

1. Физические основы метода Оже-электронной спектроскопии

Различные методы спектроскопии электромагнитных излучений и спектроскопии заряженных частиц могут использоваться для диагностики состава (анализа) поверхности и приповерхностных слоев твердых тел¹. В табл.1 приведены некоторые основные методы спектроскопии, используемые для анализа поверхностных слоев твердых тел, классифицированные согласно типу частиц, используемых для возбуждения спектра и частиц - носителей информации о составе вещества.

Таблица 1. Основные методы спектроскопии, используемые для диагностики состава поверхностных слоев.

Средства возбуж- дения Носители информации	Фотоны	Электроны	Ионы
Фотоны	РФС (рентгеновская флуоресцентная спектроскопия)	РЭС (рентгеновская эмиссионная спектроскопия)	ИРС (ионно-рентгеновская спектроскопия)
Электроны	РФЭС (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия) УФЭС (ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия)	ЭОС (электронная Оже-спектроскопия)	ИОС (ионная Оже-спектроскопия)
Ионы	ЛМС (лазерная масс-спектрометрия)	ИМС (искровая масс-спектрометрия)	ВИМС (вторично-ионная масс-спектрометрия)

Методы электронной спектроскопии основаны на измерении энергетического спектра электронов, испускаемых с поверхности твердого тела под действием тех или иных возбуждающих факторов.

В электронной Оже-спектроскопии (ЭОС) для возбуждения используется пучок электронов, называемых *первичными электронами*. Обычно применяются первичные электроны с энергией от 1 до 25 кэВ. Рассмотрим процессы, происходящие в твердом теле под действием

первичных электронов. Во-первых, имеет место *упругое рассеяние электронов* на потенциале электронных оболочек атомов. Электроны, покинувшие образец после одного или нескольких актов упругого рассеяния, имеют ту же энергию, что и первичные электроны.

Часть энергии первичных электронов (рис.1) может быть передана в результате неупругого рассеяния электронам внутренних оболочек атомов, в результате чего последние, вместе с неупругорассеянными первичными электронами могут эмитироваться с поверхности твердого тела. Эти электроны называют *вторичными*, их количество в спектре быстро падает с ростом энергии.

Образовавшаяся за счет неупругого столкновения вакансия на оболочке атома через короткое время ($\tau \sim 10^{-16}$ с) заполняется электроном одного из вышележащих уровней. Избыток энергии может пойти на испускание *рентгеновского кванта*¹ или передан третьему электрону, который может быть испущен атомом.

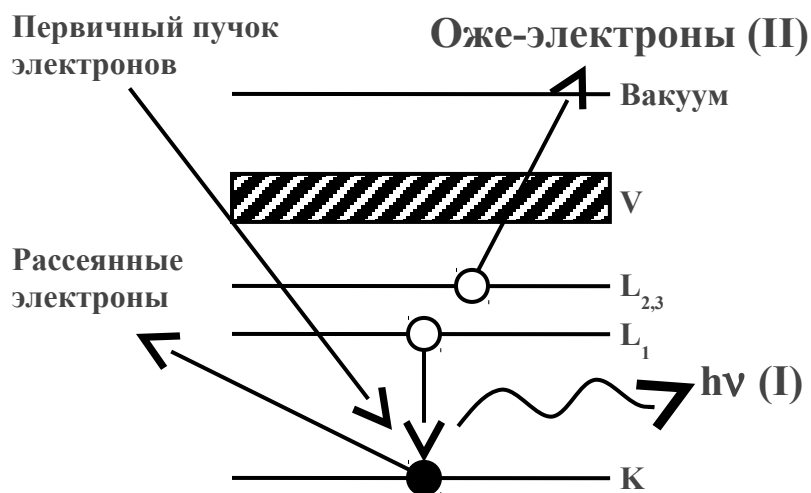


Рис.1. Схема процесса возбуждения электронов, приводящего к образованию характеристического рентгеновского излучения (I) или Оже-электронов (II)

¹ Спектр эмиссии рентгеновских квантов является характеристичным и может быть использован для химического анализа; соответствующий метод называют рентгеновской эмиссионной спектроскопией

Кинетическая энергия этого электрона зависит от разности потенциальных энергий начального (уровень K), промежуточного (L_1) и конечного состояния (L_2), поэтому спектр энергии таких электронов будет *характеристичен* для атомов каждого химического элемента.

Процесс заполнения вакансии за счет электронных переходов между внутренними оболочками атома с передачей избытка энергии третьему электрону называется *эффектом Оже*, а эти электроны – *Оже-электронами*. Таким образом, в основе метода ЭОС лежат такие процессы, как ионизация внутренних атомных уровней первичным электронным пучком, безызлучательный Оже-переход и выход Оже-электрона в вакуум, где он регистрируется при помощи электронного спектрометра.

Точно также, как и при возбуждении электронным пучком, Оже-электроны могут испускаться и в том случае, когда вакансия на внутренней электронной оболочке атома создается под действием ускоренных ионов или за счет поглощения рентгеновского кванта с испусканием фотоэлектрона. Соответствующий метод называется Оже-спектроскопией с ионным или рентгеновским возбуждением. Эффект Оже был открыт в 1925 году Пьером Оже (P.Auger)², работавшим с рентгеновскими лучами.

На рис.2 качественно представлен типичный спектр электронов, испускаемых твердым телом под действием пучка высокоэнергетичных первичных электронов с энергией E_p . На нем обычно наблюдаются сильный пик упругорассеянных электронов с максимумом около E_p и низкоэнергетическая полоса вторичных электронов. Оже-электроны дают небольшие пики на кривой энергетического распределения $N(E)$ на сильном фоне вторичных электронов. Выделение спектра Оже-электронов на этом фоне представляет собой весьма трудную экспериментальную задачу. Метод, в котором возбуждаемые электронным пучком Оже-электроны используются для идентификации компонентов на поверхности, был предложен в 1953 году Лэндером³, однако широкое применение Оже-спек-

троскопии для химического анализа началось после 1968 года, когда Харрис предложил дифференцировать кривые энергетического распределения $N(E)$ для подавления фона вторичных и неупругорассеянных Оже-электронов⁴. На рис.3 в качестве примера приведен Оже-спектр серебра в интегральной и дифференциальной форме.

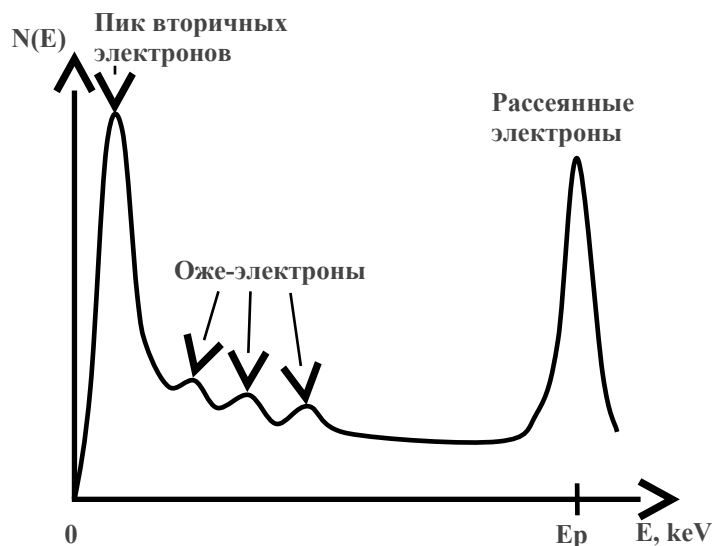


Рис. 2. Типичный спектр вторичных, рассеянных и Оже-электронов.

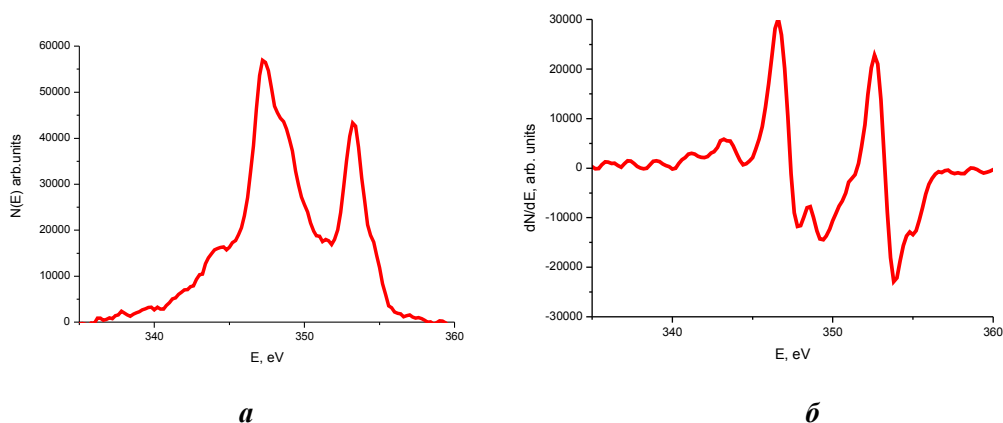


Рис. 3. Оже-спектр Ag: *a* - интегральный $N(E)$; *б* – дифференцированный dN/dE .

Рассмотрим подробнее связь энергетического положения Оже-линии в спектре с энергетическим спектром атомов вещества. Пусть первичная вакансия образовалась в К-оболочке атома, соответствующий уровень имеет энергию E_K

(рис.1), и она заполняется электроном из L-оболочки, имеющим энергию E_{L1} , а разность энергии $E_{L1} - E_K$ передается электрону с уровня L_2 . Энергия Оже-электрона будет

$$E_m = E_K - E_{L1} - E_{L2} - \varphi_A, \quad (1)$$

где φ_A – работа выхода анализирующего электрода спектрометра. Рассмотренный Оже-переход идентифицируется как переход KL_1L_2 . Возможен целый ряд подобных переходов (KL_1L_1 , KL_1L_2 , $M_2M_4M_4$, ...) с разными вероятностями. Характерной особенностью метода Оже-спектроскопии является то, что энергия Оже-электронов не зависит от энергии электронов возбуждающего пучка, а определяется исключительно разницей энергий электронных уровней атомов элемента и, в некоторой степени, его химическим окружением.

В отличие от ЭОС, в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) спектральное положение характеристических пиков фотоэлектронов зависит от энергии возбуждающего рентгеновского кванта $h\nu$ и энергии уровня (например E_k), с которого выбит фотоэлектрон:

$$E_m = h\nu - E_k - \varphi_A. \quad (2)$$

Поскольку для Оже-процесса нужны, по крайней мере, два энергетических уровня и три электрона, в отдельных атомах H и He Оже-электроны возникать не могут. Точно так же не могут быть источниками Оже-электронов изолированные атомы Li, имеющие на внешней оболочке один электрон. Все остальные элементы могут быть идентифицированы методом ЭОС. Наиболее вероятные Оже-переходы, наблюдаемые в электронной Оже-спектроскопии, представлены на рис.4. Это переходы электронов между соседними орбиталями, т.е. серии KLL, LMM, MNN, NOO и OOO. Хотя, как говорилось выше, Оже-эффект в изолированных атомах Li невозможен, в твердом теле валентные электроны обобщены, а потому возможны переходы типа KVV с участием валентных электронов. Это позволяет определять литий методом ЭОС в различных соединениях.

Как упоминалось выше, заполнение вакансии на внутренних оболочках может происходить как с эмиссией Оже-электрона, так и с излучением рентгеновского кванта (рис.5). Вероятность релаксации в результате Оже-эмиссии превышает вероятность испускания рентгеновского кванта для относительно неглубоких уровней с энергией не превышающей ~ 2 эВ. Это утверждение справедливо для всех атомных уровней – K, L, M, N и т.д.

Метод ЭОС, как и другие методы электронной спектроскопии, позволяет получать информацию только о составе приповерхностных слоев образца. Причиной этого является малая средняя длина свободного пробега электронов с энергией, типичной для Оже-электронов (50 – 2000 эВ) вследствие их интенсивного неупругого рассеяния в твердом теле. Оже-электроны, отдавшие энергию на возбуждение плазменных колебаний, на возбуждение внутренних оболочек или на межзонные переходы, исключаются из наблюдаемых характеристических Оже-пигов и становятся частью почти однородного фона вторичных электронов, на который накладываются Оже-пики. На рис.6 показана зависимость глубины выхода Оже-электронов от их энергии. Глубина выхода слабо зависит от вида матрицы, т.к. основные механизмы потерь включают в себя возбуждение электронов валентной зоны, а плотность валентных электронов не является сильно меняющейся функцией Z . Фактически, эмиссия за пределы твердого тела оказывается заметной только для Оже-электронов, испущенных атомами поверхности и приповерхностных слоев (2 – 5 монослоев). В силу этого, метод Оже-спектроскопии чувствителен к составу атомов на поверхности и нескольких приповерхностных слоев образца. Уже при наличии на поверхности исследуемого образца одного монослоя адсорбата, линии веществ, составляющих адсорбат, доминируют в Оже-спектре.

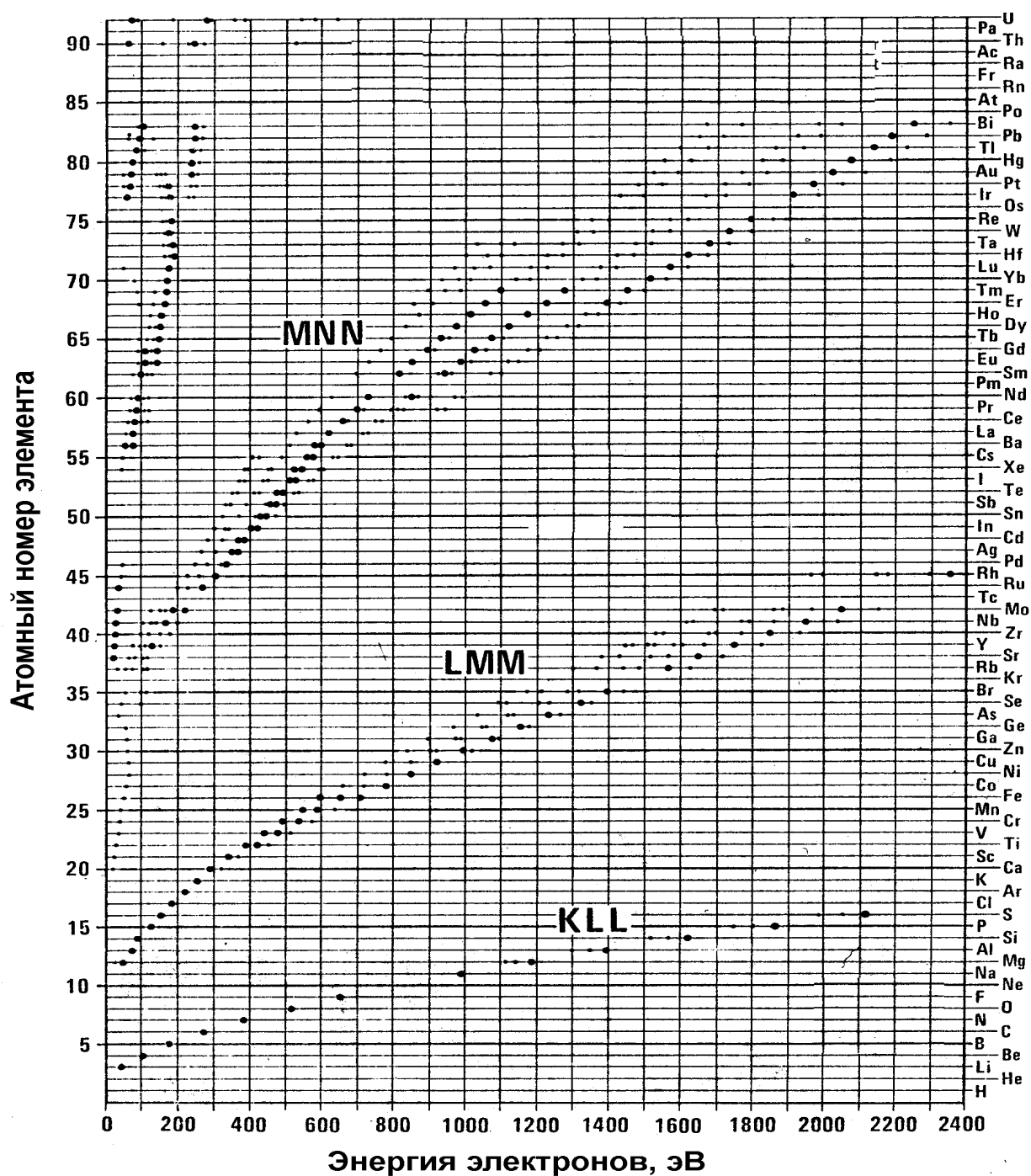


Рис. 4. Наиболее четко выраженные Оже-переходы, наблюдаемые в ЭОС. Точки, имеющие более интенсивную черную окраску, представляют собой наиболее вероятные Оже-переходы.

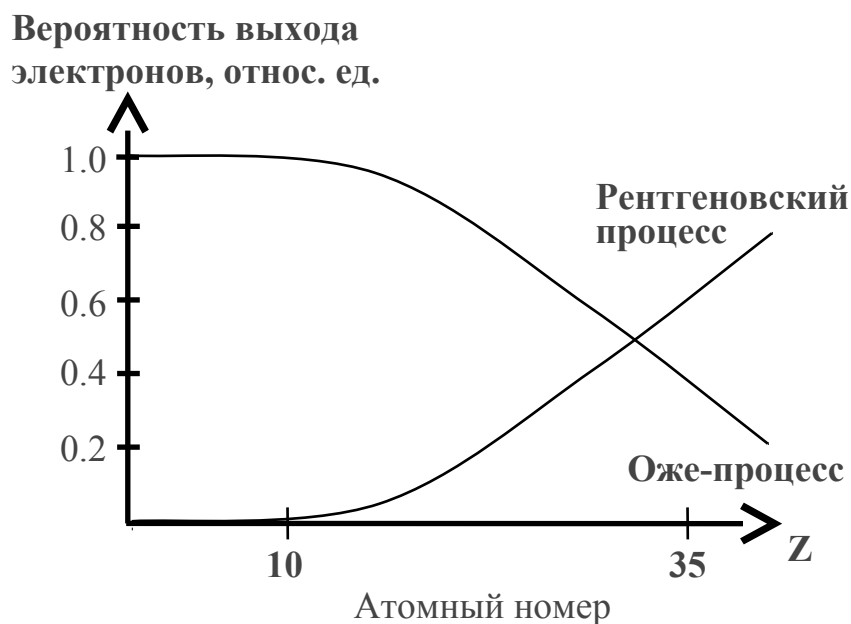


Рис. 5. Относительные вероятности релаксации после образования дырки на *K*-оболочке путем эмиссии Оже-электрона и путем испускания рентгеновских фотонов с характеристической энергией.

Ввиду этого, анализ твердых тел методом Оже-спектроскопии необходимо проводить в условиях сверхвысокого вакуума⁵ ($p \sim 10^{-10}$ Торр), позволяющего исследовать атомно-чистые поверхности.

Рис.6. Зависимость глубины выхода Оже-электронов от их энергии.

Поскольку в Оже-электронной эмиссии могут участвовать электроны валентных оболочек атомов, участвующих в образовании химических связей, фор-

ма линии и энергия максимума зависят от химического окружения атомов вещества. В силу этого из Оже-спектров можно получать информацию о химической связи в исследуемом веществе. Если имеется сильная химическая связь между двумя или большим числом атомов, то внутренние гибридизированные электронные уровни могут сдвинуться на несколько электронвольт по сравнению с их энергией в изолированных атомах (так называемые химсдвиги). На рис.7. в качестве примера приведены дифференциальные Оже-спектры атомов Si в образцах на основе диоксида кремния и элементарного кремния в области перехода LVV кремния.

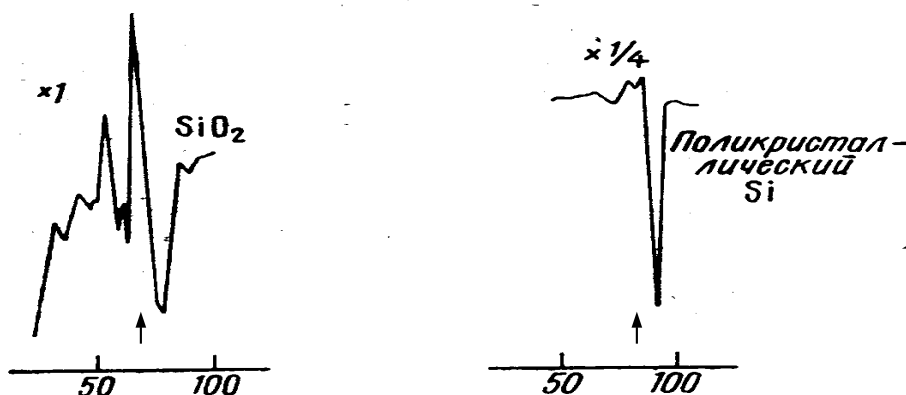


Рис. 7. Спектры Оже-электронов кремния, соответствующие переходу LVV для SiO_2 (76 эВ) и Si (92 эВ).

При ионной связи электронные уровни электроотрицательных элементов сдвигаются в сторону меньших энергий, а электроположительных – в сторону более высоких энергий. Соответствующий химический сдвиг в кинетической энергии Оже-электрона наблюдается экспериментально. Если с изменением химического состава меняется электронная плотность состояний в валентной зоне, то наблюдается изменение формы Оже-пиков, обусловленных переходами, в которых участвуют валентные электроны.

Тонкая структура Оже-спектров не всегда обусловлена лишь распределением электронной плотности в валентной зоне. Оже-электроны, выходящие с

поверхности, могут терять дискретные количества энергии, отдавая ее на возбуждение плазмонов, ионизацию внутренних уровней, межзонные возбуждения, чему соответствуют различные пики. В Оже-спектре такие пики будут иметь характерные энергии, меньшие, чем энергия основной линии. При формировании тонкой структуры Оже-спектра основное значение имеют плазмонные потери. Плазмоны – квазичастицы, которые могут создаваться быстрыми электронами, теряющими дискретные количества энергии на возбуждение коллективных колебаний плазмы твердого тела. Плазмонные потери энергии есть величина, характерная для данного твердого тела и изменяющаяся при изменении химического состава.

Сдвиг спектра также может происходить вследствие накопления заряда на поверхности из-за малой проводимости образца. При этом также может происходить уширение энергетических линий на Оже-спектре и уменьшение отношения сигнал/шум.

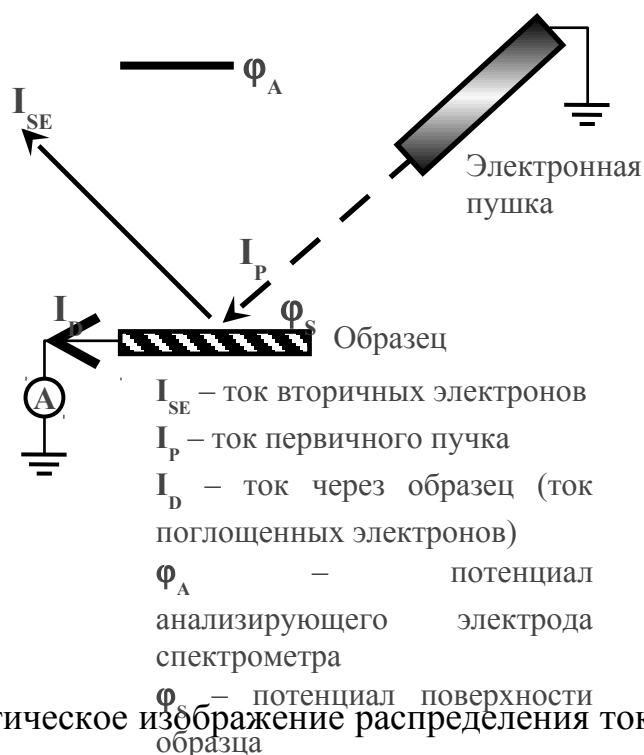


Рис. 7. Схематическое изображение распределения токов и потенциалов в системе электронная пушка – образец – анализатор.

В случае металлического или сильнолегированного полупроводникового образца зарядки поверхности не происходит, в отличие от образца с плохой проводимостью. Рассмотрим подробнее второй случай.

На поверхности присутствует некий не равный нулю потенциал ϕ_s , который может изменяться (рис. 7). После включения электронной пушки происходит перераспределение заряда и токов. Так как ток Оже-электронов пренебрежимо мал, то формула для распределения токов будет выглядеть следующим образом:

$$I_p = I_{SE} + I_D. \quad (3)$$

Ток через образец постоянен и зависит только от проводимости образца, тогда из (3) видно, что на перераспределение токов, а, следовательно, и заряда могут оказывать влияние изменение тока первичного пучка (I_p) и изменение тока вторичных электронов (I_{SE}). Первый может изменяться за счет неустойчивости тока во времени, за счет неустойчивости фокусирующей системы и за счет перемещения пучка. Второй может претерпевать изменения за счет перемещения пучка на участок с другим коэффициентом выхода вторичных электронов. Изменение соотношения (3) приводит к тому, что разность потенциалов $\phi_A - \phi_s$ изменяется, следствием чего и является сдвиг линий спектра, а также их размытие и искажение.

Существует несколько способов, позволяющих избежать зарядки образца:

1. Для стока заряда на поверхность образца с плохой проводимостью сначала напыляют тонкую пленку металла, а затем узким пучком ионов протравливают отверстие, в которое затем позиционируют электронный зонд. При этом расстояние от анализируемого участка до металлического контакта будет небольшим, что способствует стеканию заряда;
2. Для компенсации заряда на поверхности в дополнение к электронному зонду на нее направляют пучок медленных ($E=5-10$ эВ) электронов, радиус которого в несколько раз превышает диаметр зонда. Ток этого пучка регулируют таким об-

разом, чтобы в стационарном режиме полный ток двух электронных пучков точно компенсировал заряд, уносимый вторичными электронами и стекающий через образец;

3. Заряд можно устранить путем подбора угла падения электронного пучка на поверхность, изменяя угол позиционирования с помощью манипулятора. Так как коэффициент выхода вторичных электронов сильно зависит от угла падения первичных², то в ряде случаев удастся подобрать некий угол, при котором изменение заряда поверхности во времени будет нулевым.

В заключение изложения физических основ метода Оже-спектроскопии и его практического применения ниже приведена таблица с основными характеристиками распространенных методов электронной спектроскопии для диагностики поверхности и приповерхностных слоев.

Таблица 2. Некоторые характеристики методов РФЭС, УФС и ЭОС.

	РФЭС	УФС	ЭОС
Возбуждающие частицы	фотоны	фотоны	электроны
Энергия возбуждающих частиц	~1000 – 1500 эВ (MgK _α , Al, Cu, W)	2 – 15 эВ	3 – 10 кэВ
Область, откуда эмитируются характеристичные частицы	Латеральный размер – диаметр рентгеновского пучка Глубина – 0.5 – 2 нм	Латеральный размер – диаметр УФ пучка Глубина – 1–3 нм	Латеральный размер – диаметр электронного пучка Глубина – 0.5 – 2 нм
Энергия регистрируемых частиц	10 – 2 500 эВ	1 – 10 эВ	10 – 2 500 эВ
Естественная ширина линий в спектре, $\Delta E/E \cdot 100\%$	~0.2%	~0.2%	~0.5%
Относительный предел обнаружения, %ат (ат/см ²)	~0.1 (~10 ¹³)	~0.1 (~10 ¹³)	~0.1 (~10 ¹³)
Особенности	Значительная величина химсдвига линий спектра. Значение энергий линий в фотоэлектронном спектре зависит от энергии воз-		Энергия линий в спектре не зависит от энергии возбуждающего пучка. Возможна высокая ло-

² На этом эффекте основан один из основных механизмов формирования контраста в растровой электронной микроскопии

	буждающих квантов (фотонов)		кальность (до 10 нм)
Применение	Исследование при- роды химсвязи компонентов твёрдого тела	Исследование электронной струк- туры валентной зо- ны твёрдых тел	Качественный и полуко- личественный элемент- ный анализ твёрдых тел. В отдельных случаях – изучение химсдвигов

Метод РФЭС. В основе метода фотоэлектронной спектроскопии лежит явление внешнего фотоэффекта – испускание электронов атомами вещества под действием рентгеновского или ультрафиолетового электромагнитного излучения. Соответственно этому, различают рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию³ (РФЭС) и ультрафиолетовую фотоэлектронную спектроскопию (УФС). Энергия фотоэлектронов зависит от энергии электронных оболочек (термов), с которых они были испущены, поэтому спектр фотоэлектронов характеристичен для атомов каждого химического элемента, что и делает возможным применение методов фотоэлектронной спектроскопии для диагностики химического состава, т.е. анализа. Основными достоинствами метода РФЭС по сравнению с ЭОС являются более высокая разрешающая способность. Метод РФЭС в наши дни хорошо развит и широко применяется обычно для выяснения химического состояния компонентов твёрдого тела и адсорбатов. За развитие метода РФЭС К.М Зигбану в 1981 была присуждена Нобелевская премия в физике⁶.

³ Метод РФЭС также называют электронной спектроскопией для химического анализа (ЭСХА)

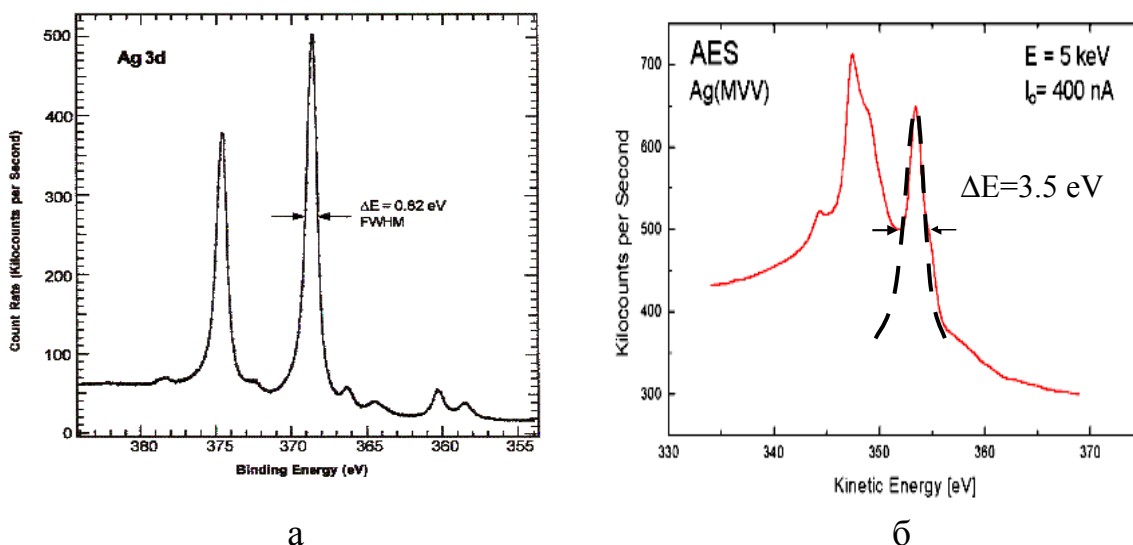


Рис. 8. Спектр РФЭС (а) и ЭОС (б) серебра. Для сравнения на спектрах (а) и (б) отмечены ширины линий.

Метод УФС. При возбуждении электромагнитным излучением ультрафиолетового диапазона фотоэлектроны эмитируются с валентных электронных оболочек атомов или из валентной зоны твердого тела. В силу этого в спектрах УФС наиболее ярко выражены химические сдвиги, поэтому этот метод в основном применяется для исследования химических связей и электронной структуры валентной зоны твердых тел.

Метод электронной Оже-спектроскопии применяется для определения элементного состава поверхности и нескольких приповерхностных слоев атомов твердого тела. По спектру энергий Оже-электронов производится качественный элементный анализ участка поверхности, облучаемого первичными электронами, а по интенсивности спектральных линий - количественный. Также в ряде случаев он позволяет получить информацию о химических связях. Метод ЭОС, проигрывая в спектральном разрешении методам РФЭС и УФС, имеет преимущество перед ними в локальности. Благодаря тому, что диаметр электронного пучка в современных электронных пушках может быть уменьшен до 10-15 нм, а глубина выхода Оже-электронов составляет 2-5 нм, становится воз-

можен локальный элементный анализ областей микро- и нанометровых масштабов (Оже-микроанализ).

2. Аппаратура и методика измерений Оже-спектра

В первых коммерческих Оже-спектрометрах (70 - 80 гг XX в.) в качестве диспергирующего элемента применялся анализатор энергии электронов типа "цилиндрическое зеркало" (АЦЗ), также часто называемый «цилиндр Венальда»⁷ (рис. 9). Этот анализатор состоит из двух concentric cylinders. Энергия электронов, проходящих через щели и попадающих в детектор, определяется напряжением между обкладками цилиндрического конденсатора U . Измерением этого напряжения осуществляется развертка спектра. Кроме него, на цилиндр подается модулирующее переменное напряжение с амплитудой $\Delta \ll U$. С помощью подачи модулирующего сигнала производится аппаратное дифференцирование спектра: сигнал, поступающий с выхода синхронного усилителя, пропорционален $dN(E)/dE$. Использование модуляционной методики позволяет значительно повысить величину отношения сигнал/шум в регистрируемом спектре.

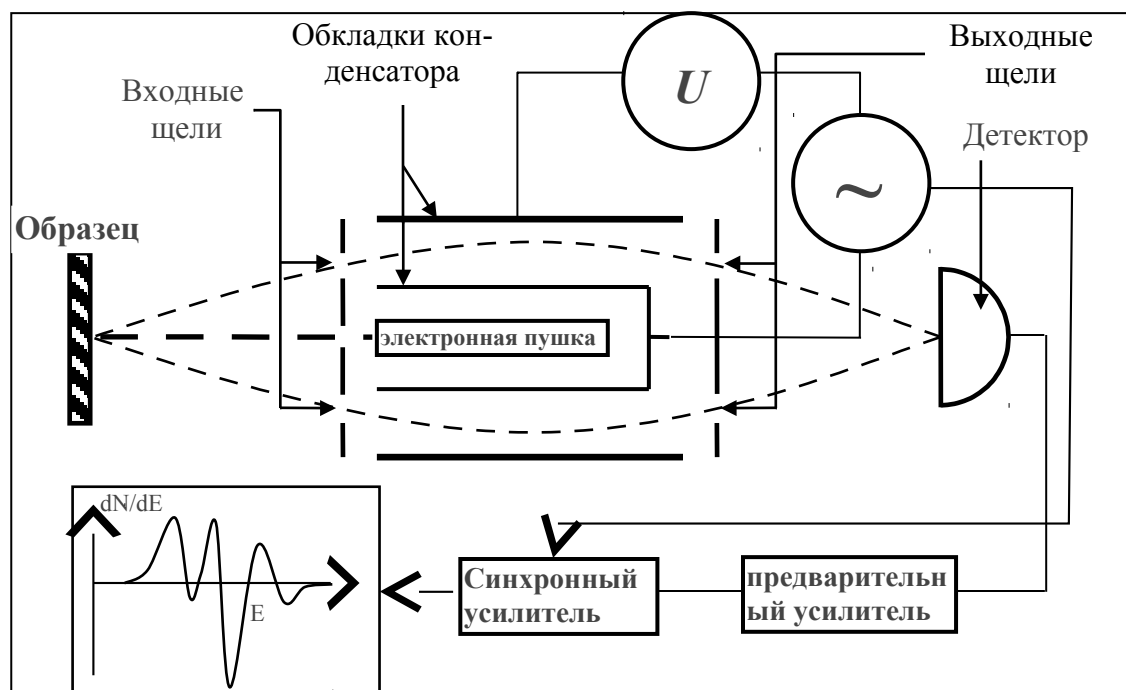


Рис.9. Схема энергетического анализатора типа цилиндра Венальда.

В современных электронных спектрометрах чаще применяется *полусферический анализатор* энергий (ПСА), схема которого представлена на рис. 10. Этот анализатор состоит из коллиматора, где электронный пучок становится параллельным и фокусируется, и полусферического конденсатора.

Уравнение анализатора выглядит следующим образом:

$$eV_0 = E \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (4)$$

где V_0 – напряжение между полусферическими электродами, E – энергия пропускания электронов, R_1 и R_2 – радиусы внутренней и внешней сферы энергоанализатора.

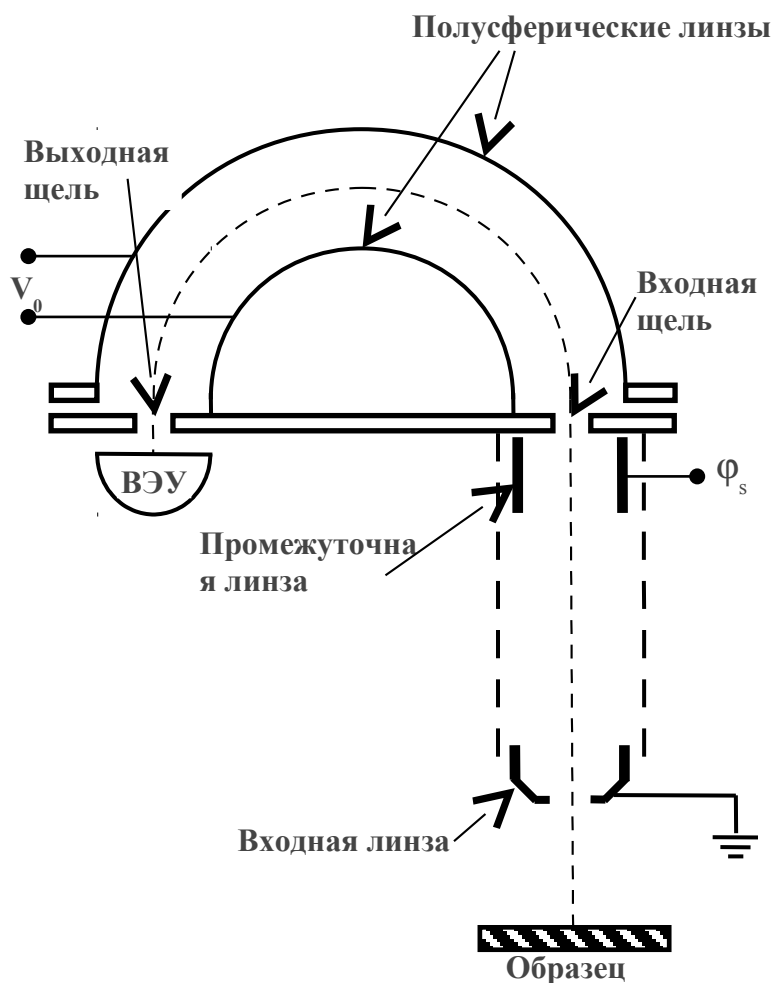


Рис.10. Схематическое изображение полусферического энергоанализатора.

затора.

Развертка спектра в полусферическом анализаторе энергий может осуществляться двумя способами. В режиме *постоянного задерживающего потенциала* между входной и промежуточной линзой подается постоянное напряжение задержки φ_s , а развертка по энергии электронов производится изменением напряжения между полусферами (рис. 10). Этот режим удобен для анализа электронов с малыми энергиями (до 150 эВ), так как в этом случае задерживающим напряжением отсекается интенсивный пик низкоэнергетичных вторичных электронов, и, как следствие, повышается чувствительность и разрешение.

В режиме *постоянного потенциала полусферических электродов* напряжение между полусферическими электродами V_0 остается постоянным, а развертка по энергии электронов осуществляется изменением напряжения задержки. Этот режим удобен для детектирования электронов с энергиями свыше 150 эВ.

В качестве детекторов на выходе анализатора используются вторичные электронные умножители (ВЭУ). Одна из конструкций ВЭУ представляет собой свернутую в спираль стеклянную трубку (рис. 11), внутренняя стенка которой покрыта материалом с высоким коэффициентом выхода вторичных электронов. При многократном соударении электронов в ВЭУ образуется электронная лавина, которая формирует импульс тока, регистрируемый счетной электронной схемой.

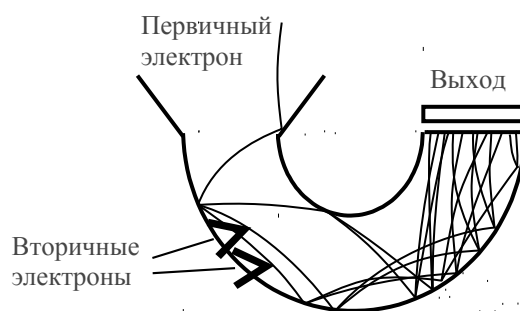


Рис. 11. Схема вторичного электронного умножителя (ВЭУ).

Импульсный, электронно-счетный режим регистрации Оже-электронов часто применяется в современных спектрометрах с компьютерным управлением. При этом получается Оже-спектр в интегральной форме $N(E)$. Для того, чтобы произвести аппаратное дифференцирование спектра, модулирующий сигнал может подаваться как между полусферическими электродами, так и на промежуточную линзу.

Основные отличия двух наиболее широко используемых анализаторов, АЦЗ и ПСА, заключаются в следующем. В АЦЗ полный телесный угол сбора электронов составляет около 1 ср, тогда как в ПСА он составляет около 10^{-2} ср. Ошибка: источник перекрестной ссылки не найден. Таким образом "светосила" АЦЗ примерно в 100 раз больше, чем у ПСА. Естественно, что больший угол сбора приводит к увеличению интенсивности сигнала в спектрометрах с анализатором в виде цилиндрического зеркала. Однако, разрешающая способность спектрометра с ПСА обычно в 2 – 3 раза лучше для того же отношения сигнала к шуму в спектре, чем при использовании цилиндрического зеркала.

3. Методика подготовки образцов

Перед проведением исследований методом электронной Оже-спектроскопии поверхность образца необходимо специальным образом подготовить. Как было сказано выше, Оже-электроны эмитируются из поверхностного слоя (толщиной порядка 0.5-2 нм). Следовательно, при наличии на поверхности образца адсорбата и/или окисла⁴, спектр будет содержать линии адсорбата (в частности, углерода) и кислорода, информация о составе анализируемого образца будет искаженной.

Существует ряд способов препарирования поверхности.

1. Термический отжиг в вакууме позволяет для некоторых веществ, не

⁴ Это обстоятельство существенно при анализе полупроводниковых материалов, поскольку Ge, Si и другие практически важные полупроводники окисляются на воздухе

критичных к высоким температурам, удалить как пленку адсорбата, так и оксидную пленку.

2. Скалывание образца в вакууме позволяет получить моноатомно-чистую поверхность. Этот метод особенно хорошо подходит для анализа монокристаллов, имеющих плоскость спайности, таких, например, как GaAs.

3. Ионное травление – стандартный метод очистки поверхности от загрязнений и окисла. Принцип этого метода заключается в распылении поверхностного слоя твердого тела под действием бомбардировки ионами инертного газа (обычно Ar) с энергией ~ 5 кэВ, для чего в состав Оже-спектрометра обычно входит ионная пушка.

Ионное травление в ЭОС используется не только для очистки поверхности образцов перед измерением, но и для получения профилей изменения состава образца по глубине. Ионный пучок создает на поверхности образца кратер (рис. 12), диаметр которого (обычно 5-20 мм) намного больше диаметра электронного зонда ($\sim 0,5$ мм). Профиль концентрации по глубине получают путем непрерывной регистрации элементного состава на дне кратера в ходе распыления (или после прекращения травления). Ионная бомбардировка, проводимая одновременно с электронной, оказывает малое влияние на Оже-анализ, поскольку число вторичных электронов, возбуждаемых ионным пучком, намного меньше, чем при возбуждении первичным электронным пучком.

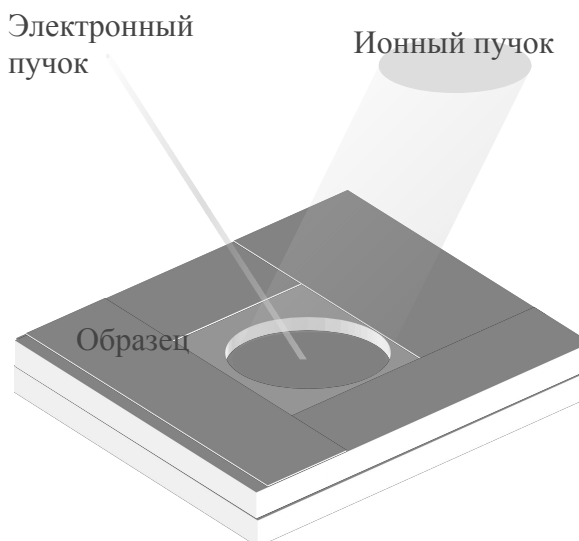


Рис. 12. Послойный элементный анализ методом ЭОС с ионным травлением.

При послойном анализе разрешение по глубине определяется несколькими факторами. К ним относятся однородность ионного пучка на исследуемом участке поверхности, глубина выхода Оже-электронов и однородность образца. Потерями в разрешении из-за неоднородности ионного пучка можно пренебрегать в тех случаях, когда его размеры велики по сравнению с электронным пучком. Вклад глубины выхода составляет несколько ангстрем и остается постоянным в процессе распыления. Наиболее важным фактором, ограничивающим разрешение по глубине, является неоднородность образца, обусловленная неодинаковой толщиной тонких пленок на исследуемых поверхностях, наличием поликристаллических зерен, сравнимых по размерам с толщиной пленки, а также образованием выделений элементов пленки. Эти артефакты можно устранить, применив метод деконволюции к полученному профилю концентрации.

Непрерывная регистрация спектра в процессе ионного травления применяется также для контроля очистки поверхности. Уменьшение и последующее исчезновение линии углерода (если углерод не входит в состав исследуемого

образца) свидетельствует об удалении адсорбата, кислорода – о полном стравливании окисла.

4. Качественный и количественный анализ

Цель качественного анализа поверхности твердых тел методом ЭОС – определить наличие того или иного элемента, получить, если это возможно, информацию о химических связях этого элемента с компонентами матрицы и дать приблизительную оценку его концентрации.

Количественный анализ методом ЭОС применяется для определения концентрации присутствующих на поверхности элементов с указанием границ доверительного интервала или стандартного отклонения для измеренной величины содержания компонента. Точность элементного анализа определяется возможностями используемой методики анализа.

Качественный анализ. После записи Оже-спектра необходимо определить, каким именно химическим элементам соответствуют зарегистрированные максимумы спектра. Для такой идентификации используются справочники с таблицами энергий Оже-переходов и атласы эталонных Оже-спектров⁸.

В процессе обработки и анализа Оже-спектров широко используются такие методы численного анализа экспериментальных данных, как вычитание фона (рис.13), фильтрация шума, дифференцирование спектра $N(E)$ (см. рис. 14) сглаживание, усреднение, аппроксимация формы линии функцией Гаусса:

$$G(x) = \frac{I}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

(рис.14а), а также разделение близко расположенных пиков. Программные средства для обработки Оже-спектров обычно включают основные методы численного анализа, часто используемые в спектроскопии, а также базы данных об энергиях и относительной интенсивности Оже-переходов.

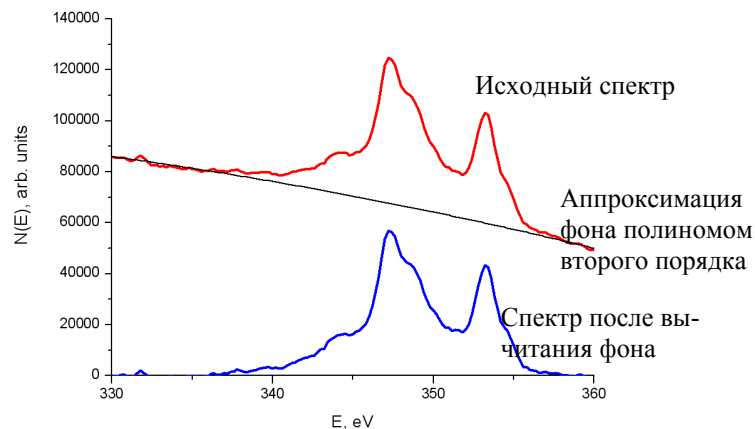


Рис.13. Пример первичной обработки Оже-спектра образца серебра при помощи программы Origin 6.1: вычитание фона.

При использовании функции Гаусса для описания линий в интегральных спектрах $N(E)$ под энергией максимума E_m понимают положение максимума (значение параметра x_0) подгоночной гауссианы. Ширину пика ΔE оценивают как полную ширину гауссианы на уровне 1/2 максимума (FWHM – Full Width at Half Maximum) $\Delta E = 2\sigma$. В качестве интенсивности линий берут амплитуду A или интегральную интенсивность I (площадь под гауссианой).

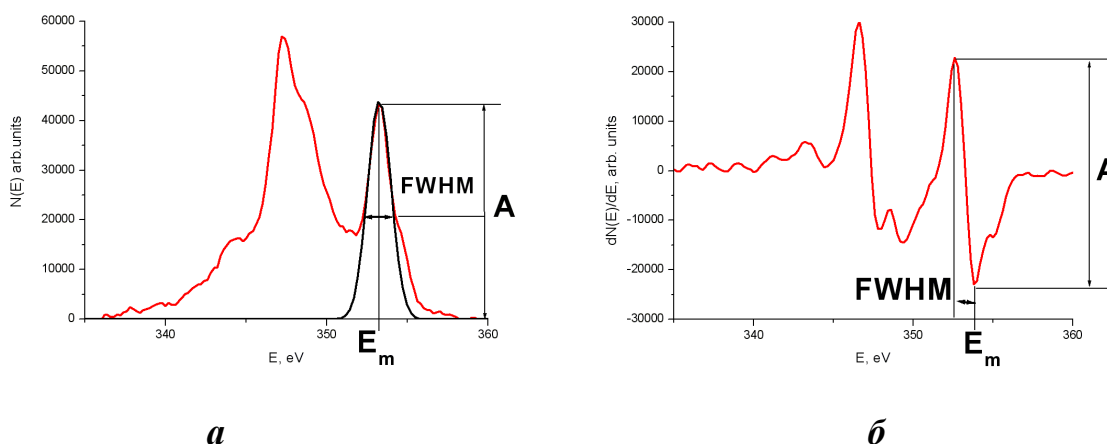


Рис. 14. К определению параметров спектральных линий

В дифференциальных спектрах dN/dE (рис. 14б) под величиной E_m пони-

мают спектральное положение минимума, ширина пика определяется как расстояние между максимумом и минимумом по шкале энергий, интенсивность (амплитуда) - как разность значений в максимуме и в минимуме, под интегральной интенсивностью пика понимают амплитуду, умноженную на ширину.

В результате измерений и математической обработки полученных спектров по положениям пиков, не проводя дополнительных измерений, можно качественно определить наличие того или иного элемента на поверхности и его приблизительную концентрацию. В ряде случаев, при регистрации химсдвигов можно определить химическую форму определяемого элемента.

Количественный анализ. Для проведения количественного анализа методом ЭОС необходимо установить связь между током Оже-электронов данного элемента и концентрацией этого элемента в поверхностной области. Ток Оже-электронов, возникающих в результате Оже-перехода WXY в элементе α можно записать в виде:

$$I_{\alpha}(WXYZ) = \int_{\Omega} \int_{E_w}^{E_p} \int_0^{\infty} I_p(E, Z) \sigma_{\alpha}(E, E_w) N_{\alpha}(Z) \gamma_{\alpha}(WXYZ) \exp(-\frac{Z}{\lambda}) d\Omega dE dZ, \quad (6)$$

где Ω – возбуждаемый объем, E – энергия Оже-электронов (распределение энергий Оже-электронов Гауссово или Лоренцево), E_p и $I_p(E, Z)$ – энергия и плотность возбуждающего потока первичных электронов, E_w – энергия внутреннего уровня W , $\sigma_{\alpha}(E, E_w)$ – сечение ионизации внутреннего уровня W , $N_{\alpha}(Z)$ – атомная концентрация элемента α на глубине Z от поверхности, λ – глубина выхода Оже-электронов, $\exp(-Z/\lambda)$ – вероятность выхода Оже-электрона, $\gamma_{\alpha}(WXYZ)$ – вероятность Оже-перехода WXY. Для простоты предполагается двумерная однородность элементного состава в слоях, параллельных поверхности.

Для дальнейшего уточнения можно предположить трехмерную однородность химического состава в области, где значительна вероятность выхода. Кроме того, имеет смысл разделить плотность возбуждающего потока на две компоненты: $I_p(E, Z) = I_p + I_B(E, Z)$, где I_p – первичный возбуждающий поток,

$I_B(E, Z)$ – возбуждающий поток, вызванный рассеянными первичными электронами. Тогда можно написать:

$$I_\alpha(WXY) = I_p T N_\alpha \gamma_\alpha(WXY) \sigma_\alpha(E, E_W) \lambda(1 + R_B), \quad (7)$$

где R_B – коэффициент обратного рассеяния, а T – пропускание анализатора.

Чтобы проводить количественный анализ на основе формулы (7), необходимо знать с требуемой точностью сечение ионизации, выход Оже-электронов и коэффициент обратного рассеяния. Кроме того, нужно точно измерить абсолютные значения тока Оже-электронов. Анализ усложняется и шероховатостью поверхности, которая обычно уменьшает выход Оже-электронов по сравнению с гладкой поверхностью. Поскольку все эти требования нельзя выполнить в условиях обычного лабораторного Оже-анализа, количественный анализ, основанный на теоретическом определении физических величин, пока что практически невозможен. Тем не менее, существует ряд методов, которые делают возможным количественный анализ методом ЭОС.

1). Метод внешних эталонов.

В этом методе Оже-спектры исследуемого образца сравнивают со спектрами эталона, содержащего интересующий элемент с известной концентрацией. Концентрацию элемента α в исследуемом образце N_α^P можно определить по концентрации этого элемента в эталоне N_α^S , пользуясь формулой (7):

$$\frac{N_\alpha^P}{N_\alpha^S} = \frac{I_\alpha^P}{I_\alpha^S} \frac{\lambda^S}{\lambda^P} \left(\frac{1 + R_B^S}{1 + R_B^P} \right) \quad (8)$$

Важным преимуществом такого метода является то, что не нужно знать сечение ионизации и выход Оже-электронов, т.е. все сводится к относительным измерениям. Если состав исследуемого образца близок к составу эталона, то глубина выхода и коэффициент обратного рассеяния выпадают из формулы (8), и все сводится к измерению отношения токов. Очевидно, что все сказанное справедливо, если измерения с исследуемым и эталонным образцами проводятся в одинаковых условиях.

Если образец и эталон различаются по составу, то нужно по возможности более точно учесть влияние матрицы на коэффициент обратного рассеяния и на глубину выхода. Кроме того, если из-за различий в матрице изменится форма Оже-пика, то высота Оже-пика в дифференцированном Оже-спектре не может служить точной относительной мерой Оже-тока.

Коэффициент обратного рассеяния можно оценить, сравнив кривые зависимости выхода Оже-электронов от E_p с теоретическими зависимостями сечения ионизации от E_p или с данными, характеризующими выход Оже-электронов в зависимости от E_p для газов, ибо в случае газов коэффициент обратного рассеяния пренебрежимо мал. Коэффициент обратного рассеяния увеличивается с ростом плотности матрицы и энергии первичных электронов. При наличии данных о коэффициенте обратного рассеяния в форме $R_B(E_p, E_w, D)$, где D – массовая плотность матрицы, можно обеспечить достаточную точность для количественного анализа.

2). Метод коэффициентов элементной чувствительности.

Менее точным, но весьма ценным методом количественного анализа является метод, основанный на введении коэффициентов элементной чувствительности. Полагая, что для каждого элемента можно ввести определенный коэффициент чувствительности, атомную концентрацию элемента X записывают в виде:

$$N_x = \frac{I_x}{S_x \sum_{\alpha=1}^N \frac{I_\alpha}{S_\alpha}}, \quad (9)$$

где S_α , S_x – коэффициенты относительной чувствительности к элементу α и x , соответственно. Очевидно, что, вводя коэффициенты чувствительности, не зависящие от матрицы, мы пренебрегаем изменением обратного рассеяния и глубины выхода в зависимости от материала, и, следовательно, метод, в общем, является полуколичественным. Два важных преимущества такого метода – отсут-

ствие эталонов и нечувствительность к шероховатости поверхности. Последнее объясняется тем, что все Оже-пики одинаковым образом зависят от топографии поверхности.

3). Метод учета коэффициентов выхода.

Интенсивность линии интересующего элемента в этом методе относится не к суммарной интенсивности всех линий, наблюдаемых в Оже-спектре, а к интенсивности линии эталона. Для каждого элемента можно ввести определенный коэффициент выхода D (зависящий от энергии первичного пучка и от матрицы). Коэффициентом выхода называется количество эмитированных Оже-электронов в расчете на один первичный электрон. Атомная концентрация элемента X рассчитывается путем сравнения интенсивности его линии I_x с интенсивностью линии эталона I_{et} , измеренной в тех же условиях:

$$N_x = \frac{I_x}{D_x} \frac{D_{et}}{I_{et}}, \quad (10)$$

где D_x и D_{et} – коэффициенты выхода Оже-электронов для исследуемого и эталона, соответственно. В качестве эталона в методе ЭОС обычно используется серебро (линия MVV, $E_m = 354$ eV). Значения коэффициентов выхода для каждого элемента для разных значений E_p (энергии первичного пучка) приведены в справочниках.

Методика эксперимента

Образец для исследования представляет собой пленку сильно легированного твердого раствора Si_xGe_{1-x} толщиной 1,3 мкм, выращенную на германиевой подложке ориентации (111) методом газофазной эпитаксии.

Описание экспериментальной установки

Сверхвысоковакуумная система Omicron Multiprobe STM предназначена для исследования морфологии и химического состава поверхности твердых тел

методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и электронной спектроскопии.

Система состоит из аналитической камеры объемом ~ 150 л (рис.15а, 15б, поз.11), изготовленной из немагнитной нержавеющей стали, специально предназначенной для прецизионной электронной спектроскопии. В рабочем объеме ионно-геттерным (рис.15б, поз.24) и титановым сублимационным (рис.15б, поз.23) насосами поддерживается давление $\sim 10^{-10}$ Торр. Турбо-молекулярный насос (рис.15а, 15б, поз.26) служит для откачки системы после развакуумирования и при работе ионной пушки (рис.15, поз.9), а также для откачки шлюзовой камеры (рис.15, поз.21), через которую загружаются образцы (рис.15в, поз.19). Предварительный вакуум в магистрали создается роторно-пластинчатым форвакуумным насосом (рис.15б, поз.27) через ловушку из активированного алюминия, которая предотвращает попадание паров масла из форвакуумного насоса в турбо-молекулярный насос.

Для возбуждения Оже-электронов применяется электронная пушка ЕКФ-300 (рис.15, поз.10) с вольфрамовым катодом (ускоряющее напряжение до 5 кВ, ток пучка до 5 μ А). Фокусировка пучка осуществляется одной электростатической линзой. Диаметр электронного пучка составляет 0.5 – 1 мм. Для позиционирования электронного зонда на образце применяются отклоняющие пластины,

Система включает в себя ионную пушку ISE-10 (рис.15, поз.9) для очистки образцов ионным распылением и профилирования состава по глубине (ускоряющее напряжение до 5 кВ, ток пучка до 30 μ А, диаметр пучка может варьироваться в пределах 1-25 мм). Отклоняющая система в данной конструкции отсутствует, поэтому позиционирование ионного пучка в необходимой области образца производится с помощью манипулятора (рис.15б, 15в, поз.17).

Особенностью конструкции пушки ISE-10 является то, что газ, используемый для травления, подается из резервуара через клапан-натекатель непосред-

ственно в ионизационную камеру пушки, а не в вакуумный объем. При этом одновременно происходит откачка газа при помощи турбовакуумного насоса, так, что во время травления в вакуумной камере сохраняется динамическое равновесие (режим дифференциальной откачки). Преимуществом такого режима является меньшее загрязнение вакуумного объема, меньшее давление в вакуумной камере, а также большая эффективность ионизации газа. Все это позволяет использовать различные (не только инертные) газы, включая кислород.

Для регистрации спектра Оже-электронов служит полусферический анализатор энергий электронов ЕА-125 (рис.15, поз.1) с радиусом полусферического конденсатора 125 мм. При помощи коллиматора (рис.15, поз.6), состоящего из 4-х электростатических линз, электронный пучок фокусируется на входную щель анализатора (рис.15в, поз.3). Кроме того, с помощью фокусирующих линз коллиматора у анализатора можно менять угол сбора анализируемых электронов. Анализатор содержит набор входных (рис.15в, поз.3) и выходных (рис.15в, поз.4) щелей различного размера, позволяющих менять разрешение и чувствительность прибора. Детектирование осуществляется пятиканальным (5 ВЭУ) блоком регистрации (рис.15б, поз.5). Диапазон регистрируемых энергий электронов составляет 0 – 2000 эВ.

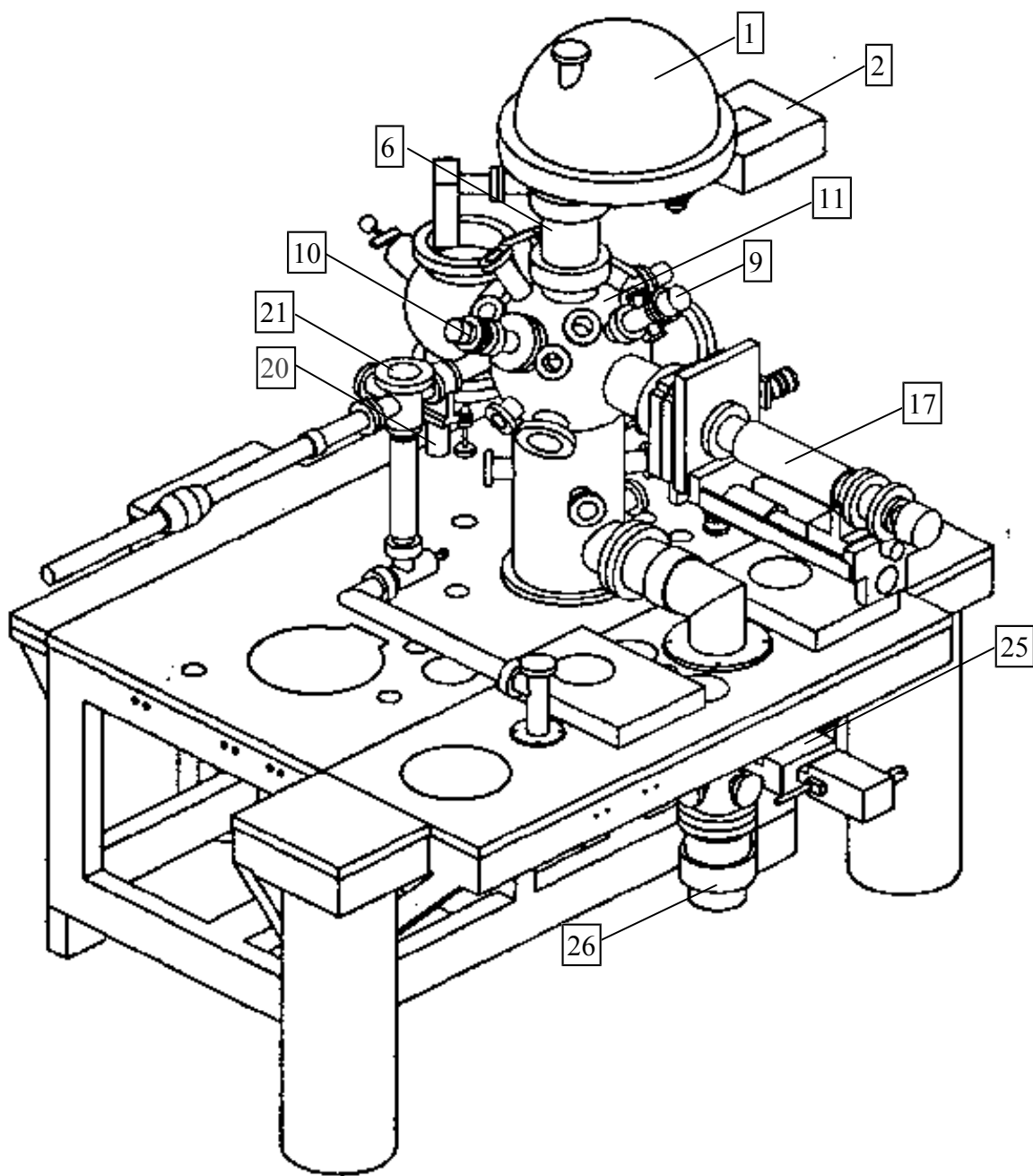


Рис.15а. Общий вид сверхвысоковакуумной системы Omicron Multirprobe S™.

1 – полусферический анализатор энергий электронов EA-125; 2 – блок обработки импульсов ВЭУ; 3 – входные щели; 4 – выходные щели; 5 – блок ВЭУ; 6 – коллиматор; 7 – входная линза; 8 – промежуточная линза; 9 – ионная пушка ISE-10; 10 – электронная пушка EKF-300; 11 – аналитическая камера; 12 – стойка для блоков управления; 13 – блок управления энергоанализатором EAC 2000; 14 – блок питания ВЭУ; 15 – блок управления ионной пушкой ISE-10; 16 – блок управления электронной пушкой EKF-300; 17 – манипулятор; 18 – подложкодержатель; 19 – образец; 20 – шибер загрузочной камеры; 21 – загрузочная камера; 22 – ионизационная лампа; 23 – титановый сублимационный насос; 24 – ионно-геттерный насос; 25 – шибер турбо-молекулярного насоса; 26 – турбо-молекулярный насос; 27 – роторно-пластинчатый форвакуумный насос; 28 – компьютер управления; 29 – блок приема и обработки информации; 30 – оптоволоконная линия передачи сигнала.

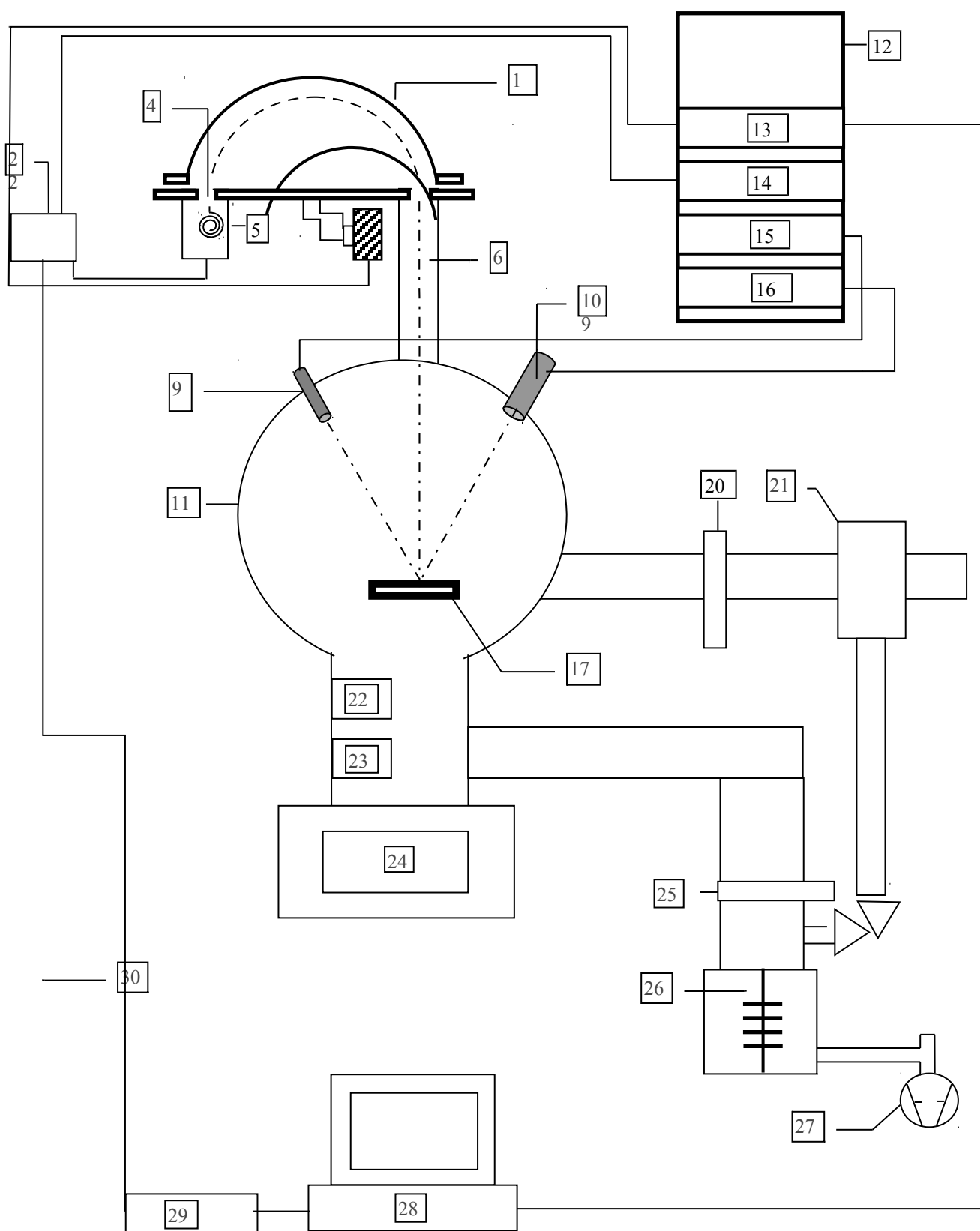


Рис. 15б. Функциональная схема сверхвысоковакуумной системы Omicron Mul-

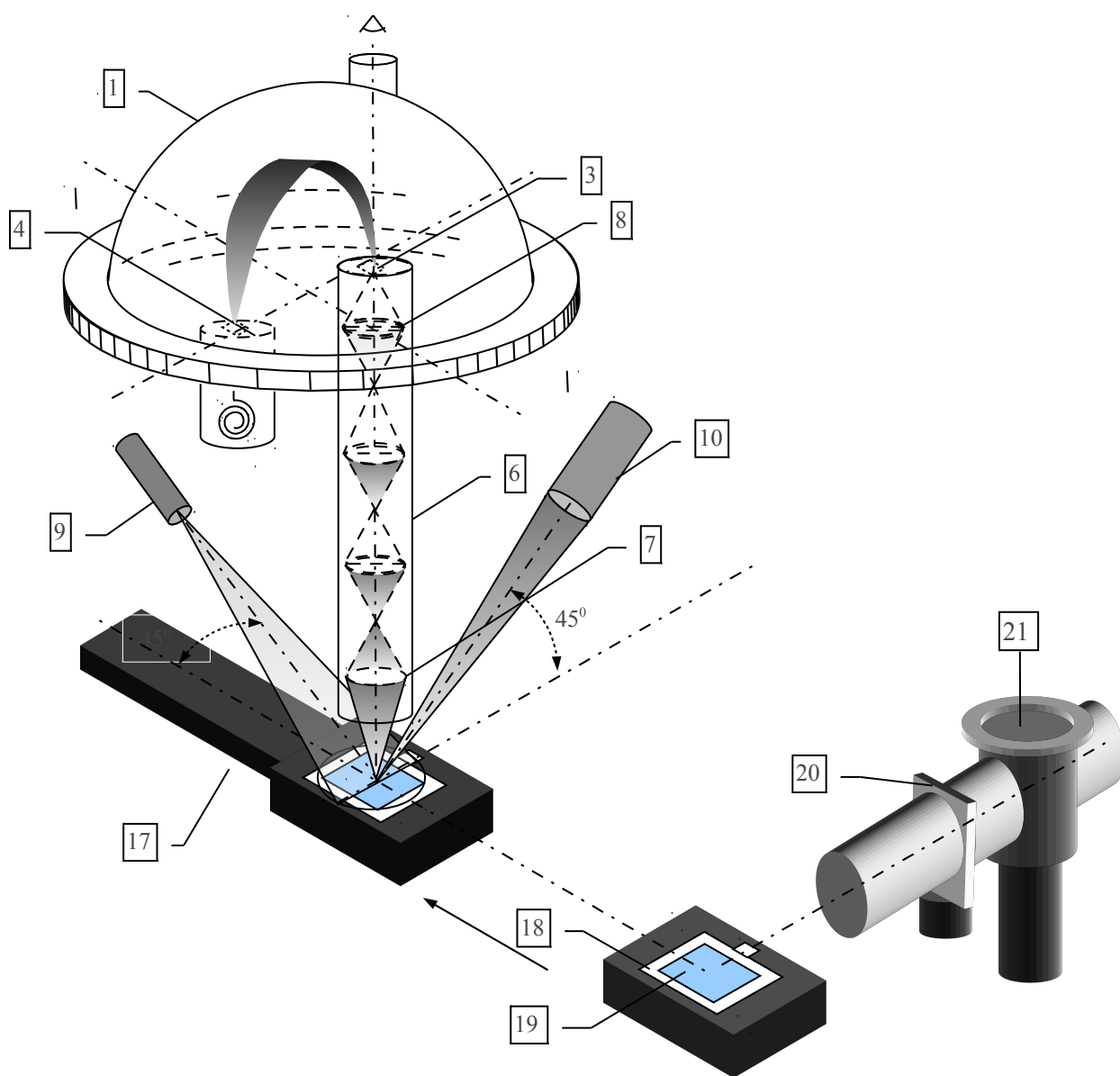


Рис. 15в. Схема взаимного расположения элементов Оже-спектрометра в составе сверхвысоковакуумной системы Omicron Multirprobe STM.

ВЭУ работают в импульсном электронносчетном режиме. Каждый электрон, попадающий на вход ВЭУ, порождает отдельный электрический импульс в цепи регистрации. С целью гальванической развязки высоковольтных цепей регистрации и низковольтных цепей компьютерного интерфейса, используются

оптоволоконная связь (рис.15б, поз.30) между блоком обработки импульсов ВЭУ (рис.15а, 15б, поз.2) и блоком приема и обработки информации (рис.15б, поз.29), связанным с компьютером управления (рис.15б, поз.28), стандартным интерфейсом RS-232.

В камере имеется магнитный транспортер для перемещения образцов из шлюзовой камеры в аналитическую и манипулятор (держатель образца), который обеспечивает трехмерное позиционирование образца относительно точек фокуса электронной пушки, ионной пушки и входной линзы полусферического энергоанализатора (рис.15в, поз.7). В головке манипулятора, в которой помещается стандартный подложкодержатель, имеется электрический нагреватель косвенного нагрева для отжига образцов в вакууме (до 770°C), а также контакты для нагрева образца прямым пропусканием тока.

Образцы крепятся на специальный подложкодержатель стандартной формы и размеров (рис.16), который в свою очередь загружается в камеру. Крепление может осуществляться с помощью специальной проводящей эпоксидной смолы, совместимой со сверхвысоким вакуумом, а также с помощью зажимов из материала, который совместим с вакуумом: нержавеющая сталь, медь, титан, молибден, тантал, вольфрам.

Для точного позиционирования образца относительно электронного и ионного пучков и оптической оси и точки фокуса анализатора может быть применен люминофор, который в виде суспензии порошка ZnS в изопропиловом спирте особой чистоты (его можно совмещать с вакуумом) наносится

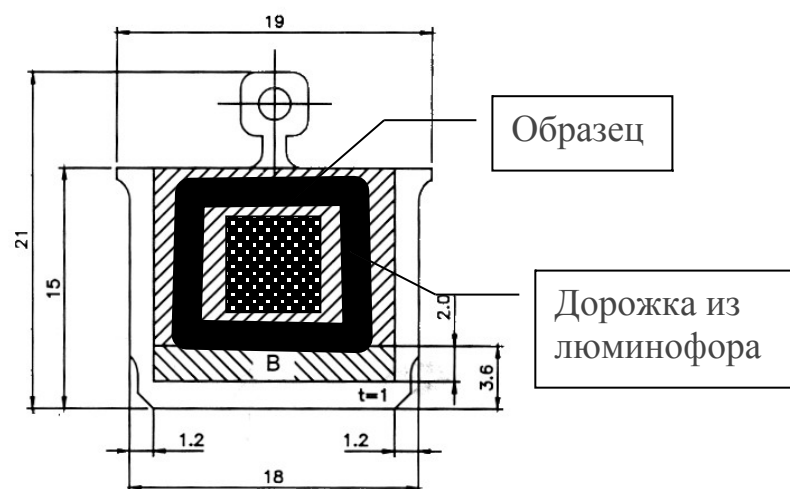


Рис. 16. Крепление образца на стандартном подложкодержателе.

в виде дорожки вокруг образца (рис.16). Наблюдая свечение люминофора в точке падения на него электронного пучка через специальное окно в верхней части анализатора, расположенное на оптической оси коллиматора (рис.15, поз.6), с помощью ручек отклонения луча x , y совмещают пятно с оптической осью. Наблюдая интенсивность линии Zn в Оже-спектре, совмещают плоскость образца с фокальной плоскостью входной линзы коллиматора, корректируя при этом положение точки падения электронного луча. Интенсивность сигнала измеряется с помощью вольтметра В7 – 40/4, подключенного к аналоговому выходу блока сбора и обработки информации. Затем образец при помощи манипулятора устанавливается так, чтобы электронный пучок был направлен в выбранную точку на его поверхности, при этом нужно учесть разницу высот поверхностей люминофора и образца. Окончательную настройку положения и фокуса электронного луча производят по максимуму сигнала какой-либо линии в Оже-спектре. С помощью люминофора также контролируют положение и однородность ионного пучка.

Методические рекомендации

Перед тем, как приступить к выполнению работы, следует изучить технические описания и руководства пользователя следующих элементов экспериментальной установки⁹:

1. Сверхвысоковакуумной системы Multiprobe S
2. Полусферического электронного энергоанализатора EA 125
3. Блока управления полусферического электронного энергоанализатора EA 125 EAC 2000
4. Электронной пушки EKF 300
5. Ионной пушки ISE -10
6. Программы управления Оже-спектрометром Wspectra
7. Программы обработки и анализа Оже-спектров "Presenter"

Ниже приведены рекомендуемые параметры эксперимента.

1. *Полусферический энергоанализатор EA-125.* Входные и выходные щели 6×3 мм, режим – CPE, $E_p=10$ эВ, увеличение 2х.
2. *Электронная пушка EKF-300.* Ток нити накала - 2.4 А, ускоряющее напряжение 3 кВ. Позиции регулировок фокусировки (Focus) и потенциала сетки (Greed) подстраиваются визуально по пятну на люминофоре, которое должно иметь круглую форму и диаметр около 0,5 мм.
3. *Ионная пушка ISE-10.* Перед ионным травлением образца необходимо отключить ионный и титановый сублимационный насосы, так как в условиях вакуума $\sim 10^{-6}$ Торр их работа недопустима. Включить турбомолекулярный насос. Открыть клапан-натекатель на ионной пушке, установить давление Ar в аналитической камере в режиме дифференциальной откачки $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Ускоряющее напряжение 5 кВ, ток нити накала 10 А, ток пучка 15 μ А, напряжение фокусирующего электрода 3.7 кВ, напряжение экстрактора 4850 В. При указанных параметрах диаметр ионного пучка составляет 18 мм (режим широкого пучка),

неоднородность ионного тока по сечению пучка – не более 5%, скорость травления $\text{SiO}_2 \approx 100 \text{ нм/ч}$).

4. Параметры развертки спектра: в режиме обзора шаг по оси энергий $\Delta E = 1 \text{ эВ}$, время накопления данных в одной точке спектра (D_{well}) = 1 с, в режиме высокого разрешения шаг по оси энергий $\Delta E = 0.1 \text{ эВ}$, $D_{\text{well}} = 5 \text{ с}$.

Техника безопасности

1. Студенты, выполняющие лабораторную работу не имеют права приступать к полученной работе без предварительного инструктажа по правилам ее безопасного выполнения.

2. Ускоряющее напряжение электронной пушки EKF 300 и ионной пушки ISE -10 составляет 3000 – 5000 В. Студентам запрещается производить какие-либо действия с кабелями, связывающими блоки питания с электронной и ионной пушками.

Эксплуатацию сверхвысоковакуумного комплекса Omicron Multiprobe S проводить в соответствии с ПТЭ и ПТБ электроустановок потребителей напряжением свыше 1000 В.

3. При обнаружении дефектов в изоляции проводов, неисправностей пускателей, рубильников, штепселей, розеток, вилок и др., а также заземления следует немедленно сообщить ответственному за проведение лабораторной работы. Все неисправности электроприборов, электроарматуры, электросети и прочего электрооборудования должны устраняться только сотрудником, имеющим допуск к подобным работам.

Студентам не разрешается включать и выключать электроприборы, без разрешения ответственного за проведение лабораторной работы.

4. Перед началом работы студентам необходимо изучить вакуумную систему и систему напуска газов (аргона, азота) в вакуумный объем, а также пройти проверку знаний по работе с сосудами под давлением. Напуск аргона для травления осуществляется медленно с постоянным контролем давления в камере. Давление аргона в вакуумном объеме не должно превышать $5 \cdot 10^{-6}$ торр. Студентам запрещается работа с газами без разрешения лаборанта в виду того, что возможен выход из строя ионных ламп и ионно-геттерного насоса при большом давлении в вакуумном объеме.

Задания

1. Снять Оже-спектр эпитаксиальной пленки $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Ge}$ в полном диапазоне энергий анализатора ЕАС-2000 (40 – 1500 эВ) в обзорном режиме.
2. Снять Оже-спектры с высоким разрешением в узкой спектральной области пиков Si, Ge, C, O.
3. С помощью ионного травления удалить слой адсорбата с поверхности образца, для точного определения момента его удаления используется регистрация линии углерода в процессе травления.
4. После удаления адсорбата снять Оже-спектры в спектральной области пиков Si, Ge и O.
5. С помощью ионного травления удалить слой окисла с поверхности образца, для точного определения момента его удаления использовать регистрацию линии кислорода в процессе травления.
6. После удаления окисла снять Оже-спектр в полном интервале энергий (40 – 1500 эВ).
7. Снять Оже-спектры в спектральной области переходов кремния и германия с высоким разрешением.

8. Произвести первичную обработку спектров с помощью программы Wspectra (Фильтрация, сглаживание, вычитание фона, дифференцирование).
9. Сравнить полученные спектры с эталонными спектрами для Si, Ge, O и C.
10. Рассчитать концентрацию элементов на поверхности образца с помощью градуировочной характеристики и по коэффициентам выхода. Сравнить результаты.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные методы электронной спектроскопии, дайте их сравнительную характеристику.
2. Сущность эффекта Оже. ЭОС как метод элементного анализа.
3. Почему в атомах H и He Оже-электроны возникать не могут?
4. Глубина выхода Оже-электронов.
5. Чем обусловлена тонкая структура Оже-спектров?
6. В чем заключаются особенности метода Оже-спектроскопии в сравнении с другими методами спектроскопии, используемые для диагностики состава полупроводников?
7. Чем обусловлен химический сдвиг в кинетической энергии Оже-электрона?
8. Применение ЭОС для анализа поверхности материалов с низкой проводимостью.
9. Интегральный и дифференцированный энергетический спектр Оже-электронов.
10. Типы анализаторов энергий применяющихся в ЭОС. Детекторы.
11. Зачем используется ионное распыление поверхности образца при анализе состава твердых тел методом ЭОС?

12. Методы количественного анализа электронной Оже-спектроскопии.
13. Какие методы численного анализа экспериментальных данных используются при обработке Оже-спектров?
14. Поясните задание и методику эксперимента.

- ¹ Д. Вудраф, Т.Делчар, Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989.
- ² Auger P., *Journ. Phys. Radium*, **6**, 205(1925).
- ³ Lander J. Auger Peaks in the Energy Spectra of Secondary Electrons from Various Materials. *Phys. Rev.*, **91**, 1382 (1953).
- ⁴ Harris L. *J. Appl. Phys.*, **39**, 1419 (1968).
- ⁵ Розанов Л.Н. Вакуумная техника, М.: Советское радио, 1982.
- ⁶ Kai Siegbahn. Electron Spectroscopy for Atoms, Molecules and Condensed Matter. Nobel lecture, 8 December, 1981. Nobel lectures. World Scientific, 1995, v.1, №26 p.63.
- ⁷ Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Под ред. Д. Бриггса и М.П. Сиха. М.: Мир, 1984.
- ⁸ Handbook of Auger Electron Spectroscopy. 2nd Edition. Ed. by L.E. Davis, N.C. MacDonald, P.W. Palmberg, G.E. Riach, and R.E. Weber. Physical Electronic Industries (Eden Prairie), 1976.
- ⁹ Техническое описание сверхвысоковакуумного комплекса Omicron Multiprobe S.