

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ ОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ а-С ПОКРЫТИЙ

Д. Г. Пилипцов¹, А. В. Рогачев¹, С. Ю. Чепкасов², К. А. Саховский¹

¹) УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», ул. Советская 102, 246003, Гомель, Беларусь, e-mail: piliptsov@gsu.by

²) Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 1, 630090, Новосибирск, Россия, e-mail: sergey@post.nsu.ru

Определено влияние магнитных полей, возникающих при прохождении импульса тока разряда через свободновисящий фильтр, включенный в разрядный контур испарителя на эффективность разделение ионной и нейтральной компонент потока углеродной плазмы, образующейся при различных энергетических режимах работы испарителя, а также установлены особенности формирования поверхностной морфологии и структуры осажденных при различных режимах сепарации.

Ключевые слова: углеродные покрытия; сепарация; шероховатость; структура.

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC SEPARATION ON THE SURFACE MORPHOLOGY AND STRUCTURE OF a-C COATINGS

D. G. Piliptsov¹, A. V. Rogachev¹, S. Y. Chepkasov², K. A. Sakhovsky¹

¹) EI "Francysk Skorina Gomel State University", Sovetskaya str.102, 246003, Gomel, Belarus

²) Physical Department, Novosibirsk State University, Pirogova str. 1, 630090, Novosibirsk, Russia

Corresponding author: D. G. Piliptsov (piliptsov@gsu.by)

The influence of magnetic fields arising from the passage of a discharge current pulse through a free-hanging filter included in the discharge circuit of the evaporator on the efficiency of separation of the ionic and neutral components of the carbon plasma flow formed under various energy modes of operation of the evaporator is determined, and the features of the formation of the surface morphology and structure of the deposited different modes of separation of carbon coatings.

Key words: carbon coatings; separation; roughness; structure.

ВВЕДЕНИЕ

Покрытия на основе аморфного углерода (а-С) нашли широкое применение в различных областях машиностроения, электроники и оптики [1, 2, 3]. Наличие высокой износостойкости и оптической прозрачности в ИК диапазоне, позволяют использовать (а-С) покрытия для защиты поверхности элементов оптического назначения, однако высокая шероховатость и наличие макрочастиц в объёме и на поверхности покрытия не позволяют обеспечить поверхностную изотропию оптических свойств покрытий, осаждаемых из импульсных потоков. В потоке углерода присутствуют макрочастицы микронного размера, представляющие собой агломераты микрочастиц графита, а также заряженные атомные частицы и заметное количество частиц материала катода в виде нейтральных и заряженных нанокластеров и капельных образо-

ваний, имеющие поперечные размеры до нескольких микрон и возникающие за счет эрозии катода при распылении его импульсным дуговым разрядом. Это существенно снижает эксплуатационные свойства осаждаемых покрытий. Наиболее эффективным способом разделения ионной и капельной компонент является использование устройств, позволяющих осуществить фильтрацию потоков, за счет различного влияния внешних электрических или магнитных полей на заряженную (ионную) и нейтральную (капельную) компоненты потока [4]. Для разделения компонент потока углеродной плазмы применяют различные по своей геометрии электромагнитные фильтры, расположенные как снаружи вакуумной камеры, так и внутри [4, 5]. Фильтры, расположенные внутри вакуумной камеры, выполненные в виде части тора и позволяющие повернуть плазменный поток на 90 градусов, характеризуются высокой эффективностью работы и разделения потока. Улавливание макрочастиц затруднено для некоторых катодных материалов, таких как углерод, потому что макрочастицы имеют тенденцию упруго отражаться от поверхностей [5, 7]. Проблема отражения частиц от поверхности решается использованием свободновисящих фильтрами с открытой архитектурой, в которых упругие свойства макрочастиц используются для их отражения от элементов фильтра и выхода их из области переноса плазмы. Отраженные частицы загрязняют объем камеры, в котором находится открытый фильтр, но с использованием дополнительных экранов возможно их локализовать в области, где отсутствуют подложки.

Фильтры открытой архитектуры не имеют изолированного, механически отделённого от объёма камеры канала и представляют некоторое количества витков катушки магнитного поля (соленоида) [4–6]. Частицы могут либо покидать фильтр через отверстия между витками катушки возбуждения, либо прилипнуть к виткам.

Проходящий через соленоид ток должен иметь достаточно высокие значения ток для формирования магнитного поля, при этом достаточно небольшое количество витков, чтобы уменьшить явление самоиндукции и изменить параметры разрядного тока. Существуют различные способы электрического подключения соленоида и формирования в нем магнитного поля, но на наш взгляд самым удобным и экономически выгодным является его включение в разрядную цепь блока питания.

Целью данной работы является изучение работы плазменного фильтра с открытой геометрией, расположенного внутри вакуумной камеры и выполненного в виде части тора, позволяющего повернуть импульсный плазменный поток на 90 градусов, а также оценка его эффективности и рассмотрение возможности использовать такой фильтр для нанесения а-С покрытий более высокого качества в сравнении с отсутствием сепарации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для осаждения а-С покрытий использовался импульсный вакуумно-дуговой метод. Углеродная плазма генерировалась из области катодных пятен, возникающих на торце графитового катода в результате развития сильноточного импульсного вакуумно-дугового разряда между графитовым катодом и кольцевым анодом. Осаждение покрытий проводили при остаточном давлении $5,7 \cdot 10^{-3}$ Па. Покрытия осаждали на полированные подложки, изготовленные из монокристалла кремния с ориентацией (111), находящиеся при температуре 23 °С. Отличительной особенностью данного соленоида является его включение в электрическую схему блока питания импульсного генератора углеродной плазмы, при этом возникающее в соленоиде транспортирующее

шее поле является импульсным и возникает в момент импульсного разряда. Геометрически фильтр выполнен в виде части тора с внутренним диаметром 95 мм и длиной 380 мм. Схема эксперимента представлена на рисунке 1.

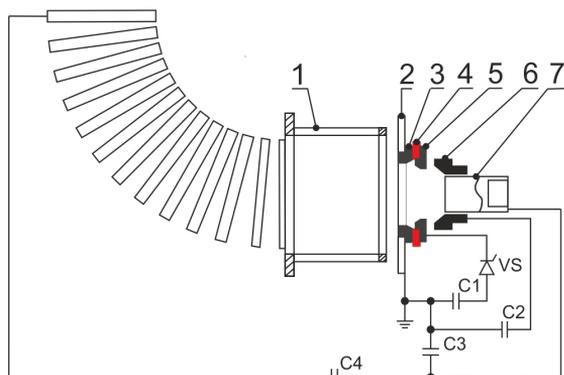


Рисунок 1. Схема осаждения углеродных покрытий.
1 – анодный узел с фильтром; **2** – дополнительный анод;
3 – графитовое кольцо; **4** – изолирующая керамика;
5 – поджигающий электрод из графита;
6 – электрод поджига; **7** – катод из графита

Для определения зависимости формирования структуры покрытий от условий осаждения, в частности напряжения разряда, которое определяет плотность и энергию частиц в потоке плазмы, а также появление макрочастиц в потоке, приводящих к изменению поверхностной морфологии были осаждены покрытия при различном напряжении разряда от 200 до 450 В (рисунок 1.) Частота следования импульсов разряда составляла 5 Гц, а их количество – 1000 импульсов.

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света с использованием спектрометра Senterra (Bruker) изучена структура покрытий. Спектры возбуждались лазерным излучением с длиной волны 532 нм и мощностью 10 мВт. Спектры снимались в диапазоне волновых чисел от 1050 до 1900 см^{-1} . Морфологию поверхности покрытий изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режимах измерения топографии и фазового контраста с участка поверхности площадью $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ с использованием прибора Solver-PRO P47 (NT-MDT, Россия). В полуконтактном режиме исследованы морфологические и относительные механические характеристики поверхности. В результате последующей математической обработки трехмерного изображения рельефа определены параметры шероховатости поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получены зависимости толщины а-С покрытий, осажденных при различных энергетических режимах работы испарителя, оснащенного свободновисящим фильтром, изготовленным в виде четверти тора и включенного в разрядную цепь испарителя. Возникающее в сепараторе магнитное поле зависит от напряжения разряда. Установлено снижение толщины покрытий при осаждении из сепарированного потока. Изменение толщины покрытий зависит от напряжения разряда (рисунок 2).

На основании изменения толщины покрытий и поверхностной шероховатости RMS (рисунок 3) полученных покрытий определена эффективность работы сепаратора потока при различных энергетических режимах генерации углеродной плазмы. Видно (рисунок 3), что сепаратор снижает поверхностную шероховатость, в сравнении с покрытиями осажденными без сепарации. Определено оптимальное напряжение разряда (300 и 350 В), при которых формируется поверхность с минимальной шероховатостью.

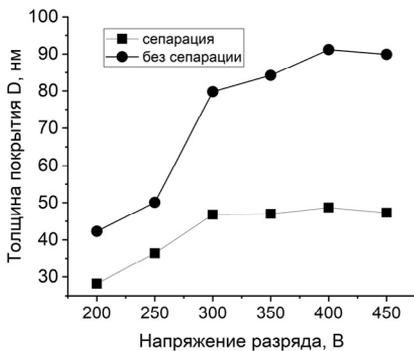


Рисунок 2. Зависимость толщины а-С покрытий от напряжения разряда

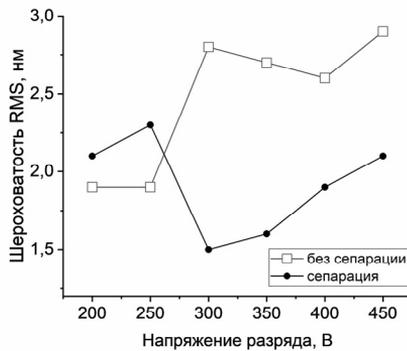


Рисунок 3. Зависимость шероховатости RMS от напряжения разряда для а-С покрытий

Анализ данных КР спектроскопии показал особенности формирования структуры покрытий, осажденных при различных параметрах магнитного поля сепарирующей системы. Установлено, что при напряжении разряда 300 В и 350 В формируются покрытия с высоким содержанием атомов углерода с sp^3 связями. При напряжении разряда 200 и 250 В количество sp^3 гибридинизированных связей значительно меньше (рисунок 4).

С ростом напряжения разряда наблюдается рост разупорядоченности структуры, что совместно со снижением отношения I_D/I_G указывает на увеличении sp^3 связей в покрытии.

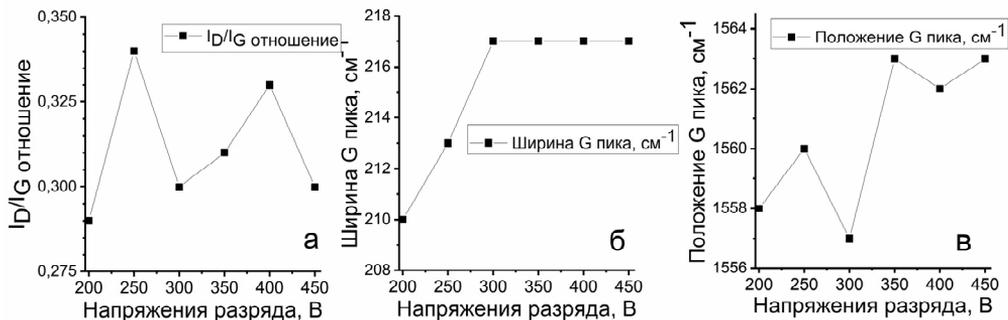


Рисунок 4. Параметры КР спектров а-С покрытий, осажденных из сепарированных потоков

Из рисунка 4 можно сделать вывод, что при низких напряжениях разряда до 250 В величина отношения I_D/I_G достигает максимальных значений, что указывает на высокую концентрацию ароматических колец. С ростом напряжения до 300 В происходит резкое снижение отношения I_D/I_G до минимальных значений и при дальнейшем увеличении напряжения разряда (более 300 В) происходит рост I_D/I_G отношения, что

указывает на незначительное увеличение ароматических колец в структуре покрытий.

Известно [3], что смещение положения G пика в сторону больших волновых чисел происходит тогда, когда размер Csp^2 кластеров углерода уменьшается, а их количество и упорядоченность возрастают, что свидетельствует о снижении отношения sp^3/sp^2 . Установлено, что с ростом напряжения разряда происходит смещение пика G в направлении более высоких волновых чисел, при этом можно сказать что при напряжении разряда равном 300 В значения положения пика G являются минимальными, что указывает на рост разупорядоченности, и, соответственно, рост sp^3 фазы в покрытии. При напряжении разряда менее 300 В формируется графитоподобная структура [3].

Также известно, что значения FWHM (G) пика являются основным параметром, характеризующим структурный беспорядок, и определяются искажением угла связей между атомами углерода. Установленная зависимость FWHM (G) от напряжения разряда (рисунок 4б) указывает на то, что при напряжении разряда 300 В наблюдается высокая степень разупорядоченности структуры с последующим ее снижением с ростом напряжения разряда.

Соответственно, можно сделать вывод, что напряжение разряда 300 В и 350 В являются оптимальными, поскольку содержание sp^3 атомов углерода велико и при этом наблюдается высокая степень разупорядоченности структуры [3, 4, 5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены зависимости толщины а-С покрытий, осажденных при различных энергетических режимах работы испарителя. На основании изменения толщины покрытий, а также анализа зависимостей поверхностной шероховатости RMS полученных покрытий определена эффективность работы сепаратора потока при различных энергетических режимах генерации углеродной плазмы. Показано, что эффективность работы сепаратора зависит от напряжения разряда, которое определяет ток разряда и соответственно величину магнитного поля сепаратора. Анализ данных КР спектроскопии показал особенности формирования структуры покрытий, осажденных при различных параметрах магнитного поля сепарирующей системы. Можно сделать вывод, что напряжение разряда 300 В и 350 В являются оптимальным, при таких начальных напряжениях разряда формируется покрытие с высоким содержанием атомов углерода с sp^3 связями. При напряжении разряда 200 и 250 В, согласно результатам анализа данных КР спектроскопии, количество sp^3 гибридных связей значительно меньше. С ростом напряжения разряда наблюдается рост разупорядоченности структуры, что совместно со снижением отношения I_D/I_G указывает на увеличение sp^3 связей в покрытии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 3.1.3 НИР №2). Авторы выражают благодарность ЦКП «ВТАН» НГУ за выполненные измерения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / под ред. А.В.Рогачева – Москва: Радиотехника, 2020. – 283 с.
2. Исследование структуры и механических свойств пленок тетраэдрального аморфного углерода, осажденных с помощью импульсного катодно-дугового источника при различных расстоя-

- ниях между источником и подложкой./ С. Ю. Чепкасов и [и др] // Сибирский физический журнал. –2018. –Т.13, № 3. –С .55–60.
3. Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon / J. Robertson // Mater. Sci. Eng. R – 2002, – Vol. 37. – P. 129–281.
 4. Boxman, R. L. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: Generation, transport, and control /R. L. Boxman, S. Goldsmith // Surf. Coat. Technol.– 1992.–V. 52.– P. 39–50.
 5. Anders, A. Approaches to rid cathodic arc plasma of macro- and nanoparticles: A review. / A. Anders // Surf. Coat. Technol.– 1999.–Vol. 120-121.–P. 319–330.
 6. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. / Ed. by R.L. Boxman, D.M. Sanders, Ph.J. Martin. – NJ:Noyes Publications, Park Ridge, 1995.–742 p.
 7. Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition/ Ed. by A. Anders John.– New York: Wiley, 2000.– 736 p.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВУМЕРНЫМ КАНАЛОМ

Д. А. Подрябинкин, В. В. Мельникова, А. Л. Данилюк

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П.Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: podryabinkin@bsiur.by*

Рассмотрено влияние на электрофизические параметры транзисторной структуры с двумерным полупроводниковым каналом ширины запрещенной зоны материала канала, емкости подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний в зависимости от потенциала полевого электрода. Установлены закономерности, характеризующие взаимосвязи между электрофизическими параметрами транзисторной структуры с двумерным полупроводниковым каналом.

Ключевые слова: двумерный полупроводник; транзисторная структура; электрохимический потенциал; квантовая емкость; взаимосвязь параметров.

INTERRELATION OF THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF A TRANSISTOR STRUCTURE WITH A TWO-DIMENSIONAL CHANNEL

D. A. Podryabinkin, V. V. Melnikova, A. L. Danilyuk

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P.Browka, 6, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: D. A. Podryabinkin (podryabinkin@bsiur.by)*

The effect of the electrical parameters of a transistor structure with a two-dimensional semiconductor channel on the band gap of the channel material, the capacitance of the gate dielectric, and the capacitance of interface states is considered depending on the field electrode potential. Regularities that characterize the relationship between the electrophysical parameters of a transistor structure with a two-dimensional semiconductor channel were established.

Key words: two-dimensional semiconductor; transistor structure; electrochemical potential; quantum capacitance; interrelation between parameters.