

УДК 592:539.2:573.533.2

И.А. Зельцер, Е.Н. Моос

**АППАРАТУРНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
ПОВЕРХНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР
С ПОМОЩЬЮ СТОЯЧИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВОЛН**

(ЧАСТЬ 2) *

Рассмотрены современные проблемы развития структурно чувствительной диагностики поверхности твердых тел под действием рентгеновского зонда в режиме стоячих волн, дан обзорный анализ базовых идей, лежащих в основе этого метода, описана техника стоячих рентгеновских волн, в том числе дифракционный рентгеновский фотоэлектронный спектрометр, представлены новые методики исследования полупроводниковых состояний, включая аспекты предпороговых возбуждений, сопровождающихся электронной эмиссией под действием непрерывного резонансного комбинационного рассеяния.

структурно-чувствительная спектроскопия, стоячие рентгеновские волны, ион, электрон, вакуум, эмиссия, атомные частицы, рентгеновская дифрактометрия, синхротронный источник, оже-электроны.

Метод стоячих рентгеновских волн (СРВ) [13] реализуется на базе многокристалльных вакуумных спектрометров, основным элементом которых служит гониометр исследуемого образца [1–6; 8; 11; 12; 14; 15; 18; 19]. Среди существенных недостатков гониометров, описанных в [1; 8; 12; 18; 19], – невысокие точностные характеристики, сложность конструкции, низкий уровень автоматизации, большая металлоемкость и необходимость применения манипуляторов для передачи движения в вакуумную камеру, где установлен гониометр.

Повышение чувствительности метода требует создания гониометрических устройств, обладающих высокими точностными характеристиками и долговременной угловой стабильностью. Разработка гониометрических устройств на основе применения вибродвигателей позволяет упростить конструкцию, повысить точность перемещения образца, автоматизировать процессы юстировки, получения и накопления данных, а также проводить эксперименты в условиях вакуума без применения дополнительных манипуляторов передачи движения. Перспективность такого развития приборной базы метода СРВ подтверждается работами по созданию пьезокерамических устройств перемещения и их использованию в рентгеновской технике [3].

Вакуумный пьезогониометр

* Окончание статьи. Начало см.: 2011. № 4/33. С. 76–115.

Разработан автоматизированный пьезогониометр, управляемый от ЭВМ [3], который может быть использован в составе многокристалльных рентгеновских спектрометров.

Пьезогониометр имеет пять степеней свободы и позволяет осуществлять следующие перемещения исследуемого образца:

- реверсивное вращение относительно вертикальной оси гониометра;
- наклон относительно вертикальной оси гониометра;
- вращение образца в собственной плоскости;
- линейное перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости, перпендикулярной оси гониометра;
- прецизионное угловое сканирование в области брэгговского отражения.

Пьезогониометр (рис. 15) состоит из гониометра, оснащенного пятью вибродвигателями и пьезодвигателем с системами питания, двух датчиков линейных и угловых перемещений с электронными блоками (фазометрами). Блок управления и питания вибродвигателей, пьезодвигателя и датчиков сопряжен с ЭВМ.

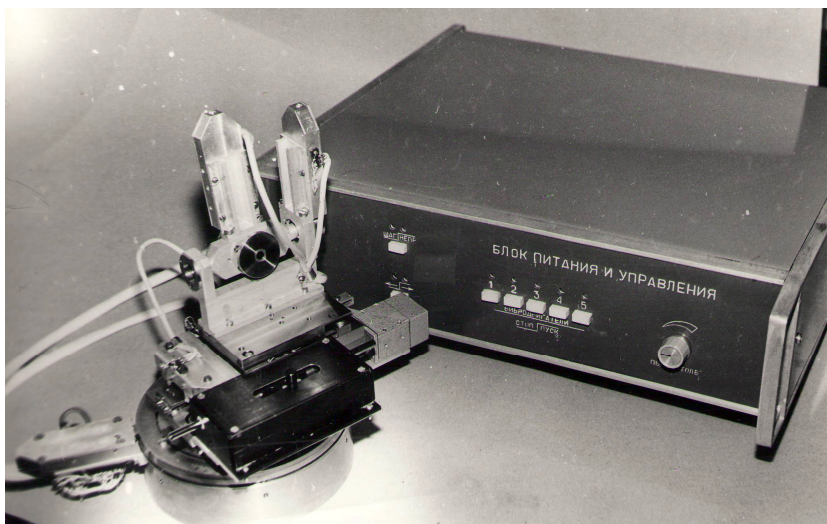


Рис. 15. Пьезогониометр

Применение ЭВМ для управления работой вибро- и пьезодвигателей, а также использование датчиков перемещений для контроля и коррекции углового положения образца в области полного отражения рентгеновских лучей обуславливает высокий уровень автоматизации данного гониометра. Сочетание такого пьезогониометра с системой регистрации энергетического спектра и угловых зависимостей выхода электронов на базе ЭВМ позволяет создать полностью автоматизированный дифракционный рентгеновский фотоэлектронный спектрометр.

Гониометр (рис. 16, 17) предназначен для установки исследуемого образца в точное брэгговское положение и его прецизионного сканирования по углу.

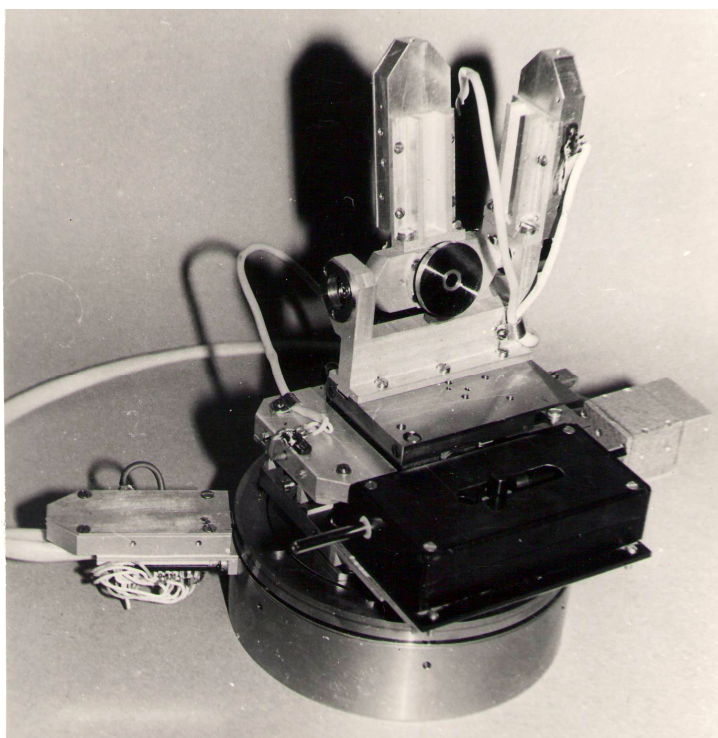


Рис. 16. Гониометр

Держатель образца выполнен в виде съемного узла, представляющего собой площадку для крепления образца с направляющими роликами для установки в цанговый зажим с поджатием пружиной в торец деталей, что обеспечивает плотную посадку держателя.

Держатель образца может вращаться вокруг горизонтальной оси с помощью двух шарикоподшипников, установленных в корпусе. Вращение осуществляется вибродвигателем с линейным перемещением в шаговом режиме $0,2-1$ мкм, что соответствует угловому шагу $1-10''$.

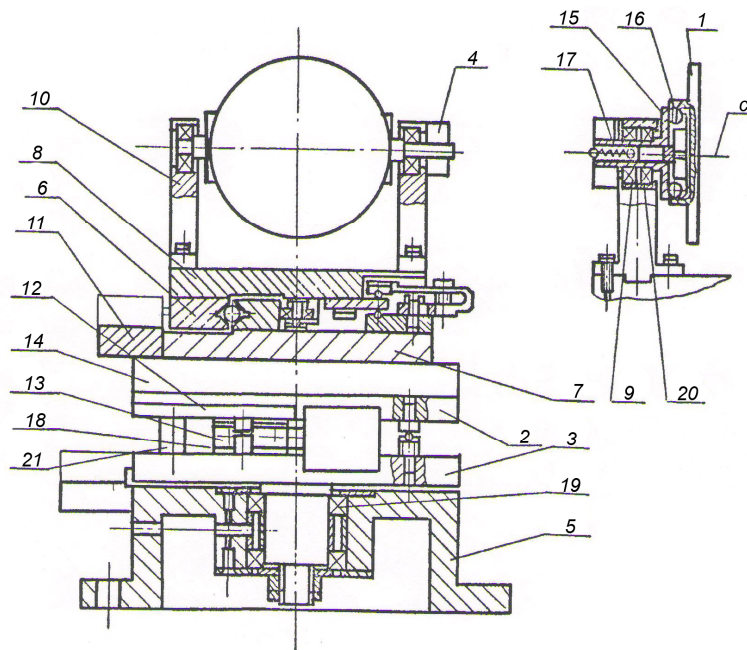


Рис. 17. Устройство механической части гониометра:

1 – держатель образца; 2, 3 – платформы; 4 – ротор; 5 – основание гониометра; 6 – направляющая; 7, 8 – площадки; 9–12 – кронштейны; 13 – пружина; 14 – направляющая; 15 – деталь для крепления держателя; 16 – цапговый зажим; 17 – пружина; 18 – шариковые опоры; 19, 20 – шарикоподшипники; 21 – фиксирующий штырь

Для выведения отражающей плоскости образца в точное брэгговское положение в процессе юстировки держатель образца совместно с вибродвигателем содержит устройство для наклона в пределах $\pm 3''$, установленное с помощью двух шарикоподшипников в кронштейне, размещенном на площадке, которая в процессе юстировки перемещается вместе с держателем образца параллельно горизонтальной оси в пределах ± 5 мм.

С целью исследования образца в различных точках его поверхности предусмотрено линейное перемещение этого образца в горизонтальной плоскости в пределах ± 35 мм.

Механизмы гониометра собраны на платформе, которая может вращаться в пределах $\pm 180^\circ$ с помощью вибродвигателя с шагом 0,1–1 мкм (1–10").

Прецизионное угловое перемещение образца вокруг вертикальной оси осуществляется пьезодвигателем, который передает движение на ось вращения гониометра через пружину без промежуточных звеньев, которые могут вносить погрешность. Диапазон прецизионного сканирования составляет $10'$ с шагом 0,01 мкм.

Для перемещений образца, установленного на гониометре, разработаны двигатели трех типов: вибродвигатели вращательного и возвратно-поступательного движения и пьезодвигатель для прецизионного углового сканирования образца.

Вибродвигатели первого и второго типа конструктивно похожи: в их корпусе установлен пьезоэлемент из пьезокерамики ЦТСст-5. Пьезоэлементы вибродвигателей сопряжены с направляющими механической части пьезогониометра. Пьезоэлемент прижимается к перемещаемой или направляющей платформе с помощью пружины. Для повышения износостойкости пьезоэлемента к нему приклеивается башмак из твердого материала.

В корпусе пьезодвигателя закреплен пьезостолб, склеенный из дисковых элементов пьезокерамики ЦТС-19 таким образом, чтобы направление вектора поляризации соседних пьезоэлементов было противоположным.

Вибродвигатели питаются от отдельных генераторов, работающих на частоте резонанса соответствующих пьезоэлементов. Генераторы объединены в систему питания, с помощью которой происходит переключение направления движения каждого вибродвигателя, а также управление их запуском или остановкой. Управление генераторами питания, а также переключение направления движения вибродвигателей осуществляется стандартными уровнями сигналов ТТЛ-логики от выходного регистра. Так как резонансная частота пьезоэлектрической пластины может меняться, то для ее возбуждения в каждом вибродвигателе на резонансе применяется обратная связь, обеспечивающая синхронизацию частоты генератора с частотой пьезопластины соответствующего вибродвигателя.

Для прецизионного углового сканирования образца применяется пьезодвигатель, на который подается управляемое напряжение в пределах 0–1000 В. Управление системой питания пьезодвигателя осуществляется с помощью ЦАП, обеспечивающего изменение напряжения на выходе в диапазоне 0–5 В.

Датчики перемещений на поверхностных акустических волнах обеспечивают разрешение 0,03 мкм, внутришаговую нелинейность 0,2 % при величине шага 50 мкм [3].

Проверка работоспособности пьезогониометра в условиях вакуума показала, что он обеспечивает необходимые перемещения объекта при остаточном давлении в вакуумной камере 10^{-4} Па.

Разработанный пьезогониометр может быть использован в качестве основного гониометра в составе трехкристального рентгеновского спектрометра, вакуумных рентгеновских спектрометров, а также спектрометров, применяемых на станциях СИ.

Технические характеристики пьезогониометра:

1. Диапазон угловых перемещений образца вокруг вертикальной оси гониометра, град (0–300).
2. Диапазон прецизионного сканирования, угл. мин (не менее 10).
3. Диапазон измеряемых угловых перемещений, угл. с (не менее 200).
3. Минимально возможное расчетное шаговое прецизионное перемещение, угл. с (не более 0,01).
5. Линейное перемещение образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости, перпендикулярной вертикальной оси гониометра, мм:
– по оси X (± 35);

- по оси Y (± 5);
- шаг (не более 0,001).
- 6. Наклон исследуемого образца относительно вертикальной оси гониометра:
 - диапазон, град (± 3);
 - шаг, угл. с (2,5).
- 7. Реверсивное вращение исследуемого образца в собственной плоскости:
 - диапазон, град (0–380);
 - шаг, угл. с (2,5).

Станция дифракционной рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для синхротронного источника

В настоящее время особое место занимает изучение наноматериалов и нанообъектов. Для получения наноматериалов и наносистем на их основе используется атомарное и молекулярное конструирование.

Одновременно развиваются адекватные новым технологиям методы атомарной диагностики, которые позволяют контролировать структурное состояние создаваемых материалов. Важную роль в диагностике материалов следует отнести методу СРВ.

Сегодня этот метод переживает второе рождение благодаря созданию специализированных источников синхротронного излучения (СИ), которые генерируют электромагнитное излучение, обладающее уникальными свойствами: непрерывным спектром от инфракрасного до γ -излучения. Синхротронные источники характеризуются высокой степенью естественной коллимации, возможностью использования периодической последовательности ультракоротких рентгеновских импульсов длительностью несколько десятков пикосекунд, определенным состоянием поляризации. Их яркость излучения в 8–10 раз превосходит яркость существующих лабораторных рентгеновских трубок [10].

Перспективы развития и применения метода СРВ для исследования наноструктур связаны с применением синхротронного излучения с указанными уникальными свойствами.

В последние годы РНЦ «Курчатовский институт» и рядом академических институтов был разработан и создан комплекс экспериментального оборудования для проведения исследований на источнике синхротронного излучения.

Станция прецизионной рентгеновской оптики (СПРО) предназначена для проведения описанных выше экспериментов и представляет собой комплекс (рис. 18 [10]) уникального оборудования. Она включает в себя двухкристальный монохроматор, многокружный гониометр, элементы вакуумного канала, блоки формирования пучка и позволяет регистрировать рентгеновское флуоресцентное излучение в условиях дифракции рентгеновских лучей [10]. Техническая возможность регистрации электронов на этом оборудовании, к сожалению, отсутствует.

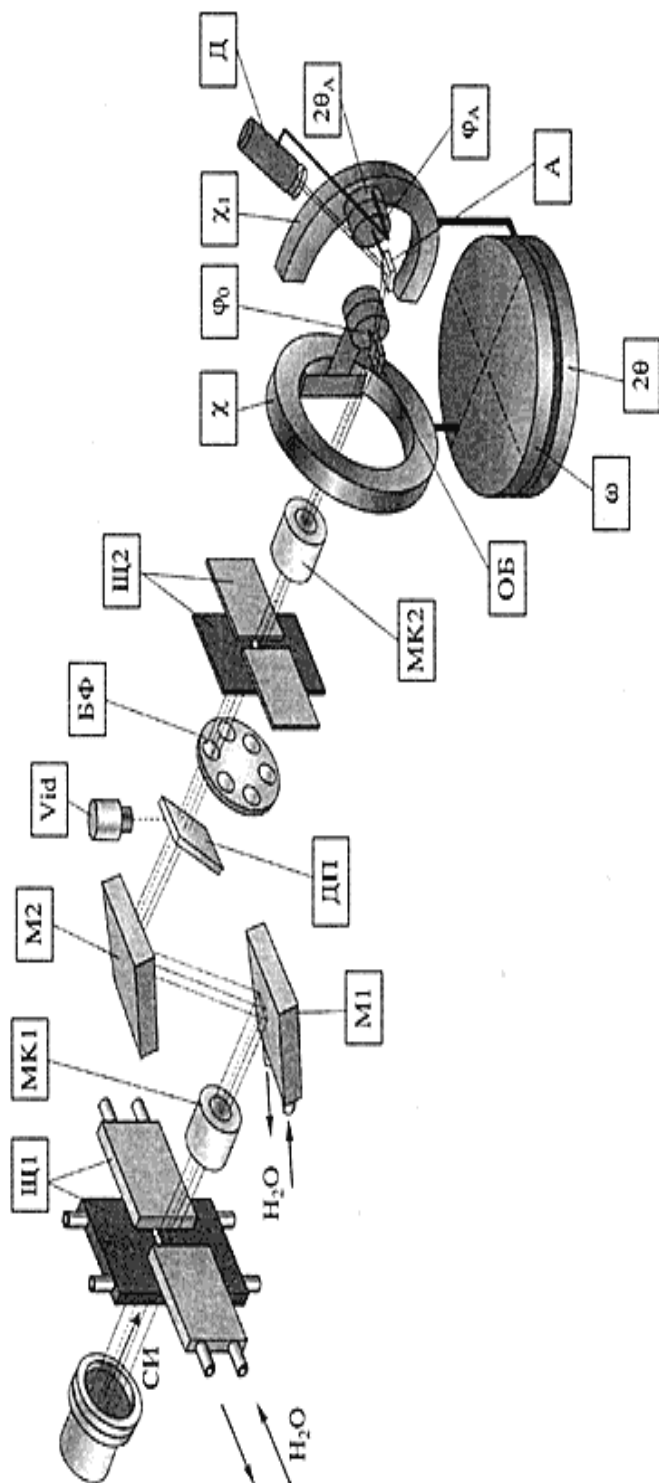


Рис. 18 Станция прецизионной рентгеновской оптики (СПРО):

Щ1, Щ2 – щелевые диафрагмы; М1, М2 – кристаллы-монокроматоры; ДП – датчик положения пучка; МК1, МК2 – мониторные камеры; ВФ – блок фильтров; ОБ – образец; А – кристалл-анализатор; Д – детектор сцинтилляционный; ω, 2φ, γ, с – оси многокружного гониометра [10]

Поскольку метод СРВ в случае электронной эмиссии имеет существенные преимущества по пространственному разрешению по сравнению с каналом рентгеновской флуоресценции, создание станции дифракционной рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (СДФЭС) для синхротронного источника (СИ), несомненно, имеет большое научное и прикладное значение.

Принципы построения СДФЭС отличаются от соответствующих принципов построения ДРФЭС и обусловлены спецификой СИ. Одна из главных особенностей таких источников, как уже отмечалось выше, – непрерывный спектр излучения. Поэтому следует выделить необходимый для эксперимента диапазон энергий, решить проблему коллимации и монохроматизации излучения. Данная задача успешно решена с помощью специально разработанного для СИ двухкристального монохроматора [10].

Другая особенность СИ – высокая коллимация излучения в плоскости, перпендикулярной к плоскости орбиты электрона, поэтому применяться для СДФЭС должны гониометрические устройства с горизонтальными осями вращения.

И, наконец, высокая интенсивность СИ требует максимальной автоматизации эксперимента и в целях безопасности персонала дистанционного управления механическими и электронными устройствами станции.

Перечисленные особенности в полной мере были учтены при создании СПРО, представленной в работе [10]. Здесь информацию о положении атомов приповерхностных слоев получают путем одновременной регистрации кривых рентгеновского отражения и выхода флуоресцентного излучения в области динамической дифракции рентгеновских лучей. Так как для регистрации данного вида вторичного излучения не требуются вакуумные условия, то это позволило решить поставленную задачу эксперимента с помощью серийно выпускаемого многокружного гониометра и полупроводникового детектора. Напротив, в разрабатываемой СДФЭС для получения информации о структуре самых верхних атомных слоев и неразрушающего послойного анализа рационально использовать электронный канал – эмиссия электроны. Однако регистрация потоков заряда возможна только в условиях вакуума.

В отличие от СПРО [10], где на воздухе регистрируется флуоресцентное рентгеновское излучение, в СДФЭС предполагается так же, как и в ДРФЭС, реализовать селективный по глубине метод СРВ, основанный на энергодисперсионных измерениях угловых зависимостей выхода фото- и оже-электронов в условиях сверхвысокого вакуума. Поэтому устройство СДФЭС будет отличаться от конструкции ДРФЭС только расположением в пространстве осей вращения гониометрических устройств кристалл-монохроматоров и образца. Эти оси в СДФЭС должны располагаться в горизонтальной плоскости, тогда как в ДРФЭС они располагаются в вертикальной плоскости. Следовательно, при конструировании СДФЭС могут быть использованы после соответствующей доработки рассмотренные выше составляющие ДРФЭС.

Отдельные функциональные узлы ДРФЭС при этом обеспечат выполнение следующих функций: установку исследуемого кристалла в отражающее положение; прецизионное сканирование его в области дифракции; энергоанализ электронов с одновременной регистрацией рентгеновского отражения и элек-

тронного выхода. К таким функциональным узлам относятся: торсионный гониометр, анализатор распределения электронов по энергии, вакуумная камера с окнами для ввода/вывода рентгеновского излучения в вакуумный объем, набор манипуляторов для управления гониометром и некоторые другие функциональные части измерительного устройства (ИУ) ДРФЭС (рис. 7, 8).

Двухкристальный монохроматор совместно с другими функциональными частями станции [10], изображенными на рисунке 18, уже разработаны и также могут войти (кроме многокружного гониометра) в состав СДРФЭС. Это обеспечит преемственность основных разработок по рентгеновским дифракционным комплексам, представленным выше.

Сочетание в дифракционно-спектроскопическом комплексе коллимированного и монохроматизированного синхротронного излучения, техники рентгеновской дифрактометрии и электронной спектроскопии позволит проводить энергодисперсионные измерения фотоэмиссии электронов в вакууме в условиях брэгговской дифракции.

**Расширение аналитических возможностей
метода стоячих рентгеновских волн
за счет новых информационных каналов
вторичной эмиссии**

Метод стоячих рентгеновских волн, возникающих в совершенных кристаллах при дифракции, обладает уникальной чувствительностью к структурным искажениям [13]. Зависимость интенсивности выхода вторичных излучений при отклонении от точного условия дифракции позволяет определить положение атомов, поглощающих кванты СВВ. Для поверхностной диагностики наибольший интерес представляют излучения с малой глубиной выхода, такие как ионы и электроны, выходящие в вакуум без энергетических потерь и имеющие длину свободного пробега $L = 0,1 - 1 \text{ нм}$.

Интенсивность выхода этих излучений можно описать формулой:

$$I \sim 1 + |E_h|^2 / |E_0|^2 + 2(|E_h| / |E_0|) F_c \cos(P_c + \alpha), \quad (1)$$

где $P_c = 2\pi n z_c / d$, $F_c = \exp(-h^2 \langle (z - z_c)^2 \rangle / 2)$.

Здесь E_0 , E_h – амплитуды полей падающей и рассеянной волн, α – фаза отношения $|E_h| / |E_0|$, P_c – когерентная позиция, z – координата по нормали к поверхности кристалла, z_c – положение средней плоскости атомов относительно дифракционных плоскостей кристалла, F_c – когерентная фракция (фактор Дебая – Валлера), описывающая среднеквадратичные статистические и тепловые смещения атомов из среднего положения, d – межплоскостное расстояние.

Таким образом, путем подгонки теоретических кривых, построенных по этой формуле, к экспериментальным зависимостям можно определить когерентную позицию P_c (длину химической связи – z_c) и когерентную фракцию F_c .

Ионы. Известны комбинации синхротронного зондирующего облучения поверхности и регистрации десорбирующихся с поверхности ионов (метод фото-стимулированной десорбции – ФСД). В рентгеновском диапазоне длин волн энер-

гия фотона достаточна для ионизации основных уровней твердого тела и процесс ФСД происходит по механизму оже-распада основных вакансий. Поэтому выход фотодесорбированных атомных частиц (ионов, нейтралей) является индикатором величины сечения фотоионизации соответствующего основного уровня. Это позволяет по изменению выхода ионов при изменении угла дифракции выявить положение СРВ относительно рассеивающих центров и таким образом определить положение самых верхних атомов [9].

Аппаратурная реализация метода СРВ в случае ионной эмиссии возможна при сочетании в условиях одного эксперимента техники ионной спектроскопии и прецизионной рентгеновской дифрактометрии с синхротронным источником [16].

Оже-электроны. Для получения информации о структуре поверхности наибольший интерес представляют характеристические оже-электроны с энергией $E = 50 - 100 \text{ эВ}$ и длиной свободного пробега $L = 0,1 - 1 \text{ нм}$. Однако большая часть из них образуется быстрыми фото- и оже-электронами, выходящими с глубины кристалла, а не квантами СРВ. Для выделения полезного сигнала, то есть сигнала, обусловленного выходом мягких оже-электронов, возбужденных СРВ, необходимо сочетать в условиях одного эксперимента прецизионную рентгеновскую дифрактометрию и технику электронной спектроскопии совпадений. Она обеспечивает разделение полезного и паразитного сигналов по времени.

Используются два равноудаленных от образца анализатора и соответственно детектора. После того как один детектор зафиксирует фотоэлектрон, второй детектор включается в работу на короткое время, достаточное для того, чтобы зарегистрировать оже-электрон, рожденный в том же акте. При этом анализаторы настроены на разные энергии пропускания: энергию фото- и оже-электрона.

НРКР-электроны. Особый интерес к процессу непрерывного резонансного комбинационного рассеяния (НРКР) рентгеновских лучей связан в первую очередь с тем, что он может сопровождаться эмиссией электронов под действием СРВ в низкоэнергетическую часть рентгеновского фотоэлектронного спектра (РФЭС) [7].

Механизм процесса НРКР рентгеновского излучения с энергией E_1 , например близкой к энергии К-уровня атома, можно условно разбить на две стадии. Первая – эмиссия атомного электрона более внешнего L-уровня с очень малой кинетической энергией $E_e = E_1 - E_2 - (E_L - E_F)$, где E_e – энергия электрона, E_1 – энергия первичного излучения, E_2 – энергия НРКР-излучения, E_L – энергия связи L-электрона, E_F – энергия уровня Ферми. Вторая стадия – образование линии рассеянного рентгеновского излучения, смещенной от энергии первичного излучения E_1 в низкоэнергетическую область рентгеновского спектра. При этом энергия фотоэлектрона может принимать любое значение в пределах от 0 до $E_1 - (E_L - E_F)$.

Наряду с НРКР-электронами, имеет место эмиссия фото- и оже-электронов. НРКР-электроны отличаются от обычной фотоэмиссии с выбиванием тех же L-электронов механизмом образования и, следовательно, величиной кинетической энергии. Как и в любом другом спектральном методе, НРКР-, фото- и оже-электроны можно разделить по положению максимума электронной линии и ее интенсивности.

Согласно квантовой теории при значительной расстройке резонанса полное сечение НРКР рентгеновского излучения для К-L канала обратно пропорционально величине $\Delta E = E_k - E_1$ [7]:

$$\sigma_{\text{CRCD}}(E_1) = \frac{\tilde{N}_e}{\Delta E}, \quad (1)$$

где $\tilde{N}_e \approx 0,256(1 + \Gamma_{k,e}/\Gamma_{k,\gamma}) S_k W_k E_k$; S_k – сила К-осцилятора; $\Gamma_{k,e}$ и $\Gamma_{k,\gamma}$ – соответственно оже- и радиационная ширина К-уровня; W_k – выход К-флюоресценции.

Представляется перспективным соединением уникальных характеристик метода СРВ (информация о когерентной позиции и фракции) с высоким пространственным разрешением НРКР-спектроскопии (несколько верхних монослоев при регистрации фотоэлектронов, образующихся при НРКР рентгеновских лучей от атомов кристалла или адсорбированного слоя) [7].

Идея метода, следующая из рассмотрения ионизационного механизма возбуждения НРКР-электронов, заключается в том, что изменения выхода фотодесорбированных НРКР-электронов при изменении угла дифракции могут выявить положение СРВ в кристалле [7].

Перспективы развития и применения метода СРВ в случае НРКР связаны с использованием синхротронного излучения [7].

Выводы

1. Перспективы развития энергодисперсионной техники СРВ связаны с дальнейшим исследованием природы вторичной эмиссии с целью более глубокого понимания особенностей аналитического сигнала.

2. Создание аппаратуры регистрации вторичного излучения, в том числе фотоэлектронов, требует изучения тонкой структуры энергетического распределения электронов, а также ионов в режиме накопления сигнала и большой статистики, так как полезный сигнал происходит от субатомных слоев.

3. Повышение энергетического разрешения так же, как увеличение пространственного разрешения, сопровождается уменьшением интенсивности аналитического сигнала. Поэтому остаются актуальными предложения, основанные на теоретическом и экспериментальном изучении эмиссии истинно вторичных частиц под действием СРВ по совершенствованию пространственно-чувствительного селективного метода диагностики микро- и наноструктур.

4. Расширение аналитических возможностей метода СРВ возможно как за счет новых информационных каналов вторичной эмиссии [7; 9], так и поиска новых подходов к разработке вакуумных гониометрических устройств [3], энергоанализаторов [4], источников рентгеновского излучения [10], геометрии рентгенооптических систем [5; 14–17] и технологии регистрации аналитического сигнала [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, П.А. Установка для исследования внешнего фотоэффекта при дифракции рентгеновских лучей [Текст] / П.А. Александров [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 1. – С. 198–201.

2. Гравшин, Ю.М. Дифракционный рентгеновский фотоэлектронный спектрометр [Текст] / Ю.М. Гравшин [и др.] // Электронная промышленность. – 1989. – Вып. 4. – С. 23–25.
3. Гравшин, Ю.М. Рентгеновский автоматизированный пьезогониометр, управляемый ЭВМ [Текст] / Ю.М. Гравшин [и др.] // Электронная промышленность. – 1989. – Вып. 4. – С. 25–27.
4. Зашквара, В.В. Электронно-оптические свойства электростатического сферического зеркала и систем на его основе [Текст] / В.В. Зашквара, Л.С. Юрчак, А.Ф. Былинкин // Журнал технической физики. – 1988. – Т. 58. – Вып. 10. – С. 2010–2020.
5. Зельцер, И.А. Дифракционный рентгеновский фотоэлектронный спектрометр [Текст] / И.А. Зельцер, О.Н. Крютченко // Материалы Всероссийского симпозиума по эмиссионной электронике, 17–19 сентября 1996. – Рязань, 1996. – С. 188–200.
6. Зельцер, И.А. Метод дифракционной рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для исследования структуры поверхности и приповерхностных областей полупроводниковых кристаллов [Текст] / И.А. Зельцер, М.В. Ковальчук, Р.С. Сеничкина // Материалы VII Междунар. конф. по микроэлектронике, 16–18 октября 1990 г. – Т. 1. – Минск, 1990. – С. 285–286.
7. Зельцер, И.А. Новые возможности нанодиагностики структуры поверхности с помощью стоячих рентгеновских волн в условиях непрерывного резонансного комбинационного рассеяния рентгеновского излучения [Текст] / И.А. Зельцер, С.А. Кукушкин, Е.Н. Моос // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 13. – С. 56–61.
8. Зельцер, И.А. Трехкристалльная рентгеновская дифрактометрия в исследовании тонких кристаллических слоев [Текст] / И.А. Зельцер, Р.М. Имамов, М.В. Ковальчук, Р.С. Сеничкина // Электронная промышленность. – 1982. – Вып. 10–11. – С. 63–67.
9. Зельцер, И.А. Ионная и электронная компонента эмиссии под действием стоячих рентгеновских волн [Текст] / И.А. Зельцер, А.С. Карабанов, Е.Н. Моос // Известия академии наук. Серия физическая. – 2004. – Т. 68, № 3. – С. 408–412.
10. Ковальчук М.В. Органические наноматериалы, наноструктуры и нанодиагностика [Текст] // Вестник РАН. – 2003. – Т. 73, № 5. – С. 405–415.
11. Ковальчук, М.В. Дифракционный вакуумный рентгенофотоэлектронный спектрометр [Текст] / М.В. Ковальчук [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – Т. 3. – С. 191–195.
12. Ковальчук, М.В. Новый метод энергодисперсионного измерения фотоэлектронной эмиссии, возбужденной стоячей рентгеновской волной [Текст] / М.В. Ковальчук, А.С. Семилетов // Физика твердого тела. – 1986. – Т. 28, № 2. – С. 558–562.
13. Ковальчук, М.В. Рентгеновские стоячие волны – новый метод исследования структуры кристаллов [Текст] / М.В. Ковальчук, В.Г. Кон // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149. – Вып. 1. – С. 69–103.
14. Устройство для исследования совершенства структуры монокристаллических слоев [Текст] : авт. свид. 1226210 СССР : МПК G01N 23/20 / А.Г. Денисов, И.А. Зельцер, Р.С. Сеничкина, М.В. Ковальчук, Ю.Н. Шилин ; № 3792952, заявл. 21.09.84; опубл. 22.12.85.
15. Устройство для исследования совершенства структуры монокристаллических слоев [Текст] : авт. свид. 1396023 СССР : МПК G01N 23/20 / А.Г. Денисов, И.А. Зельцер, А.Г. Коряков, Р.С. Сеничкина ; № 3984694, заявл. 04.11.85 ; опубл. 15.01.88.
16. Устройство для исследования структуры кристаллических слоев [Текст] : пат. 2370758 Рос. Федерация : МПК G01N 23/22 / И.А. Зельцер, С.А. Кукушкин, Е.Н. Моос ; заявитель и патентообладатель Санкт-Петерб. акад. управления и экономики. – № 2007122222/28, заявл. 13.06.07 ; опубл. 20.10.09.

17. Устройство для исследования структуры монокристаллических слоев [Текст] : пат. 2370757 Рос. Федерация : МПК G01N 23/22 / И.А. Зельцер, С.А. Кукушкин, Е.Н. Моос ; заявитель и патентообладатель Санкт-Петерб. акад. управления и экономики. – № 2007117455/28, заявл. 10.05.07 ; опубл. 20.10.09.

18. Hertel, N. A new method of measuring electron emission from monocrystals under X-ray diffraction conditions [Text] / N. Hertel [et al.] // Phys. Lett. A. – 1980. – Vol. 75. – N. 6. – P. 501–502.

19. Kikuta, S. Double – Crystal Vacuum X – Ray Diffractometer [Text] / S. Kikuta [et al.] // Rev. Scient. Instrum. – 1977. – Vol. 48. – N 12. – P. 1576–1580.

I.A. Zeltser, E.N. Moos

**METHODOLOGICAL AND INSTRUMENT ASPECTS
OF STRUCTURAL-SENSITIVE X-RAY SPECTROSCOPY
OF THE SURFACES OF CONDENSED MEDIA AND NANOSTRUCTURES**

(PART 1)

The paper analyzes the method of structural-sensitive x-ray spectroscopy of solid surfaces and describes the method of x-ray photoelectron spectroscopy. The article also treats new methods of semiconductor investigation, it analyzes pre-threshold trigger and electron emission caused by continuous resonance combinational dispersion.

structural-sensitive spectroscopy, x-rays, ion, electron, vacuum, emission, atomic particles, X-ray diffraction, synchrotron radiation, auger-electron.