

Министерство образования Украины
Харьковский национальный университет

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ИОННО-ФОТОННОЙ ЭМИССИИ МЕТАЛЛОВ**

Харьков 2003

1.УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

К работе на установке по исследованию основных параметров ионно-фотонной эмиссии допускается персонал, аттестованный по « Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилам технической безопасности при эксплуатации электроустановок потребителями » и имеющий по электрической безопасности квалификационную группу не ниже III. На источник ионов установки подается высокое (20 kV) напряжение, поэтому запрещается открывать дверь защитной сетки.

ВНИМАНИЕ:

Для проведения измерений допускаются студенты и стажеры, предварительно ознакомившиеся с правилами техники безопасности в лаборатории, изучившие настоящее методическое указание по выполнению работы и получившие разрешение на проведение измерений от руководителя занятиями.

Студентам и стажерам разрешается проводить на установке только измерения и запрещается проводить любые работы по монтажу или ремонту без специального задания руководителя занятиями.

2. ВВЕДЕНИЕ

При бомбардировке твердых тел ионами Кэв-ных энергий вблизи поверхности наблюдается светящийся ореол протяженностью порядка 1 см., обусловленный отлетом от нее частиц в возбужденном состоянии с последующим испусканием ими электромагнитного излучения. Это явление получило название ионно-фотонной эмиссии (ИФЭ) и оно занимает важное место среди ряда вторично - эмиссионных явлений, таких как распыление, рассеяние ионов первичного пучка, вторичная ионно-ионная эмиссия, ионно-электронная эмиссия.

Так как возбужденные атомы, ионы и молекулы являются составной частью вторичных частиц, образованных при ионной бомбардировке твердых тел, исследования ИФЭ весьма актуальны для развития представлений о процессах, приводящих к эмиссии вторичных частиц в различных зарядовых и энергетических состояниях. Кроме того, они могут иметь и практическое значение при определении состава поверхностных и объемных загрязнений, профиля внедренных частиц; некоторых параметров (работа выхода, ширина зоны проводимости), характеризующих электронную структуру твердого тела и др.

Основными параметрами, характеризующими явление ИФЭ, являются спектральный состав, квантовый выход и пространственное распределение излучения, испущенного отлетающими от поверхности возбужденными частицами.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

Явление ИФЭ широко исследуется уже свыше 30 лет /1-3/, однако до сих пор нет единой теории этого явления. Связано это с большой сложностью задачи, так как необходимо в рамках единых представлений учесть влияние типа связи (металлическая, ионная, ковалентная) и структуры (моно-, поликристалл) твердого тела, динамики процессов, приводящих к отлету частицы (линейные каскады столкновений, кратные столкновения), процессов электронного обмена резонансного и оже- типа, а также атомные параметры (n, l, j) исследуемого возбужденного состояния. Тем не менее, к настоящему времени сложилось достаточно четкое представление об основных процессах, приводящих к выбиванию с поверхности твердого тела частиц, их возбуждению и сохранению этого возбуждения при разрыве связи с поверхностью.

При взаимодействии первичного иона с твердым телом в области $l \leq 0$ (то есть внутри твердого тела и на его поверхности) протекают процессы, приводящие к отлету (выбиванию) частиц. Условно эти процессы можно разделить на два типа: а) процесс кратных столкновений налетающего иона с приповерхностными атомами мишени; б) процесс развития каскада столкновений. Первый из этих процессов (а), при условии $E \gg U$ и $E \gg E_v$ (E -энергия первичного иона, U - энергия связи выбитой частицы с решеткой, E_v - энергия возбуждения) можно рассматривать как упругое столкновение иона с частицей поверхности. Отлетающей частицей, возникающей в такого рода процессе, может быть либо частица пучка (преимущественно, при работе с легкими ионами), либо частица самой мишени. Энергия таких частиц сравнима с энергией первичного пучка. Максимальная энергия (E_m), которая может быть передана выбиваемому атому в центральном (лобовом) столкновении дается выражением:

$$E_m = 4M_1M_2E(M_1+M_2)^{-1} \quad (1)$$

где M_1 –масса первичного иона, M_2 –масса выбиваемого атома.

При развитии каскада столкновений (б) первичный ион, проникая в твердое тело, передает импульс его частицам. Они, в свою очередь, передают полученный импульс другим частицам. В результате такой передачи возникают каскады

атомных столкновений, которые эстафетным путем могут передавать импульс поверхностным частицам твердого тела. Если этот импульс будет иметь должную величину и направление, то поверхностная частица будет выбита в вакуум. Наиболее вероятная энергия таких выбитых частиц порядка нескольких десятков эВ. Распределение по энергиям ($N(E)$) таких выбитых частиц описывается, согласно теории Зигмунда [4], следующим выражением:

$$N(E) = CU(E+U)^{-(n+1)} \quad (2)$$

где C – константа, U – поверхностная энергия связи атома, $n=1$ или 2 – подгоночный параметр.

При разрыве связи с твердым телом ($l < l_0$, где l_0 – порядка нескольких атомных размеров) у отлетающей частицы происходит формирование состояния возбуждения. Существует ряд моделей, в которых предполагаются различные механизмы формирования состояния возбуждения у выбиваемой частицы, которые условно можно разделить на два типа: кинетические (в том числе механизм разрыва химической связи), в которых рассматривается формирование возбужденного состояния при разделе общего электронного облака пары разделяющихся частиц; электронно-обменные, где формирование состояния отлетающей частицы определяется развалом системы твердое тело - отлетающий атом. Причем, так как скорость отлетающей частицы невелика относительно боровской скорости электрона ($v \approx 10^5 \div 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1} \ll v_{\text{бор.}} \approx 10^8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$), можно считать, что происходит адиабатический развал системы. Согласно [5] формирование состояния возбуждения завершается при расстояниях от поверхности l_0 порядка атомных размеров.

При дальнейшем удалении частицы ($l_0 < l < 10l_0$) возможно изменение ее состояния за счет процессов безызлучательной потери возбуждения: резонансной ионизации (РИ) и оже-девозбуждения (ОД). Условия определяющие возможность протекания этих процессов, следующие: $E_i - E_k < \phi$ (РИ); $E_i - E_k > \phi$ (ОД), где E_i и E_k – энергия ионизации и возбуждения атома, ϕ – работа выхода (металла). Скорость

(R) протекания каждого из этих процессов зависит от расстояния до поверхности l :

$$R(l) = A \exp(-al)$$

(3)

Где A и a – константы, значение которых зависит от типа процесса и рода взаимодействующей пары твердое тело-частица. Из (3) видно, что скорость протекания процессов безызлучательной потери возбуждения быстро убывает с ростом l . Ширина критической области над поверхностью мишени, где велико влияние процессов безызлучательной потери возбуждения (причем, $P_{\text{ри}} \gg P_{\text{од}}$), порядка $10l_0$. Следовательно, вероятность ($P_{\text{выж.}}$) того, что частица с нормальной к поверхности составляющей скорости v_{\perp} , сумеет пройти эту область, сохранив состояние возбуждения, определяется соотношением:

$$P_{\text{выж.}} = \exp\left(-\frac{A}{av_{\perp}}\right) \quad (4)$$

Наконец, при расстояниях $l \geq 10l_0$ частица является практически свободной и вероятность перехода $k \rightarrow m$ (P_{km}) в атоме (ионе) с излучением фотона с длиной волны λ определяется законом спонтанного распада:

$$P_{km} \approx \exp\left(-\frac{l}{\tau v_{\perp}}\right) \quad (5)$$

где τ - время жизни возбужденного состояния.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

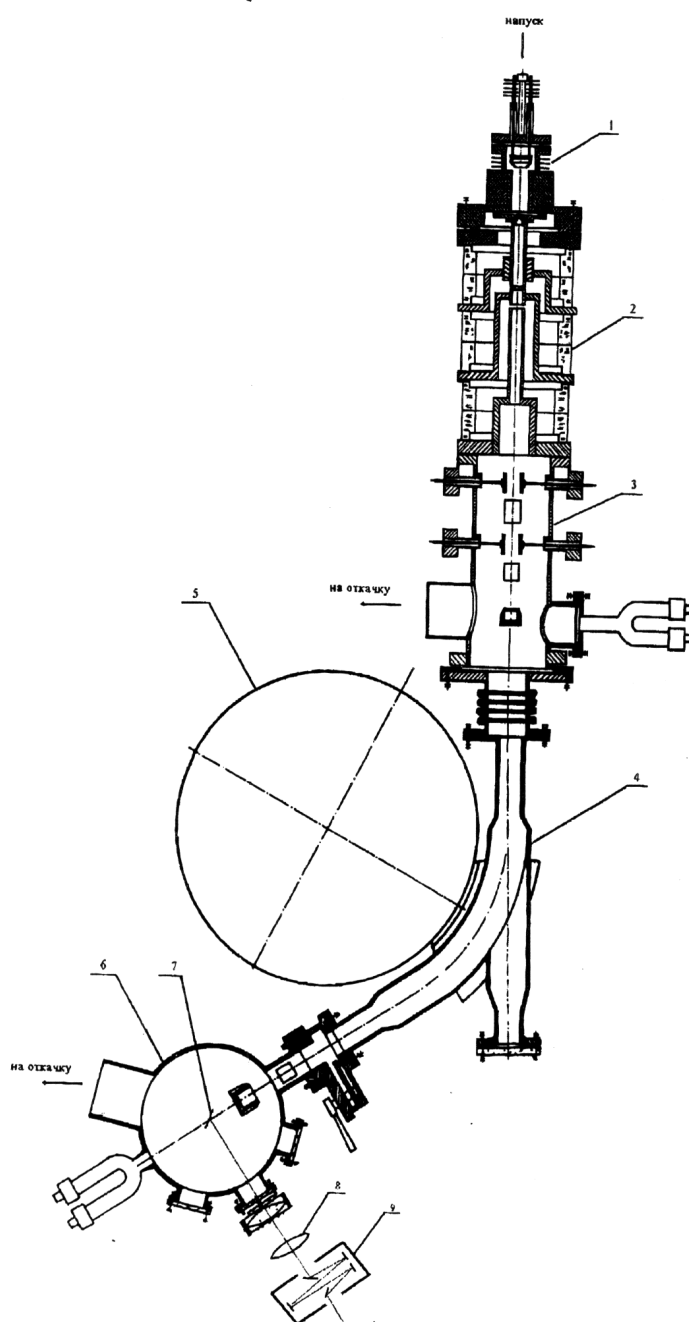


Рис.1. Экспериментальная установка

Исследование спектров излучения частиц, выбитых с поверхности мишени ионным пучком, проводится с помощью установки, состоящей из следующих основных узлов (Рис.1).

1. Магнитный дуговой источник с воздушным охлаждением. Он состоит из вольфрамового катода прямого накала, цилиндрического анода, электронного рефлятора и магнитной катушки. Ионизация газа,

напускаемого в источник, осуществляется осцилляцией электронов в магнитном поле.

2. Трехэлектродная электростатическая линза ускоряет и фокусирует ионный пучок. Рабочее напряжение =20 кэВ.
3. Камера корректоров служит для параллельного перемещения пучка в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.
4. Камера масс-анализатора расположена между полюсами магнита, имеет угол поворота $\alpha=60^\circ$ и радиус поворота $R = 200$ мм., что дает возможность разделять по массам пучки ионов вплоть до 40 а.е.м. (Ar^+) при энергии $E=20$ кэВ. Измерение тока перед анализатором производится цилиндром Фарадея с магнитным управлением, расположенным в камере корректоров.
5. Электромагнит масс-анализатора с расстоянием между полюсами $d= 20$ мм.
6. Камера мишени с 3-мя окнами для вывода светового излучения.
7. Мишень, которую можно перемещать вверх, вниз и поворачивать вокруг оси камеры. Возможен нагрев мишени путем пропускания через нее электрического тока.
8. Фокусирующая ахроматическая линза с фокусным расстоянием $F=80$ мм. служит для фокусировки оптического излучения, выходящего через окно камеры мишени.
9. Монохроматор МДР-3 является частью фотоэлектрической системы регистрации (ФЭСР), которая описана в п. «Система регистрации излучения».

Электрическая схема питания установки размещена в двух пультах – низковольтном и высоковольтном. Питание цепей ионного источника осуществляется через несколько разделительных трансформаторов. Вытягивающее и фокусирующее напряжение на линзу подается с высоковольтных рентгеновских выпрямителей УРС-70. Напряжение на пластины корректоров подается от выпрямителей на 10 кВ. Магнит масс-анализатора питается от двух стандартных источников питания УИП-1. Откачка установки осуществляется двумя форвакуумными насосами РВН-20 и двумя диффузионными насосами М-500, присоединенными к камере корректоров и камере мишени. Для вымораживания паров масел применяются азотные ловушки, установленные на вакуумных агрегатах и азотная ловушка непосредственно в камере мишени. Давление в камере корректоров и камере мишени измеряется блоками ламп ПМТ-2 и ПМИ-2. Остаточное давление в камере мишени $1-3 \cdot 10^{-4}$ Па и оно не меняется при работающем источнике ионов.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Бомбардировка поверхности мишени осуществляется выделенным по массе пучком ионов Ar^+ с энергией 20 кэВ (это соответствует максимальному значению коэффициента распыления поверхности). Угол β падения пучка на поверхность равен 45° , что обеспечивает, с одной стороны, значение

коэффициента распыления близкое к максимальному, а с другой стороны, достаточно высокий выход возбужденных частиц, для которых вероятность протекания процессов безизлучательной потери возбуждения за счет влияния поверхности еще не слишком велика.

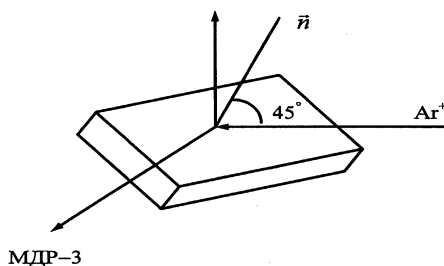


Рис.2. Схематическое изображение взаимодействующей пары пучок-мишень.

При таких условиях бомбардировки над поверхностью мишени возникает светящийся ореол, простирающийся на расстояние 0.5 – 3 см. от бомбардируемой поверхности в зависимости от типа взаимодействующей пары пучок-мишень (Рис.2). Если мишень располагается торцом к системе регистрации, то регистрируется лишь излучение отлетающих возбужденных частиц, а не ионolumинесценция самой поверхности. Взаимное расположение оси ионного пучка, мишени и ФЭСР приведено на рис. 3.

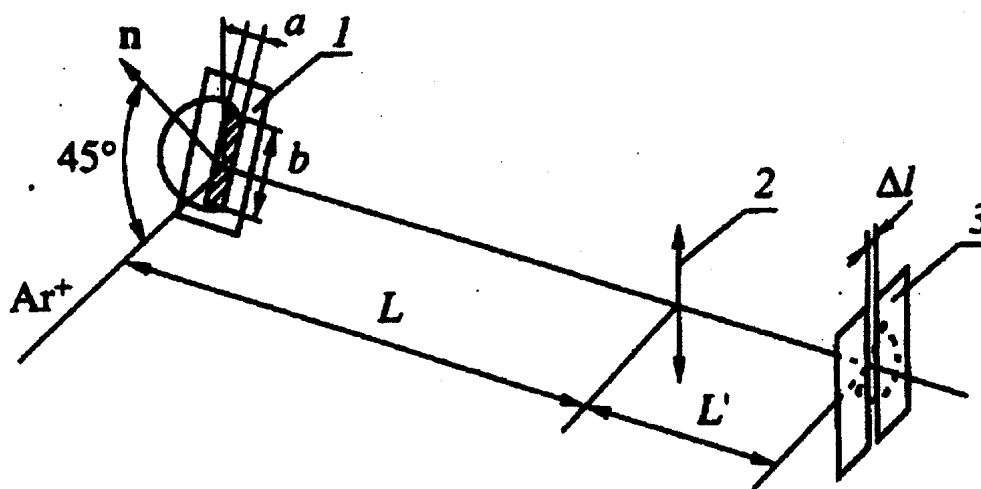


Рис.3. Взаимное расположение оси ионного пучка, мишени и ФЭСР

Оптическое излучение, испущенное возбужденными частицами в направлении, перпендикулярном плоскости падения первичного пучка, фокусировалось ахроматической линзой с фокусным расстоянием $F = 80$ мм. на входную щель МДР-3, а затем анализировалось и регистрировалось с помощью фотоэлектрической системы, работающей в режиме счета фотонов и чувствительной в области длин волн 250.0 – 800.0 нм. Блок-схема ФЭСР приведена на рис 4.

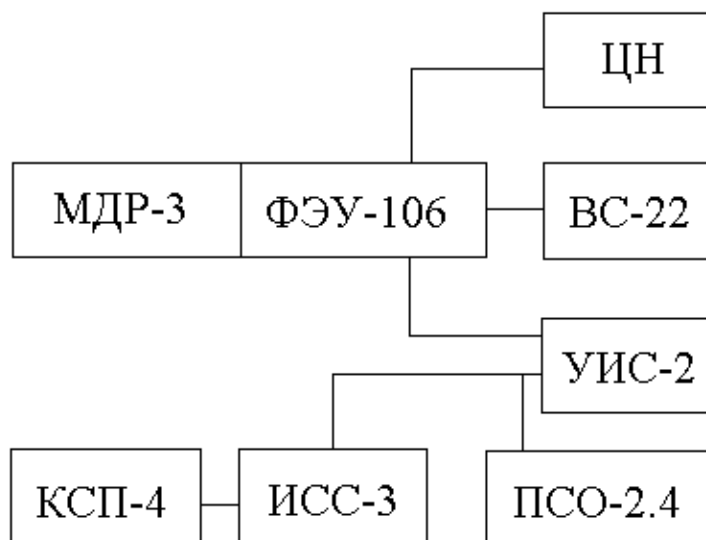


Рис.4. Блок-схема фотоэлектрической системы регистрации.

МДР-3 – монохроматор для анализа спектрального состава излучения.

ФЭУ-106 – фотоэлектронный умножитель с азотным охлаждением, присоединенный со стороны выходной щели монохроматора.

ВС-22 – блок питания ФЭУ.

ЦН – цепь накала спирали, помещенной в сосуд Дьюара с жидким азотом, для регулировки скорости испарения азота и степени охлаждения фотокатода ФЭУ.

УИС-2 – спектрометрический импульсный усилитель.

КСП-4 – электронный автоматический потенциометр, предназначенный для записи спектров излучения.

ИСС-3 – измеритель скорости счета.

ПСО-2.4 – пересчетный прибор счета импульсов.

При попадании оптического излучения на входную щель монохроматора МДР-3 в этом приборе формируется оптический сигнал определенной длины волны, который усиливается и преобразуется в ФЭУ-106 и через катодный повторитель подается на вход УИС-2, работающего в режиме внутреннего формирования импульсов. Регистрация числа импульсов производится одновременно измерителем скорости счета ИСС-3 и пересчетным прибором ПСО-2.4. Также информация подается на потенциометр КСП-4, где производится запись спектра.

Достаточная точность измерений может быть получена только в условиях постоянства температуры фотокатода ФЭУ=106, которое достигается за счет прохождения паров жидкого азота из сосуда Дьюара через криостат, присоединенный к фотоумножителю.

Спектральная чувствительность ФЭСР (S_λ) – отношение числа счетов на выходе ФЭСР к числу падающих фотонов определенной длины волны – определяется с помощью стандартного источника света. В нашем случае это стандартная спектрометрическая лампа СИ-10-300. В расчетах использовалась

величина ($K_\lambda=1/S_\lambda$), обратная спектральной чувствительности – значения которой приведены в таблице 1

Таблица 1.

Значения K_λ фотоэлектрической системы

Значения K_λ фотоэлектрической системы регистрации излучения

1 порядок		1 порядок		2 порядок	
$\lambda, \text{Å}$	K_λ	$\lambda, \text{Å}$	K_λ	$\lambda, \text{Å}$	K_λ
3200	810	6200	104	2200	300
3300	360	6300	116	2300	240
3400	167	6400	139	2400	180
3500	120	6500	156	2500	120
3600	70	6600	188	2600	84
3700	57	6700	236	2700	65
3800	48	6800	310	2800	52
3900	41	6900	410	2900	41
4000	36	7000	520	3000	34
4100	33	7100	620	3100	28
4200	30	7200	710	3200	25
4300	28	7300	860	3300	22
4400	28	7400	1000	3400	20
4500	28	7500	1250	3500	19
4600	28	7600	1650	3600	18
4700	29	7700	2300	3700	18
4800	30	7800	3000	3800	19
4900	31	7900	4000	3900	20
5000	32	8000	5000	4000	21
5100	34	8100	5800	4100	23
5200	37	8200	6800	4200	26
5300	40	8300	7700	4300	30
5400	42	8400	8650	4400	34
5500	44	8500	9700	4500	40
5600	50	8600	10500	4600	48
5700	56	8700	11500	4700	60

5800	60	8800	12500	4800	75
5900	70	8900	13700	4900	106
6000	80	9000	14500	5000	155
6100	90				

Значения K_λ для произвольной длины волны определяется из таблицы согласно формуле:

$$K_{\lambda_x} = K_{\lambda_1} + (K_{\lambda_2} - K_{\lambda_1})(\lambda_x - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)^{-1} \quad (6)$$

где $\lambda_1 < \lambda_x < \lambda_2$ и $\lambda_2 - \lambda_1 = 100$ нм. Спектры возможно записывать в I и II порядках дифракции, что расширяет диапазон измерений в ультрафиолетовую область спектра.

Режим работы ФЭСР.

1. Напряжение питания ФЭУ-106 = 1920 В.
2. Температура фотокатода ФЭУ-106 = -30°C .
3. Коэффициент усиления УИС-2 = 125.
4. Шкала ИСС-3 = 500 или 1500.
5. Скорость сканирования спектра МДР-3 = «2»
6. Скорость движения диаграммной ленты КСП-4 = 720 мм/час.
7. Фоновый сигнал ФЭСР ≤ 4 имп/сек.
8. Область спектра в I порядке = 400.0 – 800.0 нм.
Область спектра во II порядке = 250.0 – 400.0 нм.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

При постоянной линейной дисперсии прибора для определения длины волны линии достаточно измерить расстояние между двумя известными линиями и расстояние от одной из них до измеряемой линии.

Пусть в этих условиях отсчеты измерительного прибора при установке его на известные линии с длинами волн λ_1 и λ_2 будут соответственно n_1 и n_2 , отсчет прибора при установке на измеряемую линию λ_x и n_x .

Тогда из условия постоянства линейной дисперсии следует:

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_x}{n_1 - n_x} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{n_1 - n_2}, \quad (2.1)$$

откуда:

$$\lambda_x = \lambda_1 - \frac{n_1 - n_x}{n_1 - n_2}(\lambda_1 - \lambda_2). \quad (2.2)$$

Из-за влияния возможных погрешностей, связанных с механическим перемещением диаграммной ленты, на которую записывается спектр, интервал $\lambda_1 \div \lambda_2$ следует выбрать по возможности малым. Он должен быть таким, чтобы линия с длиной волны λ_x лежала внутри интервала $\lambda_1 \div \lambda_2$.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ИЗЛУЧЕНИЯ РАСПЫЛЕННЫХ ЧАСТИЦ

При анализе полученных спектров очень важной количественной характеристикой ИФЭ является квантовый выход излучения (γ_{ik}) оптического перехода $i \rightarrow k$ в расчете на один падающий ион, который определяется по формуле

$$\gamma_{ik} = (\sum N_{ik}) (N^+)^{-1} \quad (7)$$

где $\sum N_{ik}$ - полное число фотонов перехода $i \rightarrow k$, испущенных отлетающими от поверхности, возбужденными в i -тое состояние частицами; N^+ - число падающих ионов.

Из приведенной выше формулы видно, что при определении квантового выхода важно определить полное число фотонов, испущенных покидающими поверхность возбужденными частицами, поэтому геометрия сбора излучения должна гарантировать полный сбор всех испущенных фотонов. Рассмотрим более подробно геометрию сбора излучения. На рис 5 приведена схема относительного расположения пучка, мишени и светящейся области над ней (ореола), линзы и входной щели монохроматора и указаны (в мм) рабочие размеры.

Использование длиннофокусной линзы позволяет рассматривать светящейся ореол как

источник света малого размера, излучение всех участков которого проецируется на плоскость входной щели монохроматора в той ее части, для которой сохраняется условие линейности сигнала от числа падающих фотонов. С этим же связано и положение линзы, дающее уменьшенное изображение ореола ($\eta = L'/L = 0.5$). Для предложенной схемы сбора излучения регистрируемый сигнал (N_{ik}^c) определяется соотношением:

$$N_{ik}^c = (\sum N_{ik}) \frac{\Delta l}{\eta d} \frac{\Delta \Omega}{4\pi} S_{\lambda} \quad (8)$$

где Δl - ширина входной щели, d - горизонтальная проекция пучка на поверхность мишени, $\eta = L'/L$ - коэффициент увеличения изображения, L - расстояние от ореола до линзы, L' - расстояние от линзы до входной щели монохроматора, $\Delta \Omega = \frac{\pi D^2}{4L^2}$ - телесный угол сбора излучения, где D - диаметр линзы,

$\frac{\Delta \Omega}{4\pi}$ - часть излучения ореола, собранная линзой, $S_{\lambda} = 1/K_{\lambda}$ - спектральная чувствительность системы.

Число падающих в единицу времени ионов N^+ определяется из соотношения:

$$N^+ = I_{\text{миш}} \cdot 1,6 \cdot 10^{13} \text{ (ион/сек)} \quad (9)$$

Тогда формула для определения γ_{ik} принимает вид:

$$\gamma_{ik} = \frac{N_{ik}^c}{I_{\text{миш}}} K_{\lambda} \left(\frac{4\eta d\pi 1,6 \cdot 10^{-13}}{\Delta l \cdot \Delta \Omega} \right) \left(\frac{\text{фот}}{\text{ион}} \right) \quad (10)$$

5. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ:

1. Ознакомиться с настоящим методическим указанием и получить допуск к проведению измерений у преподавателя.
2. Под руководством преподавателя включить установку на откачку. При достижении остаточного давления в камере мишени порядка $2 \cdot 10^{-6}$ включить ионный источник, получить и вывести в камеру мишени пучок ионов аргона с энергией 20 кэВ.
2. Под руководством преподавателя включить систему фотоэлектрической регистрации спектра.
3. Записать спектр излучения мишени, находящейся в вакуумной камере установки и облучаемой пучком ионов (записать тип ионного пучка; плотность тока, измеряемого цилиндром фарадея, расположенным перед облучаемой мишенью и ток, измеряемый непосредственно на мишени).
4. Измерить параметры геометрии сбора излучения и рассчитать значения константы в формуле (10) для определения квантового выхода излучения.
5. Расшифровать и интерпретировать длины волн наблюдаемых эмиссий в записанном спектре излучения.
6. Определить квантовый выход излучения наблюдаемых эмиссий.
7. Результаты представить в таблице.

λ , нм.	интерпретация	γ_{λ} , 10^{-6} фот/ион

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Грицына В.В. “Электромагнитное излучение частиц, отлетающих от поверхности твердых мишеней, при ионной бомбардировке”. – Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26. С. 1969-1983.
2. Поп С.С., Белых С.Ф., Дробнич В.Г., Ферлегер В.Х. Ионно-фотонная эмиссия металлов. Ташкент: ФАН. 1989. 280с.
3. Грицына В.В., Коваль А.Г., Коппе В.Т., Гоков С.П. “Исследование излучения возбужденных частиц, отлетающих от поверхности медной мишени при ионной бомбардировке”. - Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78. С. 212-216.

	16
Оглавление	
1. Указание мер безопасности	3
2. Введение	4
3. Теоретические основы	5
4. Экспериментальная установка и методика эксперимента	7
Экспериментальная установка	7
Система регистрации излучения	7
Методика определения квантового выхода излучения	10
5. Задание на выполнение работы	11
6. Литература	12
7. Оглавление	13

Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНОГО
ПРАКТИКУМА

Для студентов IV-V курсов физико-технического факультета

Составили: Бобков В.В.
Грицына В.В.

