

ПОЛУЧЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ

А.Е. Баранов, Е.А. Вострикова, Л.И. Елизаров, А.А. Иванов, А.О. Ливадный, А.Н. Пастухов, А.А. Пташник

РНИЦ «Курчатовский институт», пл. Курчатова 1, Москва, 123182, Россия

E-mail: andr@ard.kiae.ru

Рассматривается возможность получения отрицательных ионов водорода при плазменном травлении углерода в водородной плазме пучково-плазменного разряда. Перспективность использования пучково-плазменного разряда для травления углерода связана с тем, что плазменное травление является одним из способов создания автоэмиссионных углеродных катодов с большой плотностью эмиссионных центров.

PACS: 81.20.Ka

1. ВВЕДЕНИЕ

Пучково-плазменный разряд (ППР), основные физические принципы работы которого достаточно давно известны [1,2], применяется для различных технологических приложений. Главным преимуществом систем на основе ППР является получение плотной плазмы ($10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при низких давлениях, высокий энерговыход мощности пучка в плазму (40...70%) и наличие широкого набора характеристик для управления параметрами плазмы (ток и ускоряющее напряжение электронного пучка, его геометрия, величина и конфигурация внешнего магнитного поля). Несмотря на то, что оптимальные режимы зажигания разряда были найдены еще в 60-х годах [1,2], на некоторых установках их не смогли реализовать по ряду причин. В частности американская установка LAPPS (Large Area Plasma Processing System) может работать только в режиме деградационного спектра, что затрудняет проведение на такой установке эффективного плазменного травления [3]. Однако на такой установке был получен однородный слой плазмы с шириной и длиной порядка 60 см.

Варьирование параметров плазмы в широких пределах позволяет применять стационарный пучково-плазменный разряд в плазмохимии [4]. Известно, что в пучково-плазменном разряде энергия вкладывается в электронную компоненту плазмы за счет процессов коллективного взаимодействия. Значительная степень ионизации и большое превышение температуры электронов над температурами остальных компонент плазмы в пучково-плазменном разряде приводит к преобладанию электронного удара над остальными процессами неупругих столкновений. В этой связи широкое применение молекулярного газа в качестве рабочего, в пучково-плазменном разряде, позволяет эффективно проводить плазмохимические реакции, обеспечивая поток энергии в колебательные степени свободы молекул [5]. Таким образом, в плазменно-пучковом разряде плазмохимические реакции эффективно проводятся в различных молекулярных газах, в том числе в электроотрицательных.

Изучение зажигания пучково-плазменных разрядов в электроотрицательных (галогеносодержащих) средах связано с повышенным интересом к плазменному травлению различных материалов [6]. Не исключена также возможность плазменного травления в ППР углеродных материалов. Перспективность использования

пучково-плазменного разряда для травления углерода связана, прежде всего, с тем, что плазменное травление является одним из способов создания автоэмиссионных углеродных катодов с большой плотностью эмиссионных центров [7].

В данной работе в связи с проведением на установке «Оратория 10» ряда экспериментов по травлению углерода в водородной плазме, рассматривается дополнительная возможность получения отрицательных ионов водорода за счет взаимодействия атомов водорода с углеродной поверхностью. Хорошо известно, что образование отрицательных ионов водорода в объеме плазмы происходит за счет процессов диссоциативного прилипания (dissociative attachment) холодных электронов с энергией порядка 1 эВ к колебательно-возбужденным молекулам водорода [8]. При этом сечение реакции диссоциативного прилипания возрастает при «прилипании» электронов к молекулам с высокими колебательными степенями свободы. Получение молекул водорода с высоким колебательным уровнем возможно как за счет столкновений молекул водорода с электронами, так и за счет рекомбинации (recombinative desorption) двух атомов водорода на поверхности стенок. Эти процессы лежат в основе получения отрицательных ионов водорода в tandemных источниках отрицательных ионов (tandem large volume negative ion sources) [9].

В последнее время обращено внимание на то, что материал поверхности стенок сильно влияет на получение молекул с высоким колебательным уровнем [9]. Так, использование покрытий стенок, состоящего из танталовых нитей, позволяет увеличить ток отрицательных ионов в 1,4 раза по сравнению с аналогичными нитями из вольфрама.

Отметим, что в связи с экспериментами, связанными с астрохимическими задачами, был опубликован ряд теоретических работ, объясняющих формирование отрицательных ионов водорода в межзвездной пыли за счет содержащихся в ней углеродных «вкраплений» [10]. Расчет скорости рекомбинации по механизму Ридила атомов водорода на «шероховатой» углеродной поверхности с помощью теории функционала плотности (density functional theory) показал, что при определенных условиях скорость рекомбинации на углеродной поверхности гораздо больше, чем на поверхности металлов [11]. Таким образом, возможно, что присутствие неоднородной углеродной поверхности в плаз-

менно-пучковым разряде может значительно повысить выход отрицательных ионов.

Изучение формирования отрицательных ионов водорода в экспериментах на установке «Оратория 10» будет проводиться аналогично методу, который использовался в работе [6], где исследовалась зависимость концентрации отрицательно и положительно заряженных частиц от расстояния до центра пучка в плазменно-пучковом разряде при использовании в качестве рабочего газа SF₄.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

Схема экспериментальной установки «Оратория 10», представлена на Рис.1. Для зажигания пучково-плазменного разряда в установке обеспечиваются:

- наличие вакуума не менее $\sim 10^{-6}$ Торр;
- наличие магнитного поля пробочной конфигурации (типа "зеркальная магнитная ловушка");
- наличие электронного пучка с энергией электронов 3...10 кэВ и током не менее 0.5 А;
- наличие системы газонапуска, обеспечивающей стабильный поток рабочего газа в вакуумную камеру.

В вакуумной камере установки (1) поддерживается фоновое (остаточное) рабочее давление на уровне $5 \cdot 10^{-6}$ Торр. Поддержание рабочего давления обеспечивается системой вакуумной откачки (6). Вакуумная система установки «Оратория 10» включает в себя рабочую вакуумную камеру объемом 120 литров, систему дифференциальной откачки, систему высоковакуумной откачки, систему форвакуумной откачки и систему газонапуска.

Магнитное поле пробочной конфигурации с напряженностью 500...000 Гс на оси, в центре ловушки с пробочным отношением 2-4 создается посредством магнитных катушек (2).

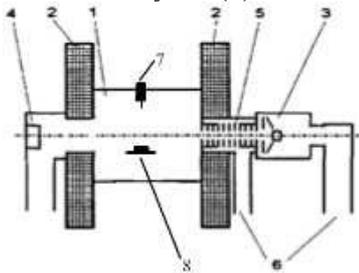


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 - вакуумная камера; 2 - магнитные катушки;
3 - электронная пушка; 4 - приемник электронов;
5 - система дифференциальной откачки; 6 - система вакуумной откачки; 7 - зонд; 8 - образец

Пучок электронов с максимальной энергией 6 кВт и током 2 А, проходящий по оси установки и, соответственно, по оси пробочной магнитной конфигурации, осуществляет ионизацию рабочего газа и нагрев электронов при взаимодействии с плазмой. На установке «Оратория 10» в качестве инжектора электронов используется электронная пушка (3), которая создает в рабочей камере пучок круглого сечения.

Зондовая система установки «Оратория 10» включает в себя одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра (7), генератор пилообразного напряжения, аналогово-цифровой преобразователь и цифровой осциллограф. Зонд представляет собой танталовую проволоку диаметром 0.2 мм, с рабочей длиной 3 мм. Предполагается (см. Рис.1), что зонд будет помещаться в камеру между стенкой и плазменной поверхностью. ВАХ одиночного зонда Ленгмюра позволяет оценить основные характеристики плазмы: температуру электронов, концентрацию электронов и положительных ионов.

Исследуемый углеродный образец (8) помещается на предметный столик на расстоянии $R \sim 10 \dots 15$ мм от пучка. Фотографии углеродного образца, сделанные после предварительного плазменного травления представлены на Рис.2.

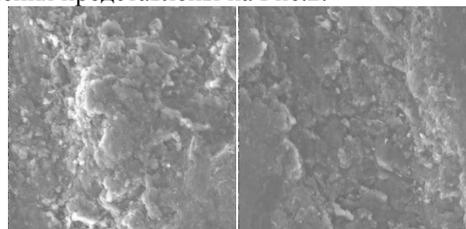


Рис.2. Поверхность углеродного образца после травления, увеличенная в 400 раз

Для определения концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц в камере, как в случае зондовой диагностики пучково-плазменного разряда в электроотрицательных средах (SF₆ и CF₄), возможно использование метода двойного зонда. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с использованием одиночного зонда именно при наличии отрицательных ионов в плазме [6].

Симметричный двойной зонд состоит из двух одинаковых одиночных зондов, через которые течет равный ток. Ток через плазму в зонд равен ионному току на один из зондов, отрицательно смещенный относительно плазмы. Наряду с хорошей устойчивостью метода двойного зонда по отношению к большим значениям n_i^- / n_e , диагностика плазмы с его применением может производиться в непосредственной близости к электронному пучку, где плотности заряженных частиц столь велики, что электронные токи даже при малых положительных потенциалах могут разрушить зонд. Таким образом, изменение концентрации заряженных частиц в нашей работе будет исследоваться в зависимости от положения двойного зонда по отношению к центру пучка.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Присутствие отрицательных ионов при плазменном травлении углеродных образцов в ППР будет влиять на скорость и анизотропность травления.

Разряд формирует в плазмообразующем газе химически активные частицы, которые, взаимодействуя с поверхностью полупроводника или металла, образуют легко летучие химические соединения, удаляемые вакуумной системой. Скорость травле-

ния в таких системах определяется количеством реакционно-способных молекул, достигающих поверхности подложки [6,7].

Для увеличения анизотропности и скорости травления в рабочую камеру установки «Оратория 10» будет вводиться ВЧ-электрическое поле. Плазменное травление будет более эффективно за счет того, что глубина проникновения поля в плазму, состоящую из положительных и отрицательных ионов, будет больше, чем проникновение в плазму, состоящую из положительных ионов и электронов. Следует также отметить, что отрицательные ионы сами могут участвовать в травлении в качестве химически активных частиц.

Как уже было отмечено, плазменное травление углеродных поверхностей применяется для создания автоэмиссионных катодов с большой плотностью эмиссионных центров [7]. Среди актуальных задач современной электроники важное место отводится созданию стабильных автоэмиссионных катодов, способных длительное время работать в условиях высокого технического вакуума ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ Торр). Преимуществами автоэмиссионных катодов по сравнению с другими видами катодов, являются: отсутствие накала; высокая плотность тока автоэмиссии (~ 20 мА/см²); устойчивость к колебаниям температуры; малая чувствительность к внешней радиации; безинерционность; экспоненциально высокая крутизна вольт-амперных характеристик. Совокупность этих свойств обуславливает перспективность использования автоэмиссионных катодов в различных электронных приборах.

Основная трудность в создании стабильных автоэлектронных катодов состоит в том, что автоэлектронная эмиссия чрезвычайно чувствительна к изменению геометрии катода и состоянию его поверхности. Анализ работ по автоэлектронной эмиссии показывает, что материалы для катодов, предназначенных для работ в условиях высокого технического вакуума, должны обладать специфической совокупностью свойств, таких, как: низкие и стабильные значения работы выхода электронов и коэффициента катодного распыления, а также высокие значения механической прочности, электро- и теплопроводности [7]. Кроме того, материалы автокатодов должны быть технологичными и достаточно доступными.

Многочисленные исследования показали, что для получения больших автоэмиссионных токов необходимо увеличение количества параллельно работающих эмиссионных центров. Использование плазменного травления, применительно к углеродным поверхностям, позволит увеличить плотность эмис-

сионных центров, что приведет к увеличению эффективности автоэмиссионных углеродных катодов.

Авторы благодарны профессору Евгению Павловичу Шешину (МФТИ) за полезные обсуждения в ходе работы и помощь в получении фотографий углеродных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Ахиезер, Я.Б. Файнберг // *ЖЭТФ*. 1951, т.21, с.1262-1269.
2. А.А. Иванов, В.Г. Лейман. *Электронные пучки в плазмохимии*. Химия плазмы, вып.5. М.: «Атомиздат», 1978, с.176-221.
3. W.M. Manheimer, R.F. Fernsler, M. Lampe and R.A. Meger. Theoretical overview of the large-area plasma processing system (LAPPS) // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2000, v.9, p.370-386.
4. А.А. Иванов, Т.К. Соболева, П. Юшманов. Перспективы использования плазменно-пучкового разряда в плазмохимии // *Физика Плазмы*. 1977, т.3, с.155-162.
5. В.М. Атаманов, Т.К. Соболева, А.Н. Жужунашвили и др. Экспериментальное исследование пучково-плазменного разряда с целью проведения плазмохимических реакций // *Физика плазмы*. 1979, т.5, №1, с.204-210.
6. Ю.Ф. Наседкин, Г.Б. Левадный, А.А. Серов и др. Зондовая диагностика пучково-плазменного разряда в электроотрицательных средах // *Теплофизика высоких температур*. 1985, т.23, №1, с.156-162.
7. Е.П. Шешин. *Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов*. М.: «МФТИ», 2001.
8. M. Bacal, A. Hatayama, J. Peters. Volume Production Negative Hydrogen Ions Sources // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005, v.33(6), p.1847-1871.
9. M. Bacal, A.A. Ivanov, Jr.M. Glass-Maujean et al. Contribution of wall material to the vibrational excitation and negative ion formation in hydrogen negative ion sources // *Rev. Sci. Instrum.* 2004, v.75, №5, p.1699-1703.
10. M. Capitelli, C. Gorse. Open problems in the physics of volume H/D⁻ sources // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005, v.33(6), p.1832-1844.
11. B. Jackson, D. Lemoine. Eley-Rideal reactions between H atoms on metal and graphite surfaces: The variation of reactivity with substrate // *J. Chem. Phys.* 2001, v.114, №1, p.474-482.

HYDROGEN NEGATIVE ION OBTAINMENT INTO BEAM-PLASMA DISCHARGE

A.E. Baranov, E.A. Vostrikova, L.I. Elizarov, A.A. Ivanov, A.O. Livadny, A.N. Pastukhov, A.A. Ptashnik

In this paper it is considered a possibility of a hydrogen negative ion obtainment at hydrogen plasma etching of carbon into a beam-plasma discharge. The usage perspective of beam-plasma discharge for carbon etching is connected with this fact that a plasma etching is one of a way on the auto emission carbon cathodes with the emission high density centers.

ОТРИМАННЯ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ ВОДНЮ У ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВОМУ РОЗРЯДІ

А.Є. Баранов, О.О. Вострикова, Л.І. Єлізаров, А.А. Іванов, О.О. Лівадний, А.Н. Пастухов, А.А. Пташник

У роботі розглядається можливість отримання негативних іонів водню при плазмовому травленні вуглецю у водневій плазмі пучково-плазмового розряду. Перспективність використання пучково-плазмового розряду для травлення вуглецю пов'язана з тим, що плазмове травлення є одним із способів створення автоемісійних вуглецевих катодів з високою густиною емісійних центрів.