

десятков нм. Через определ. промежутки времени проводят рентгеноэлектронный анализ поверхности и получают зависимость интенсивностей определ. линий от времени травления (или от глубины, если известна скорость травления). Т. о. можно проводить последний анализ на глубину до неск. мкм. Используя зависимость интенсивности линий фотоэлектронного спектра от угла  $\alpha$ , определяют изменения состава образца по глубине до 10 нм без его разрушения.

Р. с. — единств. метод, позволяющий определить толщину  $d$  и качество монокристаллич. плёнок толщиной 0,5—3,0 нм. Метод основан на экспоненц. зависимости  $I$  от  $d$  и  $\alpha$ :

$$I_A(d) = I_A(0) \exp(-d/\lambda \sin \alpha),$$

где  $I_A(d)$  и  $I_A(0)$  — интенсивности линий элемента А соответственно при наличии на подложке плёнки толщиной  $d$  и без неё;  $\lambda$  — длина свободного пробега фотоэлектронов в плёнке. Для расчёта  $d$  достаточно измерить  $I_A(d)$  при двух разл. значениях угла  $\alpha$ .

Вследствие дифракции фотоэлектронов адсорбиров. молекулы на атомах адсорбента-монокристалла интенсивность рентгеноэлектронного спектра зависит от углов между потоком фотоэлектронов и разл. направлениями в монокристалле. Эта зависимость позволяет определить способ координации адсорбиров. молекулы.

Лит.: Неможкаленко В. В., Алешин В. Г., 1983; Электронная спектроскопия кристаллов, 2 изд., К., 1983; Миначев Х. М., Антошин Г. В., Широ Е. С., Фотоэлектронная спектроскопия и ее применение в катализе, М., 1981; Нефедов В. И., Черепин В. Т., Физические методы исследования поверхности твердых тел, М., 1983; Нефедов В. И., Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений, М., 1984. В. И. Нефедов.

**РЕНТГЕНОЭМУЛЬСИОННАЯ КАМЕРА** — координатный детектор частиц высоких энергий, позволяющий определить энергию частицы ( $\mathcal{E} > 1-2$  ТэВ) и параметры её траектории, используя образование в плотной среде электронно-фотонных каскадов. Последние развиваются в результате процессов тормозного излучения и образования электрон-позитронных пар (см. *Электронно-фотонные ливни*).

Электронно-фотонные каскады регистрируются по суммарному фотогр. действию пучка каскадных электронов на рентг. плёнку, помещённую на нек-рой глубине  $t$  в плотном поглотителе (обычно Pb или Fe). При достаточно большой энергии первичной частицы  $\mathcal{E}_0$  и достаточной степени развития каскада число каскадных электронов  $N$  на глубине  $t$  бывает столь велико (рис. 1), что вызванное ими скрытое изображение после проявления даёт пятно потемнения,

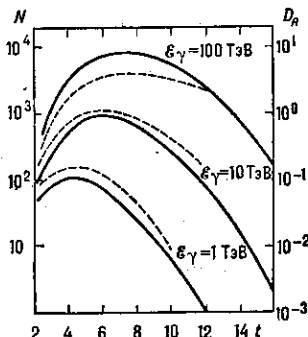


Рис. 1. Каскадные кривые: зависимость числа частиц  $N$  (сплошные линии, левая шкала) и интегрального потемнения  $D_R$  (штриховые линии, правая шкала) в круге радиуса  $R = 50$  мкм от глубины  $t$  в свинцовом поглотителе для разных значений энергии  $\gamma$ -кванта  $\mathcal{E}_\gamma$ .

видимое невооруж. глазом. Размеры пятна определяют и пространственную разрешающую способность Р. к. для регистрации отд. частиц, к-рая в ср.  $\sim 100$  мкм. Видимое пятно потемнения позволяет не только легко обнаружить место прохождения частицы, но и определить  $\mathcal{E}_0$  фотометрированием, т. к. степень его потемнения зависит от числа каскадных электронов, а следовательно и от величины  $\mathcal{E}_0$ .

Количественной мерой потемнения при фотометрировании служит величина  $D = \lg I_0/I$ , где  $I_0$  и  $I$  — ин-

тенсивности светового пучка, проходящего через диафрагму фотометра без пятна потемнения и с ним. Существует неск. методов определения энергии  $\mathcal{E}_0$  по фотометрич. измерениям. Наиб. широко используется интегральное потемнение  $D_R(\mathcal{E}_0, t)$  на глубине  $t$ , измеренное с помощью круговой диафрагмы радиуса  $R$  (иногда применяются диафрагмы с прямоуг. щелью). Связь между  $D_R$  и  $\mathcal{E}_0$  определяется свойствами эмульсии, к-рые характеризуются кривой почернения  $D(n)$  — зависимостью потемнения малого элемента площади от плотности  $n$  электронов, прошедших через этот элемент, и пространственным распределением плотности электронов  $n(\mathcal{E}_0, t, r, \varphi)$  в каскаде на глубине  $t$  ( $r$  — расстояние от оси каскада,  $\varphi$  — азимутальный угол в плоскости, перпендикулярной оси каскада). Интегральное потемнение  $D_R$  при вертикальном падении равно:

$$D_R(\mathcal{E}_0, t) = -\lg \left\{ \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi R} \int_0^0 \exp\{-\ln 10 D(n(\mathcal{E}_0, t, r, \varphi))\} \times r dr d\varphi \right\}. \quad (*)$$

Для определения  $\mathcal{E}_0$  эксперим. значения  $D_R$  сопоставляются с вычисленными по ф-ле (\*), в к-рой  $n(\mathcal{E}_0, t, r, \varphi)$  рассчитывается теоретически, а кривая почернения аппроксимируется ф-цией  $D(n) = D_{\max} [1 - \exp(-ns)]$ , где  $s$  — эфф. площадь зерна эмульсии,  $D_{\max}$  — макс. потемнение, до к-рого может быть засвечена плёнка (при бесконечно большой экспозиции). Т. к. с ростом  $n$  при переходе к области насыщения погрешность определения  $n$ , а следовательно, и  $\mathcal{E}_0$  резко возрастают, для расширения диапазона измеряемых энергий иногда используют одновременно рентг. плёнки двух типов — большой (1) и малой (2) чувствительности (рис. 2).

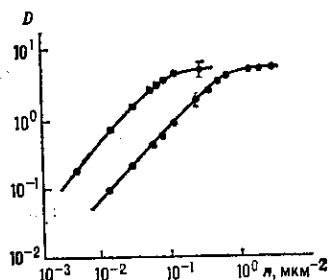


Рис. 2. Кривые почернения для рентгеновских плёнок РТ-6М (верхняя кривая) и РТ-СШ (нижняя).

В случае  $\mathcal{E}_0 \geq 10$  ТэВ при вычислении  $n(\mathcal{E}_0, t, r, \varphi)$  следует учитывать влияние многократного рассеяния на сечениях осн. процессов (тормозное излучение, образование электрон-позитронных пар), ответственных за развитие каскада в области больших энергий (эффект Ландау — Померанчука — Мигдала). Использование рентг. плёнок для количественных измерений требует введения поправок, учитывающих конструкцию реальных Р. к., слоистость поглотителей, воздушный зазор между Pb и фотоэмульсией и др. Точность определения энергии частиц Р. к.  $\sim 15-50\%$ .

Р. к. помимо энергии частицы позволяет определить угол падения каскада. Рентг. плёнка покрыта с двух сторон слоями эмульсий, разделёнными расстоянием 200—250 мкм, поэтому угол падения можно определить по отнесит. смещению пятен в эмульсионных слоях. Возможно и использование двух разл. плёнок, разделённых нек-рым промежутком с точным фиксированием их взаимного расположения. Точность намерения зенитного угла  $\sim 3^\circ$  и азимутального  $\varphi \sim 15^\circ$ .

Наряду с интегральным потемнением  $D_R$  для определения  $\mathcal{E}_0$  используют сканирование области потемнения фотометрич. ячейкой малого размера с последующей обработкой сканограммы на ЭВМ.