

а не тормозное  $\gamma$ -излучение в линенит. Лучи направлялись на ряд тонких одинаковых фольг из  $\text{Cu}^{63}$ ,  $\text{Ag}^{107}$  и  $\text{Ag}^{109}$ , вызывая в них ядерные расщепления. Число расщеплений, вызываемых непосредственно электронами, во всех фольгах одинаково, в то время как для фотонов оно линейно растёт с номером фольги. Это позволяет отличить оба вида расщепления и найти их эффективные сечения. Для электронов с энергией 16 MeV эффективные сечения равны  $1,6 \cdot 10^{-28}$  для  $\text{Cu}^{63}$ ,  $5,4 \cdot 10^{-28}$  для  $\text{Ag}^{107}$  и  $7,9 \cdot 10^{-28}$  для  $\text{Ag}^{109}$ . Для фоторасщепления сечение в 400 раз выше.

Э. Л. Бурштейн

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. K. Baldwin a. G. S. Klaiber, Phys. Rev. **70**, 259—270 (1948)... см. реферат Э. Шпольского, УФН **34**, вып. 3 (1948).
2. G. K. Baldwin a. G. S. Klaiber, Phys. Rev. **71**, 3—10 (1947).
3. G. K. Baldwin a. G. S. Klaiber, Phys. Rev. **73**, 1156—1163 (1948).
4. M. L. Perlman a. G. Friedlander, Phys. Rev. **74**, 442—448 (1948).
5. J. L. Lawson, Gen. El. Rev. **51**, No. 10, 47—50 (1948).
6. M. Schein, A. J. Hartzler a. G. S. Klaiber, Phys. Rev. **70**, 435 (1946).
7. G. S. Klaiber, E. A. Lubke a. G. C. Baldwin, Phys. Rev. **70**, 789 (1946).
8. E. A. Lubke, G. S. Klaiber a. G. C. Baldwin, Phys. Rev. **71**, 657—660 (1947).
9. N. A. Bonner, G. Friedlander a. oth., Phys. Rev. **71**, 511—520 (1947).
10. L. S. Skagge, T. S. Laughlin a. oth., Phys. Rev. **73**, 420 (1948).

#### МИКРОРАДИОГРАФИЯ ВТОРИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ\*)

Используя вторичные электроны, образованные рентгеновскими лучами попадающими на исследуемое изделие, можно получать замечательные картины, рисующие структуру объекта. Различают два метода подобной съёмки: просвечивание вторичными электронами исследуемого объекта и фиксация картины, создаваемой отражёнными вторичными электронами. Полученные картины, похожие несколько на микрофотографии, называют микрорадиограммами.

Этому методу исследования поверхности изделия или строения достаточно прозрачного объекта—около 8 лет. За это время была получена уверенность в целесообразности его применения для весьма большого числа случаев.

Рассмотрим сначала микрорадиограммы, получаемые при помощи отражённых вторичных электронов. Рентгеновские лучи проходят через чёрную бумагу, через плёнку и потом падают на объект. Плёнка прижата эмульсией к объекту, и успех метода определяется тем, что воздействуют на плёнку отражённые от объекта фотоэлектроны, а не прошедшие через неё рентгеновские лучи. Таким образом, прежде всего необходимо, чтобы коэффициент поглощения рентгеновских лучей плёнкой был ничтожно малым и, напротив, чтобы плёнка была весьма чувствительна к электронам. Фотографический слой должен быть поэтому очень тонким и состоять из очень

\*) J. J. Trillat, J. Appl. Phys. **19**, 844 (1948).

малых и нечувствительных зёрен. Рентгеновские лучи должны быть жёсткими, следовательно, надо работать при высоких напряжениях.

В специальных плёнках, которые употреблялись для этой цели, толщина эмульсии достигала  $\frac{1}{800}$  мм. Могут использоваться эмульсии с хлористым серебром, слабо чувствительные к рентгеновским лучам и очень чувствительные к электронам. Что касается напряжения на рентгеновской трубке, дающего удовлетворительную для этих опытов жёсткость, то оно должно лежать между 100 и 200 киловольт.

Разумеется, что в описанном методе исследуется лишь тонкий поверхностный слой образца, так как электроны не выходят с заметных глубин.

Успех этого метода определяется в значительной степени тем обстоятельством, что эмиссия электронов возрастает с увеличением атомного номера вещества. В оригинальной работе автора приводятся радиограммы, полученные с помощью отражённых электронов от плоской поверхности, состоящей из полосок металлов различных атомных номеров. Оказывается, что даже металлы-соседи по таблице Менделеева, как Fe и Ni, дают чётко различные потемнения плёнки. Работая в области напряжений 150—200 киловольт (здесь эффект вторичных характеристических лучей ничтожен по сравнению с действием фотоэлектронов), автор добился прекрасных радиограмм при экспозиции в несколько секунд.

Можно указать на ряд применений описанного метода. Прежде всего это исследование сплавов и смесей металлов. Ввиду малости зерна фотоэмульсии, полученная радиограмма может быть сильно увеличена, и мы на редкость отчётливо видим микроструктуру участка размером в доли квадратного сантиметра. При этом на одном снимке получается микроструктура большого участка поверхности.

Весьма целесообразно исследование этим методом руд и минералов. Мы отчётливо видим на микрорадиограммах урановые зёрна и зёрна кремния в урановой руде. Мы различаем в руде зёрна  $\text{PbS}$  от  $\text{NiAs}_2$  и от  $\text{SiO}_2$ . Нет сомнения в том, что этот метод представляет большой интерес для геологов и минералогов.

Прекрасные отпечатки радиограмм, приведённые в работе автора, показывают, что можно достигнуть совершенно замечательных результатов. Главное условие — это почти идеальный контакт фотослоя и образца. Большое поглощение и диффузия электронов в воздухе при неплотном прилегании могут полностью испортить микрорадиограмму.

Чтобы проверить механизм возникновения радиограммы, автор помещал на пути фотоэлектронов целлулоид толщиной  $\frac{1}{20}$  мм. Микрорадиограмма не появлялась. Это доказывает, что полученные снимки — это действительно следы фотоэлектронов, так как характеристические рентгеновские лучи металлов прошли бы через это препятствие без всякого труда.

Второй из методов, развитый автором, — это получение микрорадиограмм просвечиванием вторичными электронами. На пути рентгеновских лучей ставится лист чёрной бумаги, затем лист свинца толщиной 0,2 мм. Этот свинец является источником фотоэлектронов, которые проходят через очень тонкий (тысячные доли миллиметра) образец. За образцом находится фотоплёнка. На плёнку попадают как фотоэлектроны свинца, так и электроны, вырванные из просвечиваемого образца. В этих условиях при напряжении такого же порядка, как и в первом методе, т. е. 150—200 киловольт, число фотоэлектронов оказывается вполне достаточным, а рентгеновские лучи как первичные, так и вторичные характеристические не дают заметного следа на фотоплёнке. И в этом случае мы пользуемся мелкозернистой плёнкой и при увеличении получаем ряд интересных деталей на снимке с образцов размером в доли квадратного сантиметра.

Этот метод применялся с успехом для просвечивания бумаги, крыльев насекомых, животных и растительных тканей. В особенности интересно при-

менение этих радиограмм для образцов, непрозрачных для видимого света (микроскоп не пригоден!). Автор применяет этот метод для исследования тонких плёнок смазочных веществ, находившихся в контакте с деталью. Удаётся расшифровать структуру плёнок толщиной до 2 микрон.

Для того чтобы определить оптимальные условия эмиссии электронов, проводились специальные исследования. Было показано, что электроны отдачи можно не принимать во внимание — всё действие принадлежит фотоэлектронам. Распределение числа электронов по направлениям очень нерезкое. В направлении падающего луча эмиссия в 1,2 раза больше, чем в противоположном направлении. Асимметрия возрастает с уменьшением длины волны и атомного веса. Далее показано, что в эмиссии участвуют лишь атомы поверхностного слоя свинца (0,08 мм для  $L$ -электронов).

Следует отметить, что законы поглощения фотоэлектронов резко отличаются от закона поглощения рентгеновских лучей. Рентгеновское поглощение зависит примерно от четвёртой степени атомного номера; поглощение электронов зависит от плотности и не имеет простой связи с атомным номером. У рентгеновских лучей зависимость от атомного номера много резче; так, например, рентгеновские лучи поглощаются в золоте в 20 раз больше, чем в алюминии, а у электронов коэффициент поглощения в золоте всего лишь в три раза больше соответствующего коэффициента для алюминия. Это надо иметь в виду при расшифровке микрорадиограмм. Тщательное исследование характера поглощения фотоэлектронов имеет значение не только для расшифровки микрорадиограмм, но и для картин, наблюдаемых в электронном микроскопе.

А. К.