

точником информации о плотности незанятых электронных состояний выше уровня Ферми.

На возбуждении и регистрации истинно-вторичных электронов основан только один метод — электронная оже-спектроскопия. Совместная регистрация отражённых первичных и возбуждённых вторичных электронов производится, в частности, в разл. пороговых методиках Э. с., к-рые изучают особенности спектров в области порогов возбуждения электронов остова, структуру зависимостей разных коэф. вторичной электронной эмиссии от энергии первичных частиц и др. её характеристик. Др. пример методики смешанного типа — спектроскопия медленных вторичных электронов, к-рые образуются в мишени в результате торможения первичных электронов с образованием множества каскадов вторичных частиц. Исследование угл. распределений медленных вторичных электронов разной энергии позволяет, напр., получать сведения о зонной структуре твёрдого тела над уровнем Ферми [8].

Важную дополнит. информацию о свойствах твёрдого тела даёт спектроскопия спин-поляризованных электронов. Измеряя спиновые состояния рассеянных электронов, изучают явления, обусловленные спин-орбитальным и обменным взаимодействиями, в частности магнетизм поверхностных слоёв вещества [9].

Из методов ионно-электронной спектроскопии наиб. применима ионная оже-спектроскопия, используемая преим. для элементного анализа приповерхностных слоёв твёрдого тела. В отличие от электронной оже-спектроскопии, она обладает селективностью: определ. ион может возбуждать оже-электроны лишь в атомах определ. элементов. При этом чувствительность метода часто оказывается существенно более высокой. Причина избирательности кроется в обменном механизме ионизации энергетич. остовных уровней атомов ионным пучком. Применение метода целесообразно, когда производится ионное профилирование исследуемого объекта и, следовательно, в приборе имеется «готовый» ионный пучок.

С помощью электронных потоков, сформированных источниками разл. природы и используемых в разных методах Э. с., часто получают идентичную физ. информацию. Так, исследование методами регистрации фото-, оже- или квазиупруго рассеянных электронов ср. энергии (св. сотен эВ) показали, что максимумы угл. распределений электронов с хорошей точностью соответствуют ориентациям импульсов вылетающих электронов вдоль атомных цепочек в твёрдом теле, поэтому Э. с. с угл. разрешением — один из важнейших методов структурного анализа приповерхностной области твёрдого тела [10]. Наиб. эффективны исследования, проводимые одновременно неск. методами в одинаковых эксперим. условиях, они позволяют получать комплексную информацию об объекте. При этом для решения каждой конкретной задачи подбирается определ. сочетание методов Э. с. и методов, не относящихся к Э. с.

Эксперим. воплощение методов Э. с. сводится к измерению энергетич. спектров электронов, эмитируемых изучаемым объектом под действием зонда под разными углами. Спектры возбуждаются и регистрируются с помощью специально разрабатываемых электронных спектрометров. Все типы электронных спектрометров содержат сверхвысоковакуумную камеру, снабжённую системой откачки, в к-рую помещают исследуемый образец, источник возбуждающего излучения, энергоанализатор, а также регистрирующую аппаратуру. Для изменения угла регистрации электронов в спектрометрах с угл. разрешением и для варьирования угла падения первичных частиц образец, зонд (напр., электронную пушку) и энергоанализатор (или часть этих узлов) монтируют на спец. манипуляторах, обеспечивающих их подвижность в камере. В зависимости от особенностей изучаемого объекта и поставленной задачи спектрометр может иметь шлюзовые устройства для ввода образцов в камеру, дополнит. камеру для их обработки, системы нанесения адсорбатов на поверхность и др.

«Сердцем» любого электронного спектрометра является энергоанализатор, разделяющий электроны по энергиям,

его энергетич. разрешение обычно лежит в диапазоне 0,1—0,5%. Стандартные электронные пушки с термо- и автокатодами обеспечивают монокинетичность пучков электронов соответственно ~ 1 и $\sim 0,1$ эВ. Поэтому в Э. с. потеря энергии электронов высокого разрешения (абс. разрешение порядка единиц мэВ) их дополнительно монокинетизируют — первичные пучки пропускают через энергоанализаторы.

Наиб. распространение в Э. с. получили энергоанализаторы электростатического типа с тормозящим или отклоняющим полем. Квазисферич. сеточные анализаторы с тормозящим полем позволяют, кроме анализа электронов по энергиям, визуализировать угл. распределения эмитируемых электронов на коллекторе, для этого его покрывают люминофором (напр., в дифракц. методах исследования). В случае отклоняющего поля преим. используют анализаторы типа цилиндрич. зеркала и секторные со сферич. полем. С их помощью исследуют и пространств. распределения электронов во всём диапазоне их энергий. Специфика регистрирующей аппаратуры обусловлена тем, что структура энергетич. спектров наблюдается на непрерывном фоне, часто превосходящем её по величине, и задача состоит в выделении этой структуры и её измерении. В разработанной аппаратуре используется как аналоговая, так и цифровая техника в сочетании с ЭВМ (в частности, для увеличения отношения сигнал/фон широко применяется аналоговое дифференцирование спектра с помощью синхронного детектирования). Предложены способы полного удаления фона. В случае цифровой техники часто применяют способ, основанный на использовании многоканального анализатора, работающего в режиме многоканального счётчика.

Лит.: 1) Гомоюнова М. В., Электронная спектроскопия поверхности твёрдого тела, «УФН», 1982, т. 136, с. 105; 2) Проблемы физической электроники, Л., 1986, с. 74; 3) Ibach H., Mills D. L., Electron energy loss spectroscopy and surface vibrations, N. Y., 1982; 4) Dynamical phenomena at surfaces, interfaces and superlattices, Proc Intern. Summer School of E. Hore Majorana Center, Erice, Italy, 1984, В.— [a. o.], 1985; 5) Egerton R., Electron energy-loss spectroscopy in the electron microscope, [2 ed.], N. Y.—L., 1989; 6) Атлас ионизационных спектров, К., 1989; 7) De Crescenzi M., Local structural investigation of surfaces and interfaces by EELFS and EXFAS techniques, «Ultramicroscopy», 1989, v. 28, № 1, p. 65; 8) Проблемы физической электроники-88, Л., 1988, с. 76; 9) Кесслер И., Поляризованные электроны, пер. с англ., М., 1988; 10) Chambers S. A., Elastic scattering and interference of backscattered primary, Auger and X-ray photoelectrons at high kinetic energy: principles and applications, «Surf. Sci. Repts», 1992, v. 16, № 6, p. 261.

М. В. Гомоюнова, С. Л. Дударев.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕМПЕРАТУРА (T_e) — величина, имеющая размерность темп-ры, характеризующая ф-цию распределения f_e электронов по скорости (энергии) в неравновесном электронном газе (в плазме, в кристалле, см. *Горячие электроны*). Э. т. определяется интегральным соотношением

$$k T_e(r, t) = (m_e / 3 n_e) \int (v - u_e)^2 f_e(r, v, t) dv,$$

где u_e — ср. скорость направленного движения электронов. Если частота межэлектронных столкновений ν_{ee} , перераспределяющих энергию между электронами, велика по сравнению с обратным временем τ_{ei}^{-1} рассеяния энергии электронов при взаимодействии с атомами и ионами в плазме, с фононами в кристалле, с электрич. полем и т. п. $\nu_{ee} \gg \tau_{ei}^{-1}$, то за время порядка ν_{ee}^{-1} в неравновесной системе устанавливается равновесие в электронной подсистеме, характеризуемое максвелловской ф-цией распределения с темп-рой T_e . При этом T_e может быть как больше темп-ры тяжёлых частиц (напр., в плазме электрич. разряда), так и меньше (в структуре ионизирующей ударной волны).

В случае сильного нарушения равновесия электронной подсистемы, когда условие $\nu_{ee} \tau_{ei} \gg 1$ не выполняется, T_e уже не характеризует ф-цию распределения, однако понятием Э. т. пользуются как нек-рым эфф. параметром, служащим мерой ср. энергии хаотич. движения электронов, $\bar{\epsilon} = (3/2) k T_e$. В случае анизотропных распределений