

УДК 533.9.07

ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК БЫСТРЫХ НЕЙТРАЛОВ С ПОНИЖЕННЫМ РАБОЧИМ ДАВЛЕНИЕМ

канд. техн. наук, доц. В.Т. БАРЧЕНКО, Н.А. БАБИНОВ

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»)

Рассматривается создание плазменного источника быстрых нейтральных частиц, способного работать в условиях пониженного давления в технологической камере. Задача снижения рабочего давления источника быстрых нейтралов, являясь важной для повышения качества формируемых поверхностей и структур, требует решения двух проблем: снижения минимального давления горения газового разряда и обеспечения эффективной нейтрализации ускоренных ионов и получения пучка быстрых нейтралов. Авторами изучены обе проблемы, рекомендованы методы их решения. Предложена трехэлектродная конструкция источника быстрых нейтралов, в которой введение дополнительного электрода уменьшает нижний диапазон давлений газового разряда, а также позволяет создать разность давлений между внешним и внутренним объемами источника, что дополнительно снижает рабочее давление. Также рассмотрены характеристики созданного прототипа источника быстрых нейтралов.

Плазменные источники быстрых нейтральных молекул – эффективные устройства, которые находят применение в таких технологических процессах, как травление, очистка, активация поверхности. В отличие от аналогичных источников ионов, они не требуют компенсации заряда при обработке диэлектриков, а также не создают зарядовых эффектов.

Однако для создания современных высококачественных структур необходимо обеспечить достаточно низкое давление в технологическом объеме, вплоть до 0,1 Па. Несмотря на то, что в настоящее время созданы и активно используются различные источники быстрых нейтралов [1, 2], снижение рабочего давления до таких величин затруднительно. Поэтому создание источника быстрых нейтралов, способного работать в условиях низкого рабочего давления, является важной задачей, решение которой позволит улучшить качество многих технологических процессов.

В конструкции плазменного источника быстрых нейтралов можно выделить область генерации ионов, область ускорения ионов и область преобразования ионов в пучок быстрых нейтралов. В конкретных моделях некоторые из этих областей могут быть совмещены.

Методы снижения рабочего давления. Для снижения рабочего давления в источнике быстрых нейтралов необходимо решить две задачи:

1) обеспечить генерацию ионов, т.е. обеспечить горение газового разряда в условиях низкого давления;

2) создать условия для перезарядки ионов и превращения их в поток быстрых нейтралов.

При снижении давления пропорционально возрастает длина релаксации электрона по энергии, вследствие чего, если не обеспечить достаточно длительное нахождение электронов в области разряда, электроны уходят из области разряда с большой энергией, а напряжение горения разряда возрастает. Для того чтобы в условиях низкого давления сохранить напряжение горения разряда на приемлемо низком уровне, необходимо предпринять некоторые меры с тем, чтобы длина пути электронов до выхода из области разряда была сравнима с длиной релаксации. Наиболее простой метод – увеличение линейных размеров области генерации плазмы. Поскольку значимым для горения плазмы параметром является произведение давления на характерный размер области разряда, при уменьшении давления и соответствующем увеличении размеров параметры разряда останутся неизменными. Однако осуществить горение разряда при давлении порядка 0,1 Па только за счет больших размеров газоразрядной камеры источника, как правило, невозможно. Длина пробега электрона между актами ионизации при таком давлении составляет около 1,5 м, а длина релаксации по энергии – в несколько раз больше. Реализовать источник с размерами в несколько метров достаточно сложно, поэтому необходимы другие методы.

Уменьшение размеров газоразрядной камеры источника быстрых нейтралов возможно при использовании магнитного и электростатического удержания электронов в плазме. Внешнее магнитное поле, искривляя траектории электронов и увеличивая путь, пройденный ими в плазме, позволяет добиться стабильного горения разряда при напряжении менее 1000 В и давлении до 0,1 Па. Однако в ряде случаев использование источников магнитного поля крайне нежелательно из-за отрицательного влияния, которое они могут оказывать на другие области технологической камеры. В таком случае наиболее рациональным является использование электростатического удержания, хотя в целом электростатическое удержание менее эффективно, чем магнитное, оно позволяет, как будет показано ниже, добиться напряжения горения разряда в пределах 2–3 кВ при давлении 2 Па и характерных размерах источника около 20 см.

Помимо поддержания газового разряда необходимо обеспечить перезарядку ионов ускоренного пучка. Известны два основных процесса, которые могут быть использованы в качестве механизма нейтрализации: резонансная перезарядка на молекулах нейтрального газа и упругое отражение иона от поверхности металла с нейтрализацией. Резонансная перезарядка обладает большим сечением взаимодействия, благодаря чему эффективно используется во многих существующих моделях быстрых нейтралов. Для аргона это сечение составляет $1,24 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ при энергии ионов 2 кэВ, длина пробега – 3,34 см при давлении 1 Па [3]. Таким образом, если длина области перезарядки составляет по крайней мере 20 см (зачастую область перезарядки является область между источником и обрабатываемой поверхностью), этого вполне достаточно, чтобы удовлетворительно перезарядить ионный пучок при давлении 1 Па, ионы при этом будут составлять около 0,25 % от общего числа быстрых частиц. Однако если необходимо снизить давление до 0,1 Па, длина пробега относительно процесса резонансной перезарядки вырастет на порядок и составит 33,4 см. Если теперь считать, что для нейтрализации пучка необходимо прохождение им трех длин пробега (доля ионов в пучке при этом составит около 5 %), необходимая длина области перезарядки превысит 1 м, что во многих случаях больше расстояния между источником и обрабатываемой поверхностью.

Таким образом, при существенном снижении давления одной лишь резонансной перезарядки становится недостаточно для эффективной генерации потока быстрых нейтралов. Кроме того, если область перезарядки является эквипотенциальной, как в случае резонансной перезарядки ускоренного ионного пучка, непerezарядившиеся ионы попадут на обрабатываемую поверхность, обладая высокой энергией, что может вызвать нежелательные зарядовые эффекты при создании высокотехнологичных изделий. Поскольку невозможно обеспечить полную перезарядку первичного ионного пучка, в такой системе невозможно полностью избавиться от попадания быстрых ионов на обрабатываемую поверхность.

При давлениях, более низких, чем 1 Па, рациональнее использовать в качестве основного механизма генерации потока быстрых нейтралов упругое отражение потока ионов от поверхности с нейтрализацией. Основное преимущество данного механизма нейтрализации перед резонансной перезарядкой – независимость эффективности этого процесса от давления в системе, что позволяет существенно снизить нижнюю границу рабочего давления в технологической камере. Нейтрализация ионов с малой потерей энергии происходит при скользких углах падения ионов на поверхность металла, обычно полагают, что при углах не более 20° , хотя эти данные требуют экспериментальной проверки. Потери энергии согласно модели однократного бинарного отражения описываются следующей формулой:

$$E_{\text{отп}} / E_{\text{над}} = (1 + \mu^{-1})^{-2} (\cos(2\theta) - \sqrt{\mu^2 - \sin^2(2\theta)})^2,$$

где μ – отношение масс налетающей частицы и атома мишени; θ – угол падения относительно нормали к поверхности.

Видно, что потери энергии сильно зависят как от угла падения, так и от атомной массы металла, от поверхности которого происходит отражение. Поэтому металлическую поверхность, от которой происходит отражение, необходимо изготовить из металла с возможно большей атомной массой. Кроме того, необходимо создать систему, в которой значительная часть ионов будет попадать на поверхность металла, а углы падения будут небольшими относительно поверхности. Для этого наиболее подходит система из

набора пластин или трубочек, направленных под небольшим углом к проходящему ионному пучку. Также такая система может экранировать обрабатываемую поверхность от излучения плазмы, которое может повредить обрабатываемую поверхность.

На рисунке 1 представлена **трехэлектродная конструкция источника быстрых нейтралов**, созданная с учетом всех рассмотренных факторов, необходимых для снижения рабочего давления. Набор пластин, расположенных с шагом около 1 см, играет одновременно роль катода и места нейтрализации ионного пучка. Анод выполнен в виде рамки, опоясывающей катод, и заземлен. Помимо этого, введен дополнительный катод. Он имеет вид прямоугольной полости, открытой с одной стороны; основной и дополнительный катоды образуют замкнутый объем. Система из основного и дополнительного катодов образует электростатическую ловушку, реализуя эффект полого катода. Благодаря этому введение дополнительного катода значительно снижает рабочее давление источника.

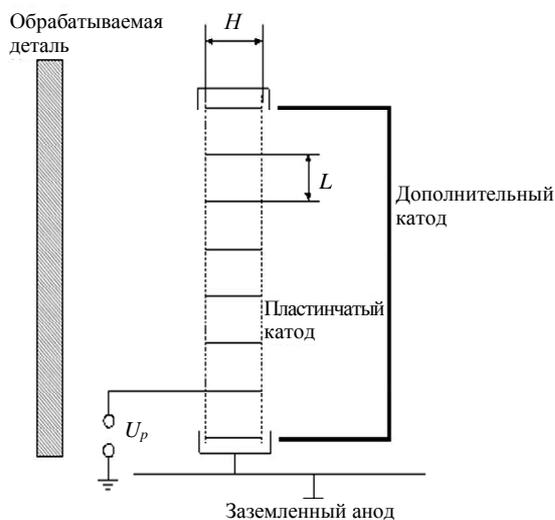


Рис. 1. Трехэлектродная конструкция источника нейтралов

Введение дополнительного электрода, кроме сказанного выше, позволяет локализовать положение плазмы и увеличить ее концентрацию, так как разряд горит внутри объема, образованного катодами, и не выходит за его пределы.

Процессы в прикатодной области. За счет криволинейной поверхности плазменного эмиттера вблизи поверхности катода траектории ионов направлены под углом к поверхности катода. Приблизительно можно считать, что плазма расположена на расстоянии ширины темного катодного пространства от поверхности пластин катода. В этом случае поверхность плазмы можно представить в виде набора цилиндрических поверхностей с радиусом, равным ширине темного катодного пространства. Для качественной оценки характеристик получающегося пучка нами проведено моделирование процессов нейтрализации ионов методом Монте-Карло. При этом считалось, что ионы выходят из плазмы перпендикулярно ее поверхности и ускоряются в области катодного падения, а потери энергии при отражении рассчитывались по модели однократного бинарного столкновения. На рисунке 2 представлены распределения частиц по энергиям, полученные путем разделения большого числа частиц в пучке по ста диапазонам энергий. При этом ширина темного катодного пространства взята 10 мм, а расстояние между пластинами d варьировалось.

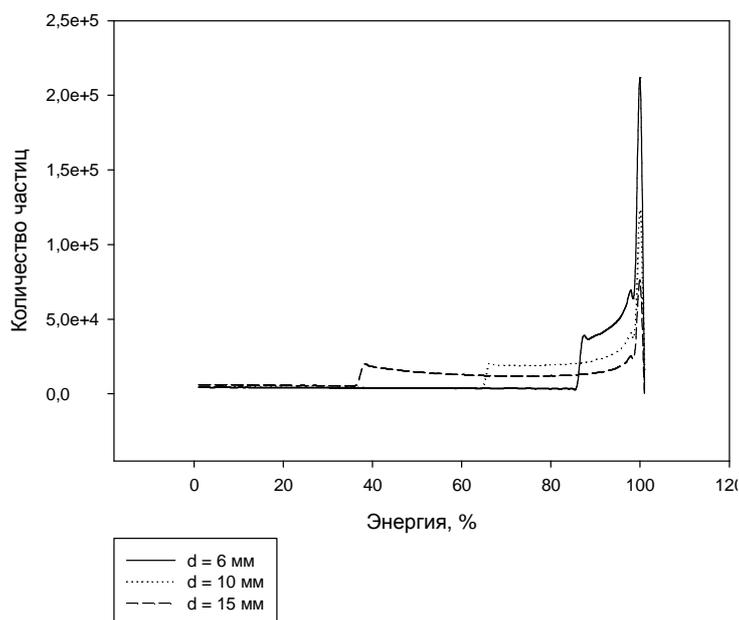


Рис. 2. Энергетический спектр быстрых нейтралов

Результаты моделирования показывают, что энергия частиц в пучке достаточно равномерно распределена от максимума, соответствующего ускоряющему напряжению, до минимума, который определяется потерей энергии, при максимально возможном угле по отношению к касательной к поверхности. Пик в энергетическом спектре, соответствующий максимуму энергии, вызван тем, что потери энергии остаются крайне малыми в некотором диапазоне углов падения, затем начинают почти линейно убывать. Кроме того, видно, что с ростом расстояния между пластинами потери сильно растут. Однако сделать расстояние между пластинами очень маленьким нельзя, поскольку в этом случае возрастет влияние негативных эффектов, неучтенных в данном моделировании, – попадание ионов в торец пластин и пролет катода без отражения от пластин. В литературе [4] представлены экспериментальные данные показывающие, что перезарядка происходит наиболее эффективно, когда расстояние между пластинами равняется их ширине.

Важной особенностью описанной системы является то, что ионы перезаряжаются в пределах симметричной потенциальной ямы, образованной катодом. Энергия быстрого нейтрала в этом случае определяется разницей потенциалов между точкой рождения иона и точкой его нейтрализации. Поскольку потенциальная яма симметрична, ионы не могут покинуть потенциальную яму с энергией, большей тепловой. Таким образом, в отличие от моделей источника быстрых нейтралов, в которых пучок перезаряжается в эквипотенциальной области, в выходном пучке рассмотренного источника отсутствуют ионы с высокой энергией.

Существенным является также то, что пластинчатый катод создает значительное сопротивление протеканию газа через него, особенно при низких давлениях, когда характер движения газа молекулярный. Поскольку разряд горит внутри источника, а для технологического процесса важно давление вне

его, создание разности давлений между внутренним и внешним объемами источника за счет напуска газа внутрь источника и непрерывной откачки позволяет снизить давление в технологической камере, оставив при этом давление внутри источника на достаточно высоком для горения разряда уровне. Так, если ширина источника 15 см, его длина 35 см, ширина пластин катода 12 мм, а расстояние между ними 10 мм, скорость потока через катод составит $0,9 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Так как такие скорости откачки достижимы для современных вакуумных насосов, давления внутри и вне источника могут отличаться в 2–3 раза.

Прототип источника. Рассмотренные выше соображения легли в основу разработки источника быстрых нейтронов. Для создания перепада давлений, обусловленного сопротивлением протеканию газа через пластинчатый катод, напуск газа осуществляется во внутренний объем источника, для более равномерного натекания газа внутри источника расположена газораспределительная пластина, через многочисленные отверстия которой натекает газ.

При зажигании разряда плазма равномерно заполняет весь внутренний объем источника, вне его разряд не горит. На рисунке 3 представлена зависимость напряжения горения разряда от давления аргона в рабочем объеме при токе разряда 60 мА.

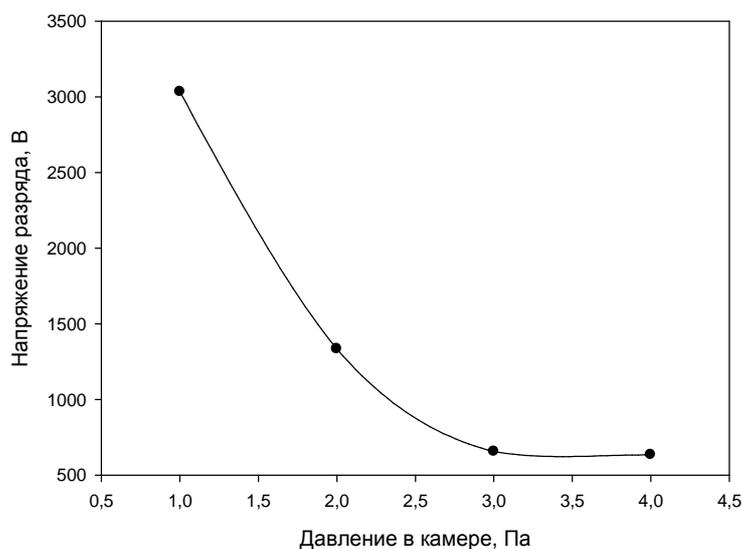


Рис. 3. Зависимость напряжения разряда от давления

Разряд стабильно горит при давлении 2 Па и ниже, хотя напряжение горения разряда начинает быстро расти при дальнейшем уменьшении давления в камере. Дальнейшего уменьшения рабочего давления можно достичь несколькими методами: во-первых, увеличением размеров источника (у данной модели размеры не превышали 25 см); во-вторых, за счет варьирования формы анода и его положения относительно дополнительного электрода можно уменьшить апертуру потерь электронов, благодаря чему минимальное рабочее давление также уменьшится. При этом следует учитывать, что уменьшение апертуры потерь электронов приведет к образованию двойного электростатического слоя вокруг анода для компенсации анодного тока [5]. Если уменьшение давления приведет к разрушению двойного электростатического слоя, разряд прервется вне зависимости от приложенного к нему напряжения. Поэтому для значительного снижения рабочего давления следует избегать условий образования двойного электростатического слоя.

Для определения перепада давлений, создаваемого пластинчатым катодом, была измерена зависимость давления в технологической камере от давления в области горения разряда источника, представленная на рисунке 4. Эта зависимость близка к линейной, причем давление в камере меньше давления внутри источника примерно в 2,5 раза.

Таким образом, даже при не очень большой скорости откачки, можно создать значительный перепад давлений. Если испытанный источник поместить в вакуумную камеру с большей скоростью откачки, минимальное рабочее давление дополнительно снизится.

Следует отметить, что диапазон рабочих давлений такого источника ограничен не только снизу, но и сверху. Если ширина темного катодного пространства становится меньше половины расстояния между пластинами, разряд начинает гореть между пластинами катода, и источник перестает функционировать. Однако давление, при котором это происходит, достаточно велико и неинтересно с точки зрения практического применения.

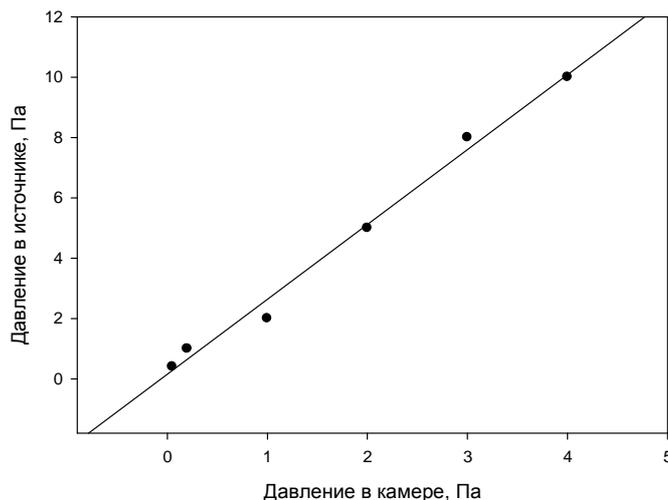


Рис. 4. Зависимость давления внутри источника от давления в камере

Заключение. В ходе проделанной работы были рассмотрены основные параметры, влияющие на минимальное рабочее давление в источнике быстрых нейтралов: минимальное давление поддержания газового разряда и минимальное давление, при котором возможна эффективная перезарядка ускоренного ионного пучка. Использование электростатического удержания электронов позволило снизить минимальное давление горения газового разряда, а переход от резонансной перезарядки ионов к нейтрализации при отражении от поверхности металла – минимальное давление перезарядки ионного пучка. Поскольку перезарядка пучка происходит в пределах симметричной потенциальной ямы, в получающемся пучке нейтралов полностью отсутствуют ионы с высокой энергией.

Результатом работы стало снижение рабочего давления источника быстрых нейтралов до 1 Па, при этом обеспечивается отсутствие быстрых заряженных частиц в формируемом источником пучке быстрых нейтралов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shimokawa, F. Reactive-fast-atom beam etching of GaAs using Cl₂ gas / F. Shimokawa // J. Appl. Phys. – 1989. – V. 66, № 6. – P. 2613 – 2618.
2. Маишев, Ю.П. Физические принципы формирования пучков быстрых атомов резонансной перезарядкой пучков ионов / Ю.П. Маишев, С.Л. Шевчук, Т.Н. Матвеев // Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника (физика, технология, диагностика и моделирование: тр. ФТИАН. Т. 19. – М.: Наука, 2008. – С. 69 – 77.
3. Грановский, В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.Л. Грановский. – М.: Изд-во «Наука». Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 543 с.
4. Барченко, В.Т. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / В.Т. Барченко, Ю.А. Быстров, Е.А. Колгин. – СПб.: Энергоатомиздат, 2001. – 332 с.
5. Григорьев, С.Н. Модификация поверхности тлеющим разрядом с электростатическим удержанием электронов / С.Н. Григорьев, А.С. Метель. – М.: МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2007. – 452 с.

Поступила 25.02.2014

PLASMA FAST NEUTRALS SOURCE WITH LOW OPERATING PRESSURE

V. BARCHENKO, N. BABINOV

The article is devoted to creating plasma fast neutrals source with low operating pressure. The problem of reducing operating pressure of the fast neutrals source that is important for improving the quality of the formed surfaces and structures can be divided into two parts: reducing the minimal pressure required to maintain gas discharge and creating conditions for effective neutralization and creation of the fast neutrals beam. The article discusses both the problems and proposes the methods to solve them. The three-electrode system is proposed in which insertion of the third electrode reduces the lower bound of the operating pressure range as well as allows creating the pressure differential between internal and external volumes of the fast neutrals source. The article also discusses the characteristics of the created fast neutrals source prototype.