



УДК:533.537

Феруз ХУДАЙКУЛОВ,

ТГТУ, докторант кафедры «Общая физика»

E-mail: f.xudoyqulov@mail.ru

Ёкуб ЭРГАШОВ,

Проректор НУУз, профессор, д.ф.-м.н

E-mail: y.ergashov@nuu.uz

Дилноза ТАШМУХАМЕДОВА,

ТГТУ, профессор кафедры «Технология производства электронных аппаратов»

Балтоходжа УМИРЗАКОВ,

ТГТУ, профессор кафедры «Общая физика»

МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЭМИССИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ W И MO ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

Аннотация

В данной работе с использованием методов оже-электронной спектроскопии, измерения коэффициента вторичной электронной эмиссии σ и квантового выхода фотоэлектронов Y исследованы состав, эмиссионные и оптические свойства поликристаллических образцов W и Mo имплантированных ионами Ba⁺ и покрытых субмонослойными атомами Ba. Эксперименты проводились в одном и том же приборе при вакууме $P \approx 10^{-6}$ Па. Показано, что при имплантации ионов Ba в поверхностных слоях тугоплавких металлов образуется механическая смесь типа W+Ba и Mo-Ba. Установлено, что значения коэффициента вторичной электронной эмиссии σ и квантового выхода фотоэлектронов Y при одинаковых значениях работы выхода ϕ в случае имплантации ионов Ba⁺ значительно больше, чем в случае осаждения атомов. Полученные экспериментальные результаты обоснованы теоретическими расчетами.

Ключевые слова: Механическая связь, ионная имплантация, эмиссионная эффективность, оже-спектр, квантовый выход, плазменные колебания, уровень Ферми.

KICHIK ENERGIYALI IONLAR BILAN BOMBARDIMON QILINGAN W VA MO NING EMISSION VA OPTIK XUSUSIYATLARINI O'ZGARISH MEKANIZMLARI

Annotatsiya

Ushbu ishda Ba⁺ ionlari bilan implantatsiya qilingan va submonoqatlam Ba atomlari bilan qoplangan W va Mo polikristal namunalarning tarkibi, emission va optik xususiyatlari oje - elektron spektroskopiyasi, hamda ikkilamchi elektron emissiya koeffitsienti σ va fotoelektronlarning kvant chiqishi Y ni o'lgan usullari yordamida o'rganildi. Eksperimentlar bitta asbobda $P \approx 10^{-6}$ Pa vakuumda o'tkazilgan. Ba⁺ ionlari implantatsiya qilingandan so'ng o'tga chidamli metallarning sirt qatlamlarida W+Ba va Mo-Ba tipidagi mexanik aralashmalar hosil bo'lishi ko'rsatilgan. Ba⁺ ionlarini implantatsiya qilishda, ϕ chiqish ishinig bir xil qiymatlarida, Y fotoelektronlarning kvant chiqishi Y va σ ikkilamchi elektron emissiya koeffitsientining qiymatlari atomlarni o'tqazishga qaraganda ancha katta ekanligi aniqlandi. Olingan eksperimental natijalar nazariy hisob-kitoblar bilan asoslangan.

Kalit so'zlar: Mexanik bog'lanish, ion implantatsiyasi, emission samaradorlik, oje-spektr, kvant chiqishi, plazmon tebranishlar, Fermi sathi.

MECHANISM OF CHANGE IN THE EMISSION AND OPTICAL PROPERTIES OF W AND MO AFTER BOMBARDMENT WITH LOW-ENERGY IONS

Annotation

The paper reports the results of study of composition, emission, and optical properties of polycrystalline W and Mo samples implanted with Ba⁺ ions and coated with submonolayer Ba atoms by applying Auger electron spectroscopy, secondary electron emission coefficient σ technique, as well as the photoelectron quantum yield Y . The experimental part was carried out by using the instrumentation and under vacuum $P \approx 10^{-6}$ Pa. It is shown that during the implantation of Ba ions in the surface layers of refractory metals, a mechanical mixture of the W + Ba and Mo-Ba types is formed. It has been established that the values of the coefficient of secondary electron emission σ and the quantum yield of photoelectrons Y at the same value of the work function ϕ in the case of implantation of Ba⁺ ions are much larger than in the case of deposition of atoms. The obtained experimental results are substantiated by theoretical calculations.

Key words: Mechanical bonds, ion implantation, emission efficiency, Auger spectrum, quantum yield, plasma oscillations, Fermi level.

Введение. В настоящее время тугоплавкие металлы, в частности Mo, W и их сплавы широко используются и имеют перспективы в авиационной и ракетно-космической отрасли при разработке высокоэффективных газотрубных двигателей нового поколения [1], улучшения стойкости к воздействию плазменных пучков первой стенки термоядерных реакторов [5-6], а также в вакуумных технологиях и СВЧ приборах [7].

При воздействии ионов и плазмы на материал происходит распыление и испарение материала, изменение структуры и фазового состояния, образование на поверхности новых химических соединений и т.д. [9]. При этом очень важно минимизация эрозии материалов как при нормальной работе, так и во время переходных событий, а также соответствующий выбор этих материалов [10].

В настоящее время хорошо изучены физико-химические свойства таких структур, полученных методами напыления, термодиффузии и перемешивания мелких частиц с последующим прессованием. Одним из перспективных методов создания нанопленочной структуры в поверхностном слое материалов различной природы является метод низкоэнергетической ионной имплантации в сочетании с отжигом [12].

Данная работа посвящена изучению влияния ионной имплантации на состав, эмиссионные и оптические свойства поликристаллических образцов W и Mo.

Методика проведения экспериментов. В качестве объектов исследования использовались монокристаллические шайбы Mo(111) и W(111) с диаметром 8 – 10 мм и толщиной 0.8 мм.

Эксперименты проводились в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 10^{-7}$ Па) в одном и том же экспериментальном приборе состоящего из двух смежных камер. Ионная имплантация, температурный отжиг осуществлялся в первой камере, а изучение состава, эмиссионных и оптических свойств исследуемых образцов – во второй камере. Исследуемые образцы устанавливались в специальной каретке и из одной камеры в другую перемещались с помощью электромагнитов.

Температурный отжиг W и Mo до ~ 900 К осуществлялся нагревом с тыльной стороны мишени с помощью вольфрамовой спирали, а высокотемпературный прогрев до $T = 2300$ К осуществлялся электронной бомбардировкой.

Ионы Ba^{+} получены методом поверхностной ионизации атомов Ba. Источником бария служили таблетки титаната бария. При нагревании кварцевой трубочки, заполненной таблетками BaTi, образуются пары бария, часть которых, попадая на поверхность раскаленной вольфрамовой спирали, ионизируется. Диаметр ионного пучка на поверхность образца составлял $\sim 1.5 \dots 2$ мм. Имплантация ионами Ba^{+} проводилась в основном с энергией $E_0 = 1$ кэВ и дозой $D = 6 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ (доза насыщения). Ток ионов Ba^{+} можно было увеличить до ~ 0.3 мкА.

Все исследования с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), измерения полного коэффициента вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) σ и квантового выхода фотоэлектронов γ осуществлялись во второй камере.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведены зависимости $\sigma(E_p)$ для чистого W и W, имплантированного ионами Ba^{+} с энергией $E_0 = 0.5$ кэВ при дозе $D = 6 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ и покрытого атомами Ba толщиной в ~ 1 монослой. На рис. 2 для этих же образцов приведены зависимости квантового выхода фотоэлектронов γ от энергии фотонов в интервале $h\nu = 2 - 6$ эВ.

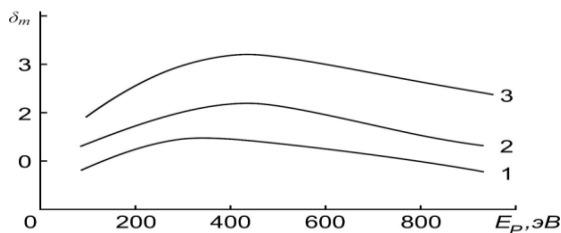


Рис. 1. Зависимости $\sigma_m(E_p)$ для: 1 – W(111), 2 – W(111) с поверхностной пленкой Ba с $\theta \approx 1$ монослой, 3 – W имплантированного ионами Ba^{+} с $E = 0.5$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$

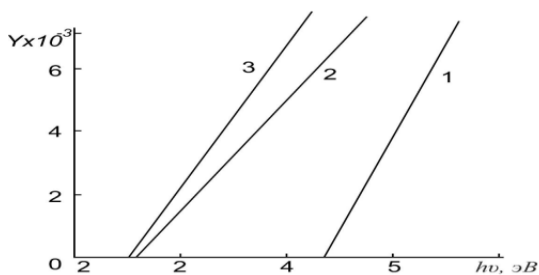


Рис. 2. Зависимости $Y_{1/2}$ от $h\nu$ для: 1 – чистого W(111), 2 – W(111) с пленкой Ва с толщиной 1 монослой, 3 – W(111) имплантированного ионами Ва⁺ с $E = 0,5$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻².

Из этих рисунков видно, что увеличение σ и Y вольфрама в случае имплантации ионов Ва⁺ существенно больше, чем при напылении Ва с толщиной $\theta \approx 1$ монослой.

Для того чтобы оценить роль поверхности и объема в увеличении коэффициентов σ_m и Y ионно-легированных образцов, проводилось сравнение результатов измерений Y и σ_m для W, покрытого слоем бария разной толщины и легированного ионами Ва⁺ с разными энергиями при $D = D_n = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻² (D_n – доза насыщения). Для сравнения выбирались такие значения энергии ионов E_0 и толщины слоев θ , при которых работа выхода для тех и других образцов была приблизительно одинаковой (таблица 1).

Таблица 1.

Значения σ_m , Y и $e\phi$ для W(111), легированного ионами бария с разными энергиями и покрытого слоем бария разной толщины.

Ва ⁺ → W, $D = 6 \cdot 10^{16}$ ион·см ⁻²				Ba/W				σ_n / σ_u	Y_n / Y_u
E_0 , кэВ	σ_m	$Y \cdot 10^6$	$e\phi$	θ	σ_m	$Y \cdot 10^6$	$e\phi$		
0.5	3.4	56	2.3	0.7	2.0	30	2.35	1.7	1.8
3.0	2.6	30	3.2	0.4	1.75	19	3.15	1.45	1.6
5.0	2.1	11	3.9	0.2	1.55	9	3.85	1.3	1.2

Значения $\sigma = \sigma_m$ соответствовало энергии $E_{pm} \approx 450 - 500$ эВ.

Из таблицы видно, что при одинаковых изменениях $e\phi$ значения σ_m и Y для легированных образцов больше, чем для напыленных. Существенное различие в σ и Y между легированными и напыленными образцами наблюдается при $E_0 = 1$ кэВ и при этом σ_l / σ_n и Y_l / Y_n составляют $\sim 1,7$. Расчетные значения глубины зоны выхода ИВЭ и фотоэлектронов для чистого W составляло 20 – 25 Å.

При этом основная часть внедренных атомов располагается на глубине 0 – 20 Å, что близко к зоне выхода ИВЭ. Этим, а также сильным уменьшением $e\phi$ объясняется наибольшее увеличение σ и Y при $E_0 = 0,5 - 1$ кэВ. С ростом энергии ионов концентрации внедренных атомов в эмитирующем слое уменьшается, что приводит к уменьшению отношения σ_l / σ_n и Y_l / Y_n .

Известно, что рост σ и Y в случае легирования связан с увеличением плотности внутренних вторичных электронов $n(E_p, x)$, которая пропорциональна потере энергии на единице пути первичного или неупругоотраженного электрона:

$$dE/dx = n_e \int_0^\infty \varepsilon \cdot d\delta(E, \varepsilon) \quad (1)$$

Здесь $d\delta(E, \varepsilon)$ – дифференциальное сечение рассеяния с потерей энергии ε . Значение n_e значительно возрастает с увеличением концентрации примеси в эмитирующем слое.

В случае металлов W и Mo для расчета можно использовать формулу [15]

$$\delta = \frac{B}{\varepsilon} \int_0^\infty F(x) e^{-\frac{\lambda}{x}} dx \quad (2)$$

Здесь $F(x)$ – функция распределения потерь энергии поглощенных и неупругоотраженных электронов. B – вероятность выхода ВЭ подошедших к поверхности, а ε – средняя энергия, необходимая для образования одного вторичного или фото- электронов, λ – глубина выхода ИВЭ. Значения λ лежит в пределах от 10 до 30 Å для большинства металлов, а величина $\frac{\varepsilon}{B}$, согласно Деккеру, не зависит от энергии первичных электронов и имеет значение $\sim 100 \div 200$. Мы провели расчеты для $\lambda = 10, 15, 20$ и 30 Å. Наилучшее согласие с экспериментом получается в случае $\lambda = 10$ Å: $\varepsilon/B = 140$ для Mo и 170 для W.

Таблица 2

Расчетанные и экспериментальные значения КИВЭ δ_m .

	E_0 , эВ	600	800	1000	3000	4000
Mo	δ_m	0.87	0.95	0.94	0.54	0.45
	δ_ε	0.98	0.95	0.92	0.55	0.46
W	δ_m	0.7	0.78	0.84	0.56	0.46
	δ_ε	0.91	0.88	0.81	0.6	0.48

В таблице 2 приведены расчетные δ_m и экспериментальные δ_ε значения коэффициентов ИВЭ для Mo и W. Из приведенной таблицы видно, что согласие с экспериментом хорошее для $E_p > 800$ эВ, а для более низких E_p расчетные значения оказываются ниже экспериментальных. Причина заключается в том, что при таких энергиях параметр $\frac{\varepsilon}{B}$ начинает зависеть от энергии первичного электрона.

Действительно, при низких энергиях увеличивается роль возбуждения и, распада плазмонов в образовании ВЭ и "выключается" механизм возбуждения электронов с глубоких уровней, что должно привести к уменьшению ξ – средней энергии, затрачиваемой на образование одного ВЭ. Вместе с этим меняются и условия выхода вторичных электронов. Полученные результаты согласуются с выводами, о том, что при больших E_0 коэффициенты ВЭЭ определяются в основном потерями энергии первичных электронов, но не механизмом выхода вторичных.

Заключения. Показано, что увеличение коэффициента вторичной электронной эмиссии и квантового выхода фотоэлектронов W и Mo при имплантации ионов Ba⁺ в основном обусловлены уменьшением работы выхода поверхности и увеличением потерь энергии на поглощение электронов в ионно-имплантированном слое. Обнаружено, что при низких энергиях электронов Ba ($E \leq 0,8$ кэВ) расчетные значения коэффициента ИВЭ существенно меньше, чем экспериментальные. При $E \geq 1$ кэВ они хорошо согласуются друг с другом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахадиллов Б.К., Миниязов А.Ж., Скаков М.К., Сагдолдина Ж.Б., Туленберганов Т.Р., Сапатаев Е.Е. // Исследование модификации структуры и эрозии поверхности вольфрама и молибдена при плазменном облучении/ Журнал технической физики, 2020, том 90, вып. 3. Стр. 400 – 409.
2. Kurnaev V., Kolodeshnikov A., Tulenbergenov T., Sokolov I. // J. Nucl. Mater. 2015. Vol. 463. P. 228-232.
3. Roth J., Tzirone E., Loarte A., Loarer Th., Counsell G., Neu R., Philipps V., Brezinsek S., Lehnen M., Coad P., Grisolia Ch., Schmid K., Krieger K., Kallenbach A., Lipschultz B., Doerner R., Cousey R., Alimov V., Shu W., Ogorodnikova O., Kirschner A., Federici G., Kukushkin A. // Nucl. J. Mater. 2009. Vol. 390-391. P. 1-9. doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.01.037.
4. Будаев В.П. Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба / ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5-33.
5. Оспенникова О.Г., Подъячев В.Н., Столянков Ю.В. // Тугоплавкие сплавы для новой техники/ труды ВИАМ, №10(46) 2016. Стр. 55-64 DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5.
6. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3-33. DOI: 10.18577/20719140- 2015-0-1-3-33.
7. Бугерко Л.Н. Борисова Н.В., Суровая В.Э. Еремеева Г.О. Влияние облучения на оптические свойства MoO₃ // Ползуновский вестник. 2013. №1. С. 77-82.
8. Суровой Э.П., Бугерко Н.В. Борисова В.Э. Суровая Г.О. // Закономерности фотостимулированных превращений в наноразмерных пленках MoO₃ // Журнал физической химии, 2013. Т.87, № 12. С. 2105–2109.
9. Report of ITER Joint Central Team, G AO FDR 4 01-07-21 R0.4 Garching, 2001. P. 80. 182
10. Philipps V., Roth J., Loarte A. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2003. Vol. 45. P. 17–30
11. Rahadilov B.K., Skakov M.K., Tulenbergenov T.R. // Key Engineer. Mater. 2017. Vol. 736. P. 46–51.
12. Аллаярова Г.Х., Ташмухамедова Д.А., Джаббарганов Р., Умирзаков Б.Е. // Изучение процессов формирования наноразмерных пленок MoO₃ при термическом окислении и ионной бомбардировке. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования № 1 2021 DOI: 10.31857/S1028096021010040.
13. Ergashov Y.S., Umirzakov B.E. // Effect of implantation of Ba⁺ and Nb⁺ ions on the morphology, composition, and emission properties of Mo (111) // Journal of Communications Technology and Electronics. volume 62, pages 612–615 (2017) DOI:10.1134/S1064226917060079.
14. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K., Djurabekova F.G., Danaev S.B. // Investigation of change of the composition and structure of the CaF₂/Si films surface at the low-energy bombardment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 326 (2014) 322–325 doi.10.1016/j.nimb.2013.10.094.
15. Рисселл Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1982. 360 с.