников показали, что квантовый выход фотоэлектронов с поверхности значительно отличается после таких технологических операций, как нанесение фоторезиста, удаление фоторезиста, химическая обработка поверхности, ионно-плазменное травление, окисление и др. Изображение эпитаксиальных слоев в фотоэлектронах демонстрирует резкую неоднородность состава слоя по поверхности, вызванную структурными дефектами с размерами 1,0–10,0 мкм. Это делает возможными визуализацию и объективный контроль результатов ионной очистки, так же как визуализацию гетерограниц в эпитаксиальных гетероструктурах, что позволяет оптимизировать технологические процессы. Метод позволяет наблюдать контраст между p - и n -областями, обнаруживать дефекты материала

(включений и структурных дефектов) размером до 1 мкм, выполнять качественный и полуколичественный анализы состава твердых растворов на основе A^3B^5 и A^2B^6 , выявлять области однородного состава. Метод фотоэмиссионного контроля является неразрушающим, что дает возможность производить технологический контроль структур на различных стадиях процесса их изготовления. Метод резерфордовского обратного рассеяния ионов [17] больших энергий (порядка 1 МэВ) обеспечивает разрешение (локальность) по глубине зондируемого образца до 10 нм, при этом первичный пучок ионов имеет диаметр 1 мм, т. е. величина разрешения по поверхности того же порядка. Созданы устройства с меньшим диаметром пучка (доли мкм).

Метод нейтронной микроскопии основан на использовании пучков ультрахолодных (скорость порядка нескольких м/с) нейтронов. Его разрешающая способность около 50 мкм. Предложен проект прибора с разрешением 0,3 мкм [18].

Метод позитронной микроскопии основан на принципе замедления позитронов до энергии несколько десятков мэВ в материале с отрицательной работой выхода и последующего их ускорения, фокусировки в вакууме; он дает разрешение около 5 нм, в перспективе ожидается — до 1 нм [19].

Метод ионного (протонного) микрозондового анализа [20] позволяет выявлять присутствие скопления элементов массой 10^{-18} г и концентрации до 10^{-6} %. Локальность метода уступает этому показателю электронно-лучевым методам. Пространственный заряд пучка не позволяет формировать пучки малого сечения несмотря на то, что рассеяние протонов в объекте меньше.

Метод рентгеновской микроскопии используется для получения изображения на просвет широкий (расходящийся) или сканирующий узкий рентгеновский пучок [21]. Несмотря на то, что мы до сих пор не можем сфокусировать рентгеновские лучи, разрешающая способность метода 10 нм при большой проникающей способности. Ни зонные пластины, ни микроканальные пластины с полным внутренним отражением пока не позволили решить проблему фокусировки рентгеновского излучения с достаточной для микроскопии интенсивностью.

Метод атомно-зондовой микроскопии представляет собой разновидность полевой ионной или автоионной микроскопии. Локальность метода очень высокая, можно обнаружить на полевым ионном изображении отдельный атом. Применяя полевую десорбцию и масс-спектрометрический анализ, можно определить массу этого атома [22].

Метод сканирующей туннельной микроскопии основан на регистрации туннельного тока между атомом на конце острого зонда и объектом исследования. Метод очень чувствителен и позволяет обнаруживать отдельные атомы на поверхности кристаллов. Разрешающая способность в плоскости объекта — до 0,1 нм и по высоте — до 1,0 нм [22].

Метод сканирующей атомно-силовой микроскопии основан на регистрации силы взаимодействия между кончиком острого, закрепленного на микрокронштейне (микропружине), и объектом. Постоянный туннельный ток поддерживается с помощью обратной связи. Метод позволяет измерять малые (менее 1 нН) локальные силы взаимодействия острого с объектом исследования [23], получать сведения о структуре поверхности. Создаются комбинированные приборы, в том числе сочетающие возможности растрового электронного микроскопа или Оже-микроскопа [24] с атомно-силовой микроскопией. Метод спин-поляризованной микроскопии основан на регистрации изменения поляризации спина электронов [25].

Метод фото- и джоулевой микроскопии [26] использует лазерную интерферометрию. Он позволяет регистрировать изменения локальной проводимости и обнаруживать области имплантации кремния в кремний даже после отжига, что не удается получить другими методами.

Надежная модель механизма формирования потока вторичных излучений, в которой достоверно установлены все связи между эффективностью детектора и анализируемой микроструктурой вместе с дефектами в ней, дает возможность использовать методы математического моделирования для решения обратных задач: восстановления формы, размеров, глубины расположения различных микро неоднородностей в исследуемом объекте, выяснения природы микродефектов и локальных электрофизических свойств. Созданы опытные образцы специализированных установок для работы в цеховых условиях. Они полностью адаптированы для работы в условиях производства изделий ИК-техники. Это ЭЛУ-ФЭМ, ЭЛУ-КНТ, "Спрут-2", РЭМ-50-01 и др. Их испытывали при контроле различных изделий ИК-техники и на различных промежуточных стадиях производства.

Основные характеристики специализированных установок для технологического контроля

Проведенные исследования позволили определить общую концепцию конструкции установок, предназначенной для исследования и кон-

троля изделий микрофотоэлектроники и контроля за технологическими процессами.

В соответствии с требованиями эксплуатации в цеховых условиях разработана установка ЭЛУ-КНТ [27]. Она включает в себя систему регистрации сигнала наведенного тока (НТ), позволяющую измерять этот сигнал и получать на экране монитора изображение исследуемого объекта в сигнале НТ и других видах излучений, в том числе в режиме работы прибора, как растрового электронного микроскопа.

Основные характеристики ЭЛУ-КНТ

Локальность обнаружения отклонений от нормы (дефектов), мкм	0,8
Увеличение электронно-оптического изображения, тыс. крат	250
Разрешающая способность во вторичных электронах, нм	20
Ускоряющее напряжение, кВ	25
Ток электронного пучка, А	$1 \cdot 10^{-8}$
Предельное остаточное давление в технологической камере, Па	$8 \cdot 10^{-4}$
Управление установкой	ручное

Для фотоэмиссионного контроля за качеством технологических процессов на промежуточных стадиях изготовления изделий микрофотоэлектроники без разрушения контролируемого объекта создана малогабаритная установка ЭЛУ-ФЭМ [28].

Основные характеристики ЭЛУ-ФЭМ

Энергия воздействия излучения на объект, эВ	5,0
Линейные размеры обнаруживаемых дефектов, мкм	1,0—10,0
Разрешающая способность:	
поперечная, мкм	0,1
по глубине, нм	1,0—5,0
Предел обнаружения адсорбированных слоев, монослой	0,01
Мощность УФ-осветителя, Вт	100
Диаметр объекта, мм	40
Предельное остаточное давление в технологической камере, Па	$8 \cdot 10^{-4}$
Скорость перемещения объекта, мкм/с	1,0—800,0

Для контроля элементного состава и выявления природы примеси (методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа) в технологическом процессе на промежуточных стадиях изготовления изделий микрофотоэлектроники без разрушения контролируемого объекта создана установка "Спрут-2" [11] и разработана методика количественного анализа гетерогенных объектов [10]. Электронный зонд имел изменяемую геометрию сечения с равномерным распределением плотности тока по сечению. Развертка пучка по поверхности объекта изотропна и анизотропна. Высокоэффективная регистрация рентгеновского излучения обеспе-

чивала микроанализ гетерогенных объектов, в том числе и на границе гетерогенных образований.

Основные характеристики "Спрут-2"

Анализ элементов	Na—U
Ускоряющее напряжение, кВ	0,5—30,0
Размер сечения электронного зонда, нм	5—5000
Диаметр объекта исследования, мм	100
Температура объекта, К	85—500
Абсолютная чувствительность, г	$10^{-17}+10^{-18}$
Погрешность анализа, %	0,5—0,8
Угол анализа, град.:	
азимутальный	0—360
полярный	22—48
Управление	ручное
Предельное остаточное давление в технологической камере, Па	$8 \cdot 10^{-4}$

Растровый электронный малогабаритный микроскоп РЭМ-50-01 с разрешающей способностью 5,0 нм оснащен рентгеновским спектрометром для рентгеноспектрального микроанализа и другими аналитическими приставками и приспособлениями, необходимыми при исследовании поверхности изделий ИК-техники. Среди них — устройство для объективной оценки микрорельефа объекта по их изображениям [29], и разработан метод количественной оценки морфологии объекта [30].

Разработка и развитие локальных методов и контрольно-диагностического оборудования для контроля за технологическими процессами изготовления приборов ИК-техники на сегодняшний день являются актуальной задачей, так как позволяют значительно сократить расходы финансовых и материальных ресурсов при массовом производстве изделий микроэлектроники, улучшив качество выпускаемой продукции.

Литература

1. Гостев А. В. и др. Визуализация приповерхностной микроструктуры полупроводниковых материалов методом индукционно-зарядовой ЭДС// Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 5. С. 73—81.
2. Лукьянов А. Е. и др. Визуализация рекомбинационной неоднородности полупроводниковых пластин в РЭМ с СВЧ-детектированием// Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 10. С. 31—33.
3. Crewe Albert V. Is there a limit to the resolving power of the SEM// J. Electron. Microsc. 1986. V. 35. Suppl. № 3. P. 2105—2108.
4. Bauer E., Telieps W. Low energy electron microscopy// Ibid. № 1. P. 67—70.
5. Aristov V. V. et al. Sem-tomography// Ibid. P. 475—476.
6. Rosencwaig A. Depth profiling of integrated circuits with thermal wave electron microscopy// Electronics Let. 1980. V. 16. № 24. P. 928—930.
7. Pay Э. И. Растровая электронная термоакустическая микроскопия твердотельных структур// Заводская лаб. 1987. Т. 53. № 10. С. 31—38.

8. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии/ Под ред. Д. Бриггса и М. П. Сиха. — М.: Мир, 1987. — 600 с.
9. *Гареева А. Р., Петров В. И., Чижов Г. А.* Зависимость пространственного разрешения в режиме локальной катодолуминесценции в растровом электронном микроскопе от значений электрофизических параметров образца// Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физика. Астрономия. 1989. Т. 30. № 1. С. 23—28.
10. *Васичев Б. Н.* Информационные особенности опознавания образов в виде элементной неоднородности, структуры и топологии объектов в полупроводниковых и др. материалах методами аналитической электронной микроскопии// Прикладная физика. 1999. № 4. С. 52—61.
11. *Васичев Б. Н., Филачев А. М.* Электронная и ионная оптика и электронно- и ионно-лучевое оборудование в Государственном институте электронной и ионной оптики (к 25-летию)// Там же. 2002. № 2. С. 17.
12. *Гюлдстейн Дж.* и др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. — М.: Мир, 1984. Кн. 1 и 2.
13. *Рехнер В., Шнайдер Р.* Некоторые вопросы спектроскопии энергетических потерь в просвечивающей электронной микроскопии// Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 10. С. 43—51.
14. *Yagi Katsumichi.* Reflection electron microscopy// J. Appl. Crystallogr., 1987. V. 20. № 3. P. 147—160.
15. *Miln R. H.* Surface steps imaged by secondary electrons// Ultramicroscopy. 1989. V. 27. № 4. P. 433—437.
16. *Васичев Б. Н.* Электронно-зондовый микроанализ тонких пленок. — М.: Металлургия, 1977. — 239 с.
17. *Ключников А. А., Пучеров Н. Н., Чесноков Т. Д., Шербин В. Н.* Методы анализа на пучках заряженных частиц. — Киев: Наукова Думка, 1987. — 152 с.
18. *Стрепетов А. Н., Франк А. И.* Зеркальный нейтронный микроскоп с магнитной компенсацией гравитационных искажений// Журн. техн. физ. 1986. Т. 56. № 9. С. 1775—1785.
19. *Rich Arthur, Van House James.* Physics in action// Phys. Bull. 1988. V. 39. № 8. P. 308.
20. *Nobling R.* Analytical possibilities of high energy proton microprobes// J. Electron Microscopy. 1986. V. 35. Suppl. 1. № 1. P. 601—602.
21. Рентгеновская оптика и микроскопия/ Под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа. — М.: Мир, 1987. — 464 с.
22. *Hren J. J., Shedd G.* Field electron emission, the atom probe and scanning tunneling spectroscopy// Ultramicroscopy. 1988. V. 24. № 2—3. P. 169—180.
23. Atomic resolution with atomic force microscope/ G. Binnig, Ch. Gerber, E. Stoll et al.// Europhys. Lett. 1987. V. 3. № 12. P. 1281—1286.
24. *Reihi B., Gimzewski J. K.* Field emission scanning Auger microscope (FESAM)// Surface Sci. 1987. V. 189. № 1—3. P. 36—43.
25. *Pierce Daniel T.* Spin-polarized electron microscopy// Physica Scripta. 1988. V. 38. № 2. P. 291—296.
26. *Martin Lves.* Photo- and Joule-displacement microscopy// Phys. Bull. 1987. V. 38. № 4. P. 145—147.
27. *Васичев Б. Н.* и др. Установка для межоперационного контроля полупроводниковых структур микрофотоэлектроники на работоспособность и анализа на отказ в технологическом процессе их производства// Прикладная физика. 2002. № 2. С. 47—57.
28. *Васичев Б. Н.* и др. Установка для межоперационного контроля за качеством поверхности подложек и тонких пленок микроструктур изделий микроэлектроники в технологическом процессе// Там же. С. 58—67.
29. *Васичев Б. Н.* Сб. докл.: Приборы для научных исследований. — М.: Изд-во "Секретариат СЭВ", 1980. Т. 2.
30. *Васичев Б. Н.*// Изв. АН СССР. Сер. физ. 1972. Т. XXXVI. № 9. С. 1885.

Loyal methods diagnostics and equipment for control of IR-technique

B. N. Vasichev

Moscow State Institute of Electronics and Mathematicians (Technical university), Moscow, Russia

A. M. Filachov, V. P. Ponomarenko, G. I. Fatiyanova
ORION Federal Research and Production Association, Moscow, Russia

In this paper examination methods diagnose simiconductors IR-structures in production and electron-beam equipments use for it.