

ЛК №4. Тема 10. Оптическая структуроскопия. §§Нефелометры.

§Понятие об ОНК материалов при помощи рассеянного излучения.

При взаимодействии света с веществом наряду с другими явлениями возникает также рассеяние света. В прозрачной однородной среде свет распространяется только в прямом направлении. Если в среде есть неоднородности, при распространении света возникает его рассеяние в стороны. Неоднородности бывают различными по размерам, форме и физической природе. Если оптическая однородность среды нарушена крупными частицами постороннего вещества (с размерами $\sim \lambda$), беспорядочно распределенными по объему и находящимися во взвешенном состоянии, то среда называется мутной.

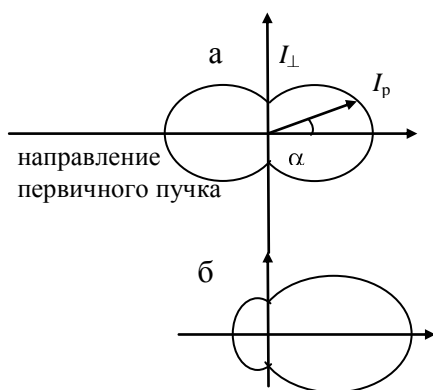


Рис. 4.1

Примерами мутных сред могут служить пыльный воздух, дымы (аэрозоли), туман, эмульсии и суспензии. При достаточно большой концентрации рассеивающих частиц указанные системы могут быть непрозрачными вследствие потерь света на рассеяние (молоко, дым).

Закономерности рассеяния света мутными средами экспериментально впервые исследовал Тиндаль в 1869 году, поэтому такое рассеяние называют тиндалевским, а его теорию разработал Рэлей. Падающий на мутную среду свет частично рассеивается в стороны.

2) Интенсивность рассеяния для мелкодисперсных коллоидных систем с малыми частицами ($\sim \lambda/10$) в соответствии с законом Рэля обратно пропорциональна четвертой степени длины волны света

$$I \sim 1/\lambda^4. \quad (4.1)$$

3) Рассеяние в чистых средах называют молекулярным. Причиной рассеяния света в чистых веществах являются всякие нарушения оптической однородности или флуктуации показателя преломления, которые могут быть вызваны различными причинами: флуктуациями плотности, анизотропии, концентрации в случае растворов и т.д. Например, флуктуации плотности возникают вследствие теплового движения молекул, количество которых в элементарных объемах по случайным причинам со временем меняется.

В случае мутных сред пространственное распределение рассеянного света имеет симметричный характер относительно направления первичного пучка и перпендикулярного ему направления (рис. 4.1а). В плоскостях, нормальных оси исходного пучка, интенсивность рассеянного света одинакова. Для произвольного направления под углом α к оси первичного пучка интенсивность света равна

$$I_p = I_{\perp}(1 + \cos^2 \alpha), \quad (4.2)$$

где $I_{\perp} = kI_0 \frac{n_0 \cdot V^2}{\lambda^4}$, — интенсивность в направлении, нормальном к первичному, I_0 — исходная интенсивность света, n_0 — число частиц в единице объема, V — объем частиц, λ — длина волны, k — коэффициент пропорциональности.

4) Теорию рассеяния на крупных частицах (с размерами $> \lambda$), разработал Шулейкин, экспериментально такое рассеяние исследовал Ми. Индикатрисы рассеяния для

крупных частиц (рис. 4.1б) существенно отличаются от рэлеевских, они уже не симметричны, и по мере увеличения размеров частиц рассеяние вперед становится все более преимущественным (эффект Ми). По виду индикатрис можно оценить размеры частиц.

Нефелометры.

Нефелометрией называют методы измерения мутности среды. Существуют две разновидности метода нефелометрии – *турбидиметрия*, основная на измерении интенсивности света, прошедшего средой ($\alpha = 0$), и собственно *нефелометрия*, в основе которой лежит регистрация интенсивности рассеянного излучения. Рассмотрим физические основы нефелометрии.

Часто требуется определить количество вещества, находящегося в суспендированном состоянии, без отделения мелкодробленого вещества от растворителя. Способы определения размеров и концентраций частиц суспендированных систем по свойствам рассеянного света составляет предмет нефелометрии. В нефелометрии используют упрощенную формулу Рэлея

$$I_{\perp} = kI_0 \frac{n_0 \cdot V^2}{\lambda^4}. \quad (4.3)$$

Из формулы видно, что интенсивность рассеянного света определяется числом частиц в единице объема n_0 и размерами частиц. Измеряя экспериментально отношение интенсивностей рассеянного света для двух жидкостей, можно сделать вывод о соотношении размеров частиц при одинаковой концентрации c ($c = n_0 Vd$, где d – плотность растворенного вещества), или для одинаковых размеров частиц определить отношение концентраций.

Нефелометрами называют приборы для измерения интенсивности света, рассеянного исследуемым веществом. Существуют визуальные (рис. 4.2) и фотоэлектрические (рис. 4.3) нефелометры, действие которых основано на сопоставлении интенсивности света, рассеянного объектом, с известной интенсивностью рассеяния рабочего эталона (мутного стекла, диффузно рассеивающей поверхности и т. п.), который освещается тем же световым пучком, что и изучаемый объект. Сравниваемые жидкости наливаются в два сосуда 2 цилиндрической формы, которые крепятся в металлических гильзах 1. В футляре 6 против каждого сосуда вырезаны окошки 4. Высота окошек изменяется с помощью подвижных пластинок 5.

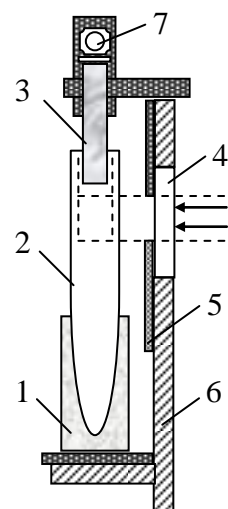


Рис. 4.2 Визуальный фотометр

1-металлическая гильза, 2-прозрачные сосуды, 3-стеклянные цилиндры, 4-окошки, 5-заслонка, 6-футляр, 7-окуляр

Шкала позволяет измерять высоты освещенных столбов растворов в обоих кюветах с точностью до 0,1 мм. Освещение производится сбоку электрической лампы, находящейся в узком футляре с зачерненными изнутри стенками. Рассеянный жидкостями свет поступает в стеклянные цилиндры 3, погруженные в жидкость, затем попадает в фотометрическое устройство. В визуальных нефелометрах интенсивности рассеяния объекта и эталона сопоставляются фотометром (сравниваются два световых поля зрения, например, фотометром Пульфриха). Более чувствительные

фотоэлектрические нефелометры имеют фотоэлектронные умножители (ФЭУ), которые усиливают свет объекта и эталона и направляют его в компенсационный блок сравнения двух сигналов.

Процесс фотометрирования сводится к тому, что наблюдатель, меняя высоту освещенной части сосудов с исследуемой и эталонной жидкостями, уравнивает освещенности наблюдаемых полей. В условиях фотометрического равенства полей отношение высот освещенных столбов обратно пропорционально отношению интенсивностей света, рассеянного в обоих сосудах: $h_1/h_2 = I_2/I_1$.

Фотоэлектрический нефелометр состоит из источника света в кожухе, конденсорной линзы, диафрагмы, прозрачного сосуда на подставке и двух фотоэлементов (обычно полупроводникового типа). Все перечисленные части устанавливаются на общей оптической скамье. Фотоэлементы поочередно подключаются к гальванометру. В одном случае измеряется прошедший свет, в другом – рассеянный. Отношение токов равно отношению интенсивностей.

Современные нефелометры (визуальные и фотометрические) могут измерять не только интенсивность рассеяния, но и его угловое распределение. В связи с тем, что $I \sim 1/\lambda^4$, в нефелометрах используют излучение из коротковолновой области (УФ и синие лучи).

Выражение (4.3) может применяться для анализа сред, различающихся только по степени дисперсионности и концентрации частиц. Закономерности рассеяния света на частицах, сравнимых или больших длин волн света ($2 - 100 \text{ мкм}$), отличны от описанных выше и значительно сложнее. Для анализа подобных сред используют лазерные гониофотометрические установки (рис.13.3), позволяющие измерять интенсивность

рассеянного света в большом диапазоне углов ($0 \leq \alpha \leq 180^\circ$) (индикатрисы рассеяния) с последующей обработкой на ЭВМ.

Основное уравнение *турбидиметрии* записывается

в виде

$$I = I_0 \exp(-kcl), \quad (4.4)$$

где I_0 – интенсивность падающего на среду света, k – полярный коэффициент мутности (для сферических непрозрачных частиц $k = R^2$, где R - радиус частиц), c - концентрация взвешенных частиц, l – толщина слоя контролируемой среды.

Рис. 4.4. 1 - лазер, 2 - источник потока частиц, 3 - рассеянное излучение, 4 - световоды, 5 - многоэлементный фотоприемник, 6 - блок обработки информации, 7 - световая ловушка для гашения прямого излучения.

Эта зависимость аналогична выражению для закона Бугера, поэтому для турбидиметрических измерений могут быть использованы *абсорбционные концентратометры* (фотоколориметры).

Фотоколориметры успешно применяются для турбидиметрических определений мутности питьевой воды, выбраковки бутылок с напитками и ампул с лекарствами, содержащих посторонние частицы, контроля работы различных фильтров и центрифуг, измерения концентрации дыма и пыли и решения многих других задач.

Приборы телевизионной и когерентно-оптической структуроскопии.

Во многих случаях информация о качестве объектов контроля может быть по-

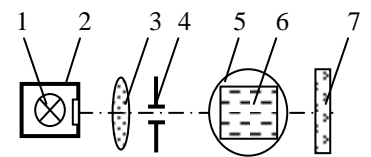
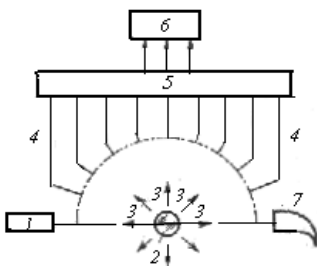


Рис. 4.3. Фотоэлектрический нефелометр

1-источник света, 2-кожух, 3-конденсор, 4-диафрагма, 5, 7-фотоэлементы, 6-прозрачный сосуд



лучена на основе анализа структуры их материала как поверхностной, так и объемной. Для этих целей создан ряд приборов, среди которых наибольшее распространение получили *телевизионные анализаторы (ТВА)* и *когерентно-оптические процессоры (КОП)*. Действие ТВА основано на сканировании изображения изучаемых структур видеодатчиком (телевизионной камерой или устройством типа "бегущий луч") и последующей машинной обработке получаемых видеосигналов с помощью вычислительных средств (микропроцессора, микроЭВМ и т.д.). При этом эффективным оказался подход, основанный на моделировании изображений полем случайных величин. Геометрические, фотометрические и другие характеристики изображений анализируются с позиций теории случайных процессов. Получаемые при этом статистические характеристики имеют четкий физический смысл – они отражают пространственную упорядоченность и функциональные свойства исследуемых структур, которые, в свою очередь, влияют на прочностные, электрические, оптические и другие характеристики объектов контроля.

В случае применения КОП анализируется спектр-Фурье исследуемых структур, получаемый с помощью оптических процессоров.

Принцип действия оптического процессора

Любой физический процесс, несущий в себе ту или иную информацию, называется сигналом. Световая волна может рассматриваться как оптический сигнал. Если она имеет определенную пространственную структуру, то это пространственный оптический сигнал. Преобразование (соответствующую обработку) таких сигналов производит оптический процессор. При помощи оптического процессора можно выполнять различные математические операции, например, умножение, сложение, вычитание и т. д. Для этого используются оптические транспаранты (ОТ) - плоские устройства, оптические параметры которых (прозрачность, рассеяние, коэффициент преломления, поляризация) изменяются от точки к точке. Покажем, как оптический процессор выполняет операцию умножения.

Если световая когерентная волна имеет напряженность $E = \text{const}$, то после прохождения ОТ с прозрачностью $T_1(x,y)$, напряженность поля световой волны равна $ET_1(x,y)$ и неодинакова по сечению. Следовательно, пучок света за ОТ пространственно промодулирован и распределение интенсивности по его сечению есть некоторая функция $f_1 = T_1(x,y)$, а он сам стал носителем пространственного оптического сигнала. Если на пути пучка поставить второй ОТ, пропускание которого есть функция $f_2 = T_2(x,y)$, то после него распределение интенсивности в пучке $ET_1(x,y)T_2(x,y)$, будет соответствовать произведению функций f_1f_2 .

Оптический сигнал, являющийся произведением функций f_1f_2 , может быть далее преобразован в последовательность электрических сигналов с помощью, например, матрицы фотоприемников. Произведение двумерных функций также является двумерной функцией, поэтому с ее помощью можно закодировать большое количество информации.

Для выполнения рассмотренной операции умножения нужно предварительно записать на первый и второй ОТ соответствующую информацию: определенным образом промодулировать одну из оптических характеристик ОТ, воздействуя на него управляющим оптическим сигналом. Примером ОТ переменной прозрачности является обычная фотопленка.

Существуют управляемые оптические транспаранты (УОТ). Это двухкоординатная матрица элементарных ячеек, оптические свойства которых меняются под воздействием управляющих сигналов, подаваемых от внешних коммутирующих устройств. При записи информации на таком ОТ отдельные ячейки включаются либо на максимальное пропускание (состояние логической единицы), либо так, что становятся непрозрачными (состояние логического нуля). На УОТ можно записать информацию как в дискретной, так и в аналоговой форме.

В рассмотренных примерах ОТ оптический сигнал промодулирован по амплитуде. Возможна также и фазовая модуляция, например, с помощью ОТ, прозрачность которого одинакова, а толщина изменяется от точки к точке.

Наиболее часто с помощью оптических процессоров выполняется операция, называемая *преобразованием Фурье*. Рассмотрим следующую оптическую схему (рис. 4.5). На одномерную решетку, которая состоит из горизонтальных щелей, разделенных непрозрачными промежутками, падает плоская световая волна. Решетка расположена в плоскости z_1 . В фокальной плоскости z_2 линзы L_1 образуется дифракционный спектр (дифракционный образ) предмета, а в фокальной плоскости z_3 линзы L_2 образуется действительное изображение решетки.

В теории формирования изображений дифракционная картина, возникающая в плоскости z_2 , рассматривается как Фурье - преобразование (спектр) анализируемого объекта (сигнала). Линза L_2 также выполняет преобразование Фурье, но уже для дифракционного изображения в плоскости z_2 : она преобразует его в действительное изображение решетки в плоскости z_3 .

Изображение предмета формируется как бы в две стадии: вначале в фокальной плоскости первой линзы возникает дифракционное изображение (пространственный спектр) предмета, а затем в фокальной плоскости второй линзы – действительное изображение предмета.

Очевидно, что вся информация, имеющаяся в изображении, имеется и в дифракционной картине, и если как-то изменять последнюю, например, экранировать часть максимумов, то соответственно изменится и изображение. Процесс изменения изображения путем изменения его дифракционной картины называется *пространственной фильтрацией изображения* (оптического пространственного сигнала). Дифракционные максимумы первых, низких порядков, несут информацию о крупных деталях объекта, а максимумы более высоких порядков – о мелких. Пространственный оптический сигнал можно изменять, создав пространственный оптический фильтр, который размещается в той плоскости, где образуется дифракционная картина.

Принцип фильтрации лежит в основе действия различных оптических процессоров. Оптический процессор представляет собой набор различных оптических эле-

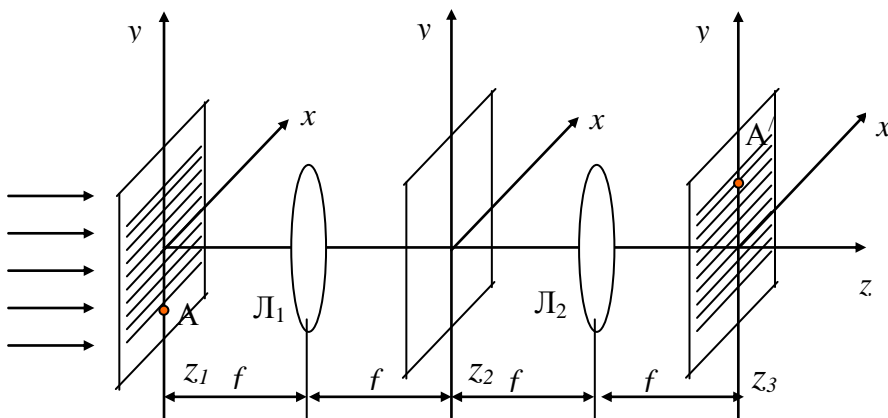


Рис. 4.5 Схема преобразования Фурье

ментов - линз, диафрагм, решеток, зеркал, голограмм. Результаты оптической обработки информации могут фиксироваться в виде фотографического изображения либо голограммы. Оптические сигналы на выходе процессора могут преобразовываться в электрические.

Приборы когерентно-оптической структуроскопии.

Дефектоскопическая информация во многих случаях представляет собой изображения различного типа. Например, при контроле усталостных трещин оператор сравнивает изображения эталонной и контролируемой поверхностей. Аналогичные операции многократно выполняются при сравнении формы однотипных изделий, выявлении дефектов заданного типа на фоне структурных помех и т. д. Это вызывает утомление операторов и приводит к ошибкам распознавания дефектов. Во всех этих случаях эффективно применение когерентно-оптических методов фильтрации основных частот изображения, позволяющих устранить ошибки операторов. Любое изображение можно представить его частотным спектром (спектром Фурье), представляющим собой совокупность синусоидальных решеток с различным периодом изменения яркости и различной ориентации на плоскости. Двумерное преобразование Фурье может быть выполнено с помощью ЭВМ, однако оптические устройства выполняют эту операцию существенно проще и быстрее. Воздействуя на спектр изображения с помощью различных устройств (масок, диафрагм), можно осуществлять его обработку в реальном масштабе времени.

Схема когерентного оптического анализатора пространственных структур приведена на рис. 4.6. Предмет располагается в передней фокальной плоскости линзы и освещается параллельным лучом лазера. В ее задней фокальной плоскости при этом формируется спектр Фурье предмета в виде характерной картины ярких точек различного размера, образующих некоторую структуру (в общем случае непериодическую). Пространственный фильтр выполняется в виде прозрачного экрана с набором непрозрачных точек, перекрывающих изображение спектральных компонент эталонного объекта. При этом часть высоких пространственных частот может быть пропущена через экран для создания контурного изображения объекта, что облегчает поиск дефектов и их привязку к предмету.

Контролируемый объект (фотошаблон и т.п.) устанавливается в иммерсионной кювете для устранения влияния оптических неоднородностей материала его подложки. Если дефектов (отклонение в топологии рисунка, царапины) нет, то в плоскости наблюдательного экрана видно только контурное изображение объекта. При наличии дефектов, обычно имеющих широкий дифракционный спектр, их спектральные компоненты проходят мимо заградительной маски и формируют изображение на экране в виде светлых пятен. Оператор ведет отбраковку в соответствии с критериями годности. Процедура контроля однотипных изделий может быть автоматизирована. Эффективно применение телевизионных систем наблюдения. Погрешность установки объекта в кювете не должна превышать $\pm 0,01$ мм. Наклоны объекта не должны превышать $0,5^\circ$.

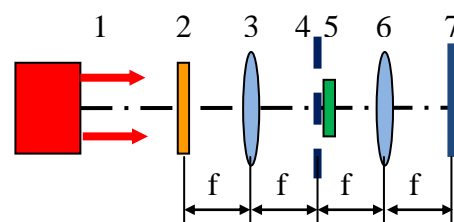


Рис. 4.6 Схема когерентно-оптического анализатора

1 - лазер, 2 - объект, 3, 6 - линзы, 4 - плоскость спектра Фурье-объекта, 5 - маска, 7 - плоскость изображения, f - фокусное расстояние линз

Контролируемый объект (фотошаблон и т.п.) устанавливается в иммерсионной кювете для устранения влияния оптических неоднородностей материала его подложки. Если дефектов (отклонение в топологии рисунка, царапины) нет, то в плоскости наблюдательного экрана видно только контурное изображение объекта. При наличии дефектов, обычно имеющих широкий дифракционный спектр, их спектральные компоненты проходят мимо заградительной маски и формируют изображение на экране в виде светлых пятен. Оператор ведет отбраковку в соответствии с критериями годности. Процедура контроля однотипных изделий может быть автоматизирована. Эффективно применение телевизионных систем наблюдения. Погрешность установки объекта в кювете не должна превышать $\pm 0,01$ мм. Наклоны объекта не должны превышать $0,5^\circ$.

На рис. 4.7 показана схема согласованной оптической фильтрации. В этом случае роль пространственного фильтра выполняет Фурье-голограмма эталонного объекта, схема получения которой понятна из чертежа. Отличие структуры контролируемого объекта от эталона приводит к изменению сигнала фотоприемника, показания которого пропорциональны степени корреляции исходного и текущего изображений. Схема эффективна для технологического контроля печатных плат. Вначале получают голограммы платы в нормальных условиях, а затем платы нагревают (или охлаждают) и измеряют интенсивность сигнала корреляции. Нагрев вызывает деформацию проводников и материала платы, что приводит к декорреляции изображения и изменению интенсивности сигнала ФЭУ.

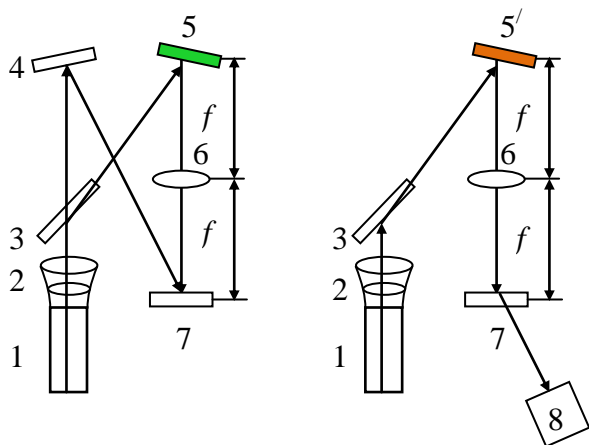


Рис. 4.7 Схема согласованной оптической фильтрации.

1 - лазер, 2 - телескоп, 3 - светоделитель, 4 - зеркало, 5 - эталонный объект, 5' - контролируемый объект, 6 - объектив, 7 - голограмма, 8 - фотоприемник, f - фокусное расстояние линзы

Аналогично исследуется процесс появления усталостных трещин в лопатках турбин и других изделиях.

Возможности когерентно-оптических методов существенно возрастают при сочетании их с ЭВМ, применяемыми для логической обработки корреляционных или отфильтрованных изображений. Ввод изображения в ЭВМ может производиться, например, с помощью быстродействующих фотомозаичных структур (фотодиодные матрицы и т.д.). Гибридные оптико-электронные вычислительные машины, несомненно, найдут широкое применение в практике оптического неразрушающего контроля.

Перспективно применение гибридных методов контроля, при которых предварительная обработка изображений (выделение объектов с заданными признаками, проведение операций типа свертки, пространственной фильтрации и т.п.) производится быстродействующими КОП, а процедуры последующей классификации структур осуществляются ЭВМ (подсчет коэффициента формы, вычисление числа одинаковых элементов в поле зрения, корреляционный анализ, вычисление статистических характеристик и т.д.).

Становится возможным проведение *стереологического анализа* структур, т.е.

определение трехмерной структуры объектов по их плоским срезам (согласно принципу Кавальери). Подобные методы контроля и анализа широко применяют в металлологии, микробиологической промышленности, других областях.

Схемы ТВА включают устройства формирования оптических изображений объекта, телевизионную систему и устройство обработки видеосигнала, выполняемого на базе встроенных в структуроскоп микропроцессора или с помощью внешней ЭВМ. В состав математического обеспечения обычно входят программы, обеспечивающие автоматический поиск объектов, контурное слежение и построчное сканирование в пределах заданного контура, а также вычисление необходимых статистических характеристик объектов. Время обработки зависит от сложности изображения, характера решаемой задачи и составляет в среднем 0,1 – 1 с.

Структороскопы на основе ТВА выпускает ряд фирм – Иманко (Англия), Оптон (ФРГ) и др. Характеристики некоторых из них приведены в табл. 3.1.

Телевизионные и когерентно-оптические структуроскопы

Таблица 4.1

Тип структуроскопа	Страна, фирма	Примечания
Ф-3000	Англия, Рэнк	Лазерный Фурье-процессор с цифровой ТВ системой для анализа изображений структур; разрешение составляет 20 мм^{-1} в плоскости объекта
ЛФО ИБАС	Германия, Шпиндлер, Оптон	КОП с набором управляемых транспарантов
ТАС	Германия, Лейтц	Интерактивная система обработки изображений с набором программ применительно к задачам микробиологии и металлологии (в том числе вычисление стереоскопических характеристик сплавов, композитов и других объектов)
Квантимет	Англия, Иманко	Использован датчик с повышенным разрешением до 800 лин (плюмбикон и специальные видиконы) и высокой фотометрической стабильностью
Маджискан	Англия, Джойс и Лебл	ТВА с интерактивным вводом изображений и высокой емкостью цифровой памяти
Эпиквант	Германия, Цейсс	ТВА, специализированный для стереологического анализа в металлологии
Оминскан	США, Бауш и ЛОМБ	ТВА с повышенной фотометрической точностью (512 градаций яркости) и набором сменных видеодатчиков
Сакура	Япония, Конишироку	ТВА со встроенным микропроцессором типа Интел 8080
Лузекс	Англия, Джойс и Лебл	ТВА для размерного анализа и гранулометрического состава частиц размером 0,1 - 800 мкм
Тимбрелл	Франция, Культроникс	"-", диапазон размера частиц 0,5 - 50 мкм
МОП	Германия, Котрон	Интерактивная система ввода изображений с матричного прозрачного планшета с помощью контактного датчика электромагнитного типа
Протва	Россия, ИБФ АН	Устройство ввода на основе механического сканатора и ФЭУ, сопряженного с микроскопом. Высокое разрешение (до 1 мкм). Предназначен для автоматизированного контроля в микробиологической промышленности

ТАСИ	Латвия, ИРФ АН	ТВА с развитым программным обеспечением для широкого круга задач
ТАИ	Россия, ЛОМО, ЛЭТИ	ТВА для комплексного анализа фотометрических и геометрических параметров микрообъектов с повышенной скоростью вычислений за счет сочетаний аналоговых и цифровых устройств обработки видеосигнала