

РЕНТГЕНОЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ХИМИИ

Л. Н. МАЗАЛОВ

Новосибирский государственный университет

X-RAY PHOTOELECTRON SPECTROSCOPY AND ITS APPLICATION IN CHEMISTRY

L. N. MAZALOV

In this paper, physical principle of the method is described, a connection between chemical shifts in X-ray electron spectra and particularities of electron structure of a compound is considered, the history of the method's formation and development is presented.

Изложены физические основы метода, рассмотрена связь химических сдвигов в рентгеноэлектронных спектрах с особенностями электронного строения вещества, рассказано об истории становления и развития метода.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Успехи химии невозможны без широкого применения в химических исследованиях достижений физики и ее новых методов. В настоящее время в химии используется обширный арсенал физических методов для исследования электронного и пространственного строения вещества. Многие из них основываются на базе тех достижений в физике, которые лежат в основе современных представлений о строении вещества, природе электромагнитного излучения и процессах их взаимодействия.

Становление того или иного метода обычно связано с работами многих исследователей, каждый из которых вносил свой вклад в развитие метода. Но нередко случается, что работы только определенной группы ученых позволяют наиболее отчетливо показать возможности метода и в дальнейшем сам метод непосредственно связывается с работами этой группы исследователей.

Обычно новый этап в развитии метода связан с появлением новых технических возможностей, позволяющих повысить точность, чувствительность и мощность отдельных устройств, используемых в установках и приборах. При этом нередко случается, что ученые, заложившие основы метода, на первых порах остаются в тени и только со временем становится ясна важность вкладов, сделанных ими на ранних этапах. Важнейшим является также фактор востребованности временем, когда возможности метода смыкаются с необходимостью получения соответствующей информации для развития других областей науки.

Среди новых методов, нашедших широкое применение в различных областях химии в последние годы, являются методы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФС). Оба метода основаны на одном и том же физическом явлении – внешнем фотоэффекте, суть которого состоит в том, что под действием света из вещества выбиваются электроны

(фотоэлектроны). Последние имеют определенную кинетическую энергию $E_{\text{кин}}$, величина которой зависит от энергии квантов возбуждающего света $h\nu$.

Однако до последнего времени было принято рассматривать эти методы более или менее независимо друг от друга, что связано прежде всего с применением различных источников возбуждения фотоэлектронов. В случае рентгеноэлектронной спектроскопии в качестве такого источника используется рентгеновская трубка, которая испускает мощный поток рентгеновских фотонов. В фотоэлектронной спектроскопии источником является газоразрядная лампа, генерирующая ультрафиолетовое излучение. Оба метода позволяют изучать электронное строение атомов, молекул и твердых тел.

При рассмотрении электронного строения можно выделить внутренние (остовые) электроны и внешние (валентные) электроны системы. Внутренние электроны сильно связаны с ядром атома, поэтому требуется значительная энергия (ее называют энергией связи или энергией ионизации внутренних электронов атома), чтобы удалить эти электроны из атома.

В табл. 1 приведены энергии связи электронов для некоторых атомов Периодической таблицы. Как видно, энергия связи внутренних электронов $1s$, $2s$ и $2p$ всегда значительна, в то время как для валентных электронов $3s$ и $3p$ соответствующие значения гораздо меньше. Из табл. 1 также видно, что энергии остовных электронов какого-либо атома сильно отличаются от энергий остовных электронов любого другого атома Периодической системы.

При образовании молекул создается единая для всей молекулы система молекулярных орбиталей. Строение верхних занятых молекулярных орбиталей определяет химическую индивидуальность молекулы. Остовные электроны атомов, например $1s$, или какие-либо другие относящиеся к глубоким электронным слоям в химическом связывании при образовании молекулы не принимают заметного участия и остаются “атомными”. В твердых телах, кристаллах энергетические уров-

ни валентных электронов превращаются в полосы разрешенных энергий – зоны.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА

В основе методов рентгеновской и фотоэлектронной спектроскопии лежит явление внешнего фотоэффекта. Под действием кванта света из вещества выбиваются электроны, энергия кванта ($\epsilon = h\nu$) в соответствии с законом сохранения энергии тратится на энергию ионизации $E_{\text{св}}$ и сообщение этому электрону кинетической энергии ($E_{\text{кин}} = mv^2/2$):

$$h\nu = E_{\text{св}} + E_{\text{кин}}. \quad (4)$$

Явление внешнего фотоэффекта было открыто выдающимся немецким физиком Генрихом Герцем в 1887 году. Теоретическое объяснение явлению фотоэффекта дано А. Эйнштейном в 1905 году. Он получил основное уравнение фотоэффекта (1).

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия фактически зародилась в те далекие годы при исследованиях фотоэлектрического эффекта, в ходе которых рентгеновские лучи применяли для возбуждения фотоэлектронов. Так, Инес в 1907 году описал опыты, в которых использовали рентгеновскую трубку и проводили анализ скоростей эмитированных фотоэлектронов по отклонению их в магнитном поле с последующим фотодетектированием (регистрация на фотопленке). В то время идеальными возможностями для проведения таких исследований обладала лаборатория Резерфорда в Манчестере (Англия), которая занималась исследованием ядра, в частности исследованием β -лучей (электронов), испускаемых радиоактивными веществами. Первые эксперименты по изучению рентгеноэлектронных спектров были осуществлены Мозли, Раулингтоном и Робинсоном еще до начала первой мировой войны. В 1914 году Резерфорд сделал первый шаг к выводу основного уравнения РФЭС, которое впоследствии было приведено к виду

$$E_{\text{кин}} = h\nu - E_{\text{св}}. \quad (5)$$

После войны Робинсон продолжил эти работы. В это время РФЭС рассматривалась как инструмент исследования структуры атома, дополняющий рентгеновскую спектроскопию, и в связи с успехами последней метод не получил должного развития.

После второй мировой войны Стейхард и Серфас из университета Лехай (Англия) решили возродить метод РФЭС в качестве аналитического метода, в частности для исследования химических процессов на поверхности. Работа Стейхарда на соискание степени доктора философии была озаглавлена пророчески: “Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия для химического

Таблица 1. Энергии связи электронов в атомах, эВ

Элемент	1s	2s	2p	3s	3p	3d
⁵ B	188	5				
⁶ C	284	7				
⁷ N	400	9				
⁸ O	543	41,6	7			
¹⁴ Si	1839	150	99,2	8		
¹⁵ P	2149	189	136	6		
²⁶ Fe	7112	844,6	720	91,3	52,7	6

анализа". Новый этап развития рентгеноэлектронной спектроскопии был связан с работами, проводимыми с 1954 года в Уппсальском физическом институте (Швеция) Каем Зигбаном, сыном выдающегося шведского ученого Карла Манне Зигбана; последний широко известен своими работами в области рентгеновской спектроскопии.

В 1954 году в Уппсале был получен первый рентгеновский фотоэлектронный спектр очищенного кристалла хлорида натрия. В уппсальском спектре впервые наблюдалась полностью разрешенная линия, соответствующая фотоэлектронам, не потерявшим энергию. Ранее существовало мнение, что соответствующую линию наблюдать будет трудно, так как электроны, выходящие из кристалла, будут терять часть своей энергии из-за столкновений с атомами кристалла. В дальнейшем группа ученых под руководством К. Зигбана наблюдала и сдвиг внутренних уровней атомов под влиянием химической связи (химический сдвиг). Зигбан ввел для названного метода термин ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis). Русская аббревиатура названия метода ЭСХА (электронная спектроскопия для химического анализа) в настоящее время одновременно с английской ESCA широко используется в отечественной научной литературе.

Накопление обширного экспериментального материала, полученного методами рентгено- и фотоэлектронной спектроскопии [1–4], а также методами рентгеновской спектроскопии [5], стимулировало развитие теории. Впервые появились надежные и простые способы проверки достоверности теоретических расчетов и допущений.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

В уравнении (1) отражены важные особенности внешнего фотоэффекта. Однако в некоторых случаях для получения точных значений энергии связи $E_{св}$ необходимо учитывать дополнительные факторы, отражающие особенности исследуемых систем.

Ион, который образуется при удалении электрона из атома или молекулы, также получает в результате столкновения с фотоном некоторую кинетическую энергию, на которую должна быть уменьшена энергия измеряемого фотоэлектрона. В этом случае уравнение для фотоэффекта имеет вид

$$h\nu = E_{св} + E_{кин} + E_{отд}, \quad (6)$$

где $E_{отд}$ — энергия отдачи при эмиссии электрона.

Однако масса образованного иона настолько больше массы вылетающего электрона, что кинетическая энергия иона (в соответствии с законом сохранения количества движения) пренебрежимо мала по сравнению с энергией электрона, и ее можно не учитывать

при интерпретации спектров. При $h\nu \approx 1500$ эВ $E_{отд} \sim 0,1$ эВ, поэтому добавочным членом в уравнении (3) можно пренебречь.

Атомы, образующие молекулу, могут колебаться относительно друг друга, молекула как целое может еще и вращаться. В связи с этим возникает необходимость учета возможности нахождения молекулы до и после выбивания фотоэлектрона в состояниях с определенной колебательной $E_{кол}$ и вращательной $E_{вращ}$ энергиями.

Если электрон выбит с некоторого электронного уровня, а образовавшийся молекулярный ион находится в некотором колебательном и вращательном состояниях, то основное уравнение фотоэффекта (1) имеет вид

$$h\nu = E_{св} + E_{кин} + \Delta E_{кол} + \Delta E_{вращ}, \quad (7)$$

где $\Delta E_{кол}$ — изменение колебательной, а $\Delta E_{вращ}$ — изменение вращательной энергии молекулы при ионизации. Таким образом, фотоэлектрон, выбитый с какого-либо электронного уровня с энергией $E_{св}$, может иметь различную $E_{кин}$ в зависимости от того, в какое колебательное (вращательное) состояние переходит молекула в процессе ионизации.

Из (4) видно, что каждому значению $E_{кин}$ соответствует свой максимум в фотоэлектронном спектре. Так как $E_{св} \gg \Delta E_{кол} > \Delta E_{вращ}$, то соответствующие линии рентгеноэлектронного спектра, связанные с различными значениями $\Delta E_{кол}$ и $\Delta E_{вращ}$, должны проявиться в виде отдельных максимумов на фоне основной линии, соответствующей выбиванию электрона с некоторого электронного уровня. Однако малое энергетическое расстояние между отдельными колебательными и вращательными уровнями ($< 0,1$ эВ) не позволяет обычно выявить в фотоэлектронном спектре отдельные линии, связанные с этими уровнями. Наличие соответствующих уровней проявляется в фото- и рентгеноэлектронных спектрах в виде расширения основной фотоэлектронной линии, отвечающей соответствующему электронному уровню. Тонкая структура линии проявляется только с помощью спектрометров с очень высоким разрешением.

Как уже говорилось, уравнение (1) описывает самые основные, наиболее существенные особенности фотоэффекта. Учет конкретного строения изучаемых систем требует внесения поправок в уравнение (1). В случае изучения рентгеноэлектронных спектров твердых тел уравнение (1) также необходимо модифицировать, чтобы учесть особенности их электронного строения.

В свободных атомах электроны располагаются на отдельных энергетических уровнях, образующих дискретный спектр. Каждый уровень характеризуется определенной энергией — энергией связи $E_{св}$, которая определяется работой, которую необходимо совершить,

чтобы полностью удалить электрон из атома на бесконечность. В этом случае электрон полностью теряет связь с атомом и считается, что он находится на нулевом уровне или уровне вакуума.

Взаимодействие атомов при образовании кристаллической решетки приводит к превращению энергетических уровней свободных атомов в энергетические зоны кристалла. Каждый уровень расщепляется в зону разрешенных энергий, причем зоны тем уже, чем глубже лежит исходный уровень. Электроны, ранее находившиеся на дискретных уровнях отдельных атомов, заполняют наиболее низко лежащие уровни энергии в зонах. Верхнюю из заполненных зон называют валентной, а наиболее низкую из незаполненных – зоной проводимости. Кристалл, у которого валентные зоны полностью заполнены, а более высокие зоны пусты, является диэлектриком. Если одна из зон заполнена лишь частично, возникает электронная структура, свойственная металлу.

В этом случае электроны заполняют уровни зоны проводимости начиная от расположенных вблизи ее дна до некоторого верхнего уровня, значение энергии которого зависит от полного числа электронов в системе. Энергия, соответствующая этому уровню, называется энергией Ферми. В свою очередь, энергия, необходимая для перевода электрона с уровня Ферми на уровень вакуума, определяет работу выхода (ϕ) для данного вещества (рис. 1). В случае твердых образцов уравнение (1) видоизменяется, поскольку образец находится в электрическом контакте со спектрометром.

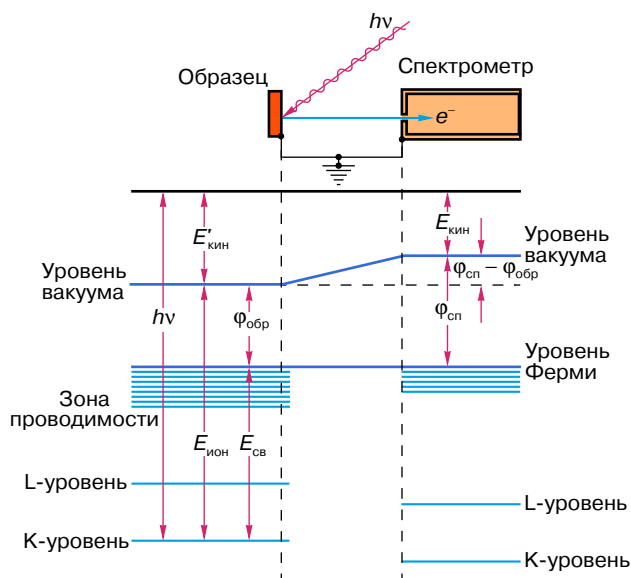


Рис. 1. Схема энергетических уровней для твердого образца и спектрометра

Действительно, если контактируют два проводника с различными работами выхода, между проводниками происходит обмен электронами. Электроны проводимости с более высоким уровнем Ферми (малая работа выхода) перетекают на проводник с более низким уровнем Ферми (большая работа выхода). В результате первый из проводников заряжается положительно, а второй – отрицательно. Возникновение этих зарядов вызывает смещение энергетических уровней обоих проводников. Подобное смещение претерпевают все энергетические уровни, в том числе и уровень Ферми. Процесс обмена электронами между образцом и спектрометром продолжается до тех пор, пока уровни Ферми обоих металлов не выровняются. В этом случае между металлом (образцом) и спектрометром устанавливается разность потенциалов $(\phi_{обр} - \phi_{сп})/e$, которая увеличивает или уменьшает измеряемую величину $E_{кин}$ фотоэлектронов образца. Иными словами, уровни вакуума различны для образца и спектрометра. Переходя от поверхности образца в спектрометр, фотоэлектрон чувствует потенциал, равный разности между работой выхода спектрометра $\phi_{сп}$ и работой выхода образца $\phi_{обр}$.

На рис. 1 показана схема энергетических уровней для материалов образца и спектрометра в условиях установившегося между ними равновесия. Схема позволяет определить энергии связи электронов в исследуемом образце с учетом возникающей между спектрометром и образцом разности потенциалов.

Как видно из рис. 1, энергия связи $E_{св}$ в образце может быть определена по отношению к общему уровню Ферми из соотношения

$$h\nu = E_{св} + E_{кин} + \phi_{сп}. \quad (8)$$

Электроны регистрируются спектрометром, поэтому измеряемая в спектрометре величина $E_{кин}$ связана с величиной $E'_{кин}$ на поверхности образца соотношением

$$E_{кин} = E'_{кин} - (\phi_{обр} - \phi_{сп}). \quad (9)$$

Энергия связи (ионизации) относительно уровня вакуума будет определяться соотношением

$$E_{ион} = E_{св} + \phi_{обр}. \quad (10)$$

Поверхность образцов, не обладающих хорошей проводимостью, может заряжаться при испускании электронов. Это приводит к сдвигу эффективного уровня образца относительно уровня Ферми спектрометра. Уравнение для $E_{св}$ с учетом возможной зарядки образца будет иметь вид

$$E_{св} = h\nu - E_{кин} - \phi_{сп} \pm E_{заряд}, \quad (11)$$

где $E_{заряд}$ – поправка, учитывающая возможность зарядки образца.

Обычно для преодоления трудностей при определении $E_{св}$, связанных с зарядкой образца, а также наличия других возможных причин, обуславливающих сдвиг уровней, используют привязку изучаемых спектров к спектру какого-либо вещества (стандарта), для которого точно известны энергии связи некоторых внутренних уровней.

В качестве стандарта наиболее часто используется слой углеводородов, оседающих на образце и всегда присутствующих в камере спектрометра из-за проникновения в нее паров масла откачных насосов, дегазации органических прокладок, находящихся в приборе. Энергия $1s$ -линии углерода, находящегося в этом слое, принимается равной 285,0 эВ, и по отношению к ней измеряется энергия всех остальных исследуемых линий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Из уравнения (1) видно, что если известны величины $h\nu$ и $E_{кин}$, то можно определить энергию ионизации $E_{ион}$ или энергию связи $E_{св}$ соответствующего уровня. Для определения $E_{кин}$ используются специально созданные электронные спектрометры. Электронный спектрометр (рис. 2) состоит из трех основных частей, в которых соответственно происходит генерация электронов, анализ их энергии и регистрация. В спектрометре поток ионизирующего излучения направляется на образец. Электроны могут быть выбиты из любой оболочки молекулы, ионизационный потенциал которой меньше энергии облучения. Выбитые электроны попадают в анализатор энергий электронов спектрометра. В анализаторе электроны описывают различные траектории в зависимости от своих энергий и напряжения, приложенного к электродам анализатора.

Наиболее распространен и хорошо известен сферический анализатор. В этом анализаторе к обкладкам сферического конденсатора прикладывается заданное напряжение. Разность потенциалов между двумя пластинами сферического конденсатора непосредственно

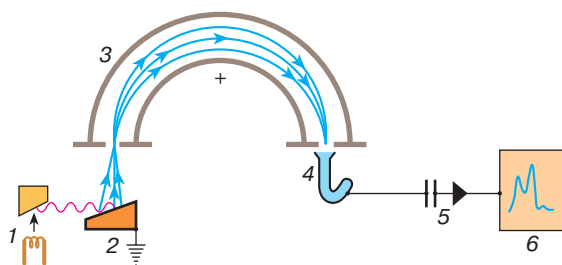


Рис. 2. Принципиальная схема рентгеновского электронного спектрометра: 1 – источник рентгеновского излучения, 2 – образец, 3 – анализатор, 4 – детектор электронов, 5 – усилитель, 6 – самописец

связана с кинетической энергией электронов, прошедших через анализатор соотношением

$$V = \frac{E_{кин}}{e} \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (12)$$

где $E_{кин}$ – кинетическая энергия электрона, V – разность потенциалов между двумя сферами радиусов R_1 и R_2 . Если менять напряжение на обкладках, то можно проанализировать спектр энергии $E_{кин}$, которой обладают электроны, падающие на входную щель анализатора.

Исследуемое вещество облучают монохроматическим рентгеновским излучением. В качестве источника рентгеновских монохроматических квантов может быть использована обычная рентгеновская трубка, анод которой сделан из материала, имеющего достаточно интенсивную и узкую линию рентгеновского излучения. В качестве таких линий выступают обычно $K_{\alpha_{12}}$ -линия Mg ($h\nu = 1253,6$ эВ) или $K_{\alpha_{12}}$ -линия Al ($h\nu = 1486,6$ эВ).

В качестве детектора электронов может быть использован обычный электромметр или пропорциональный счетчик. В серийных промышленных спектрометрах применяются электронные умножители. В этих приборах каждый попавший в них фотоэлектрон выбивает лавину вторичных электронов, которые регистрируются электронной схемой как отдельный импульс. Интенсивность рентгеноэлектронной линии определяется числом импульсов в единицу времени.

ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ

Элементный состав. Остовные электроны в молекуле, как было сказано выше, сохраняют признаки своего атома, что позволяет проводить элементный анализ вещества: наличие определенного элемента обнаруживается по присутствию линии, соответствующей его K - (или другой внутренней) оболочке. Так, например, кислород имеет линию, связанную с $1s$ -электронами в области ~ 530 – 534 эВ, атом фтора – в районе ~ 684 – 686 эВ. Хотя и имеется определенный разброс в энергетическом положении $1s$ -уровня элемента (~ 5 эВ) в различных химических веществах, однако разность энергий $1s$ -линий соседних элементов, например кислорода и фтора (~ 150 эВ), намного больше этого разброса. Следовательно, величины энергий связи можно использовать для определения качественного состава, поскольку величины $E_{св}$ для разных элементов существенно отличаются друг от друга. Экспериментальные значения энергии связи для некоторых элементов приведены в табл. 1.

Химический сдвиг. Несмотря на постоянство энергии остовных уровней атома, в различных веществах



Рентгеноэлектронный спектр $\text{Na}_2\text{N}_2\text{O}_3$ ясно указывает наличие структурно неэквивалентных атомов азота, и это исключает симметричную структуру (I). В то же время можно также ожидать, что структуры II и III будут давать две полосы в спектре N1s. Окончательный выбор между структурами (II) и (III) возможен только при анализе величины расщепления N1s полосы, связанной с различием величины электронной плотности на атомах азота.

Степень окисления. Рентгеноэлектронные спектры позволяют четко показать, что энергия связи внутреннего уровня атома в сильной степени зависит от степени окисления элемента, спектр которого изучается. Так, уже в первых работах было установлено, что при одинаковых ближайших соседях сдвиг внутренних уровней исследуемого атома в сторону увеличения $E_{\text{св}}$ тем больше, чем больше степень окисления элемента в соединении.

При изучении поверхности металлов и сплавов часто возникают вопросы, является ли поверхность окисленной и какой именно компонент сплава окислен. Рентгеноэлектронные спектры в большинстве случаев помогают решить эту задачу, поскольку энергия связи электрона в металле обычно на несколько электрон-вольт меньше, чем в оксиде, причем с увеличением степени окисления также растет положительный химический сдвиг.

Интересный эксперимент описан в книге К. Зигбана с сотрудниками [1]. Металлический бериллий испарялся при давлении 10^{-4} торр и осаждался на алюминиевую подложку. Образец облучали рентгеновскими квантами K_{α} -линии Al и изучали выбитые 1s-электроны с целью определения энергии связи 1s-электрона в бериллии. Спектр (рис. 5) состоит из двух линий одинаковой интенсивности, расстояние между которыми равно $2,9 \pm 0,1$ эВ. Появление двух линий вместо одной можно объяснить тем, что металл частично окислен и одна из линий электронного спектра соответствует металлическому, а другая — окисленному бериллию. Для проверки этого предположения образец нагревали на воздухе до полного окисления бериллия и снова снимался электронный спектр. На этот раз была получена только одна 1s-линия. Ее положение совпадает с положением линии меньшей кинетической энергии на рис. 5. Следовательно, это линия бериллия в оксиде. Для дополнительного доказательства бериллиевый образец, полученный испарением в вакууме, частично восстанавливали цирконием, после чего был получен его электронный спектр. Хотя в спектре видны обе линии, линия, соответствующая оксиду, гораздо менее интенсивна.

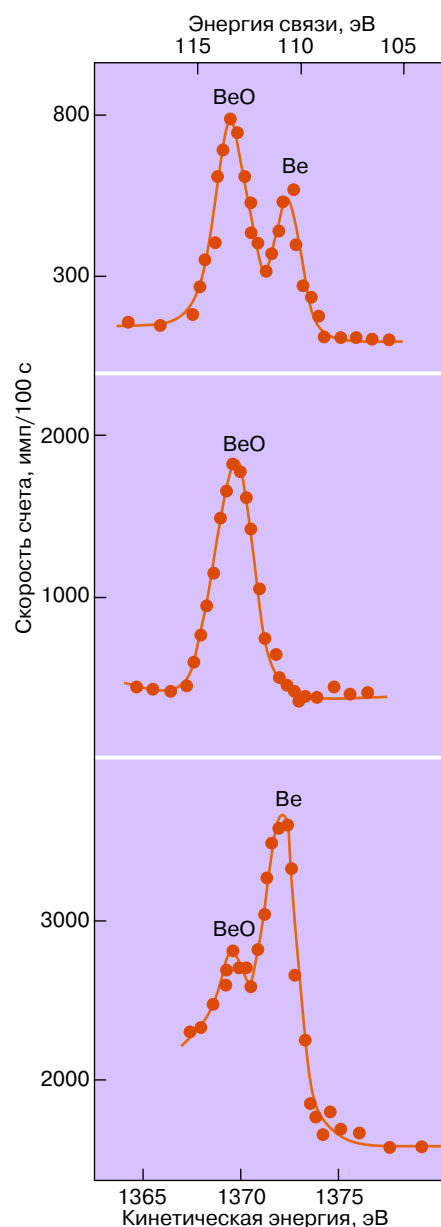


Рис. 5. Рентгеноэлектронные Be1s-спектры

Поверхность твердого тела. Метод рентгеноэлектронной спектроскопии в настоящее время широко применяют для исследования поверхности твердых тел. В рентгеноэлектронной спектроскопии регистрируются электроны, вышедшие из слоя вещества, в котором они не успевают отдать часть своей кинетической энергии другим электронам и атомам в образце. Толщина этого слоя $\sim 20\text{--}40 \text{ \AA}$, и, следовательно, рентгеноэлектронные спектры характеризуют только атомы поверхностного слоя. Вследствие этого рентгеноэлектронные

спектры внутренних уровней атомов, входящих в соединение или материал, позволяют определять элементный состав поверхности, концентрацию элементов на поверхности, химическое состояние атомов на поверхности и приповерхностных слоях. Именно эти аналитические возможности метода позволяют изучать различные процессы, протекающие на поверхности [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены основы нового физического метода – рентгеновской электронной спектроскопии, проанализированы возможности применения метода к исследованию электронного строения веществ, рассмотрены наиболее характерные примеры, иллюстрирующие возможности метода.

Дальнейшее детальное знакомство с изложенным материалом интересующиеся читатели могут получить ознакомившись с монографиями [1–6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зигбан К., Нордлинг К., Фальман А. и др. Электронная спектроскопия. М.: Мир, 1971.
2. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная и фотоэлектронная спектроскопия. М.: Знание, 1983.

3. Нефедов В.И. Электронные уровни химических соединений. М.: ВИНТИ, 1975. (Сер. Строение молекул и химическая связь.)

4. Бейкер А., Беттеридж А. Фотоэлектронная спектроскопия. М.: Мир, 1975.

5. Мазалов Л.Н. Рентгеновские спектры и химическая связь. Новосибирск: Наука, 1982.

6. Нефедов В.И., Черепин В.Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983.

Рецензент статьи Н.Ф. Степанов

* * *

Лев Николаевич Мазалов, доктор физико-математических наук, профессор Новосибирского государственного университета, зав. лабораторией физических методов исследования, руководитель отдела структурной химии Института неорганической химии Сибирского отделения РАН. Область научных интересов – рентгеновская и рентгеноэлектронная спектроскопия, электронное строение вещества. Автор 280 научных работ, семи монографий, трех учебных пособий для студентов физиков и химиков НГУ.