

Бессеточная система генерации низкоэнергетического ионного пучка на основе тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов

И. Лопатин^{}, Ю. Ахмадеев, А. Петров*

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

**lopatin@opee.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Разработана система генерации ионного пучка на основе тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов. Система предназначена для ионно-пучкового осаждения покрытий на основе алюминия, в том числе его оксида. Особенностью системы является отсутствие конструктивного элемента, определяющего границу плазмы. Граница плазмы ограничена образованием двойного электростатического слоя между плазмой основного и вспомогательного разрядов. В качестве генератора вспомогательной плазмы использовался ПИНК. Двойной электростатический слой локализовался вблизи эмиссионного окна, через которое осуществлялась встречная эмиссия электронов и ионов. Показано, что диапазон рабочих давлений системы составляет от 0.1 до 1 Па, ток основного разряда составляет единицы ампер. Также показана возможность управления разностью потенциалов на двойном электростатическом слое за счет изменения напряжения горения основного тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов.

Ключевые слова: плазма, двойной электростатический слой, внешняя инжекция электронов.

1. Введение

Пленки на основе оксида алюминия Al_2O_3 имеют большой потенциал для применения в науке и промышленности благодаря своим механическим, тепловым и оптическим свойствам. Получение пленок такого типа осуществляется с использованием различных методов, включающих как CVD [1], так и PVD методы. Исследование условий осаждения пленок на основе оксида алюминия показывают, что характеристики получаемых пленок во многом зависят от таких параметров как плотность, состав и энергия ионов/атомов, производящих бомбардировку растущих покрытий. Особый интерес представляют пленки $\alpha-Al_2O_3$ (корунд) благодаря тому, что эта фаза является единственной термостабильной. Получение $\alpha-Al_2O_3$ является актуальной и привлекает интерес многих исследователей по всему миру, которые используют для его получения различные методы [2, 3]. Однако, важной особенностью и недостатком большинства используемых PVD методов получения пленок на основе оксида алюминия является необходимость приложения отрицательного смещения к подложкам. Такой подход к контролю энергии ионов оправдывает себя при нанесении покрытий на электропроводящие подложки и при получении электропроводящих покрытий, либо покрытий с ограниченной электропроводностью при получении относительно тонких пленок, однако, использование электрического смещения при получении пленок большей толщины, а также на диэлектрических подложках, не может обеспечить сообщения одинаковой энергии ионам в начале и в конце процесса напыления диэлектрического покрытия. Ряд авторов предлагает для решения данной проблемы использовать ионно-пучковое ассистирование [4]. Для процессов ионно-пучкового ассистирования, как правило, используются источники газовых ионов, которые сами по себе не образуют покрытия, использование же источников не газовых (в том числе металлических) ионов ограничено низкой плотностью их тока, малой апертурой пучка, либо малым временем их непрерывной работы, что обусловлено ростом на ускоряющем и/или плазмоограничивающем электроде пленок осаждаемого материала.

Данная работа посвящена созданию и исследованию системы генерации объемной плазмы с извлечением пучка ионов, в том числе Al, с использованием несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов. Виртуальным

извлекающим «электродом», при такой схеме формирования ионного пучка, служит плазма вспомогательного разряда, а разделение плазмы вспомогательного и основного разрядов осуществляется двойным электростатическим слоем.

2. Описание экспериментальной установки

Работы проводились на экспериментальном стенде, выполненном на основе вакуумной установки ННВ-6.6 И1 дооснащенной генератором объемной газовой плазмы на основе дугового разряда с накаливаемым катодом «ПИНК», размещенным на одном из боковых фланцев камеры и генератором плазмы на основе тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов. Откачка вакуумной камеры производилась турбомолекулярным насосом с производительностью 500 л/с, газовое питание осуществлялось по трем независимым каналам с регуляторами газа РРГ10. Поддержание необходимого распределения потенциала в разрядном промежутке обеспечивалось последовательным включением двух источников питания разрядов вспомогательного и основного (Рис.1).

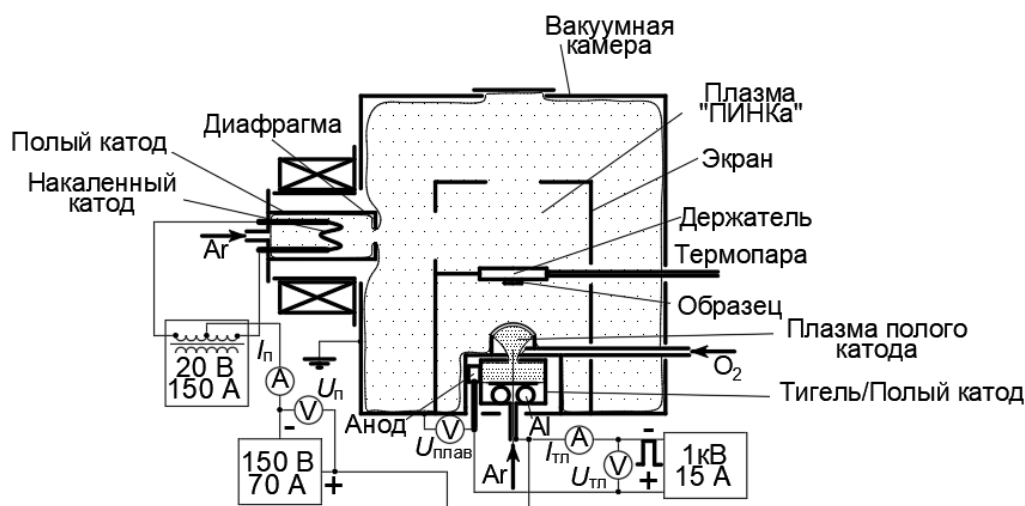


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Генерация объемной плазмы с целью формирования пучка ионов, происходит в разряде с внешней инжекцией электронов (Рис.2) и локализуется как в полном катоде основного разряда, так и вблизи диафрагмы, через которую производится инжекция электронов из вспомогательного разряда, в качестве которого используется разряд плазмогенератора «ПИНК». Область генерации плазмы за эmissiveйной диафрагмой, выполненной из графита для предотвращения ее расплавления, ограничивается сверху слоем нескомпенсированного пространственного заряда (двойным электростатическим слоем), образующимся между плазмами основного и вспомогательного разрядов, а с боков – экранным кольцом с размерами $\varnothing 80 \times 35$ мм. Экранное кольцо установлено для того, чтобы ограничивать направление эмиссии ионов из плазмы основного разряда. Полный катод основного разряда выполнен из графита и является частью стакана $\varnothing 90 \times 70$ мм. Стакан разделен по высоте на две части графитовой крышкой, верхняя часть стакана, высотой 35 мм выполняет функцию полого катода, в боковой стенке которого выполнено квадратное анодное окно с размерами 30×30 мм², напротив которого установлен анод с сечением в виде квадрата со сторонами 25×25 мм². Нижняя часть стакана выполняет роль тигля, в котором расплавляется алюминий, который через кольцевой зазор 2 мм в виде пара попадает из тигля в полный катод. Также в тигель через трубчатый центральный ввод потенциала подается аргон. Трубчатый ввод

потенциала/газа выполнен из титана, с целью предотвращения его расплавления и закреплен в водоохлаждаемом вакуумном вводе. Такая конструкция тигля обеспечивает снижение вероятности образования оксидной пленки на поверхности расплавленного алюминия за счет ее обдува аргоном и исключает запыление поверхности алюминия продуктами распыления стенок полого катода. Эти аспекты оказываются критически важными при термическом распылении алюминия в присутствии кислорода в вакуумной камере, так как по мере проникновения кислорода в тигель поверхность алюминия покрывается оксидной пленкой, которая препятствует испарению алюминия. Вводы потенциалов анода и полого катода изолированы керамическими трубчатыми изоляторами для исключения зажигания паразитных разрядов. Крышка полого катода выполнена из графита и имеет эмиссионное окно $\varnothing 20$ мм, расположенное в центре. Графитовый тигель/полый катод вместе с графитовым анодом окружены двойным тепловым экраном выполненными из нержавеющей стали и имеющими графитовые диафрагмы $\varnothing 19$ мм исключая их оплавление в области эмиссионного окна. Тепловые экраны электрически изолированы и от графитового стакана, анода и друг от друга, что позволяет избегать каскадного зажигания дугового разряда между внутренним экраном и анодом основного разряда.

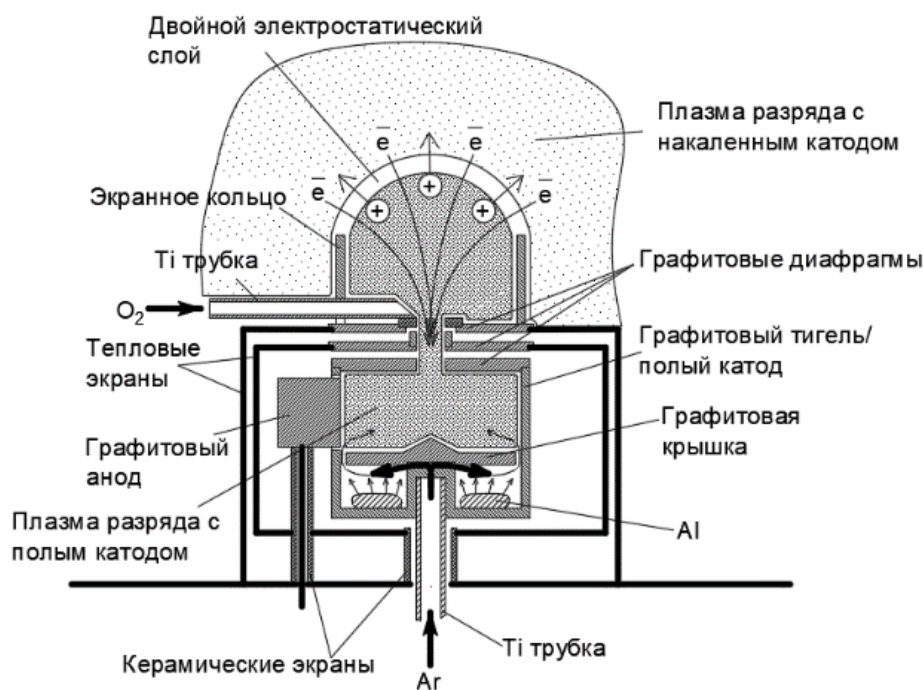


Рис.2. Принципиальная схема генерации плазмы разряда для формирования ионного пучка.

Кислород подается в область, ограниченную экранным кольцом над вторым тепловым экраном непосредственно к эмиссионному окну второго экрана. Такая локализация подачи кислорода обеспечивает его эффективное возбуждение, диссоциацию и ионизацию инжектированными из вспомогательного разряда электронами в пространстве, занятом плазмой основного разряда, ограниченном графитовой диафрагмой второго теплового экрана снизу, экранным кольцом по бокам и слоем нескомпенсированного пространственного заряда (двойным электростатическим слоем) сверху. Подача кислорода также производится по трубке, изготовленной из титана, так как вблизи эмиссионного окна происходит интенсивный локальный разогрев электродов, даже находящихся под плавающим потенциалом. Такой нагрев производится инжектированными из вспомогательного разряда и

ускоренными в двойном электростатическом слое электронами, компенсируемыми на поверхности электродов ионами из плазмы основного разряда.

Горение вспомогательного разряда с накаливаемым катодом генератора плазмы «ПИНК» обеспечивалось стабилизированным источником тока с максимальным напряжением до 150 В и током разряда до 70 А, накал катода обеспечивался источником переменного тока с частотой 2 кГц и выводом средней точки, что обеспечивало симметричную нагрузку вольфрамовых накаливаемых катодов частью тока разряда, замыкающегося на них и повышало стабильность работы устройства. Особенностью работы системы было то, что основным анодом для вспомогательного разряда являлся графитовый полый катод/тигель основного разряда. Стенки вакуумной камеры не являлись токоведущим электродом и находились под «плавающим» потенциалом по отношению к разрядной системе. С целью уменьшения интенсивности износа и окисления накаливаемых катодов напускаемым в камеру кислородом, в катодную полость генератора «ПИНК» подавался аргон, а ее выход был прикрыт диафрагмой с проходным диаметром 20 мм. Система генерации основного разряда размещалась на нижнем центральном фланце вакуумной камеры. Электропитание основного разряда осуществлялось от стабилизированного источника питания 20–1000 В, 0.1–15 А, с возможностью импульсной работы и регулируемые в пределах 1–100 кГц частотой и в пределах 15–80% коэффициентом заполнения импульса. Особенностью работы данного источника была возможность стабилизации не только напряжения и тока, но и мощности. Ввиду высоких требуемых плотностей тока в полном катоде и из-за присутствия в системе испаряющегося алюминия, вносящего нестабильность в работу системы, генерация плазмы основного разряда осуществлялась в основном в импульсном режиме 70 кГц при коэффициенте заполнения импульса напряжения 80%, ниже приведены средние значения параметров. Для оценки *in situ* энергии извлекаемых ионов, а также инжектируемых в основной разряд электронов и, соответственно, мощности расходуемой на нагрев тигля/полого катода основного разряда, средняя величина «плавающего» потенциала относительно анода основного разряда контролировалась с помощью высокоомного стрелочного вольтметра на стенках камеры. Измеренная таким образом величина не может считаться точной величиной разности потенциалов плазмы вспомогательного и основного разрядов, образующейся на двойном электростатическом слое из-за неизвестных величин «плавающего» потенциала во вспомогательном разряде и потенциала плазмы основного разряда относительно соответствующих анодов, однако, качественное изменение искомой разности потенциалов плазм двух разрядов такое измерение позволяет легко отслеживать. Напыляемые подложки размещались напротив эмиссионной диафрагмы основного разряда, на расстоянии 120 мм от нее, на держателе, закрепленном под потенциалом камеры. Разогрев экранов, трубки подачи кислорода, а также поток ионов с границы двойного электростатического слоя разогревали держатель до температур 300–650°C, температура держателя образцов контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Поскольку получаемый оксид алюминия является диэлектриком, который при попадании на стенки вакуумной камеры способен в дальнейшем затруднять горение разрядов, использующих стенки в качестве основного анода, вся система генерации основного разряда, а также область распространения ионного пучка была закрыта экраном, Ø320×450 мм с отверстиями под вводы кислорода, термопары, потока плазмы вспомогательного разряда из генератора плазмы, а также вакуумной откачки.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В ходе проведения экспериментов было установлено, что диапазон рабочего давления системы генерации объемной плазмы с внешней инжекцией электронов соответствует

диапазону работы генератора газовой плазмы «ПИНК» и составляет от 0.08 до 1.1 Па. Характер изменения «плавающего» потенциала относительно анода основного разряда, при этом, соответствовал таковому напряжению горения основного разряда, что косвенно свидетельствует об изменении разности потенциалов плазмы основного и вспомогательного разрядов. А напряжение между катодом и анодом вспомогательного разряда могло снижаться до нуля (Рис.3а), что свидетельствует о сильном взаимном влиянии разрядов.

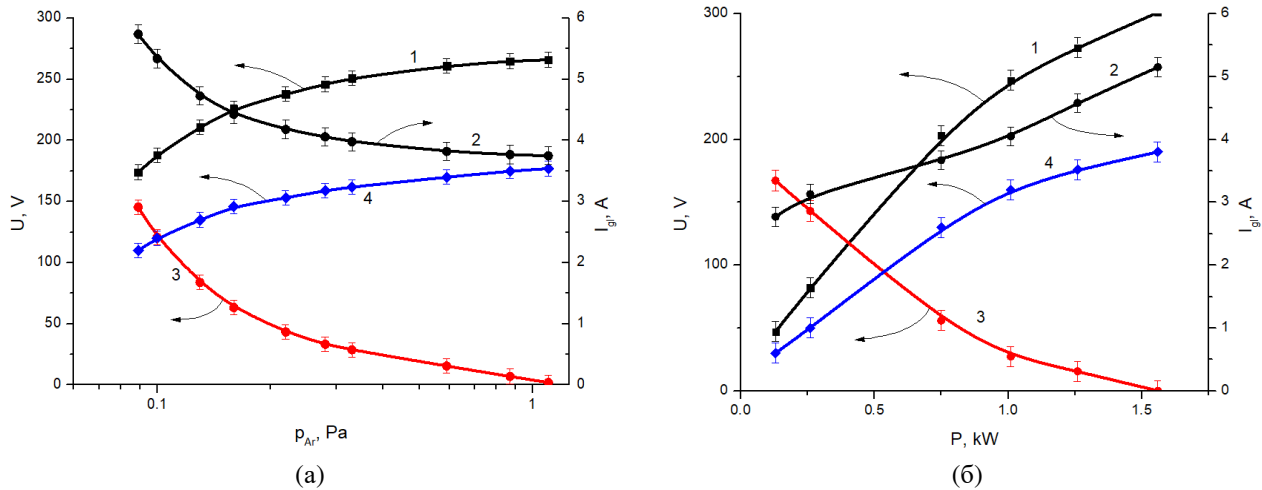


Рис.3. Зависимость напряжения горения $U_{mл}$ (1) и тока $I_{гл}$ (2) основного разряда, напряжения горения вспомогательного разряда U_n (3) и плавающего потенциала $U_{плав}$ (4) от давления аргона p_{Ar} (а) и мощности основного разряда P (б) при фиксированных: $P = 1$ кВт (а), $p_{Ar} = 0.3$ Па (б), токе вспомогательного разряда $I_n = 3$ А и токе накала вспомогательного разряда $I_n = 83$ А.

При изменении мощности основного разряда в пределах от 0.1 до 1.5 кВт и фиксированном токе вспомогательного разряда 3 А, ток основного разряда плавно изменялся в диапазоне 3–6 А, как и напряжение горения основного разряда (разность потенциалов катод-анод основного разряда) 50–300 В (Рис. 3б). При этом, характер изменения напряжения между катодом и анодом вспомогательного разряда и «плавающего» потенциала относительно анода основного разряда был близок к наблюдаемому при изменении рабочего давления.

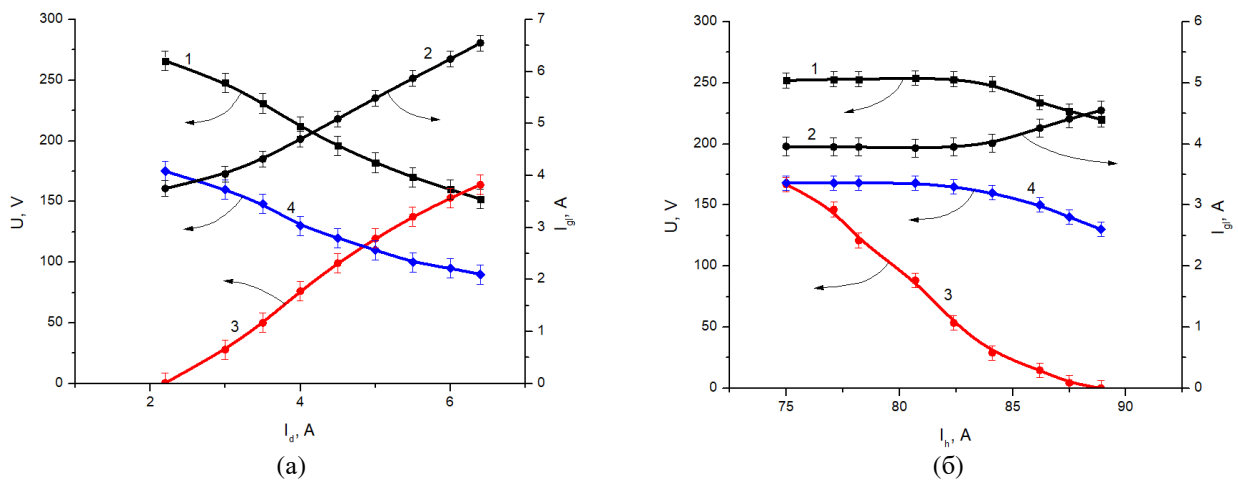


Рис.4. Зависимость напряжения горения $U_{mл}$ (1) и тока $I_{гл}$ (2) основного разряда, напряжения горения вспомогательного разряда U_n (3) и плавающего потенциала $U_{плав}$ (4) от тока вспомогательного разряда I_n (а) и от тока накала вспомогательного разряда I_n (б), при фиксированных: $p_{Ar} = 0.3$ Па; $P = 1$ кВт; $I_n = 83$ А (а), $I_n = 3$ А (б).

Широкий диапазон регулировки тока основного разряда также обеспечивался возможностью плавного изменения тока вспомогательного разряда (Рис.4а) при этом, влияние изменения тока накаливаемого катода вспомогательного разряда, на параметры горения основного разряда - имеет более сложный характер (Рис.4б), что, вероятно, связано с изменением напряжения горения вспомогательного разряда и, соответственно, концентрацией его плазмы, которая по мере увеличения тока накала снижается, так как все большая часть тока на его комбинированном катоде замыкается термоэлектронами, эмитированными с термокатада.

4. Заключение

Таким образом:

- Разработанная система позволяет осуществлять внешнюю инжекцию электронов из вспомогательного разряда на основе дугового разряда с накаливаемым катодом в основной тлеющий разряд с полым катодом без эмитирующего электрода как конструктивного элемента, за счет образования двойного электростатического слоя;
- Непрерывный диапазон разрядного тока для разработанной системы генерации плазмы в разряде со внешней инжекцией электронов составляет от сотен миллиампер до десятка ампер, при напряжении горения несамостоятельного разряда десятки–сотни вольт, в то время как диапазон рабочих давлений совпадает с таковым генератора плазмы на основе дугового разряда с накаливаемым и полым катодом («ПИНК»), что позволяет работать этим системам генерации плазмы совместно при давлениях от десятых долей до единицы паскаля.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ Росатом, проект № 20-21-00111.

5. Список литературы

- [1] Muller J., Schierling M., Zimmermann E., Neuschütz D., *Surf. Coat. Technol.*, **120**, 16, 1999; doi: 10.1016/S0257-8972(99)00333-3
- [2] Sarakinos K., Music D., Nahif F., Jiang K., Braun A., Zilkens C., Schneider J.M., *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.*, **4**(7), 154, 2010; doi: 10.1002/pssr.201004133
- [3] Gavrilov N.V., Kamenetskikh A.S., Tretnikov P.V., Chukin A.V., *Surface & Coatings Technology*, **337**, 453, 2018; doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.01.058
- [4] Lu H., Ran Y., Zhao S., Jia L., Gao C., Guo Q., Jiang Z., Yang F., Wang Z., *Journal of Physics D: Applied Physics*, **52**(24), 245102, 2019; doi: 10.1088/1361-6463/ab10fe