

Влияние внешнего магнитного поля в реакторе осаждения алмазоподобных углеродных покрытий на генерацию индуктивно-связанной плазмы

П.Д. Товт, Н.В. Леонович, Д.А. Котов

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

Разработан реактор химического осаждения из газовой фазы с применением плазмы высокой плотности на основе источника индуктивно-связанной плазмы. Проведены исследования влияния аксиального магнитного поля и магнитного поля с нулевым контуром на рабочее давление источника индуктивно-связанной плазмы. При наличии аксиального магнитного поля величиной 0,7 мТл в рабочей камере удалось снизить рабочее давление «горения» индуктивно-связанной плазмы вплоть до $5 \cdot 10^{-2}$ Па.

Ключевые слова: Алмазоподобное углеродное покрытие, плазма высокой плотности, индукционный разряд, индуктивно-связанная плазма, аксиальное магнитное поле.

Введение

Высокочастотные индуктивные плазменные реакторы и источники ионов низкого давления уже в течение нескольких десятилетий являются важнейшей составляющей многих современных научных технологий. Широкому распространению технологических применений ВЧ-разряда способствует его основное достоинство, а именно, возможность получения высокой концентрации электронов и ионов при низком уровне ВЧ-мощности порядка 50-300 Вт. Наиболее часто индуктивный ВЧ-разряд используется в качестве источника плазмы в реакторах, предназначенных для отчистки, активации, травления подложек, осаждения функциональных покрытий.

Поэтому технология химического осаждения из газовой фазы с использованием плоского источника индуктивно-связанной плазмы имеет ряд преимуществ таких как: низкая температура процесса 25-300 °С, высокое содержание ионизированных частиц в плазме порядка 10^{12} см⁻³, широкий спектр химических реакций с благоприятными термодинамикой и кинетикой. Процесс химического осаждения из газовой фазы с использованием индуктивно-связанной плазмы осуществляется при давлениях от 0,05 Па до 10 Па, в следствии чего равномерное газораспределение обеспечивает минимальную неравномерность покрытия по толщине. Высокая концентрация заряженных частиц и радикалов имеет определяющее влияние на структуру и свойства осаждаемого покрытия. Однако для генерации плазмы на пониженном давлении в диапазоне в 0,1 – 0,05 Па в реакторе должно быть предусмотрено создание внешнего магнитного поля. Такая конфигурация приводит к увеличению степени ионизации плазмы и как следствие уменьшения рабочего давления. И как следствие магнитное поле увеличивает плотность плазмы, что увеличивает равномерность распределения ионизированных частиц над рабочей плоскостью антенной системы источника.

Экспериментальная часть

Для реализации метода химического осаждения из газовой фазы с применением плазмы высокой плотности, нами был разработан реактор цилиндрической формы диаметром 280 мм с откачкой снизу, представленный на рис. 1, основные составляющие которого описаны в работах [1,2]. Основными критериями при равномерном осаждении алмазоподобных углеродных покрытий данным методом при использовании плоского источника индуктивно-связанной плазмы являются формирование плазмы высокой плотности с равномерным

распределением концентрации заряженных частиц над всей рабочей плоскостью антенной системы и распределения газового потока в зоне плазмообразования [3]. Формирование плазмы с равномерным распределением концентрации заряженных частиц при рабочих давлениях ниже 10^{-1} Па зависит от конфигурации и величины магнитной индукции в промежутке между зоной плазмообразования и подложкодержателем. Поэтому при определении влияния внешнего магнитного поля на степень ионизации и рабочего давления в камере, рассматривались несколько систем: магнитная система из трех соленоидов и магнитная система из двух соленоидов

Магнитная система из трех соленоидов обеспечивает зажигание индукционного разряда с нейтральным контуром, который должен обеспечить увеличение степени ионизации индукционного разряда и снижение рабочего давления. В такой системе центральный соленоид включен встречно двум крайним, и такое расположение соленоидов создает тороидальную магнитную ловушку с нулевой магнитной индукцией в центре тора. Электроны плазмы находятся в магнитном поле, удерживающем их в области нейтрального контура. Наличие нейтрального контура должно вносить заметное влияние на режимы генерации разряда: недостаточное или избыточное увеличение тока центрального соленоида приводит к ухудшению согласования [4]. Магнитная система из двух соленоидов генерирует аксиальное магнитное поле внутри реактора, что приводит к увеличению плотности плазмы, то есть к увеличению степени ионизации.

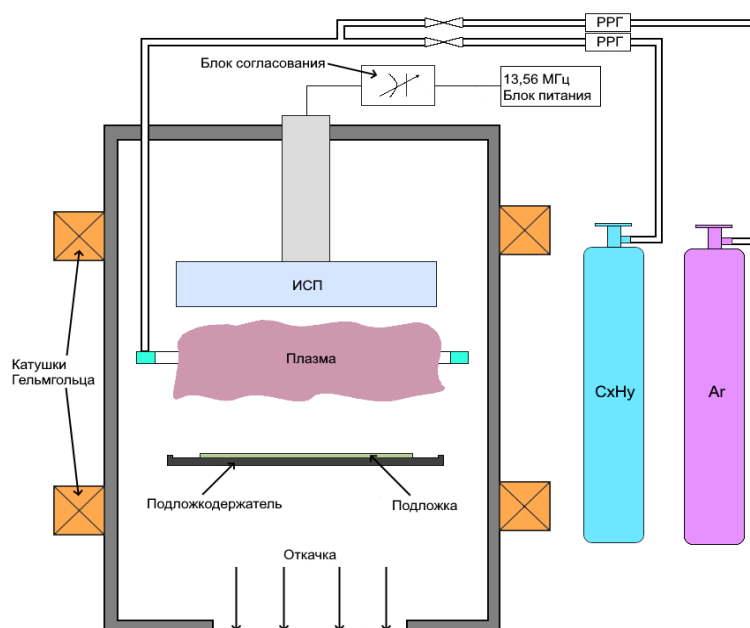


Рис. 1. Схематическое изображение реактора цилиндрической формы

Без магнитного поля разряд формируется нормально, и добиться согласования удастся на давлении 2,5 Па, дальнейшее снижение рабочего давления требует наличия внешнего магнитного поля. В ходе проведения экспериментальных исследований с магнитной системой из трех соленоидов установлено, что при иницировании разряда с наименьшей отраженной мощностью $<1\%$ необходимо поддерживать индукцию магнитного поля в диапазоне от 1 мТл до 2 мТл, давление в зоне разряда 2,5 Па. При дальнейшем снижении рабочего давления отраженная мощность увеличивалась и разряд «затухал» при давлении в 0,1 Па. При этом экспериментальные исследования магнитной системы из двух соленоидов показали, что величина магнитного поля менее 0,1 мТл заметных изменений при генерации плазмы не

вносила, в то время как при величине поля более 1 мТл наблюдалось увеличение отраженной мощности, то есть ухудшение настройки согласования вплоть до 5%. Дальнейшее снижение рабочего давления при значении аксиального магнитного поля в 0,7 мТл позволило снизить рабочее давление генерации плазмы вплоть до 0,05 Па, отраженная мощность составила ~2%, при дальнейшем снижении давления разряд исчезал. Наличие аксиального магнитного поля ведет к увеличению плотности плазмы, то есть к увеличению степени ионизации, что и позволило снизить рабочее давление генерации индуктивно-связанной плазмы.

Заключение

Наличие аксиального магнитного поля позволяет реализовать метод химического осаждения из газовой фазы с применением источника индуктивно-связанной плазмы при давлении 0,05 Па. Величина перпендикулярной составляющей магнитной индукции, к поверхности источника плазмы и поверхности подложки, для работы на пониженном давлении и формирования равномерной плазмы высокой плотности в рабочей зоне между ними должна быть в диапазоне от 0.1 мТл до 1 мТл. Так же снижение рабочего давления в реакционной камере ведет к уменьшению температуры, что увеличивает гибкость управления параметрами процесса и имеет прямое влияние на структуру осаждаемых покрытий.

Список источников

- [1] **Леонович, Н.В.** Реактор осаждения алмазоподобных углеродных покрытий / Н.В. Леонович, М.А. Толкач, А.И. Занько // ФКС XXVII: материалы международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Гродно: ГрГУ, 2019. 163-164 с.
- [2] **Занько, А.И.** Исследование газодинамического потока в реакторе осаждения диэлектрических слоев на основе кремния / Н.В. Леонович, А.И. Занько. // 56-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2020, 81 с.
- [3] **Boogaard, A.** Deposition of High-Quality SiO₂ Insulating Films at Low Temperatures by means of Remote PECVD / A. Boogaard, R. Roesthuis. – 2008. – С. 452–456.
- [4] **Ясюнас, А.А.** Влияние распределения магнитного поля на разрядные параметры источника индукционного разряда / А. А. Ясюнас, Д. А. Котов // Молодежь в науке – 2014 приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» : в 5 ч. / НАН Беларусі, Совет молодых ученых НАН Беларусі. – Минск, 2015. – Ч. 3 : Серия физико-технических наук – С. 49–53.

Effect of an external magnetic field in a reactor for the deposition of diamond-like carbon coatings on the generation of an inductively coupled plasma

P. D. Tovt, N.V. Leonovich, D.A. Kotov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Annotation

A high-density plasma chemical vapor deposition reactor based on an inductively coupled plasma source has been developed. The influence of an axial magnetic field and a magnetic field with a zero loop on the working pressure of an inductively coupled plasma source has been studied. In the presence of an axial magnetic field of 0.7 mT in the working chamber, it was possible to reduce the working pressure of the "burning" of the inductively coupled plasma down to $5 \cdot 10^{-2}$ Pa.

Keywords: Diamond-like carbon coating, high-density plasma, inductive discharge, inductively coupled plasma, axial magnetic field.