

дований объектов, и в частности спектрометрами энергетич. потерь электронов, рентг. спектрометрами, сложными системами детектирования прошедших, обратно рассеянных и вторичных электронов, выделяющих группы электронов, рассеянных на разл. углы, имеющих разл. энергию и т. п. Приборы комплектуются ЭВМ для комплексной обработки поступающей информации.

Эмиссионные Э. м. создают изображение объекта электронами, к-рые эмитирует сам объект при нагревании, бомбардировке первичным пучком электронов, под действием эл.-магн. излучения и при наложении сильного электрич. поля, вырывающего электроны из объекта. Эти приборы обычно имеют узкое целевое назначение (см. *Электронный проектор*).

Зеркальные Э. м. служат гл. обр. для визуализации электростатич. «потенциальных рельефов» и магн. микрополей на поверхности объекта. Осн. электронно-оптич. элементом прибора является *электронное зеркало*, причём одним из электродов служит сам объект, к-рый находится под небольшим отрицат. потенциалом относительно катода пушки. Электронный пучок направляется в электронное зеркало и отражается полем в непосредственной близости от поверхности объекта. Зеркало формирует на экране изображение «в отражённых пучках»: микрополя возле поверхности объекта перераспределяют электроны отражённых пучков, создавая контраст в изображении, визуализирующий эти микрополя.

Перспективы развития Э. м. Совершенствование Э. м. с целью увеличения объёма получаемой информации, проводившееся многие годы, продолжится и в дальнейшем, а улучшение параметров приборов, и прежде всего повышение разрешающей способности, останется главной задачей. Работы по созданию электронно-оптич. систем с малыми aberrациями пока не привели к реальному повышению разрешения Э. м. Это относится к несимметричным системам коррекции aberrаций, криогенной оптике, к линзам с корректирующим пространств. зарядом в приосевой области и др. Поиски и исследования в указанных направлениях ведутся. Продолжаются поисковые работы по созданию электронных голографич. систем, в т. ч. и с коррекцией частотно-контрастных характеристик линз. Миниатюризация электростатич. линз и систем с использованием достижений микро- и нанотехнологий также будет способствовать решению проблемы создания электронной оптики с малыми aberrациями.

Лит.: Практическая растровая электронная микроскопия, под ред. Д. Тоулдстейна, Х. Яковича, пер. с англ., М., 1978; Спенс Д., Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения, пер. с англ., М., 1986; Стоянов П. А., Электронный микроскоп СВЭМ-1, «Известия АН СССР, сер. физ.», 1988, т. 52, № 7, с. 1429; Хокс П., Каспер Э., Основы электронной оптики, пер. с англ., т. 1—2, М., 1993; Oechsner H., Scanning auger microscopy, Le Vide, les Couches Minces, 1994, т. 50, № 271, p. 141; McMullan D., Scanning electron microscopy 1928—1965, «Scanning», 1995, т. 17, № 3, с. 175. П. А. Стоянов.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС (ЭПР)—резонансное поглощение (излучение) эл.-магн. волн радиочастотного диапазона (10^9 — 10^{12} Гц) парамагнетиками, парамагнетизм к-рых обусловлен электронами. ЭПР — частный случай парамагн. резонанса и более общего явления — *магнитного резонанса*. Лежит в основе радиоспектроскопич. методов исследования вещества (см. *Радиоспектроскопия*). Имеет синоним — *электронный спиновый резонанс* (ЭСР), подчёркивающий важную роль в явлении спинов электронов. Открыт в 1944 Е. К. Завойским (СССР). В качестве парамагн. частиц (в случае конденсированных сред — парамагн. центров), определяющих парамагнетизм, могут выступать электроны, атомы, молекулы, комплексные соединения, дефекты кристалла, если они обладают отличным от нуля *магнитным моментом*. Источником возникновения магн. момента могут служить неспаренный спин или отличный от нуля суммарный спин (момент кол-ва движения) электронов.

В постоянных магн. полях в результате снятия вырождения у парамагн. частицы возникает система магн. (спино-

вых) подуровней \mathcal{E}_i (см. *Зеемана эффект*). Между ними под действием эл.-магн. излучения возникают переходы, приводящие к поглощению (излучению) фотона с частотой $\omega_{ij} = |\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_j|/\hbar$. В случае одного электрона в постоянном магн. поле H энергии подуровней $\mathcal{E}_{1,2} = \pm g\beta H/2$ и соответственно частота ЭПР ω определяется соотношением

$$\hbar\omega = g\beta H, \quad (1)$$

где g — фактор спектроскопич. расщепления; β — магнетон Бора; обычно, $H = 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ Э; $g \approx 2$.

Экспериментальные методы. Спектрометры ЭПР (радиоспектрометры) работают в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Используется техника СВЧ-диапазона — генератор (обычно *клицтрон*), система волноводов и резонаторов с детектирующим устройством. Образец объёмом в неск. мм³ помещается в область резонатора, где составляющая эл.-магн. волны (обычно магнитная), вызывающая переходы, имеет пучность. Резонатор устанавливается между полюсами электромагнита — источника постоянного магн. поля. Резонансное условие типа (1) обычно достигается путём изменения напряжённости поля H при фиксированном значении частоты генератора ω . Значение магн. поля при резонансе (H_p) в общем случае зависит от ориентации вектора H по отношению к образцу. Сигнал поглощения в виде типичного колоколообразного всплеска или его производной (рис. 1) наблюдается

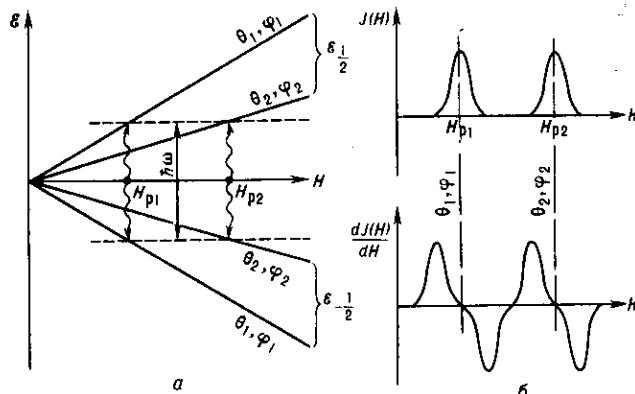


Рис. 1. Электронный парамагнитный резонанс: а — парамагнитная частица со спином $S = 1/2$, помещённая во внешнее магнитное поле, имеет два подуровня ($\mathcal{E}_{1/2}$ и $\mathcal{E}_{-1/2}$), каждый из которых изменяется пропорционально полю H и зависит от его ориентации по отношению к кристаллографическим осям, задаваемой углами θ и ϕ . При резонансных значениях магнитного поля H_{p1} и H_{p2} (углы θ_1, ϕ_1 и θ_2, ϕ_2) разность $\mathcal{E}_{1/2} - \mathcal{E}_{-1/2}$ становится равной кванту энергии $\hbar\omega$ СВЧ-излучения. При этом в спектре поглощения (б) наблюдаются характерные всплески вблизи H_{p1} и H_{p2} (приведены сигнал поглощения и его производная).

с помощью осциллоскопа или самописца. Наиб. часто исследуется сигнал поглощения, пропорциональный мнимой части динамической магн. восприимчивости (χ'') образца. Однако в ряде случаев регистрируется её действительная часть (χ'), определяющая долю намагниченности, меняющуюся синфазно с магн. компонентой эл.-магн. волны. ЭПР может проявляться в виде микроволновых аналогов оптич. эффектов Фарадея и Коттона — Мутона. Для их регистрации используются волноводы, в конце к-рых устанавливаются спец. антенны, вращающиеся вокруг оси волновода и измеряющие поворот плоскости поляризации или эллиптичность волны, вышедшей из образца. Широкое распространение получили импульсные методы, позволяющие анализировать временные зависимости сигналов ЭПР (т. н. спиновую индукцию и *спиновое эхо*). Существует и ряд др. методик для изучения релаксационных процессов, в частности для измерения времён релаксации.

Теоретическое описание. Для описания спектра ЭПР используется *спиновый гамильтониан*, к-рый для каждого