

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК [533.9+537.523]:621.3.049.77

Юник
Андрей Дмитриевич

Нетермическая активация вакуумно-плазменных технологических процессов
производства изделий электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 02 «Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Научный руководитель

Бордусов Сергей Валентинович

д.т.н., профессор

Минск 2017

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире всё более актуальной становится задача внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий во всех отраслях машиностроения. Анализ результатов научно-технических достижений в области высоких технологий показал, что вакуумным ионно-плазменным технологиям уделяется большое внимание в ряде стран мира, в особенности в Германии, США, Японии и России. Это обусловлено тем, что плазменные технологии имеют ряд неоспоримых преимуществ и позволяют повысить температуру в зоне обработки изделий, также расширяют диапазон операционных параметров и номенклатуру обрабатываемых материалов, значительно повышают плотность плазмы при небольшом уровне средней мощности, сокращают время обработки. Используя особенности горения разряда с эффектом полого катода можно проводить модифицирование поверхности различных материалов, улучшая физико-механические характеристики поверхностных слоев и их служебные свойства до трех и более раз, а также снижая энергопотребление самого процесса обработки.

Указанные особенности разряда с эффектом полого катода дают возможность переходить на новые ресурсосберегающие технологические процессы, причем область их применения чрезвычайно широка: от микроэлектроники до точного машиностроения. Тенденция перехода на менее материалоемкие технологии в настоящее время весьма актуальна, что обуславливает необходимость проведения более глубоких исследований данного типа разряда.

Таким образом, основными задачами данной магистерской диссертации являются: анализ основных механизмов процессов плазменной обработки материалов, способов управления их характеристиками и режимами, а также ключевых факторов, влияющих на эти характеристики, применительно к процессам плазменного травления, осаждения и модификации поверхностных слоев материалов; проведение исследований, изучение и анализ специфических особенностей разряда с эффектом полого катода, электрофизических характеристик его возбуждения и поддержания, а также исследование влияния различных конфигураций разрядной системы на эти характеристики.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данная работа посвящена изучению нетермической активации вакуумно-плазменных технологических процессов производства изделий электронной техники.

Разряд с эффектом полого катода представляет интерес как с научной, так и с практической точки зрения. В настоящее время, данный тип разряда широко используется в процессах плазменного травления, осаждения и модификации поверхностных слоев материалов, что обуславливает актуальность изучения данной темы.

Целью проводимых исследований является определение условий возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода при различных положениях катода в кварцевом чехле; изучение влияния изменения конфигурации разрядной системы на характеристики возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода при различных вариантах подачи плазмообразующего газа и при различных положениях противоиэлектрода; изучение влияния предионизации плазмообразующего газа в разряде с эффектом полого катода на скорость удаления фоторезистивной пленки в газоразрядной системе Е-типа.

Основными задачами данной работы являются: изучение и анализ специфических особенностей разряда с эффектом полого катода, электрофизических характеристик его возбуждения и поддержания, а также исследование влияния различных конфигураций разрядной системы на эти характеристики.

Результаты работы над магистерской диссертацией опубликованы в виде тезисов в следующих сборниках:

1) Проблемы взаимодействия излучения с веществом: IV Республиканская научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 2016 г.

2) 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: материалы конференции. Минск, 2017 г.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка. Объем магистерской диссертации составляет 75 страниц, включая 42 иллюстрации, библиографический список из 35 наименований, 1 приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе магистерской диссертации приводится анализ основных механизмов процессов плазменной обработки материалов. Рассматриваются способы управления характеристиками и режимами процессов плазменной обработки, а также ключевые факторы, влияющие на эти характеристики, применительно к процессам плазменного травления, осаждения и модификации поверхностных слоев материалов.

Основными факторами, влияющими на характеристики процессов плазменного травления материалов являются:

- давление рабочего газа;
- мощность, вкладываемая в разряд;
- расход газа;
- температура поверхности, подвергающаяся травлению;
- материал электродов.

Основными факторами, влияющими на характеристики процессов плазменного осаждения материалов являются:

- коэффициент распыления, который определяется как среднее число атомов, выбиваемых с поверхности материала одной падающей частицей;
- скорость распыления v_p , определяемая по толщине поверхностного слоя материала, удаляемого в единицу времени;
- процессы переноса распыленного материала от мишени к поверхности конденсации и процессы формирования пленки на приемной поверхности.

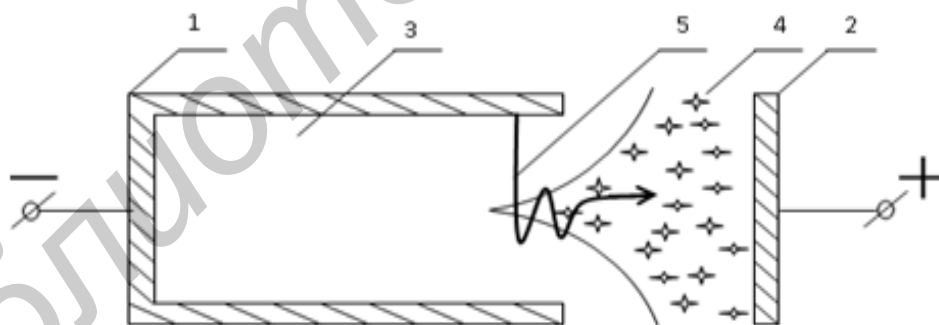
Основными факторами, влияющими на характеристики процессов плазменного модифицирования поверхностных слоев материалов являются: температура и продолжительности насыщения, давление и состав насыщающего газа, электрические характеристики, межэлектродное расстояние, конфигурация деталей и расположение их в садке.

Вторая глава посвящена анализу специфических особенностей тлеющего разряда с эффектом полого катода, рассмотрению областей его применения и различных вариантов конструкций газоразрядных систем с эффектом полого катода.

Уже первые исследователи тлеющего разряда применяли катоды разнообразной формы и отмечали те или иные особенности разряда, присущие ему в случае использования не плоского, а полого катода. Полым катодом называется катод, рабочая поверхность которого имеет отрицательную кривизну или состоит из отдельных поверхностей (включая и плоские), ограничивающих часть пространства газоразрядного прибора и создающих

полость. В зависимости от того, какой формы используется катод: плоский или полый – свойства самостоятельных разрядов в той или иной степени (часто очень резко) различаются друг от друга. В частности, уже давно известно, что при использовании полого катода в тлеющем разряде картины разных явлений резко изменяются, что и послужило поводом дать особое название для этой формы разряда.

Сущность эффекта полого катода заключается в следующем: когда катод плоский, приближение к нему края плазмы сокращает эффективную длину d , что и определяет сильный рост напряжения пробоя, приводящий, в конечном счете, к переходу разряда в дуговую стадию. Положение сильно меняется, когда граница плазмы приближается к открытому концу полого катода. Вследствие искривления в этом месте пространства эквипотенциальных поверхностей электрического поля граница плазмы приобретает воронкообразный характер, и вершина плазменной воронки проникает внутрь полости. Электроны, ускоренные на каком-либо участке катодного падения, входят в этот плазменный стержень с большими скоростями, проходят его насквозь, попадают в противоположный участок катодного падения как на рисунке 1, тормозятся встречным полем, останавливаются. Затем они начинают движение в противоположном направлении, снова попадают в плазму, проходят ее и т. д.



1 – катод, 2 – анод, 3 – темное катодное пространство, 4 – плазма,
5 – траектория электрона, совершающего колебания внутри полости

Рисунок 1 – Схематический рисунок, поясняющий переход высоковольтного разряда в тлеющий разряд с эффектом полого катода

Два эффекта могут быть важны при этом. Торможение электронов во встречном поле формируют заметный отрицательный объемный заряд, который компенсирует положительный объемный заряд пространства катодного

падения. Это способствует приближению границы плазмы к поверхности катода. Кроме того, уменьшая свою энергию при торможении во встречном поле, электроны более эффективно ионизируют газ и увеличивают плотность плазмы, прижимающейся к катоду. В результате действия этих факторов плазма прорывается внутрь катода, поле резко растет, напряжение на разрядном промежутке падает. Возникает эффект полого катода, обусловленный осцилляцией внутри полости значительного количества быстрых электронов.

Целый ряд интересных особенностей разряда с полым катодом обуславливают его широкое применение в спектроскопии, СВЧ технике, различных ионных приборах, для сварки и плавки металлов, в процессах плазменного травления, осаждения и модификации поверхностных слоев материалов и т. д.

В третьей главе рассматривается состав технологического оснащения, измерительных систем и устройств, которые включает в себя экспериментальный стенд для проведения физических и технологических экспериментов по изучению разряда с эффектом полого катода, возбуждаемого в электроде трубчатой формы. Приводится детальное описание конструкции разрядной системы, а также методик проведения физических и технологических экспериментов.

Экспериментальный стенд собран на базе вакуумного поста установки ионного травления УРМ – 3.279.029. В состав экспериментального стенда входят (рисунок 2):

- генераторы электрических импульсов;
- измеритель мощности;
- вакуумная камера с системой вакуумной откачки и разгерметизации;
- датчик вакуума и вакууметр ВТБ – 1;
- блок смещения и напуска газов;
- генератор водорода (ГВЧ – 12К);
- спектрометр;
- осциллограф.

Указанный состав технологического оснащения, измерительных систем и устройств обеспечивает возможность проведения ряда физических и технологических экспериментов по изучению разряда с эффектом полого катода, возбуждаемого в электроде трубчатой формы.

Разрядная система с эффектом полого катода (ЭПК) представляет собой полый цилиндрический катод на который подается импульсное напряжение отрицательной полярности величиной не более 1000 В. Ток с катода течет на анод, анодом является колпак вакуумной камеры.

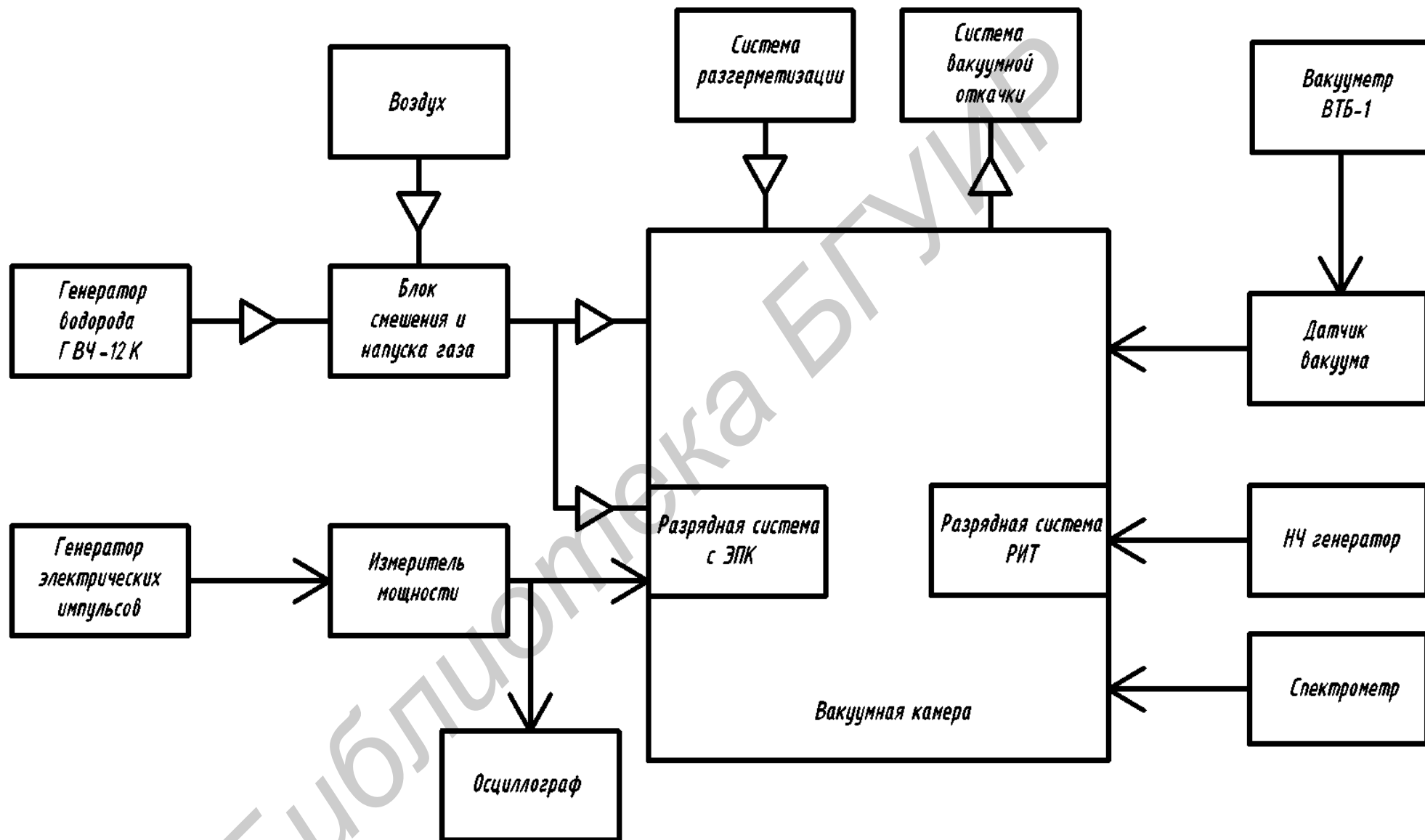


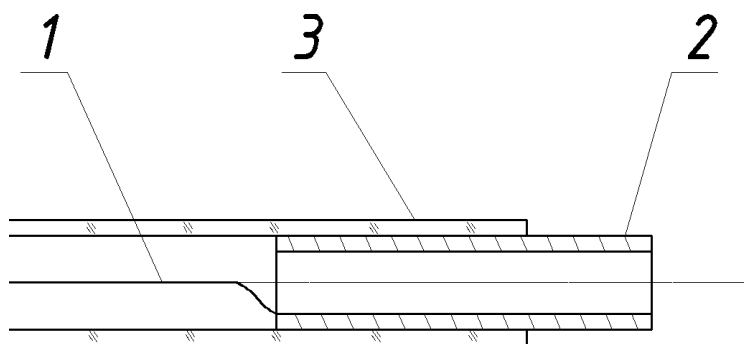
Рисунок 2 – Структурная схема экспериментального стенда

Разрядная система реактивного ионного травления (РИТ) представляет собой газоразрядную систему Е-типа. Для формирования и поддержания газового разряда к ней подключен НЧ генератор электрических импульсов, с частотой следования равной 25 кГц.

Для создания разряда внутри камеры используется источник электрических импульсов, питаемый от промышленной трёхфазной сети. На катод подается импульсное напряжение отрицательной полярности с частотой следования равной 50 кГц и скважностью 50 %.

На рисунке 3 представлена конструктивная схема разрядной системы плазменного технологического модуля на базе разряда с эффектом полого катода. Для возможности поддержания необходимого для проведения экспериментов рабочего вакуума данная разрядная система закрепляется на вакуумной камере вакуумного поста УРМ–3.279.029, позиция 1. Полый катод 2 представляет собой цилиндр из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, который помещен в один из концов длинной кварцевой трубки 3. Этот конец находится непосредственной в вакуумной камере. Другой же конец трубки закреплен в специальном тройнике 4. Данный тройник выполняет сразу несколько функций: с одной стороны с его помощью осуществляется подвод проволоки из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т через трубку непосредственно к катоду; с другой, через штуцер 5 подводится необходимый рабочий газ. Далее вся эта конструкция крепится на специальном опорном круге 6 и помещается в диэлектрический защитный кожух 7, который закреплен на вакуумной камере. Подвод необходимого отрицательного потенциала от импульсного источника питания осуществляется электрическим соединением токопровода и проволоки на клеммной колодке 8, которая также закреплена на опорном круге.

Конструкция электрода-катада представлена на рисунке 4.



1 – проволока-токоподвод; 2 – полый катод; 3 – трубка кварцевая

Рисунок 4 – Конструкция трубчатого электрода-катада

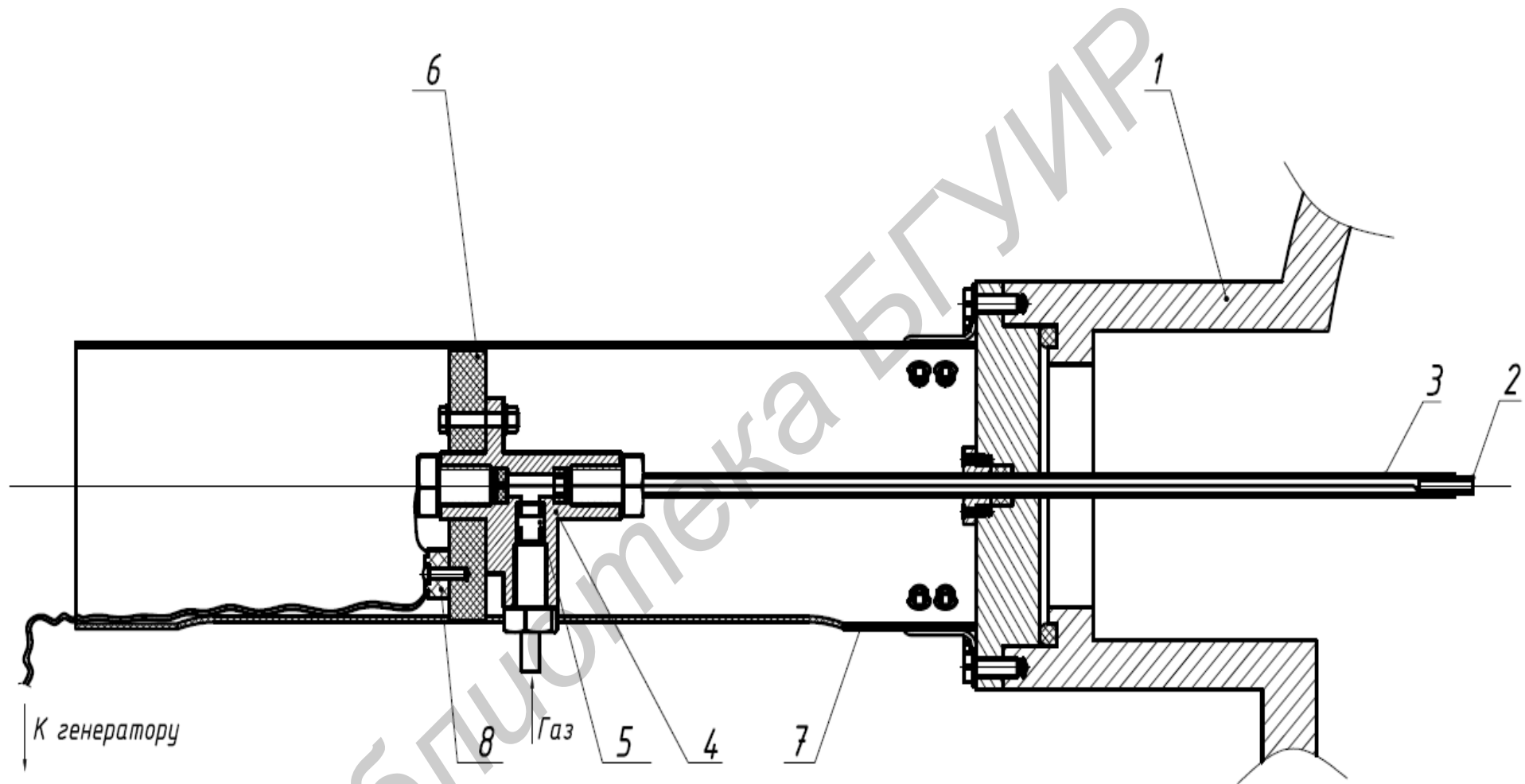


Рисунок 3 – Разрядная система плазменного технологического модуля на базе разряда с эффектом полого катода

Четвертая глава представляет собой обобщенные результаты экспериментов и анализ полученных данных по определению условий возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода при различных положениях катода в кварцевом чехле и исследованию влияния изменения конфигурации разрядной системы на характеристики возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода, в частности, при различных вариантах подачи плазмообразующего газа и при различных положениях противозэлектрода. Представлены экспериментальные данные по изучению влияния предиионизации плазмообразующего газа в разряде с эффектом полого катода на скорость удаления фоторезистивной пленки в газоразрядной системе Е-типа.

Было установлено, что:

1) Положение полого катода трубчатого типа в кварцевом чехле влияет на режимы возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода, но не в значительной степени (как для воздуха, так и для водорода). Существенное увеличение значений пикового напряжения и пиковой мощности, необходимых для возбуждения и поддержания разряда, наблюдалось только при сильном углублении катода в кварцевый чехол ($l = -20$ мм и более) и давлениях свыше 300 Па, в случае использования воздуха в качестве плазмообразующего газа, что, вероятнее всего, связано с увеличением вероятности гибели плазменных частиц на внутренней поверхности кварцевого чехла.

2) Положение полого катода трубчатого типа в кварцевом чехле существенно влияет на диапазон давлений при котором возбуждается и стабильно горит разряд с эффектом полого катода.

При использовании воздуха в качестве плазмообразующего газа разряд возбуждается и стабильно горит в диапазоне давлений 47 – 665 Па при положениях катода в кварцевом чехле от $l = -15$ мм до $l = 15$ мм. При углублении и выдвигении катода более чем на 20 мм диапазон давлений существенно уменьшается, особенно его верхняя граница. Разряд начинает вести себя нестабильно или вовсе не загорается при давлениях свыше 350 Па. Следует отметить, что нестабильность в данном случае выражается в быстром (порядка 2 – 5 сек.) затухании разряда и невозможности объективной регистрации его характеристик по осциллограмме.

В отличие от воздуха, при использовании H_2 в качестве плазмообразующего газа разряд возбуждается и стабильно горит в диапазоне давлений 340 – 750 Па при всех положениях катода в кварцевом чехле ($l = -15; 0; 15$ мм), но ведет себя нестабильно при давлениях ниже 220 Па. Также следует отметить существенное повышение значений напряжения и тока,

необходимых для возбуждения разряда при выдвигании катода из кварцевого чехла при значении давления плазмообразующей среды в 267 Па.

3) Характеристики возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода при пропускании плазмообразующего газа через саму разрядную систему лучше, чем при подаче газа минуя ее. Экспериментально это подтверждается большими значениями пиковой импульсной мощности разряда и большими значениями пикового напряжения, возбуждающего разряд с эффектом полого катода. Например, при выдвигании катода из кварцевого чехла ($l = 15$ мм) и давлении $P = 133$ Па значение пиковой импульсной мощности разряда больше на 23%, а значение пикового напряжения, возбуждающего разряд с эффектом полого катода, больше на 8%, в случае пропускания плазмообразующего газа (воздуха) через разрядную систему.

4) Пропускание плазмообразующего газа через разрядную систему, как и положение полого катода трубчатого типа в кварцевом чехле, существенно влияет на диапазон давлений при котором возбуждается и стабильно горит разряд с эффектом полого катода, причем как для воздуха, так и для H_2 . Особенно это заметно при низких давлениях.

При использовании воздуха в качестве плазмообразующего газа разряд возбуждается и стабильно горит в диапазоне давлений 47 – 665 Па, при пропускании плазмообразующего газа через разрядную систему, а при подаче газа минуя разрядную систему – только в диапазоне 106 – 505 Па.

При использовании H_2 в качестве плазмообразующего газа разряд возбуждается и стабильно горит в диапазоне давлений 222 – 748 Па, при пропускании плазмообразующего газа через разрядную систему, а при подаче газа минуя разрядную систему – только в диапазоне 338 – 748 Па.

Полученные данные подтверждают, что конструкция разрядной системы с возможностью подачи плазмообразующего газа непосредственно через разрядную систему имеет преимущество над системой, в которой подача плазмообразующего газа осуществляется минуя разрядную систему, благодаря лучшей энергоэффективности разряда и большему диапазону давлений при котором возбуждается и стабильно горит разряд с эффектом полого катода.

5) Влияние расстояния между катодом и противоанодом в диапазоне от 110 до 200 мм на режимы возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода несущественно. На этом диапазоне расстояний и при давлениях от 47 до 505 Па разряд ведет себя стабильно, электрофизические характеристики изменяются незначительно.

Полученные данные подтверждают возможность успешной реализации различных конструкций систем технологического применения на основе

разряда с эффектом полого катода трубчатого типа с расположением противоанода на расстояниях до 200 мм.

б) В условиях предионизации плазмообразующего газа скорость удаления фоторезистивной пленки с поверхности кремниевой пластины выше в 3 – 4 раза чем в ее отсутствии. При мощностях разряда в 450 и 550 Вт максимум скорости удаления фоторезистивной пленки наблюдался при давлениях в разрядной камере в 150 – 170 Па.

Применительно к типовому процессу удаления фоторезистивных пленок при производстве изделий интегральной электроники предионизация плазмообразующего газа позволяет существенно ускорить процесс травления (до 4 раз), по сравнению с процессом травления в разряде Е-типа без предионизации, при сохранении стойкости фоторезистивных маскирующих покрытий в процессе обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы над магистерской диссертацией был проведен анализ основных механизмов процессов плазменной обработки материалов, способов управления их характеристиками и режимами, а также ключевых факторов, влияющих на эти характеристики, применительно к процессам плазменного травления, осаждения и модификации поверхностных слоев материалов.

Рассмотрены физические особенности формирования разряда с эффектом полого катода. Приведены конструктивные решения газоразрядных устройств для формирования разряда с эффектом полого катода. Представлены примеры технологического применения тлеющего разряда с эффектом полого катода.

Экспериментально определены условия возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода при различных положениях катода в кварцевом чехле; исследовано влияние изменения конфигурации разрядной системы на характеристики возбуждения и поддержания разряда с эффектом полого катода, в частности, при различных вариантах подачи плазмообразующего газа и при различных положениях противоэлектрода.

Получены экспериментальные данные по изучению влияния предионизации плазмообразующего газа в разряде с эффектом полого катода на скорость удаления фоторезистивной пленки в газоразрядной системе Е-типа. Установлено, что в условиях предионизации плазмообразующего газа скорость удаления фоторезистивной пленки с поверхности кремниевой пластины выше в 3 – 4 раза чем в ее отсутствии.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 79,5 %. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в библиографическом списке.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 – А. Исследование влияния режимов электропитания на температуру поверхности цилиндрического электрода-катода / А.И. Божко, А.Д. Юник // Физика конденсированного состояния (ФКС – XXIV): материалы XXIV международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21 апреля 2016 г. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В.Г. Барсуков [и др.]. – Гродно, 2016. – С. 144-145.

2 – А. Плазменный модуль тлеющего разряда импульсного тока / А.Д. Юник, С.В. Бордусов // Проблемы взаимодействия излучения с веществом [Электронный ресурс] : IV Республиканская научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя (Гомель, 9–11 ноября 2016 г.) : материалы : в 2 ч. Ч. 2. – Электрон. дан. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: IBM-совместимый компью-тер; Windows XP; ОЗУ 512 Mb; CD-ROM 8-х и выше. – Загл. с этикетки диска. – С. 202-204.

3 – А. Плазменный технологический модуль для нетермической активации вакуумно-плазменных процессов на базе разряда с эффектом полого катода / А.Д. Юник // 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: материалы конф. Минск, 2–6 мая 2017 г. – в печати.

4 – А. Plasma module for nonthermal activation of vacuum-plasma processes / A.D. Yunik // 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: материалы конф. Минск, 2–6 мая 2017 г. – в печати.