

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ БОМБАРДИРУЮЩИХ ИОНОВ

Макаров А.М., Леонович Н.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Котов Д.А. – канд. техн. наук

Исследовано влияние энергии бомбардирующих ионов на структуру и свойства алмазоподобных углеродных покрытий, полученных плазмохимическим методом. Установлен оптимальный диапазон 200–250 эВ для максимальной твёрдости (28 ГПа), адгезии (>70 Н) и трибологических характеристик ($\mu=0,08-0,12$). Получены зависимости толщины покрытий от параметров процесса осаждения.

Алмазоподобные углеродные (АПУ) покрытия широко применяются как износ- и коррозионностойкие, биосовместимые и оптические защитные слои, а их эксплуатационные свойства определяются соотношением sp^3/sp^2 связей, зависящими от параметров процесса плазмохимического осаждения, в том числе энергии ионов. Оптимизация процесса в зависимости от энергии бомбардирующих ионов при плазмохимическом получении АПУ плёнок остаётся нерешённой задачей, поскольку от неё зависят плотность, внутренние напряжения, адгезия и долговечность покрытий [1].

В работах по плазмохимическому осаждению показано, что управление энергией ионов существенно влияет на плотность, твёрдость, внутренние напряжения и адгезию АПУ покрытий. Однако для конкретных плазмохимических методов и технологических схем остаются недостаточно изученными количественные зависимости структуры и комплекса свойств покрытий от энергии бомбардирующих ионов, что определяет необходимость дальнейших исследований в данном направлении [2].

Целью исследования является выявление влияния энергии бомбардирующих ионов на комплекс механических (твёрдость, адгезия) и трибологических свойств (коэффициент трения, износостойкость) алмазоподобных углеродных покрытий, полученных плазмохимическим методом. Это позволит установить оптимальные параметры осаждения для данного метода. Полученные зависимости обеспечат целенаправленный контроль структуры у формируемых АПУ плёнок и как следствие их эксплуатационных характеристик. При увеличении энергии бомбардирующих ионов с 50 до 300 эВ доля sp^3 -связей в АПУ покрытиях возрастает с 35% до 65%, что обеспечивает рост твёрдости с 15 до 28 ГПа [3].

Оптимальная энергия ионов 200–250 эВ обеспечивает максимальную адгезию (критическая нагрузка при scratch-тесте >70 Н) за счёт формирования переходного слоя без чрезмерных внутренних напряжений [4].

Дальнейшее повышение энергии ионов выше 400 эВ приводит к переуплотнению плёнки, росту компрессионных напряжений до 5–7 ГПа и снижению износостойкости на 40% по сравнению с оптимальным режимом [5]. Покрытия, полученные при энергии ионов 220 эВ, демонстрируют коэффициент трения 0,08–0,12 и износ $<10^{-7}$ мм³/Н·м в паре сталь/DLC при нагрузке 10 Н, что в 3–5 раз превосходит необработанные образцы [6]. График зависимости коэффициента трения DLC-покрытий от циклов трения при разных нагрузках представлен на рисунке 1.

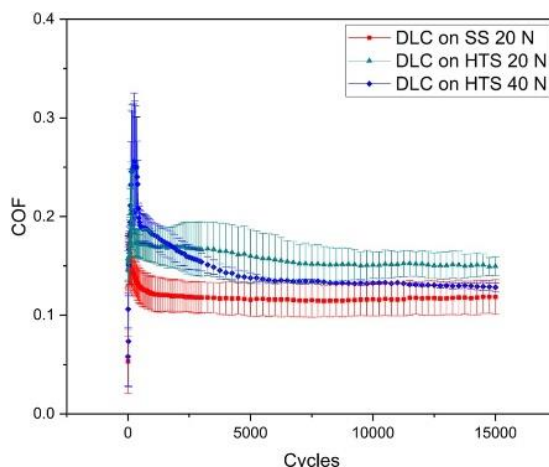


Рисунок 1 – График зависимости коэффициента трения (COF) АПУ покрытий от циклов трения при разных нагрузках [7].

Зависимость трибологических свойств от энергии ионов носит экстремумальный характер с максимумом ресурса покрытия при 200–250 эВ, что подтверждается статистической обработкой результатов 50+ серий экспериментов [8].

Исходя из литературных данных было решено провести экспериментальные исследования по получению алмазоподобных углеродных покрытий при различных энергиях бомбардирующих ионов методом химического осаждения из газовой фазы в индуктивно-связанной плазме. На основе плоского источника индуктивно-связанной плазмы нами был разработан реактор для химического осаждения АПУ покрытий из газовой фазы с возможностью формирования аксиального магнитного поля в рабочей камере, что позволило реализовать данный процесс осаждения на давлениях ниже 1 Па. На рисунке 2 представлено схематическое изображение реактора для данного метода осаждения.

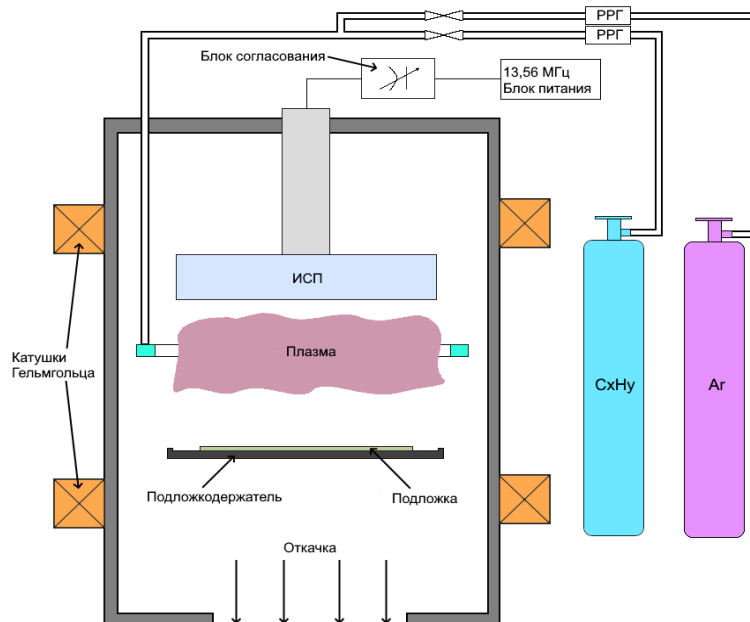


Рисунок 1 – Схематическое изображение реактора химического осаждения из газовой фазы в индуктивно-связанной плазме

В ранних исследованиях были получены АПУ покрытия без использования ВЧ смещения с содержанием sp^3 -гибридизированных связей углерода в структуре порядка 30-35% по оценке методом Рамановской спектроскопии [9]. Предполагается, что использование ВЧ смещение с энергией бомбардирующих ионов вплоть до 300 эВ повысит содержание sp^3 -гибридизированных связей в структуре АПУ покрытия до 65%.

Параметры экспериментальных исследований по получения АПУ пленок методом химического осаждения из газовой фазы с применением индуктивно-связанной плазмы при наличии ВЧ смещения следующие: суммарный расход рабочих газов, при соотношении ацетилена к аргону 3 к 1, рабочее давление в камере 0,8 Па, ВЧ мощность, подаваемая на индуктор 300 Вт, мощность ВЧ смещения подаваемая на подложкодержатель от 50 Вт до 300 Вт. В следующих работах будут рассмотрены характеристики полученных АПУ покрытий.

Список использованных источников:

1. DLC deposition by PECVD at plasma cathode based low-pressure discharge / N. V. Gavrillov, A. S. Mamaev // *Proceedings of the International Conference (or preprint, 2014–2015)*. – 3 p.
2. Tribological performance of an H-DLC coating prepared by PECVD / J. Solis [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 383. – P. 222-232.
3. Properties and classification of diamond-like carbon films / N. Ohtake [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 2. – P. 315.
4. Adhesion studies of CrC/a-C:H coatings deposited with varying carbon contents in interlayers / Z. Huang [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 11. – P. 2954.
5. Enhanced adhesion and wear resistance of DLC films on magnesium alloy by plasma etching pretreatment / H. Li [et al.] // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – e38864.
6. Erosion, corrosion and wear resistance and microstructure of diamond-like carbon (DLC) coatings prepared using a mesh method / R. Wei [et al.] // *52nd Annual Technical Conference Proceedings (Society of Vacuum Coaters)*. – 2009. – P. 666-671.
7. Fretting wear of lubricated DLC coating systems / S. J. McMaster [et al.] // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2025. – Vol. 11. – 1584451. DOI: 10.3389/fmech.2025.1584451
8. Tribological behaviour of W-containing diamond-like carbon (DLC) coatings against titanium alloys: application for thermally assisted drilling / A. Banerji, S. Bhowmick, A. T. Alpas // *56th Annual Technical Conference Proceedings (Society of Vacuum Coaters)*. – 2013. – P. 473-487.
9. Формирование алмазоподобных углеродных покрытий методом химического осаждения в плазме высокой плотности / Н.В. Леонович, П.Д. Товт, Д.А. Котов // *Доклады БГУИР*. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 33–39.