

УДК 533.924
EDN: SRRHKM

PACS: 52.77.Dq, 84.40.Fe

**Влияние условий формирования пленок системы W-C
при магнетронном распылении вольфрама с введением летучих
углеводородов в плазменный разряд**

© М. А. Кононов, В. В. Савранский

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия**Статья поступила в редакцию 18.05.2026; после доработки 8.06.2026; принята к публикации 06.08.2026**Шифр научной специальности: 1.3.19.*

Представлены результаты экспериментального исследования формирования соединений WC в процессе магнетронного распыления вольфрама в среде углеводородов на поверхности стеклянной подложки. Установлено, что режим работы магнетрона влияет на формирование и структуру поверхности растущей пленки. В области напряжений, приложенных к вольфрамовой мишени, в плазме разряда происходит полная диссоциация всех используемых углеводородов. Свободный углерод растворяется в растущей пленке вольфрама. При относительно низких напряжениях на магнетроне в системе W-C формируются в основном две фазы – α -WC и W_2C , с преобладанием WC. Повышение напряжения на магнетроне увеличивает скорость распыления и долю W_2C . В работе приведена оценка изменения микроструктуры поверхности пленок WC и W_2C методом атомно-силовой микроскопии – АСМ. Показана перспективность данного метода для получения соединений тугоплавких металлов с углеродом.

Ключевые слова: магнетронное распыление, вольфрам, графит, модификация поверхности, плазмохимический синтез.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-46-52

Введение

Карбиды тугоплавких металлов уже давно нашли широкое применение в современной технике. Одним из важнейших материалов этой серии является карбид вольфрама WC. В настоящее время с развитием технологий область применения карбида вольфрама постоянно расширяется. Современные достижения в материаловедении позволяют модифицировать свойства WC и W_2C , добавляя, при необходимости, в их состав разные легирующие добавки. Такие добавки позволяют получать новые свойства хорошо изученных соединений вольфрама с уникальными свойствами – такими, как повышенная термостойкость или устойчивость к коррозии. Подобные

модификации находят применение в самых различных отраслях промышленности, включая медицинские инструменты, авиационную и космическую технику. Карбид вольфрама в чистом виде или в смеси с W_2C и с добавками никеля или кобальта позволяет обеспечить максимальную долговечность поверхностям, покрытым такими материалами. Наряду с этим карбид вольфрама активно используется в электронике, где применяются его проводящие свойства и термостойкость. Применяются такие соединения в различных электронных компонентах в качестве подложки для создания полупроводниковых устройств. В криогенной технике в качестве чувствительных элементов используются вольфрамовые и вольфрам-углеродные термоэлектрические

элементы для сверхчувствительных термометров.

С каждым годом исследования и разработки в этой области становятся все более актуальными. Для нанесения выше перечисленных покрытий используются различные методы синтеза. Вакуумные процессы – такие, как комбинация импульсной лазерной абляции и магнетронное распыление [1], комбинация реактивного ВЧ магнетронного распыления с имплантацией ионов из плазменного источника [2], распыление с помощью магнетронного дугового источника [3] или совместное распыление мишеней WC и C в атмосфере аргона (Ar) [4]. Среди этих методов особый интерес представляет гибридная технология PECVD («плазменно-усиленное химическое осаждение из газовой фазы»), PVD («физическое осаждение из газовой фазы»), включающая одновременное распыление вольфрамовой мишени в реактивной углеводородной атмосфере – такой, как C_2H_2 [3, 5], CH_4 [6] или C_6H_6 [7, 8]. Несомненно, особый интерес представляет диссоциация органических молекул в плазме, приводящая к включению наночастиц WC в гидрированную углеродную матрицу WC/C:H. Эти результаты в сочетании с атомно-силовой микроскопией позволяют описать поверхность напыленной пленки как совокупность кристаллитов W_xC_{1-y} , соответствующих совокупности мелких нанозерен W_2C и WC_{1-x} , разбавленных в гидрированной углеродной матрице. При этом соотношение между твердой кристаллизованной фазой WC и более мягкой гидрированной углеродной матрицей уменьшается при увеличении потока углеводородов. В данной работе авторы получали пленки карбида вольфрама, распыляя магнетронным способом чистую вольфрамовую мишень в среде углеводородов и рабочего газа аргона Ar при комнатной температуре при различных режимах работы магнетрона. Авторы применяли подобные методы получения различных соединений металла с углеродом. В работах [9–13] были использованы, например, составные мишени меди и твердого графита. Однако коэффициенты распыления меди (2,4 – в аргоне) и графита (0,12 – в аргоне) при энергиях ионов Ar^+ ~ 500 эВ сильно разнятся, поэтому очень сложно подобрать подходящий режим для ра-

боты магнетрона. При распылении вольфрамовой мишени эта разница заметно меньше (0,6 – в аргоне), но все равно процесс роста пленки WC плохо управляем. По этой причине был выбран способ введения смеси легко испаряющихся углеводородов в область плазменного разряда. В этой области, как известно из литературы, должен происходить плазмохимический пиролиз, то есть процесс разложения органических соединений, осуществляемый в низкотемпературной плазме со средними энергиями молекул порядка 0,1–50 эВ [14–18]. Рост пленок WC в нашем случае проходил при низких температурах подложки (~ 100 °C). Подвижность атомов осаждаемого вещества при таких температурах мала, рост кристаллов заторможен. Образующаяся мелкокристаллическая структура наблюдалась нами в атомно-силовом микроскопе (АСМ).

Методика эксперимента

Покрытия из WC были сформированы на подложках из стекла с помощью реактивного магнетронного распыления вольфрамовой мишени в плазме $Ar + C + H$. В качестве источника углерода использовался Нефрас марки БР-1. Нефрас представляет собой смесь парафиновых и нефтяных углеводородов.

В экспериментах в качестве мишени использована пластинка вольфрама с содержанием 99,93 масс. % основного элемента диаметром 70 мм и толщиной 2 мм. На магнетрон подавалось постоянное напряжение от –600 В до –1400 В в зависимости от эксперимента. При магнетронном распылении в качестве плазмообразующего газа использован аргон. Эксперименты проводились при постоянном давлении аргона и углеродосодержащего компонента в соотношении 1:1. Каждый газ подавался через отдельный натекаль, после чего газы смешивались и попадали в зону плазмы в виде смеси. Давление смеси газов в вакуумной камере поддерживалось на постоянном уровне и составляло ~ 10^{-3} Торр. Таким образом реализовывался процесс реактивного осаждения атомов на поверхности подложки. В результате в среде реактивного газа в плазме на поверхности подложки формируется необходимое соединение. Скорость распыления мишени

зависела от подаваемого на нее напряжения. В эксперименте на первом этапе при трех разных напряжениях (560 В, 900 В, 1400 В) распылялась чистая вольфрамовая мишень. Так, при напряжении 560–600 В скорость осаждения составляла ~ 1 нм/с, а при напряжении 880–900 В – $\sim 2,6$ – $2,7$ нм/с, при 1400 В скорость напыления составляла 10–12 нм/с [19–21]. Для процесса реактивного напыления в среде аргона и углерода при тех же напряжениях скорости напыления меняются. В области низких напряжений на магнетроне рост пленки WC происходит как на поверхности подложки, так и на поверхности вольфрамовой мишени. Поэтому при низких напряжениях скорости распыления мишени меньше, так как происходит распыление уже сформировавшейся на поверхности W мишени фазы WC, где конкурируют скорости образования фазы WC и скорости ее распыления [22–24]. Такое состояние наблюдается частично и для

средних значений применяемого напряжения. Только при напряжении 1400 В скорость роста пленки WC сравнима со скоростью роста W пленки. Структурные и электрофизические параметры пленок, нанесенных при обычных режимах напыления, в общем случае аналогичны структурам массивных образцов. Характерной особенностью пленок WC является наличие минимума удельного сопротивления у пленок стехиометрического состава. Оно соответствует для вольфрама $0,56$ мкОм·см и для карбида вольфрама $0,19$ мкОм·см при условии хорошей откачки вакуумной камеры до величин остаточного давления $\sim 5 \times 10^{-6}$ Торр, и дальнейшее снижение окислительных компонентов остаточной атмосферы – дегазацией. Морфология поверхности пленок исследовалась методом атомно-силовой микроскопии. На рисунке 1 представлены АСМ – изображения поверхности вольфрамовой пленки при разных скоростях напыления.

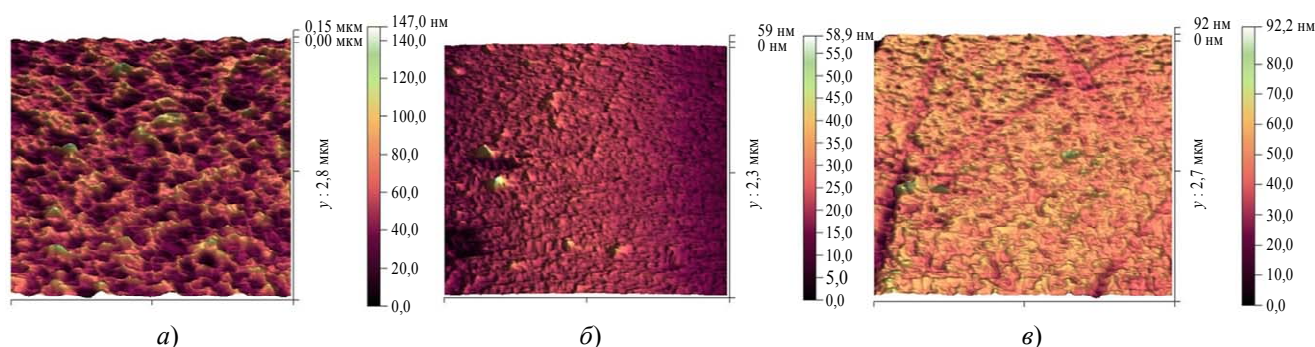


Рис. 1. АСМ – изображение поверхности пленки при распылении вольфрамовой мишени при различных скоростях напыления. Напряжение на W мишени: а) – 600 В; б) – 900 В; в) – 1400 В

На изображениях видно, что с увеличением скорости напыления поверхность вольфрама становится более однородной. Поверхности пленок плотные, без крупных частиц, пустот или расслоений, что указывает на хорошую адгезию, хотя сжимающее напряжение в вольфрамовой пленке увеличивается с толщиной. При больших скоростях осаждения на поверхности пленки появляются микротрещины и при толщинах ~ 1 мкм и выше увеличивается содержание других фаз, что приводит к росту механических напряжений из-за несоизмеримости параметров элементарных ячеек различных фаз.

Увеличение механических напряжений приводит к росту удельного сопротивления пленок вольфрама и более, чем на порядок, пре-

вышает сопротивление объемного материала. Сформированные пленки на полученных образцах более однородны и содержат в основном α -фазу – это приводит к уменьшению удельного сопротивления. На рисунке 2 показаны поверхности, где сформированы пленки карбида вольфрама. Согласно литературным данным [1–5], образование WC происходит на поверхности вольфрама во время роста пленки. Атомы углерода, адсорбированные на поверхности и не прореагировавшие с вольфрамом, диффундируют внутрь, в результате образуются кристаллы W_2C . С увеличением скорости напыления и, как следствие, локального нагрева поверхности образца диффузия C в W ускоряется, содержание WC уменьшается, и W_2C становится доминирующим карбидным

соединением. При низких скоростях напыления формируется более упорядоченная, но более шероховатая поверхность. При увеличении скорости напыления шероховатость заметно убывает – это, вероятно, происходит в связи с недостатком времени для формирования кристаллов WC больших размеров.

Предполагается, что при данных режимах напыления содержание чистой α -фазы вольфрама на поверхности и внутри пленки минимально, металлический вольфрам в приповерхностной области полностью прореагировал с углеродом, что подтверждается литературными данными [6–8].

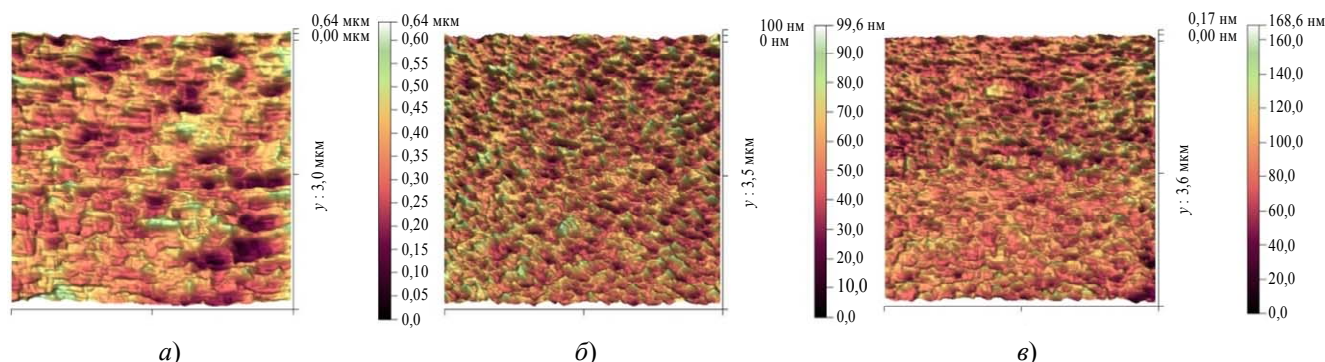


Рис. 2. АСМ – изображение поверхности пленки при распылении вольфрамовой мишени в среде углеводородов при различных скоростях напыления. Напряжение на W мишени: а) – 600 В; б) – 900 В; в) – 1400 В

Результаты и обсуждение

Исследование структуры пленок проводилось с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47-PRO компании NT-MDT. С помощью атомно-силовой микроскопии изучена морфология поверхности вольфрам графитовых пленок состава WC и W_2C при отсутствии углеводородов при их получении. На основании данных атомно-силовой микроскопии и графиков распределения частиц по размерам проведена оценка характерных особенностей рельефа поверхности

WC и W_2C в зависимости от скорости напыления по ключевым статистическим параметрам – таким, как средняя шероховатость, среднеквадратичная шероховатость, высота от пика до впадины и асимметрия. Результаты этих исследований показывают на явное различие в характеристиках поверхности между пленками W и WC.

На рис. 3 приведен график распределения высот на поверхности вольфрама, то есть зависимость числа кристаллитов от их размеров на единице поверхности.

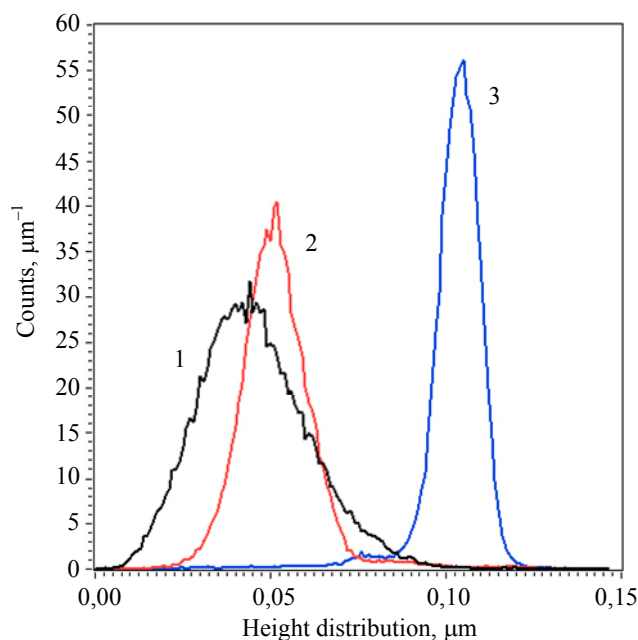


Рис. 3. Распределение высот кристаллитов на поверхности пленок вольфрама при трех скоростях напыления: 1 – низкая; 2 – средняя; 3 – высокая

Пленки W после напыления имели относительно гладкую и однородную поверхность с колебаниями высоты от 40 до 120 нм. На приведенном графике ширина пика 1 указывает на несколько большую шероховатость поверхности, чем на двух остальных. Ширина второго пика указывает на оптимальную и гладкую поверхность. Пик 3 сдвинут сильно вправо, так как на поверхности имеются микротрещины, влияющие на параметр средней шероховатости – высота от пика до впадины, что указывает на более сложную морфологию поверхности. С другой стороны, пленки WC продемонстрировали значительно более высокую неоднородность поверхности (рис. 4). Различия в высоте имеют значения от 100 до 500 нм. Более широкое и симметричное распределение графиков подтвердило увеличение количество фазы W_2C на поверхности растущей пленки. Изменение морфологии поверхностей, вызванных ростом пленки WC, показало, что углерод изменяет структуру зерен и увеличивает неоднородность поверхности для всех скоростей напыления.

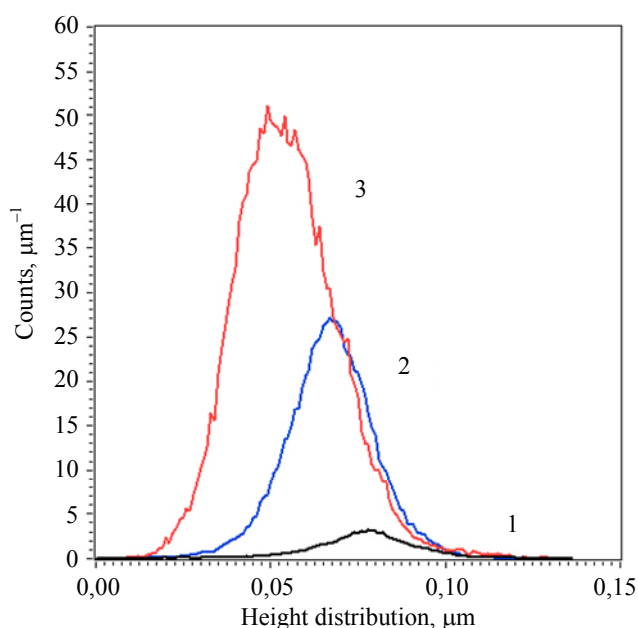


Рис. 4. Распределение высот кристаллитов на поверхности пленок карбида вольфрама при трех скоростях напыления: 1 – низкая; 2 – средняя; 3 – высокая

Эти значения дополнительно показывают различия в симметрии и текстуре поверхности. Пленки WC демонстрировали более выраженные поверхностные дефекты. Для пленок W характерны сбалансированные пики и

впадины, тогда как для WC преобладают впадины.

Эти результаты показывают, что добавление углерода увеличивает площадь поверхности и рельеф структуры пленок WC, что делает их потенциально более подходящими для применений, требующих высокой реакционной способности поверхностно-активных веществ, например, в газочувствительных материалах или каталитических процессах.

Выводы

Таким образом, в работе предложен и реализован способ получения тонких поликристаллических пленок WC с помощью введения в область плазмы и вблизи подложки углеводородов с малыми энергиями пиролиза. Апробация способа проведена на пленках толщиной 0,5 мкм. Результаты обработки 3d изображений, полученных на АСМ, подтверждают возможность получения поликристаллических пленок WC или WC + W_2C в пропорции 50:50 в зависимости от требований эксперимента указанным методом. Показана возможность управления фазовым составом «вольфрам–углерод» путем изменения напряжения разряда при неизменной силе постоянного тока. Дальнейшее развитие данного метода позволяет перейти к исследованию и изготовлению монокристаллических пленок меньших толщин, а также металл-углеродных пленок других тугоплавких металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Voevodin A. A., O'Neill J. P., Zabinski J. S. / *Thin Solid Films*. 1999. Vol. 342. P. 194. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01456-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01456-4)
2. Baba K., Hatada R. / *Surf. Coat. Technol.* 2003. Vol. 287. P. 169–170. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.182>
3. Precht W., Czyzniewski A. / *Surf. Coat. Technol.* 2003. Vol. 979. P. 174–175. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00586-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00586-3)
4. Abad M. D., Muñoz-Márquez M. A., Mrabet S. El., Justo A., Sánchez-López J. C. / *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 204. P. 3490. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.019>
5. Strondl C., Carvalho N. M., De Hosson J. T. M., Krug T. G. / *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 200. P. 1142. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.182>
6. Rincon C., Romero J., Esteve J., Martinez E., Lousa A. / *Surf. Coat. Technol.* 2003. Vol. 386. P. 163–164. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00635-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00635-7)

7. Radic N., Grzeta B., Milat O., Ivkov J., Stubicar M. / *Thin Solid Films*. 1998. Vol. 192. P. 320. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00758-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00758-X)
8. Dubcek P., Radic N., Milat O., Bernstorff S. / *Surf. Coat. Technol.* 2002. Vol. 218. P. 151–152. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01560-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01560-2)
9. Абрамов Д. В., Аракелян С. М., Климовский И. И., Кононов М. А., Кучерик А. О., Прокошев В. Г., Савранский В. В. / *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2006. № 10. С. 28–36.
10. Валянский С. И., Виноградов С. В., Кононов М. А., Кононов В. М., Растопов С. Ф. / *Прикладная физика*. 2016. № 1. С. 49–52.
11. Валянский С. И., Кононов В. М., Кононов М. А. / *Успехи прикладной физики*. 2019. Т. 7. № 5. С. 502–507.
12. Виноградов С. В., Кононов М. А., Кононов В. М. / *Прикладная физика*. 2015. № 3. С. 40–42.
13. Валянский С. И., Виноградов С. В., Кононов М. А., Кононов В. М. / *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 3. С. 301–306.
14. Fincke J. R. / *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. Vol. 41. P. 1425–1435. <https://doi.org/10.1021/ie010722e>
15. Appel J. / *Combust. Flame*. 2000. Vol. 121. P. 122–136. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00135-2](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00135-2)
16. Hidaka Y. / *Combust. Flame*. 1999. Vol. 118. P. 340–358. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8039031>
17. Olsvik O. / *Chem. Eng. Technol.* 1995. Vol. 18. P. 349–358. <https://doi.org/10.1002/ceat.270180510>
18. Chen C.-J. / *Can. J. Chem.* 1975. Vol. 53. P. 3580–3590. <https://doi.org/10.1139/v75-516>
19. Кононов М. А., Растопов С. Ф. / *Прикладная физика*. 2022. № 1. С. 70–74. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-70-74>
20. Кононов М. А., Растопов С. Ф. / *Прикладная физика*. 2023. № 6. С. 66–71. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-6-66-71>
21. Виноградов С. В., Кононов М. А., Кононов В. М., Савранский В. В., Тишков В. В. / *Прикладная физика*. 2017. № 4. С. 5–9.
22. Сейдман Л. А. / *Электронная промышленность*. 1984. № 4. С. 15–20.
23. Сейдман Л. А. / *Электронная техника*. 1984. № 2. С. 44–47.
24. Сейдман Л. А. / *Электронная техника*. 1984. № 2. С. 68–75.

PACS: 52.77.Dq, 84.40.Fe

The influence of conditions of formation of films of the W-C system during magnetron sputtering of tungsten with the introduction of volatile hydrocarbons into the plasma discharge region

M. A. Kononov* and V. V. Savransky

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*E-mail: mike@kapella.gpi.ru

Received 18.05.2026; revised 8.06.2026; accepted 06.08.2026

This paper presents experimental studies on the formation of a WC compound during magnetron sputtering of tungsten in a hydrocarbon environment on the surface of a glass substrate. It has been established that different magnetron operating modes affect the formation and surface structure of the growing film. In the range of voltages applied to the tungsten target, all hydrocarbons used in the experiment completely dissociate in the discharge plasma. Free carbon dissolves in the growing tungsten film, and at relatively low magnetron voltages, two chemical compounds are mainly formed in the W-C system: α -WC and W_2C , with WC predominating. As the magnetron voltage increases, the sputtering rate increases, and the proportion of W_2C increases. In this paper, changes in the surface microstructure of WC and W_2C films are assessed using atomic force microscopy (AFM). The potential of this method for producing compounds of refractory metals with carbon is demonstrated.

Keywords: magnetron sputtering, tungsten, graphite, surface modification, plasma-chemical synthesis.

REFERENCES

1. Voevodin A. A., O'Neill J. P., and Zabinski J. S., *Thin Solid Films* **342**, 194 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01456-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01456-4)

2. Baba K. and Hatada R., *Surf. Coat. Technol.* **287**, 169–170 (2003). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.182>
3. Precht W. and Czyzniewski A., *Surf. Coat. Technol.* **979**, 174–175 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00586-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00586-3)
4. Abad M. D., Muñoz-Márquez M. A., Mrabet S. El., Justo A., and Sánchez-López J. C., *Surf. Coat. Technol.* **204**, 3490 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.019>
5. Strondl C., Carvalho N. M., De Hosson J. T. M., and Krug T. G., *Surf. Coat. Technol.* **200**, 1142 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.182>
6. Rincon C., Romero J., Esteve J., Martinez E., and Lousa A., *Surf. Coat. Technol.* **386**, 163–164 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00635-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00635-7)
7. Radic N., Grzeta B., Milat O., Ivkov J., and Stubicar M., *Thin Solid Films* **192**, 320 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00758-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00758-X)
8. Dubcek P., Radic N., Milat O., and Bernstorff S., *Surf. Coat. Technol.* **218**, 151–152 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01560-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01560-2)
9. Abramov D. V., Arakelian S. M., Klimovsky I. I., Kononov M. A., Kucherik A. O., Prokoshev V. G., and Savransky V. V., *Brief Communications on Physics of the Lebedev Physical Institute*, № 10, 28–36 (2006).
10. Valyansky S. I., Vinogradov S. V., Kononov M. A., Kononov V. M., and Rastopov S. F., *Applied Physics*, № 1, 49–52 (2016) [in Russian].
11. Valyansky S. I., Kononov V. M., and Kononov M. A., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **7** (5), 502–507 (2019) [in Russian].
12. Vinogradov S. V., Kononov M. A., and Kononov V. M., *Applied Physics*, № 3, 40–42 (2015) [in Russian].
13. Valyansky S. I., Vinogradov S. V., Kononov M. A., and Kononov V. M., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **4** (3), 301–306 (2016) [in Russian].
14. Fincke J. R., *Ind. Eng. Chem. Res.* **41**, 1425–1435 (2002). <https://doi.org/10.1021/ie010722e>
15. Appel J., *Combust. Flame* **121**, 122–136 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00135-2](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00135-2)
16. Hidaka Y., *Combust. Flame* **118**, 340–358 (1999). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8039031>
17. Olsvik O., *Chem. Eng. Technol.* **18**, 349–358 (1995). <https://doi.org/10.1002/ceat.270180510>
18. Chen C.-J., *Can. J. Chem.* **53**, 3580–3590 (1975). <https://doi.org/10.1139/v75-516>
19. Kononov M. A. and Rastopov S. F., *Applied Physics*, № 1, 70–74 (2022) [in Russian]. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-70-74>
20. Kononov M. A. and Rastopov S. F., *Applied Physics*, № 6, 66–71 (2023). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-6-66-71>
21. Vinogradov S. V., Kononov M. A., Kononov V. M., Savransky V. V., and Tishkov V. V., *Applied Physics*, № 4, 5–9 (2017) [in Russian].
22. Seidman L. A., *Electronic Industry*, № 4, 15–20 (1984).
23. Seidman L. A., *Electronic Engineering*, № 2, 44–47 (1984).
24. Seidman L. A., *Electronic Engineering*, № 2, 68–75 (1984).

Об авторах

Кононов Михаил Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: mike@kapella.gpi.ru SPIN-код: 8607-2597, AuthorID: 30241, ResearcherID: I-2413-2018, Scopus Author ID: 7004098676

Савранский Валерий Васильевич, к.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией ОЛФ, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: savr@nsc.gpi.ru SPIN-код: 3017-0185, AuthorID: 18563, ResearcherID: K-6388-2018