

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

МИКРОСКОПИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ*)

В. Косслет

Идея создания микроскопа для рентгеновских лучей восходит к самым первым дням открытия этих лучей. В первом сообщении о своем открытии Рентген указывает на сделанную им попытку сфокусировать полученное излучение и делает следующее замечание по поводу ее неудачи: «Das man mit Linsen die X-Strahlen nicht konzentrieren kann, ist nach dem Mitgeteilten selbstverständlich» (то, что невозможно фокусировать рентгеновские лучи с помощью линз, с очевидностью следует из предыдущего). Хотя последующие эксперименты обнаружили, что на самом деле фокусировка имеет место, однако эта фокусировка столь слаба, что микроскоп для рентгеновских лучей, построенный по типу оптических микроскопов, оказался бы слишком громоздким (из-за большой длины тубуса). Однако преимущества использования рентгеновских лучей настолько велики, что было предпринято немало попыток построить систему, не содержащую линз вообще. Рентгеновские лучи относительно свободно проникают через вещество, они позволяют достичь большей разрешающей силы, чем видимый свет, и — что еще более важно — они испускаются (и поглощаются) весьма характерным образом по отношению к природе и содержанию присутствующих элементов; это обстоятельство открывает возможности для различного типа микроанализов.

ФОКУСИРОВКА ОТРАЖЕНИЕМ

Если пучок рентгеновских лучей падает на зеркало нормально, то лучи проходят в глубину зеркала и доля отраженных лучей пренебрежимо мала; однако если луч едва касается поверхности зеркала, то эффективное отражение составляет почти 100%. Поскольку показатель преломления для всех веществ по отношению к рентгеновским лучам несколько меньше единицы, может происходить полное отражение для пучка рентгеновских лучей, идущих из воздуха в любой физически более плотный материал, такой, например, как стекло или металл. Следовательно, вполне возможно фокусировать рентгеновские лучи зеркалом с искривленной поверхностью, если только отражаемые лучи будут при своем падении скользить по отражающей поверхности. «Критический угол» падения очень близок к 90° , так что для используемых в настоящее время длин волн угол скольжения должен быть меньше одного градуса. Вследствие указанных обстоятельств едва ли можно ожидать сколько-нибудь замет-

*) Nature 183, 1423 (1959). Microscopy with X-rays, V. E. Cosslet. Перевод В. А. Угарова.

ной фокусировки под прямыми углами к плоскости падения, так что изображение, создаваемое вогнутым сферическим зеркалом, вытягивается в линию: фокусировка приводит к резкому астигматизму. Однако, как это было выяснено Киркпатриком и Бецем², второе зеркало, расположенное в плоскости, перпендикулярной к указанной, делает изображение стигматичным. Фокусирующие системы такого типа были разработаны Киркпатриком и его школой в Стенфордском университете³. Регулировка расположения зеркал и положения объекта при требуемых малых углах падения должна быть настолько точной, что требуются микрометрические приспособления. До сих пор были сконструированы микроскопы только с одной ступенью увеличения; сложные микроскопы неизбежно ведут к чрезмерным потерям интенсивности при многократных отражениях, а также к значительно возрастающим трудностям в юстировке. Наилучшие результаты, полученные с опытными решетками, приближаются к результатам хорошего оптического микроскопа. Мак-Ги⁴ утверждает, что им получено разрешение 0,5 микрона (им использовались зеркала с радиусом 8,5 м и фокусным расстоянием 6,4 см). Для того, чтобы иметь разумные времена экспозиции (от 10 до 30 минут), ему приходилось ограничиваться прямым увеличением всего лишь в семь раз. Затруднения для дальнейшего совершенствования отражательных систем можно разбить на две категории: различные aberrации изображения и практические затруднения в изготовлении зеркальных поверхностей. Недостаточная яркость изображения, требующая больших экспозиций, является также существенным ограничением, поскольку апертура не может превышать скользящий угол, соответствующий полному отражению, равный примерно одному градусу. Aberrация фокусирующих систем в принципе может быть обойдена использованием комбинаций нескольких зеркал с поверхностями особой формы—эллиптической, параболической, гиперболической—как это было показано Уолтером⁵ и Патти⁶. Они утверждают, что с помощью пары скрещенных эллипсоидов, следующих за парой скрещенных параболоидов, можно получить разрешение около 500 Å, т. е. примерно вдвое лучшее, чем на ультрафиолетовом микроскопе, и в четыре раза лучше, чем в предельно возможном случае оптического микроскопа.

Изготовление подобных систем высокой точности требует высокого мастерства и величайшего терпения, чтобы отполировать поверхность до требуемой степени совершенства, которая приблизительно в десять раз превосходит точность, необходимую в лучших оптических приборах. Дело не только в том, что полируемая поверхность должна в точности соответствовать расчетной поверхности; кроме этого, требуется гладкость поверхности почти до молекулярных размеров. По всем этим причинам трудно дать оценку предельных возможностей, которые следует ожидать от отражательного микроскопа, работающего с рентгеновскими лучами. Весьма вероятно, что таким способом будет достигнуто такое же разрешение, как и в лучших оптических микроскопах, и несколько менее вероятно, что предел, указанный Патти, может быть осуществлен практически.

КОНТАКТНАЯ МИКРОРАДИОГРАФИЯ

Самым простым способом получения увеличенных изображений является геометрическое проектирование, обходящееся вовсе без какой-либо фокусирующей системы; таким образом поступают в хорошо известном методе медицинской радиографии. Образцы, которые в различных своих частях по-разному пропускают излучение, создают скорее полутоновое изображение, чем простой силуэт. Обстоятельством, ограничивающим достижимое разрешение, является полутень, образующаяся на краю

истинной тени. Разрешение, если требуются микроскопические детали, может быть увеличено либо за счет уменьшения размеров источника излучения, либо за счет приближения образца к экрану, на котором производится наблюдение (или к фотографической пластинке). Первый метод, который называется проекционным методом, позволяет достичь значительного прямого увеличения за счет близкого взаимного расположения образца и источника. Последний метод сам по себе не дает никакого увеличения; все увеличение получается последующим рассматриванием негатива в оптическом микроскопе; этот метод известен под названием «контактной микрорадиографии». Пока источник рентгеновских лучей достаточно далек, толщина полутени будет пренебрежимо мала и разрешение конечного изображения будет определяться размером зерен проявленной эмульсии и разрешением оптического микроскопа, который используется для увеличения. Если использовать современные тонкозернистые эмульсии, такие, скажем, какие используются для спектрографических целей, то оба эти фактора имеют одинаковый порядок величины, именно от 0,2 до 0,5 микрона, так что лучшие контактные микрорадиографии имеют почти такое же разрешение, как и лучшие оптические микрографии.

Соответствующая техника была развита в промежутке между первой и второй мировыми войнами, главным образом во Франции. Начиная с 1946 г. эта техника была доведена до высокого совершенства Энгстромом с сотрудниками в Стокгольме со специальным уклоном для цитологических исследований. Тем не менее первым опубликованным применением метода было изучение внутренней структуры сплавов. Хейкок и Невиль⁷ в 1898 г. изучали различия в форме и размерах зерен, образуемых при медленном и быстром охлаждении расплава алюминий—золото. С тех пор постепенно этот метод входит в практику металлургов, что видно на примере работ Шарпа⁸, Эндрюса и Джонсона⁹ в Англии, а также Трилла¹⁰ во Франции. Применения этого метода в биологии значительно более широки; последний обзор на эту тему написан Энгстромом¹¹. Применяя очень мягкие рентгеновские лучи, возможно отчетливо обнаружить даже составляющие элементы отдельной клетки, такие небольшие по размеру, как хромосомы, без нарушения их строения или деятельности.

Колоссальные преимущества контактного метода кроются в его простоте, а также в большой площади, которая может быть одновременно просмотрена. Не требуется никакой специальной рентгеновской трубки, однако время экспозиции может быть существенно снижено (примерно до 20 минут) при применении рентгеновской трубки, сконструированной специально для этой цели^{12, 13}. Тонкозернистая эмульсия требует весьма осторожного обращения: должны быть созданы условия, в которых исключается попадание пыли на пластинку; это делается имея в виду последующее значительное увеличение. Для наибольшего разрешения образец должен быть изготовлен в виде тонкого среза и приведен в тесный контакт с эмульсией; для этой цели Энгстром разработал специальную технику. Для разрешения крайний предел устанавливается разрешением оптического микроскопа, так что не следует ожидать лучшего разрешения, чем 0,2 микрона. Лучшие контактные микрографии из лаборатории Энгстрема уже приближаются к этому пределу.

ПРОЕКЦИОННАЯ МИКРОРАДИОГРАФИЯ

В проекционном методе образец располагается вблизи источника вместо того, чтобы находиться вблизи фотографической пластинки, как это было в предыдущем методе; точечность источника рентгеновских лучей является теперь чрезвычайно существенным требованием, таким же,

как ультратонкозернистая эмульсия в предыдущем методе. Проще всего получить точечный источник, поместив небольшую апертуру перед источником рентгеновских лучей обычных размеров; первые радиографы с камерами, отверстия в которых были величиной с булавочную головку, были построены в 1896 г. Чермаком¹⁴. Интенсивности пучков, проходящих через столь малую апертуру, очень невелики, и даже со значительно усовершенствованными рентгеновскими трубками, которые стали доступны впоследствии, было невозможно сочетать достаточное увеличение и приемлемое время экспозиции (Зиверт¹⁵). В 1939 г. Арденне¹⁶ показал, что можно создать точечный источник рентгеновских лучей большой яркости, используя магнитные линзы для фокусировки электронного пучка на мишень, расположенную в рентгеновской трубке; разрешение в проекционном изображении определяется, таким образом, в первую очередь размерами источника.

Точно-проекционная система такого типа была позже создана Кослетом и Никсоном¹⁷ в Кавендишской лаборатории. Чтобы достичь наименьших размеров электронного источника (вольфрамовая нить), были использованы две электронные линзы. Размер электронного пятна на мишени может быть доведен в этих условиях до 1 микрона без особых затруднений и даже до 0,1 микрона. Рентгеновские лучи исходят от этого фокусного пятна через очень тонкую мишень, которая служит в качестве окошка в рентгеновскую трубку. Объект, помещенный вблизи этой мишени, может дать увеличенное изображение на экране или на фотографической пластинке, помещенных на некотором удалении. Так как расстояние между источником и объектом может быть доведено до 0,1 мм, прямое увеличение с помощью рентгеновских лучей порядка $100\times$ вполне достижимо для камеры длиной в 1 см и увеличение $1000\times$ — в камере длиной 10 см. Напряжение, прилагаемое к трубке, обычно составляет от 5 до 20 кВ, электронный ток в пучке имеет порядок 1 микроампера, причем он концентрируется в фокальное пятно размером в 1 микрон и даже меньше. Тепловое рассеяние от столь малого электронного пятна настолько незначительно, что вовсе не требуется водяного охлаждения мишени.

Область применения проекционного метода несколько шире, чем область применения контактного метода, который ограничен необходимостью тесного контакта между образцом и эмульсией. К примеру, проекционный метод удобнее для исследования живых объектов. Саундерс¹⁸, следуя ранним работам Барклая¹⁹ и Беллмана²⁰, использовавшим контактный метод в области микроартериографии, изучал изменение циркуляции крови в ушах кролика под действием различных факторов. Толщина объекта, допустимая в проекционном методе, больше, чем в контактном методе, и может достигать до 1 мм. Смит²¹, например, исследовал мускулатуру различных жуков в проективном рентгеновском микроскопе. Внутренняя структура видна сразу в целом, тогда как при оптической технике эту структуру пришлось бы восстанавливать по серии последовательных срезов, выполненных по туловищу насекомого, из-за ограниченности глубины фокусировки в оптическом микроскопе. Известны также многочисленные применения этого метода в минералогии и металлургии, в энтомологии и ботанике.

В проекционной системе глубина фокусировки фактически простирается по всем направлениям от той стороны объекта, которая обращена к фотографической пластинке. Таким образом, представляется возможность получать стереофотографии образцов значительно большей толщины, чем это допускают оптические микроскопы; в последних глубина фокусировки уменьшается с возрастанием применяемого увеличения, так что стереофотографирование с большим увеличением оказывается практи-

чески невозможным. Великолепные рентгеновские стереомикрографии структур сплавов и насекомых уже удалось получить. Хотя вполне возможно получать стереофотографии также и контактным методом, однако в этом случае сложнее как получение первоначальных изображений, так и отождествление соответствующих участков на двух негативах.

Проекционный метод всегда оказывается предпочтительным, когда необходимо простое отождествление интересующих нас участков оптическим или иным способом с целью подготовки препарата, помещаемого в электронный поток для получения непосредственного изображения. С другой стороны, контактный метод обеспечивает значительно большее первоначальное поле зрения, из которого отдельные участки могут быть впоследствии выбраны при просмотре микро негатива в оптическом микроскопе. Время экспозиции при проекционной методике намного меньше, составляя примерно одну минуту. Разрешающая сила ограничивается отнюдь не разрешающей силой оптического микроскопа, а размерами электронного пятна на мишени и степенью рассеяния в этом пятне электронов до того, когда они образуют рентгеновские лучи. Лучшие результаты, полученные до сих пор Никсоном²² и Онгом совместно с Ле Пулем²³, приходится на область 0,1 микрона, где разрешение соответствует ультрафиолетовому микроскопу. Проекционный метод, следовательно, уже дает большее разрешение, чем метод отражения или контактный метод. Дальнейшее продвижение в настоящее время затрудняется недостаточной интенсивностью, поскольку ток, который необходимо фокусировать на фокальное пятно, быстро падает с уменьшением диаметра пятна, но имея достаточные основания предполагать, что разрешение может быть доведено до 0,05 микрона (500 Å), и реальные надежды на то, что в конце концов можно будет достичь значения 250 Å.

МИКРОАНАЛИЗ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Как контактный, так и проекционный методы микрорадиографии могут быть использованы для установления природы и содержания химических элементов в данном образце, для чего привлекаются ступеньки, встречающиеся в спектрах поглощения. Коэффициент поглощения данного элемента резко меняется при определенной длине волны, тогда как коэффициент поглощения раствора в общем возрастает плавно и примерно пропорционально кубу длины волны. Ступеньки встречаются не слишком часто, поэтому очень редко случается так что соответствующие длины волн для двух элементов столь близки, что не разделяются в рентгеновском спектрометре. Если измерения проникающей способности рентгеновских лучей производятся на длинах волн несколько ниже и несколько выше длины волны, соответствующей ступеньке для данного элемента, то разница в поглощении будет обязана присутствию соответствующего элемента, с небольшой поправкой на влияние раствора. Зная высоту ступеньки поглощения для чистого элемента, можно получить непосредственно из наблюдаемой высоты процентное содержание этого элемента в растворе. Таким способом можно делать количественные определения практически для всех элементов периодической системы.

В контактной технике необходимо получение микрографий образца на двух избранных длинах волн для каждого подлежащего определению элемента. Различие в поглощении в каждой отдельной области определяется измерением относительной прозрачности негатива с помощью микрофотометра. Для того чтобы обеспечить высокую точность, весь фотографический процесс должен быть максимально стандартизован, причем желательно производить измерения на оригинальных негативах, а не на

увеличенных изображениях. Наименьшая площадь, которая еще поддается анализу, при этом определяется площадью наименьшего светового пятна, которое может быть создано в микрофотометре; эта площадь составляет около 5 квадратных микрон. Линдстрем²⁴ проводил микроанализ серы, фосфора и кальция в срезах определенных биологических тканей с предельной чувствительностью между 10^{-11} и 10^{-12} г и относительной точностью $\pm 3\%$. С другой стороны, если нас интересует только общее количество вещества, приходящееся на единицу площади, как это имеет место для многих цитологических исследований, достаточно измерения поглощения лишь на одной длине волны при условии, что состав поглотителя в определенных пределах известен. Таким способом Энгстрем¹¹ смог определить сухой вес составляющих клетки почти с такой же точностью, какая достигается интерференционным микроскопом.

Микроанализ поглощения существенно упрощается при использовании проекционного метода, так как в этом случае необязательно приготовление фотোগрафического негатива: относительная прозрачность различных точек образца может быть измерена непосредственно, если поместить апертуру, за которой расположен спектрометр и счетчик, в исследуемой точке спроектированного изображения. Рокер²⁵ совместно с Лонгом²⁶ исследовал микрораспределение кальция в зубном цементе обезьян различного возраста, взятом из различных частей челюсти. Оказалось, что не существует никакой ясной закономерности: различия в зубах данного типа для различных индивидуумов оказались значительно большими, чем различия в средних значениях в зависимости от возраста или местонахождения. Лонг применил ту же самую технику для определения содержания кальция у некоторых минералов, а Мозли и Вилкс²⁷ произвели качественное определение содержания других элементов.

ЭМИССИОННЫЙ МИКРОАНАЛИЗ

Альтернативным методом анализа элементов является спектрометрия характеристических эмиссионных линий, возбуждаемых при использовании образца в качестве мишени в рентгеновской трубке. Положение линий может указать на присутствие тех или иных элементов, а измерения интенсивности линий дают относительные концентрации этих элементов. Сравнением с чистыми эталонными образцами может быть получено абсолютное содержание каждого элемента.

Метод испытывался на крупных образцах в течение длительного времени как при непосредственном возбуждении образца, помещенного в качестве мишени в рентгеновской трубке, так и при флуоресцентном возбуждении в интенсивном первичном пучке рентгеновских лучей. Впервые этот метод был применен в микромасштабах Кастенгом и Гинье²⁸. Они использовали электронные линзы для формирования точечного фокуса электронного пучка на образце, помещенном внутрь рентгеновской трубки, и анализировали рентгеновские лучи, возбуждаемые в отдельных точках на его поверхности, выбираемых с помощью оптического микроскопа, вделанного в электронные линзы. Внесенные усовершенствования метода позволяют к настоящему времени анализировать все элементы периодической системы от урана до алюминия с точностью до 0,1% на площадях, диаметр которых составляет около 1 микрона. Такого рода микроанализатор со статическим пятном рентгеновских лучей сейчас уже производится во Франции.

Было бы весьма важным научиться видеть именно то место поверхности образца, куда попадает электронное пятнышко. Тогда можно было бы сочетать технику подвижного электронного пятна, уже разработанную

для оптической и электронной микроскопии, с микроанализатором, как это схематически показано на рис. 1. Выход рентгеновского излучения, отмеченный счетчиком, усиливается и используется затем для модулирования пучка в катодной трубке, действующей синхронно с электронным пучком, сканирующим мишень. Если недифференцированный выход обнаруживается таким способом, получаемое изображение поверхности образца представлено полным излучением рентгеновских лучей. Если отбирается отдельная линия излучения, то изображение указывает распределение соответствующего элемента по образцу, причем локальная яркость зависит от количества элемента, содержащегося в данной точке. «Настройкой» на

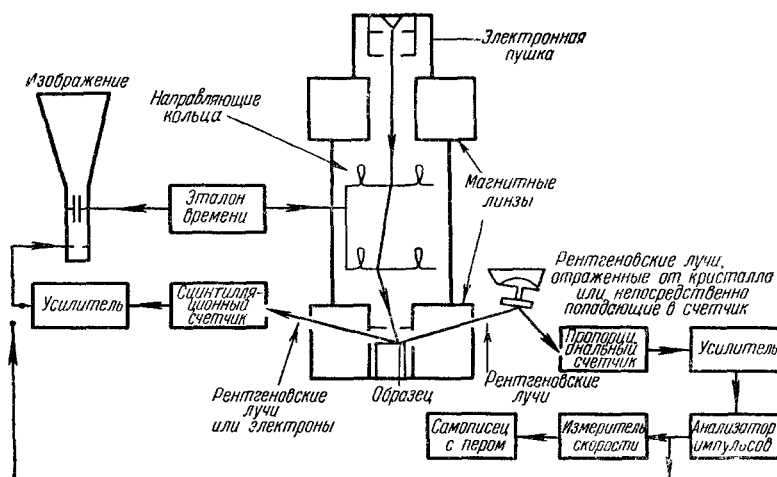


Рис. 1. Схематическое изображение сканирующего рентгеновского микроанализатора.

каждый присутствующий элемент можно провести довольно быстрый количественный анализ на сканированной площади. Если исследуемые элементы расположены в периодической системе достаточно далеко друг от друга, необходимое отделение линий излучения может быть осуществлено с помощью одного пропорционального счетчика, однако в случае соседних элементов в настоящее время приходится пользоваться спектрометром Брегга. Получаемая интенсивность в этом случае ниже и приходится применять медленное сканирование; изображение получают на экране с заметной «памятью» (трубка замедленного действия), с тем чтобы добиться некоторой концентрации энергии.

Если требуется более точный анализ, электронное пятнышко делают сканирующим вдоль заданной линии и выход излучения передается к самописцу с пером, который прослеживает изменение содержания данного элемента вдоль данной части поверхности. Альтернативным методом является остановка сканирующего пучка и передвижение этого пучка вручную к интересующей точке. Относительные интенсивности линий рентгеновских лучей, соответствующих различным элементам, присутствующим в образце, фиксируются на графике соответственно тому, как спектрометр выделяет их из испускаемого спектра (рис. 2). После внесения поправки на дифференциальное поглощение в мишени и записывающей системе можно достичь точности 0,05% в наиболее благоприятных случаях, но точность снижается с повышением содержания элемента. Электронное пятно может быть сделано меньше чем в 1 микрон диаметром без чрезмерного уменьшения силы сигнала, даже если элемент присутствует в

больших пропорциях. При тех напряжениях, которые обычно используются в трубках (15—25 кВ), в большинстве металлов электронный пучок проникает на глубину в несколько микрон, прежде чем его энергия снизится настолько, чтобы стать недостаточной для возбуждения характеристических рентгеновских линий металла. Следовательно, вполне поддается анализу объем порядка 1 кубического микрона, содержащий массу примерно 10^{-11} г,

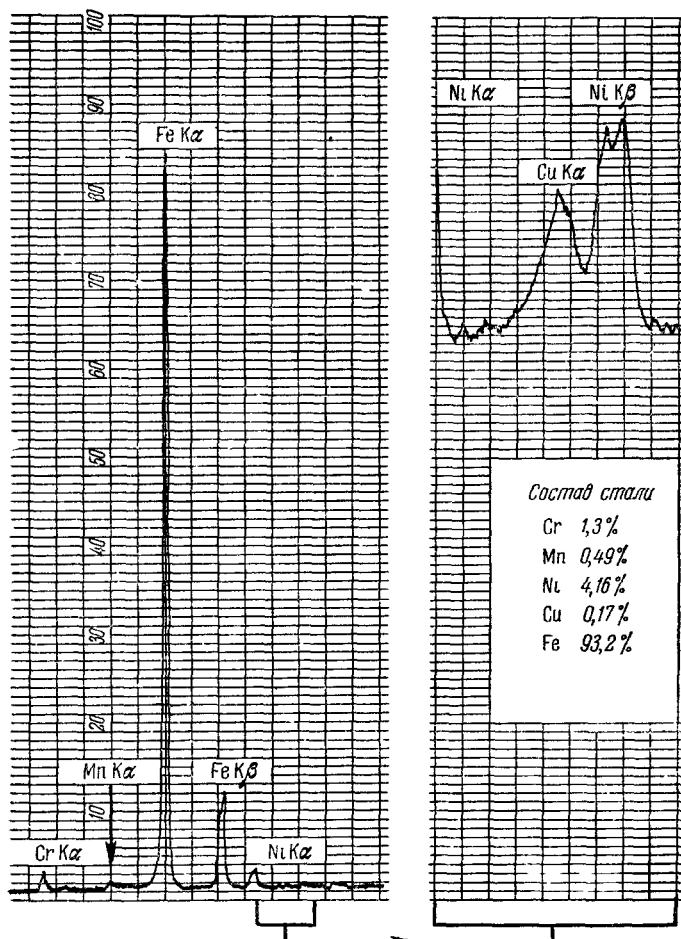


Рис. 2. Анализ состава стали с помощью рентгеновского микроанализатора.

а чувствительность, т. е. наименьшее количество вещества, которое еще может быть обнаружено, лежит между 10^{-14} и 10^{-15} г. Хотя некоторые иные методы анализа могут обеспечить большую точность определения, а один-два метода дают примерно ту же чувствительность, ни один из этих методов не может предложить хоть что-либо похожее на ту высокую степень микроскопической локализации, которая имеет место при применении микроанализатора с рентгеновскими лучами. Именно по этой причине этот метод находит все возрастающее применение в металлургических³⁰, минералогических^{26, 31, 32} и, в несколько меньшей степени, биологических исследованиях.

Оригинальный сканирующий микроанализатор был построен на основе старого электронного микроскопа. Усовершенствованная модель раз-

работывается сейчас в Исследовательской лаборатории в Хинкстоне (Tube Investments Research Laboratory, Hinxton), с целью применения ее в металлургических исследованиях. Эта модель позволяет одновременно определять содержание трех элементов за счет параллельного применения трех спектрометров. Сканирующая система теперь уже сочетается с микроанализатором, как это осуществлено в одном типе анализатора (Castaing-type microanalyser), созданном в лаборатории Элдермастона (A. E. I. Research Laboratory, Aldermaston) и демонстрировавшемся в этом году на выставке Физического общества. Более простой инструмент был недавно изготовлен Лонгом²⁶, первоначально предназначавшим его для минералогической работы. Так как большинство шлифов минералов достаточно тонко и поэтому оптически прозрачно, в стенку вакуумной камеры можно вдевать микроскоп, так что можно просматривать шлиф, чтобы выбирать участки для сканирования, представляющие интерес; когда электронное пятно попадает на шлиф, оно вызывает флуоресцентное свечение. Как и в описанном ранее случае, изображение формируется на экране катодной трубки длительного действия, показывая поверхностное распределение отдельных элементов в минерале или изменение концентрации вдоль заданной линии. Используя для получения изображения трубку с двойным электронным лучом, можно регистрировать концентрацию элемента немедленно по мере продвижения луча вдоль кривой, в окрестности которой проводится анализ. Для повышения точности самописец с пером может быть пространственно спарен с двухлучевым осциллоскопом; однако если требуемая точность анализа не превосходит одного процента, то такой анализ можно проводить непосредственно с помощью фотографии осциллоскопа. Значительное число микроанализов минералов и метеоритов было уже произведено^{26, 31, 32}.

Дальнейшее улучшение качеств микроанализаторов излучения сталкивается с тем затруднением, что интенсивность рентгеновских лучей уменьшается при уменьшении размера электронного пятна. Данкомб анализировал осадочные породы с зернами размером менее 0,25 микрона с помощью электронного пятна несколько большего размера, но получаемый сигнал был очень слаб. Анализ областей еще меньшего размера может производиться и этим инструментом; но необходимое время намного превышает время, затрачиваемое обычно в этих операциях, а выход излучения недостаточен для визуального обнаружения. Интенсивность может быть увеличена тремя путями: улучшением конструкции электронной пушки; корректировкой сферической аберрации электронных линз и за счет улавливания большей части испускаемого рентгеновского излучения. Исследования по всем трем направлениям ведутся в Кавендишской лаборатории и других местах. Имеются обоснованные надежды на существенный прогресс, особенно в третьем направлении, так что можно ожидать, что в ближайшем будущем удастся анализировать частицы меньше 0,1 микрона.

Другая основная проблема состоит в том, чтобы расширить круг элементов, которые возможно анализировать, так чтобы стало возможным анализировать элементы от алюминия вплоть до азота и углерода. Обнаружение и раздельная оценка содержания этих элементов имеют величайшее значение для черной металлургии, где в изобилии встречаются карбиды и нитриды. Если эта задача будет решена—а перспективы являются обнадеживающими^{33, 34}—тогда круг применений рентгеновских микроанализаторов чрезвычайно расширится, причем они могут стать весьма ценными и для биологов. В данный момент возможно обнаруживать наличие и оценивать концентрацию лишь более тяжелых элементов, которые могут появляться в патологических условиях, как, например, олово и

кремний в легких. Даже тогда, когда углерод, азот и кислород сами по себе будут поддаваться анализу, остается неясным, можно ли будет производить анализ без того, чтобы удалять ткань, или каким-либо другим образом отделять другие составляющие при электронной бомбардировке. Поэтому применимость эмиссионного микроанализа в биологии остается неясной до той поры, когда будут получены более полные данные. В металлургии и минералогии значение эмиссионного микроанализа уже вполне признано, открытым остается лишь вопрос о его дальнейших возможностях. Своеобразное сочетание микроскопического изображения с микроанализом представляется наиболее действенным методом (разумеется, в пределах разрешения) по сравнению с существующими в настоящее время оптическими и электронно-оптическими методами, так что эта новая техника независимо от того, называть ли ее микроскопией или нет, быстро завоевывает свое место среди других методов научного исследования.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Röntgen W. C., Sitz. Med.-phys. Ges. Würzburg **137**, (1895).
2. Kirkpatrick P. and Baez A. V., J. Opt. Soc. Amer. **38**, 766 (1948).
3. Kirkpatrick P. and Pattee H. H., Handbuch der Physik **30**, 305 (1957).
4. McGee J. F., X-ray Microscopy and Microradiography 164 (Acad. Press, New York, 1957).
5. Wolter H., Ann. Physik, Lpz., **10**, 94, 286 (1952).
6. Pattee H. H., X-ray Microscopy and Microradiography 135 (Acad. Press, New York, 1957).
7. Heycock C. T. and Neville F. H., Trans. Chem. Soc. Lond. **73**, 714 (1898); Phil. Trans. Roy. Soc. **194**, 201 (1900).
8. Sharpe R., X-ray Microscopy and Microradiography, 590 (Acad. Press, New York, 1957).
9. Andrews K. W. and Johnson W., X-ray Microscopy and Microradiography, 581 (Acad. Press, New York, 1957).
10. Trillat J. J., Rev. Sci., Paris **78**, 212 (1940); Rev. Metall **46**, 79 (1949).
11. Engström A., Physical Techniques in Biological Research **3**, chapter 10 (Acad. Press, New York, 1956).
12. Engström A. and Lundberg B., Exp. Cell. Res. **12**, 198 (1957).
13. Combee B. and Engström A., Biochim. Biophys. Acta **14**, 432 (1954).
14. Czermak P., Ann. Physik, Lpz. **60**, 760 (1896).
15. Sievert R., Acta Radiol., Stockh. **17**, 299 (1936).
16. Ardenne M. von Naturwiss. **27**, 485 (1939).
17. Cosslett V. E. and Nixon W. C., Nature **168**, 24 (1951); J. App. Phys. **24**, 616 (1953).
18. Saunders R. L. de C. H., X-ray Microscopy and Microradiography, 561 (Acad. Press, New York, 1957); Nature **180**, 1353 (1957).
19. Barclay A. E., Micro-arteriography (Blackwell, Oxford, 1951).
20. Bellman S., Acta Radiol., Stockh., Suppl. **102** (1953).
21. Smith D. S., X-ray Microscopy and Microradiography, 492 (Acad. Press, New York, 1957).
22. Nixon W. C., Proc. Roy. Soc. **A232**, 475 (1955).
23. Ong S. P. and LePoole J. B., App. Sci. Res. **7**, 233 (1958).
24. Lindström B., Acta Radiol., Stockh., Suppl. **125** (1955).
25. Röckert H., Acta Odont., Scand., **16**, Suppl. **25** (1958).
26. Long J. V. P., J. Sci. Instr. **35**, 323 (1958); thesis, Cambridge (1959).
27. Mosley V. M. and Wyckoff R. W. G., J. Ultrastructure Res. **1**, 337 (1958).
28. Castaing P. and Guinier A., Proc. Conf. Electron Microscopy, Delft, 1949, p. 60 (Martin Nijhoff, Delft, 1950); Castaing, R., thesis, Paris (1951).
29. Cosslett V. E. and Duncumb P., Nature **177**, 1172 (1956); X-ray Microscopy and Microradiography, 374 (Acad. Press, New York, 1957).
30. Melford D. A. and Duncumb P., Metallurgia **57**, 341 (1958).
31. Long J. V. P. and McConnell J. D. C., Miner. Mag. (in the press).
32. Agrell, S. O. and Long J. V. P. (unpublished work).
33. Mulvey T. and Campbell A. J., Brit. J. App. Phys. **9**, 406 (1958).
34. Dolby R. M., Proc. Phys. Soc. **73**, 81 (1959).