

УДК 539.2:539.1(075.8)
ББК 22.37:22.383я73
Н62

Никитенков Н.Н.

Н62 Основы анализа поверхности твердых тел методами атомной физики: учебное пособие / Н.Н. Никитенков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 203 с.

ISBN 978-5-4387-0349-5

Пособие посвящено экспериментальным особенностям и теоретическим вопросам анализа свойств поверхности твердых тел и тонких пленок. Рассмотрены механизмы физических явлений, лежащих в основе эмиссионных процессов, при возбуждении поверхности электронными и ионными пучками, температурой и электростатическими полями большой напряженности. Описаны принципы функционирования узлов высоковакуумных аналитических установок (оптика заряженных частиц, энергоанализаторы, масс-анализаторы, электронные и ионные пушки, детекторы частиц и излучений).

Предназначено для бакалавров и магистрантов, обучающихся по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния вещества».

УДК 539.2:539.1(075.8)
ББК 22.37:22.383я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН

Г.П. Грабовецкая

Доктор физико-математических наук,
профессор МАТИ

А.М. Борисов

ISBN 978-5-4387-0349-5

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013
© Никитенков Н.Н., 2013
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 6 |
| ВВЕДЕНИЕ. История и актуальность науки о поверхности и методов ее исследования | 7 |
| 1. СТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ..... | 11 |
| 1.1. Кристаллическая структура поверхности | 11 |
| 1.1.1. Основные понятия кристаллографии | 11 |
| 1.1.2. Структура идеальной поверхности | 14 |
| 1.1.3. Структура реальной поверхности..... | 18 |
| 1.1.4. Описание кристаллической структуры поверхности | 20 |
| 1.2. Электронная структура поверхности | 23 |
| 1.2.1. Поверхностные состояния..... | 24 |
| 1.2.2. Распределение поверхностных состояний..... | 28 |
| Вопросы для самопроверки..... | 32 |
| 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ | 33 |
| 2.1. Вакуум и сверхвысокий вакуум..... | 33 |
| 2.2. Чистота и «динамическая чистота» поверхности | 34 |
| 2.3. Важнейшие конструктивные узлы аналитических установок ... | 39 |
| 2.3.1. Электронная и ионная оптика..... | 40 |
| 2.3.2. Электронные и ионные пушки | 43 |
| 2.3.3. Источники рентгеновских квантов и фотонов | 45 |
| 2.3.4. Энергоанализаторы..... | 48 |
| 2.3.5. Масс-анализаторы..... | 56 |
| 2.3.6. Детекторы заряженных частиц и фотонов..... | 61 |
| Вопросы для самопроверки..... | 67 |
| 3. ЯВЛЕНИЯ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ | 69 |
| 3.1. Физические принципы и классификация методов анализа поверхности | 70 |
| 3.2. Электронная эмиссия (ЭЭ) | 76 |
| 3.2.1. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ)..... | 76 |
| 3.2.2. Ионно-электронная эмиссия (ИЭЭ) | 80 |
| 3.2.3. Фотоэлектронная эмиссия (ФЭЭ)..... | 83 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.4. Полевая электронная эмиссия (ПЭЭ)..... | 86 |
| 3.2.5. Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ)..... | 89 |
| 3.3. Ионная эмиссия (ИЭ)..... | 91 |
| 3.3.1. Ионное распыление и вторичная ионная эмиссия..... | 92 |
| 3.3.2. Полевая ионная эмиссия (ПИЭ)..... | 94 |
| 3.3.3. Термоионная эмиссия..... | 97 |
| 3.3.3.1. Термодесорбция (ТД)..... | 97 |
| 3.3.3.2 Поверхностная ионизация (ПИ)..... | 100 |
| 3.3.4. Нетермическая десорбция..... | 103 |
| Вопросы для самопроверки..... | 107 |
| 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ | |
| ИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПОВЕРХНОСТИ..... | 108 |
| 4.1. Элементы теории атомных столкновений..... | 109 |
| 4.1.1. Сечение столкновений..... | 109 |
| 4.1.2. Сечение рассеяния и прицельный параметр..... | 110 |
| 4.1.3. Упругие столкновения..... | 112 |
| 4.2. Элементы теории прохождения ускоренных частиц через вещество..... | 115 |
| 4.3. Элементы теории ионного распыления..... | 117 |
| 4.3.1. Классификация механизмов распыления..... | 117 |
| 4.3.2. Теория распыления путем каскадов атомных столкновений..... | 121 |
| 4.3.3. Модели теплового пика, горячего пятна и ударных волн.. | 128 |
| 4.3.4. Механизмы распыления за счет электронных процессов и химических реакций..... | 133 |
| 4.3.5. Особенности распыления многокомпонентных мишеней. | 134 |
| 4.3.6. Моделирование на ЭВМ процессов распыления..... | 136 |
| 4.4. Элементы теории ионизации и возбуждения атомов в ионной спектроскопии..... | 139 |
| 4.4.1. О классификации теоретических моделей ионообразования..... | 139 |
| 4.4.2. Микропроцессы, ответственные за ионообразование..... | 140 |
| 4.4.3. Модели ионизации вторичных атомов в условиях распыления за счет каскадов атомных столкновений..... | 147 |
| 4.4.4. Модель разрыва связей..... | 153 |
| 4.4.5. Термодинамическое описание процессов ионизации и возбуждения..... | 157 |
| Вопросы для самопроверки..... | 163 |

| | |
|---|------------|
| 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПОВЕРХНОСТИ | 164 |
| 5.1. Глубина выхода электронов и исследуемый объем вещества . | 164 |
| 5.2. Сечение неупругих электрон-электронных столкновений | 166 |
| 5.3. Сечение ударной электронной ионизации | 167 |
| 5.4. Плазмоны | 167 |
| 5.5. Средняя длина свободного пробега электронов..... | 170 |
| 5.6. Оже-процесс и процесс эмиссии рентгеновского кванта | 170 |
| 5.7. Пробеги первичных электронов в твердых телах | 172 |
| 5.8. Рентгеновское излучение..... | 175 |
| 5.8.1. Тормозное излучение..... | 176 |
| 5.8.2. Характеристическое рентгеновское излучение..... | 177 |
| 5.8.3. Вероятности процессов, ширины атомных уровней и времена жизни..... | 180 |
| 5.9. Особенности детектируемого энергетического спектра электронов при разных факторах возбуждения | 182 |
| Вопросы для самопроверки..... | 186 |
| 6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ..... | 187 |
| 6.1. Дифракция..... | 187 |
| 6.1.1. Дифракция электронов | 187 |
| 6.1.2. Построение Эвальда | 190 |
| 6.1.3. Тепловые колебания решетки и фактор Дебая–Валлера.... | 192 |
| 6.2. Сканирующая зондовая микроскопия | 193 |
| Вопросы для самопроверки..... | 196 |
| Задачи | 197 |
| Часто использованные обозначения и аббревиатуры..... | 200 |