

ТЕРМИЧЕСКАЯ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПЛЕНОК Cu/W, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ СЕРЕБРА

В.В. Углов¹⁾, С.В. Злоцкий¹⁾, К. Асокан²⁾, М. Сентил Кумар³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, uglov@bsu.by

²⁾Университет нефти и энергетики, кампус Бидхоли, Виа Прем Нагар, Дехрадун 248007, Индия, Asokan.kandasami@ddn.upes.ac.in

³⁾Совет по научным и промышленным исследованиям-Национальная физическая лаборатория, Доктор К.С. Кришнан Марг, Нью-Дели 110012, Индия, senthilramu@gmail.com

Методом рентгеноструктурного анализа исследована структура бислоев Cu/W, их термическая стойкость при отжиге на воздухе при 800°C и радиационная стойкость при облучении ионами Ag с энергией 70 МэВ и флюенсом до $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Пленки получены методом реактивного магнетронного распыления (слой W) и термического испарения (слой Cu). Выявлено, что слой вольфрама является фазой β -W (Pm-3n), а слой меди имеет низкую интенсивность дифракционных пиков. Отжиг на воздухе не приводит к изменению фазового состава пленок Cu/W, а только к уменьшению параметра решетки β -W. Облучение ионами Ag приводит к уменьшению интенсивности и увеличению ширины дифракционных пиков β -W (амортизации пленки). Выявлены закономерности изменения параметра решетки, размеров кристаллитов и микродеформаций в пленках в зависимости от толщины слоя меди и флюенса облучения.

Ключевые слова: фазовый состав; магнетронное распыление; термическое испарение; бислой; отжиг; облучение ионами.

THERMAL AND RADIATION STABILITY OF Cu/W FILMS IRRADIATED WITH SILVER IONS

V.V. Uglov¹⁾, S.V. Zlotski¹⁾, K. Asokan²⁾, M. Senthil Kumar³⁾

¹⁾Belarusian State University, Nezavisimosti Ave. 4, 220030 Minsk, Belarus, zlotski@bsu.by

²⁾University of Petroleum and Energy Studies, Bidholi Campus, Via Prem Nagar, 248007 Dehradun, India, Asokan.kandasami@ddn.upes.ac.in

³⁾CS IR-National Physical Laboratory,

Dr. K.S. Krishnan Marg, 110012 New Delhi, India, senthilramu@gmail.com

The structure of Cu/W bilayers, their thermal stability upon annealing in air at 800°C, and radiation resistance upon irradiation with Ag ions with an energy of 70 MeV and a fluence of up to $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ were studied by X-ray diffraction analysis. The films were obtained by reactive magnetron sputtering (W layer) and thermal evaporation (Cu layer). It was revealed that the tungsten layer is the β -W phase (P m-3n), and the copper layer has a low intensity of diffraction peaks. Annealing in air does not change the phase composition of the Cu/W films, but only reduces the β -W lattice parameter. Irradiation with Ag ions leads to a decrease in the intensity and an increase in the width of the β -W diffraction peaks (film damping). The patterns of changes in the lattice parameter, the sizes of the crystalline and microdeformations in the films depending on the thickness of the copper layer and the irradiation fluence were revealed.

Keywords: phase composition; magnetron sputtering; thermal evaporation; bilayer; annealing; ion irradiation.

Введение

Существенной проблемой при разработке термоядерных реакторов является выбор оптимальных материалов первой стенки и дивертора, подвергающихся максимальному воздействию плазмы [1].

Наиболее подходящим для данных целей является вольфрам, обладающий достаточно высокой температурой плавления, пороговой энергией дефектообразования, эрозионной стойкостью. Однако ввиду низкой теплопроводности

вольфрама тепловая энергия накапливается в приповерхностном слое, резко повышая его температуру и создавая высокий уровень термоупругих напряжений, вследствие чего происходит интенсивное образование микротрещин на поверхности, ее эрозия за счет абляционных процессов [2].

Тяжелые элементы поверхности, попадая в плазму, увеличивают ее эффективное массовое число, приводя к затуханию реакции. Решение такой задачи может быть достигнуто путем введения в кристаллическую решетку вольфрама дополнительных атомов, в первую очередь, атомов переходных металлов (например, меди), которые будут способствовать формированию твердых растворов с уменьшенными упругими модулями и деформированной решеткой с увеличенным числом кристаллографических систем пластической деформации [3].

Интерес к наноструктурным тонким пленкам в последние годы обусловлен тем, что их свойства отличаются от свойств их объема, а также их широким спектром экономичных технологических применений. Несмотря на то, что Cu и W не растворимы друг в друге, присутствие Cu улучшает его физические свойства, особенно термостойкость, устойчивость к абляции и высокую тепло- и электропроводность.

Методика эксперимента

Бислои Cu/W толщиной 5 нм/200 нм и 10 нм/200 нм были выращены методом реактивного магнетронного распыления и термического испарения в Национальной физической лаборатории (Нью Дели, Индия). Параметры магнетронного осаждения слоя W: давление 5×10^{-2} мбар, мощность DC источника 47 Вт. Затем осаждался слой Cu методом термического испарения со скоростью 0.05 нм/с.

Отжиг образцов проводился на воздухе при температуре 800°C.

Облучение бислоев W/Cu проводилось ионами Ag с энергией 70 МэВ и флюенсами 5×10^{12} и 1×10^{13} см⁻² в межуниверситетском ускорительном центре (Дели, Индия).

Исследования структуры бинарных пленок проводились методом рентгеноструктурного анализа на синхротроне (энергия 16 кэВ, длина волны 0.07751 нм) в межуниверситетском ускорительном центре (Дели, Индия). Анализ рентгеновских спектров проводился после пересчета их при длине волны K_{α} Cu (0.154056 нм).

Результаты и их обсуждение

На рисунках 1 и 2 представлены рентгенограммы исходных и отожженных на воздухе при 800°C пленок Cu/W (5 нм/200 нм) и (10 нм/200 нм), соответственно.

Анализ рентгенограмм показал наличие только одной фазы β -W (Pm-3n). Дифракционные пики, соответствующие фазе Cu с ГЦК решеткой не выявлены. Это связано с совпадением дифракционного пика Cu(111) (43.04°) с пиком β -W (211), а также малой толщиной слоя меди (5 нм), что обуславливает формирование широкого дифракционного пика с низкой интенсивностью.

Параметр решетки β -W равен (0.50732 ± 0.00009) нм и (0.50821 ± 0.00009) нм, т.е. увеличение толщины

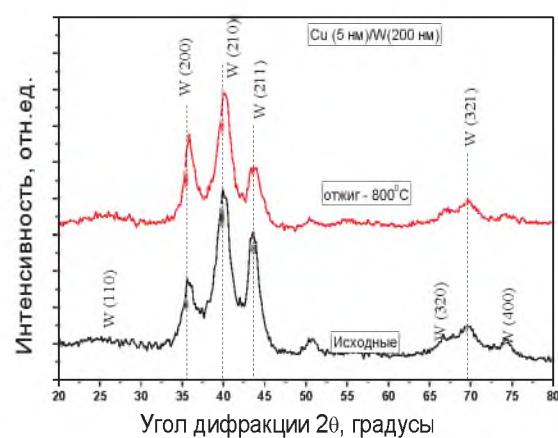


Рис. 1. Рентгенограммы исходных и отожженных на воздухе при 800°C пленок Cu/W (5 нм/200 нм)

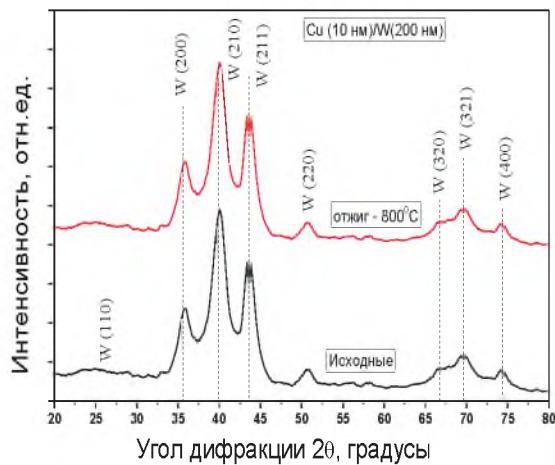


Рис. 2. Рентгенограммы исходных и отожженных на воздухе при 800°C пленок Cu/W (10 нм/ 200 нм)

медного слоя Cu приводит к росту параметра решетки β -W. При этом размер ОКР (область когерентного рассеяния или кристаллитов) пленок составляет 3-3.5 нм, а микродеформации составляют -0.3% и -1.1% для Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм), соответственно.

Отжиг при температуре 800°C не приводит к изменению фазового состава пленок, как видно из рисунков 1 и 2. Выявлено уменьшение параметра решетки β -W на 0.0071% и 0.22% для Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм), соответственно. Уменьшение параметра решетки связано с релаксацией напряжений при термическом отжиге.

Таким образом, бислойные пленки Cu/W являются термически стабильными при отжиге на воздухе до температуры 800°C.

На рисунках 3 и 4 представлены рентгенограммы исходных и облученных ионами Ag (70 МэВ, 5×10^{12} и 1×10^{13} см $^{-2}$) пленок Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм), соответственно.

Анализ рентгенограмм свидетельствует об уменьшении интенсивности и увеличении ширины дифракционных пиков β -W.

Выявлено, что параметр решетки β -W уменьшается на 0.12 и 0.19% для облученных ионами Ag с флюенсом 5×10^{12} см $^{-2}$ пленок Cu/W (5 нм/ 200 нм)

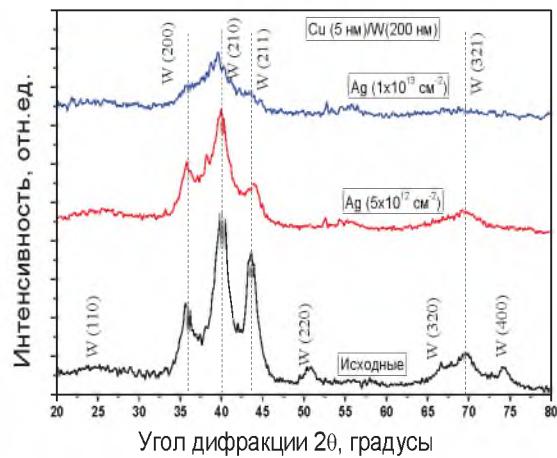


Рис. 3. Рентгенограммы исходных и облученных ионами Ag (70 МэВ, 5×10^{12} и 1×10^{13} см $^{-2}$) пленок Cu/W (5 нм/ 200 нм)

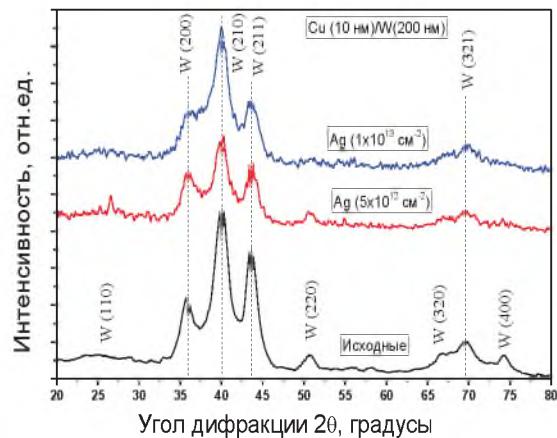


Рис. 4. Рентгенограммы исходных и облученных ионами Ag (70 МэВ, 5×10^{12} и 1×10^{13} см $^{-2}$) пленок Cu/W (10 нм/ 200 нм)

и (10 нм/ 200 нм), соответственно.

Увеличение флюенса облучения 1×10^{13} см $^{-2}$ приводит к значительному уменьшению параметра решетки β -W на 1.3% для пленки Cu/W (5 нм/ 200 нм). Для пленки Cu/W (10 нм/ 200 нм) уменьшение параметра решетки составляет 0.45%.

Также стоит отметить, что облучение с флюенсом 5×10^{12} см $^{-2}$ приводит к росту ОКР в 1.93 и в 2.36 раза для пленок Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм), соответственно. Увеличение флюенса приводит к уменьшению размеров ОКР до 2 нм. При этом уровень микродеформации решетки возрастает до -2.2% и -1.4% для пленок Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм), соответственно.

Таким образом, облучение ионами Ag с энергией 70 МэВ при флюенсе 1×10^{13} см $^{-2}$ приводит к амортизации пленки Cu/W.

Заключение

Выявлена высокая термическая стойкость бислоев Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм) после отжига на воздухе при 800°C.

Облучение ионами Ag приводит к уменьшению интенсивности и увеличению ширины дифракционных пиков β -W (амортизация пленки).

Облучение при флюенсе 1×10^{13} см $^{-2}$ приводит к значительному (на 1.3%) уменьшению параметра решетки β -W для пленки Cu/W (5 нм/ 200 нм).

Также стоит отметить, что облучение с флюенсом 5×10^{12} см $^{-2}$ приводит к росту ОКР в 1.93 и в 2.36 раза для пленок Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм), соответственно. Увеличение флюенса приводит к уменьшению размеров ОКР до 2 нм. При этом уровень микродеформации

решетки возрастает до -2.2% и -1.4% для пленок Cu/W (5 нм/ 200 нм) и (10 нм/ 200 нм), соответственно.

Работа выполнена при поддержке Государственной комитета по науке и технологиям Республики Беларусь (Т23ИНДГ-012).

Библиографические ссылки

1. R.E. Nygren, T.D. Rognlien, M.E. Rensink, S.S. Smolentsev, M.Z. Youssef, M.E. Sawan, B.J. Merrill, C. Eberle, B.E. Nelson, D.K. Sze, R. Majeski. A fusion reactor design with a liquid first wall and divertor. *Fusion Engineering and Design* 2004; 72 (1-3): 181-221.
2. V.P. Budaev, Yu.V. Martynenko, A.V. Karpov, N.E. Belova, A.M. Zhitlukhin, N.S. Klimov, V.L. Podkovyrov, V.A. Barsuk, A.B. Putrik, A.D. Yaroshevskaya, R.N. Giniyatulin, V.M. Safronov, L.N. Khimchenko. Tungsten recrystallization and cracking under ITER-relevant heat loads. *Journal of Nuclear Materials* 2015; 463: 237-240.
3. Chai Ren, Z. Zak Fang, Mark Koopman, Brady Butler, James Paramore, Scott Middlemas. Methods for improving ductility of tungsten - A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2018; 75: 170-183.