

УДК 537.533.8

**ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО  
ВОЛЬФРАМА И МОЛИБДЕНА****АЛИЕВ Б.З.***Азербайджанский технологический университет*

В работе проведено исследование процессов вторичной электронной эмиссии двух тугоплавких металлов – вольфрама и молибдена. Установлено, что влияние температуры кристалла на структуру основных вторично-эмиссионных характеристик обусловлено взаимодействиями электронов с фотонами.

Взаимодействие электронов с периодическим полем решетки твердого тела, сопровождающееся их дифракционным рассеянием, приводит к перераспределению электронной плотности падающего на поверхность твердого тела пучка электронов при его проникновении и распространении в глубь кристалла [1]. В зависимости от ориентации падающего пучка относительно кристаллографических осей решетки электроны могут оказаться сконцентрированными как вблизи узлов решетки, так и в пространстве между ними. Различия в пространственной локализации плотности зарядов электронов обуславливают анизотропию условий движения их в твердом теле.

На протяжении многих лет, однако, при рассмотрении явлений, возникающих в процессе облучения твердых тел электронами средних энергий, авторы, как правило, пренебрегали их когерентным рассеянием на периодическом потенциале решетки [2]. Твердое тело полагалось изотропным, и анализ процессов рассеяния электронов велся в рамках парных взаимодействий с ядрами (либо с экранированными ядрами). Модель свободных частиц приводила к удовлетворительным результатам до тех пор, пока объектами исследования были поликристаллические или аморфные образцы.

Изучение монокристаллов, начавшееся интенсивно развиваться главным образом в последние годы, обнаружило новые особенности явлений, проявившиеся в различных ориентационных эффектах [3]. В частности, это нашло свое отражение в кристаллографической анизотропии вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ). Изучению анизотропии ВЭЭ двух тугоплавких металлов - вольфрама и молибдена и посвящена настоящая работа. Главное внимание при ее выполнении было сосредоточено на исследовании основных характеристик явления ВЭЭ, а именно - зависимостей от энергии электронов коэффициентов отражения электронов  $(КОЭ)_\eta$ , ВЭЭ  $(КВЭЭ)_\sigma$  и истинной ВЭЭ  $(КИВЭЭ)_\delta$ . Изучены три наиболее интересные грани  $\{100\}$ ,  $\{110\}$  и  $\{111\}$ . При этом мы исходим из того, что взаимодействия электронов с фононами в кристалле затушевывают дифракционные явления, так что наибольшую информацию о них должны содержать результаты исследований, относящиеся к низким температурам  $T$ . Повышение температуры, наоборот, должно приближать характеристики монокристаллов к таковым для поликристаллов. Поэтому часть измерений проведена при низких ( $T \sim 80^\circ\text{K}$ ) и повышенных ( $T \sim 1000 \div 1300^\circ\text{K}$ ) температурах образцов. Погрешности выведения соответствующих граней на поверхность образцов, как правило, были равны или меньше  $1^\circ$ . До сих пор, насколько нам известно, подобных систематических исследований указанных вторично-эмиссионных характеристик разных граней не проводилось. Между тем изучение ВЭЭ монокристаллов представляет интерес как для физики твердого тела при рассмотрении закономерностей взаимодействия заряженных частиц с твердым телом, так и для эмиссионной

электроники, поскольку дифракционное рассеяние электронов, как указано выше, проявляется при исследовании различных эмиссионных явлений и, следовательно, их знание необходимо при выяснении механизмов этих явлений. Кроме того, все расширяющееся использование монокристаллов в технике обуславливает актуальность их исследований и для прикладных целей.

Измерения основных зависимостей ВЭЭ исследованных граней W и Mo проведены в статическом режиме, как правило, с помощью потенциометрических схем, содержащих нормальные элементы Вестона, в диапазоне энергий  $E_p \approx (0,3 \div 3) \text{кэВ}$  через интервалы  $\Delta E_p \approx 10 \text{ эВ}$ . Погрешности определения  $\eta$  и  $\sigma$  по этой схеме составляли  $\sim (0,2 \div 0,7)\%$ , коэффициента  $\delta = \sigma - \eta = (0,6 \div 1,2)\%$ . Неточности измерения  $E_p$  были порядка 1 эВ. Измерения угловых зависимостей коэффициентов ВЭЭ выполнены с помощью гальванометров М 1201 и обладают несколько меньшей точностью, а именно  $\Delta\eta/\eta$  и  $\Delta\sigma/\sigma \approx (1 \div 1,5)\%$ ,  $\Delta\delta/\delta \approx (2 - 3)\%$ . Погрешности определения угла падения  $\varphi$  электронов на поверхность кристаллов возрастали с увеличением  $\varphi$ , составляя при  $\varphi \approx (40 \div 45)^\circ$  величину порядка  $1^\circ$ .

В работе изложены данные, полученные при исследовании зависимостей  $\eta(E_p)$ ,  $\sigma(E_p)$  и  $\delta(E_p)$  граней  $\{100\}$ ,  $\{110\}$  и  $\{111\}$  W и Mo. У всех изученных кристаллов на указанных вторично-эмиссионных характеристиках обнаружена отчетливая структура в виде системы многочисленных максимумов и минимумов. Для металлического эмиттера подобный сложный немонотонный характер основных зависимостей ВЭЭ в исследованной области энергий в нашей работе был получен впервые. Анализ структуры показал, что ее целесообразно разделить на два типа. Максимумы и минимумы, а также, "ступеньки", имеющие протяженность порядка нескольких сотен эВ, названы структурой 1-го порядка; аналогичные немонотонности с полушириной порядка нескольких десятков эВ отнесены к структуре 2-го порядка. Кроме того, абсолютные величины немонотонной структуры 1-го порядка заметно больше, чем у структуры 2-го порядка. Таким образом, структура 1-го порядка является более "грубой", и она определяет общий характер исследуемых зависимостей, от структуры же 2-го порядка зависят особенности детального хода кривых. Подобное деление немонотонностей на два вида было также предложено в [4]. Наиболее сильно структура 1-го порядка выражена на зависимостях  $\eta(E_p)$ , менее отчетливо она видна на кривых  $\delta(E_p)$ . Структура 2-го порядка проявляется примерно одинаковым образом у КОЭ, КВЭЭ и КИВЭЭ. Обнаружена почти полная корреляция структур как 1-го, так и 2-го порядка у всех трех коэффициентов ВЭЭ.

Показано, что у разных граней монокристаллов W и Mo как значения коэффициентов ВЭЭ, так и структура их зависимостей от  $E_p$  различны, и это определяется кристаллографическим строением поверхности эмиттера. Расхождения в структуре 1-го порядка у грани  $\{111\}W$ , обнаруженные первоначально в наших исследованиях, как показали измерения вторично-эмиссионных характеристик, проведенные при разных углах падения  $\varphi$  электронов на поверхность кристалла, объясняются небольшими различиями в углах  $\varphi$  около  $(1 \div 3)^\circ$ , по-видимому, имевшими место в разных опытах. Показано, что, в отличие от структуры 1-го порядка, энергетическое положение особенностей структуры 2-го порядка от  $\varphi$  (при небольших  $\varphi$ ) зависит слабо.

Таким образом, основные зависимости ВЭЭ являются структурно-чувствительными характеристиками твердого тела, и им свойственна кристаллографическая анизотропия. Поэтому, в отличие от поликристаллов, коэффициенты ВЭЭ монокристаллов не могут быть определены через один параметр  $Z$ , а зависят также от индексов  $\{hkl\}$  грани.

Показано, что у всех трех исследованных граней  $\{100\}$ ,  $\{110\}$  и  $\{111\}$  W и Mo КОЭ и КВЭЭ, заметно больше, чем у поликристаллических образцов тех же металлов.

Для W, кроме того, у всех трех граней величины  $\eta$  превосходят 0,5, что никогда не наблюдалось при нормальном падении для поликристаллического W. Наибольшие  $\eta$  и  $\sigma$  у обоих металлов обнаружены для грани {100}. Наименьшие  $\sigma$  характеризуют грань {110}.

Ниже приведена сводная таблица величин  $\sigma_{\max}$  и  $\delta_{\max}$  и соответствующих значений  $E_{p\max}$  и  $E'_{p\max}$ , составленная на основе всех полученных экспериментальных данных для исследованных граней W и Mo, а также поликристаллических образцов этих же металлов. Кроме того, в таблице указаны наибольшие из полученных величин  $\eta$  граней и области  $E''_p$  (в исследованном интервале  $E_p$ ), в которых они наблюдались.

Показано, что имеются определенные черты сходства в структуре основных зависимостей ВЭЭ у одних и тех же граней {hkl} W и Mo [5,6,7].

Таблица. Вторично-эмиссионные параметры граней {100}, {110} и {111} W и Mo, а также поликристаллических образцов этих же металлов.

hkl	100	111	110	Поликрист.
W				
$\sigma_{\max}$	1,64+1,66	1,52+1,58	4,44+1,48	1,42
$E_{p\max}$ , эВ	760+790	650+580	~550 и ~720	700
$\delta_{\max}$	1,15+1,18	1,08+1,12	~1.06	1,10
$E'_{p\max}$ , эВ	470+490	550-570	500+550	400
$\eta$	~0,6	~0,55	~0,6	
$E''_p$ эВ	1400+1500	1450+1550	2200+2600	
Mo				
$\sigma_{\max}$	1,50+1,52	~1,45	1,33+1,35	1,27
$E_{p\max}$ , эВ	350+400	~350 и ~540	440+460	400
$\delta_{\max}$	1,09+1,11	1,13+1,14	0,97+1,02	0,99
$E'_{p\max}$ , эВ	~350	~360	~360	370+380
$\eta$	~0,45	~0,42	~0,43	
$E''_p$ эВ	1300+1600	1200+1500 2200+2800	2500+3000	

Исследования зависимостей  $\eta(E_p)$ ,  $\sigma(E_p)$  и  $\delta(E_p)$  при углах  $\varphi$ , соответствующих различным максимумам и минимумам структуры на угловых характеристиках коэффициентов ВЭЭ, обнаружили немонотонности на этих зависимостях для всех изученных углов  $\varphi$ .

В работе приведены качественные соображения, касающиеся дифракционного рассеяния электронов в кристаллах и поясняющие некоторые из наблюдаемых в настоящей работе особенностей ВЭЭ монокристаллов. Отмечено, что, рассматривая дифракционные явления, возникающие при облучении монокристаллов электронами средних энергий, их целесообразно разделить на два типа. Во-первых, падая нормально на грань {hkl}, электронные волны дифрагируют на плоскостях, перпендикулярных поверхности кристалла. Во-вторых, электроны могут претерпевать дифракционное рассеяние на любых других плоскостях, ориентированных не перпендикулярно к поверхности кристалла. Основное отличие между указанными

двумя типами дифракционных явлений состоит в том, что в 1-ом случае дифракция происходит при всех  $E_p$ , и условие Брэгга здесь всегда выполняется неточно. Во втором случае для каждой системы отражающих плоскостей условие Брэгга может быть строго удовлетворено, и это имеет место при фиксированных значениях  $E'_p$ .

Указано, что обнаруженное на опыте влияние температуры кристалла на структуру основных вторично-эмиссионных характеристик обусловлено взаимодействиями электронов с фотонами.

Практическая значимость работы определяется тем, что показана возможность увеличения эффективности умножения электронных потоков при использовании в качестве эмиттера монокристаллического вольфрама

- 
1. *H.Hashimoto, A.Howie, M.J.Whelan*, Proc.Roy., A269, 80, 1962
  2. *Л.Н.Добрецов, М.В. Гомоюнова*, Эмиссионная электронная гл. УП. Изд-во "Наука" М.1966.
  3. *А.П. Комар, Ю.С. Коробочко*,. Некоторые эффекты каналирования электронов низких энергий кристаллами, препринт АН СССР ОЛ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Л., 1968.
  4. *М.В. Гомоюнова, Б.З.Алиев*. ФТТ, 12,2472,1970..
  5. *М.В. Гомоюнова, Б.З.Алиев*. ФТТ, 12,2742,1970.
  6. *М.В. Гомоюнова, Б.З. Алиев*. Изв. АН СССР, серия физ., 35, 231, 1971
  7. *А.Р. Шульман, В.В. Кораблев, Ю.А. Морозов*. Изв. АН СССР сер. физ. 33,218, 1971.
  8. *П.Хирш, А.Хови, Р.Николсон, Д.Пэшли, М.Уэлан*. Электронная микроскопия тонких кристаллов. Изв-во "Мир", М., 1968.
  9. *H.Taub, КМ. Stem, V.P.Dvoryankin*, .Stat.Sol.Phys. 33, 573, 1969.

## **VOLFRAM VƏ MOLİBDEN MONOKRİSTALLARINDAN İKİNCİ NÖV ELEKTRON EMİSSİYASI**

**ƏLİYEV B.Z.**

Məqalədə, volfram və molibden monokristallardan ikinci növ elektron emissiyası prosesləri tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, kristalların temperaturunun ikinci növ elektron emissiyasının əsas xarakteristikalarına təsiri elektronların fononlarla qarşılıqlı təsirləri ilə bağlıdır.

## **THE SECONDARY ELECTRONIC EMISSION OF SINGLE-CRYSTAL WOLFRAM AND MOLYBDENUM**

**ALIYEV B. Z.**

The processes of secondary electronic emission of two refractory metals - tungsten and molybdenum had been under research. It is found out that influence of crystal temperature on structure of the main secondary - emission characteristics are caused by interactions of electrons with photons.