

СТАЦИОНАРНЫЙ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЙ РАЗРЯД ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua

Описан стационарный пучково-плазменный разряд умеренной мощности и приведены результаты его экспериментального исследования в виде ряда параметрических зависимостей, характеризующих работу электронной пушки, газовой мишени, а также поведение образуемой при этом плазмы.

ВВЕДЕНИЕ

Плазма пучково-плазменного разряда (ППР), так называемая пучковая плазма, все чаще используется не только в чисто физических исследованиях и при решении прикладных задач, связанных с разработкой новых генерирующих [1] и ускорительных [2] устройств, но и в технологических целях [3-8]. Так в работах [3-6] показано, что плазма импульсного ППР в слабом магнитном поле и газовой среде низкого давления может быть использована для: ионного травления полупроводниковых материалов; напыления пленок с однородной структурой; микроэлектроники; модификации поверхностных свойств твердых материалов, в частности, за счет селективности физических и химических процессов на поверхности материалов. Проведены испытания технологии травления ионными потоками из ППР полупроводниковых гетероструктур Al-GaAs / InGaAs / GaAs, перспективных для создания СВЧ-полевых транзисторов миллиметрового диапазона. Проведенные исследования свидетельствуют о малой плотности радиационных повреждений и возможности использования ППР в технологии изготовления гетероструктурных СВЧ-приборов. Пучково-плазменные химические реакторы используются также для получения графена и напыления алмазоподобных углеродистых пленок. В работах [7-9] сформулировано предложение об использовании ППР в качестве механизма и средства создания сепарационной многокомпонентной плазмы и селективного разделения элементов и их стабильных изотопов с самовозбуждением электронно-циклотронных и ионно-циклотронных колебаний и самостоятельным нагревом электронов и ионов образуемой плазмы. Существенным достоинством создания плазмы для сепарационных технологий с помощью ППР является тот факт, что электронный пучок от внешнего источника в вакууме и продольном магнитном поле распространяется практически без потерь в пределах выбранных размеров сепарирующих устройств, т.е. плазма может быть образована в требуемой точке (области) инжекционного тракта длиной в несколько метров, а именно, в зоне разделения. Использование ППР в сепарационных устройствах и технологиях позволяет упростить компоновку и собственно систему сепаратора и снизить жесткость требований к отдельным его узлам, в частности, к магнитной системе. В [10] отмечается, что основными тенденциями в практике использования электрических разрядов

низкого давления для реализации процессов роста, травления и модификации пленок современных материалов, в том числе пучково-плазменного, является генерация плотной неравновесной плазмы регулируемых параметров, а также создание слоев однородной плазмы большой площади. Для получения такой плазмы, удовлетворяющей требованию реализации максимально больших значений таких параметров как плотность (10^{13} см⁻³ и более) и неравномерность, а также их гибкого регулирования с целью управления плазмохимическими реакциями, с успехом может служить стационарный пучково-плазменный разряд, реализуемый в режимах слабой надкритичности энергоотдачи электронного пучка и с возможным управлением энергетическим вкладом в плазму разряда в процессе пучково-плазменного взаимодействия. В [11] с учетом результатов работы [8] высказывается суждение об использовании селективного магнито-ротационного нагрева в пучково-плазменном разряде для обогащения иттербием изотопом Yb^{168} . Исходное содержание Yb^{168} в природном иттербии – 0,13 %, необходимая степень обогащения – более 30 %. Актуальность и важность решения этой задачи заключается в том, что радиоактивный изотоп Yb^{169} имеет перспективы широкого потребления в медицине: в кардиологии, онкологии и других разделах радионуклидной терапии, а нарабатывается он в ядерном реакторе при облучении нейтронами стабильного изотопа Yb^{168} .

Таким образом, в работах [3-11] сформулированы задачи, требующие использования пучково-плазменного взаимодействия и ППР для их решения. В связи с этим и необходимостью решения других прикладных задач могут быть востребованы ППР различного типа: импульсные и стационарные, низкого и среднего энергосодержания, с изменяющимися, но контролируемыми параметрами в широком диапазоне значений. Поэтому в данной работе предприняты исследования стационарного пучково-плазменного разряда средней мощности, образующегося в глубоком вакууме и магнитном поле при взаимодействии электронного пучка с локализованной в вакуумном пространстве газовой мишенью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты по исследованию стационарного пучково-плазменного разряда проводились на установке, схематическое изображение которой приведено на Рис.1.

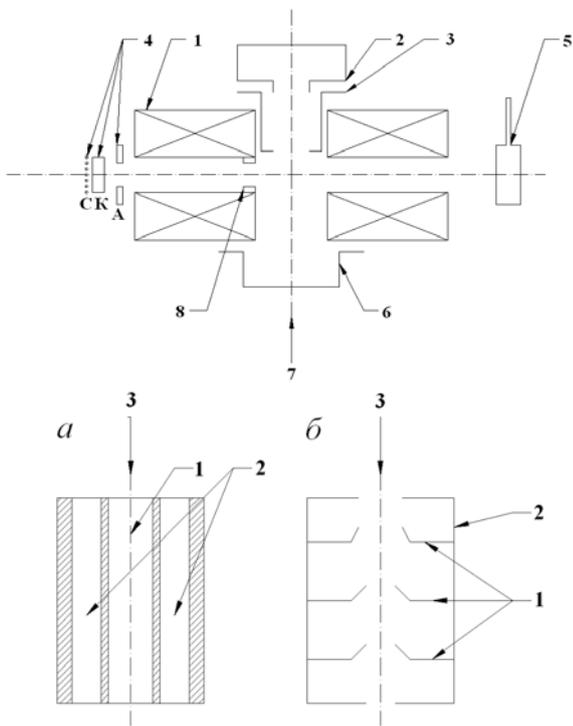
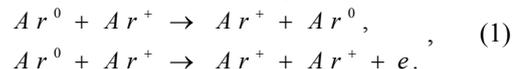


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

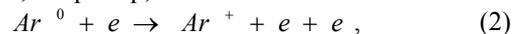
1 – магнитная система; 2 – формирователь сверхзвукового потока рабочего газа; 3 – коллиматор; 4 – электронная пушка, А – анод, К – катод, С – спираль подогревателя; 5 – приемник электронного пучка; 6 – крионасос; 7 – тракт зондирующего пучка быстрых нейтральных атомов; 8 – магнитный зонд. а – коллиматор канального типа: 1 – коллимирующий канал; 2 – каналы криоохлаждения; 3 – направление движения потока. б – коллиматор диафрагменного типа: 1 – набор сепарирющих и коллимирующих диафрагм; 2 – криостенка (криоповерхность с температурой 20°K); 3 – направление движения потока

Она представляет собой магнитную ловушку пробочной конфигурации с пробочным отношением $R = 1,5$. Магнитная система (1) состоит из двух криогенно охлаждаемых многovitковых соленоидов. Конструкция соленоидов в принципе позволяла вести их охлаждение различными криогентами: жидким азотом или водородом. Температура обмотки в первом случае могла варьироваться в пределах 77,36...63,15 К, во втором случае равнялась 20,4 К. Выбор конфигурации формирователя сверхзвукового потока газа и его коллиматора производился с учетом данных работы [12]. Основным элементом формирователя (2) сверхзвукового потока рабочего вещества является сверхзвуковое сопло Лавала оптимальной конфигурации, для которой характерно значение отношения длины l_c сверхзвуковой части сопла к диаметру d_c выходного отверстия сопла $l_c / d_c \sim 1$. Помимо этого в состав формирователя входят камера напуска рабочего газа и устройство его очистки путем фракционирования основного вещества и высококипящих примесей. В работе были испытаны коллиматоры (3) двух типов: канальный и диафрагменный. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки: первый – прост в изготовлении и эксплуатации, но имеет ограниченный

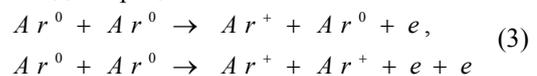
ресурс работы из-за нарастания конденсата на внутренней поверхности коллимирующего канала. Второй имеет практически неограниченный ресурс работы и дает меньшую расходимость потока, но более сложен в изготовлении и настройке. При подготовке настоящих исследований был выбран вариант электронной пушки (4) с термокатодом, поскольку он, в отличие от плазменных источников электронов (ПИЭЛ), позволяет наиболее простым способом регулировать ток пучка изменением эмиссии при уменьшении (увеличении) тока накала катода и при одинаковой плотности тока эмиссии получать пучки с меньшим сечением (большей плотностью тока). Используемая электронная пушка представляет собой трехэлектродную систему “анод-катод-подогреватель катода”, которая может работать в режиме получения потока лучистой энергии или потока ускоренных электронов на обратную сторону катода для его подогрева. Помимо основных узлов (1-4), установка была укомплектована криогенно охлаждаемым приемником (5) электронного пучка для измерения его энергосодержания; крионасосом (6) для откачки нейтральных частиц сверхзвукового потока, движущихся с тепловыми скоростями; магнитным зондом (8) для измерения полного энергосодержания плазмы и инжектором быстрых нейтральных атомов водорода (H_1^0) и аргона (Ar_1^0) для определения максимальных значений плотности плазмы, превосходящих значение критической плотности для длины волны $\lambda = 8$ мм зондирующего СВЧ-сигнала. Для определения плотности плазмы большей, чем $1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, производилось зондирование пучком быстрых нейтральных атомов аргона. В плазме, состоящей из однозарядных ионов аргона, основным процессом, приводящим к ослаблению первичного пучка Ar^0 , является процесс ионизации:



Сечение этого процесса равно $2,8 \times 10^{-15} \text{ см}^2$ для энергии атомов Ar^0 , равной 20 кэВ. Сечение других процессов, например,



существенно меньше вышеуказанного и равно $\sigma_e = 6,6 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ и им можно пренебречь. В предположении, что степень ионизации плазмы близка к 100 %, вкладом процесса



в общем ослаблении тока зондирующего пучка Ar^0 можно также пренебречь. Обработка полученных данных проводилась только для случая $Z = 1$ ввиду отсутствия данных о величинах экспериментальных сечений взаимодействия быстрых нейтральных атомов с многозарядными ионами аргона и об относительном содержании их в объеме.

Измерение плотности нейтрального газа в сверхзвуковом потоке проводилось по ослаблению пучка быстрых нейтральных атомов H_1^0 , а его радиальный профиль определялся с помощью подвижных ионизационных манометров типа МИ-10с. Для определения плотности плазмы использовался СВЧ-интерферометр с рабочей длиной волны $\lambda = 8$ мм.

Измерение амплитуд и фаз прошедшей и отраженной волн позволило определить изменение максимальной и средней плотности и получить информацию о радиальном распределении плотности плазмы в разряде.

Далее, рассмотрим серию рисунков (2-8), дающих представление о параметрах электронного пучка, газовой мишени и образованной в ППР умеренной мощности плазмы. На Рис.2 и 3 представлены зависимости, характеризующие параметры электронного пучка – тока и напряжения. Мощность нагрева изменялась от 70 до 150 Вт. Максимальные параметры стационарного электронного пучка: $I_e \leq 1$ А, $U_e \leq 5$ кВ.

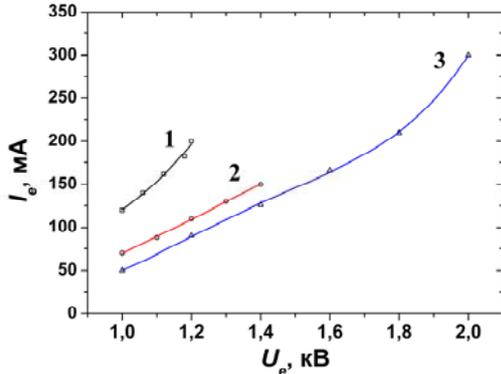


Рис.2. Зависимость тока электронного пучка от величины приложенного напряжения при различных токах спирали подогрева катода. 1 – 45 А; 2 – 40 А; 3 – 34 А

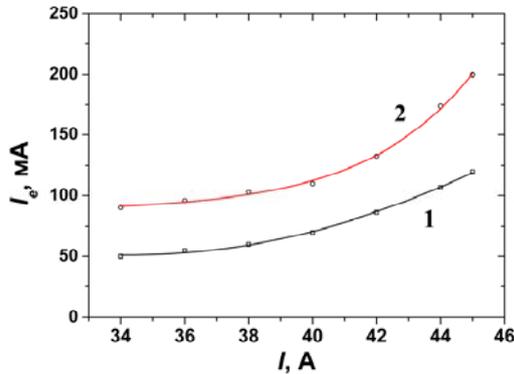


Рис.3. Зависимость тока электронного пучка от тока спирали подогрева катода для различных ускоряющих напряжений. 1 – 1 кВ; 2 – 1,2 кВ

Результаты экспериментов по определению толщины или, что то же самое, плотности сверхзвукового потока приведены на Рис.4. Кроме того, проведенные измерения (Рис.5) показали, что доля выносимого поперек потока вещества составляет $10^{-2} \dots 10^{-5}$ от величины основного потока.

Качество формирования сверхзвукового потока определяется приростом Δp давления у основных потребителей высокого вакуума: электронной пушки – от $3 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Торр; по тракту пучка быстрых нейтральных атомов H_1^0 или Ar_1^0 – от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ Торр, что не препятствует их работе в штатном режиме.

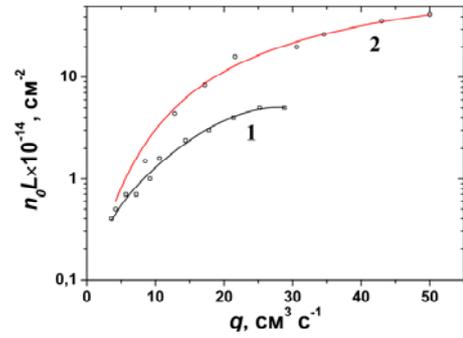


Рис.4. Зависимость толщины сверхзвукового потока в вакууме от объемного расхода рабочего газа (Ar) для коллиматоров канального (кривая 1) и диафрагменного типа (кривая 2)

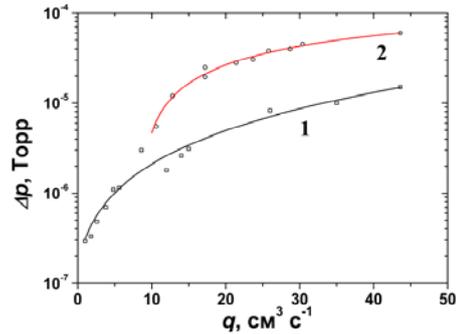


Рис.5. Зависимость прироста давления у электронной пушки и по тракту диагностического пучка быстрых нейтральных атомов от объемного расхода рабочего газа (Ar). 1 – у электронной пушки; 2 – по тракту пучка H_1^0

На Рис.6-8 приведены значения параметров образованной плазмы: плотности, энергосодержания и поперечных размеров плазменного столба.

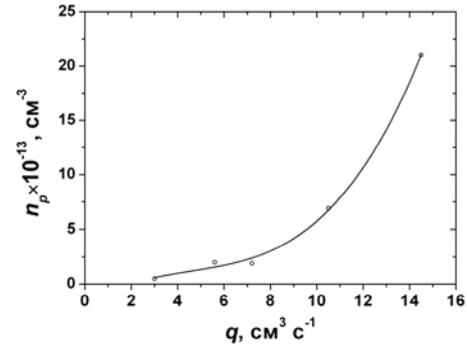


Рис.6. Зависимость плотности плазмы от объемного расхода рабочего газа (Ar) для энергии электронов пучка $E_e = 5$ кэВ

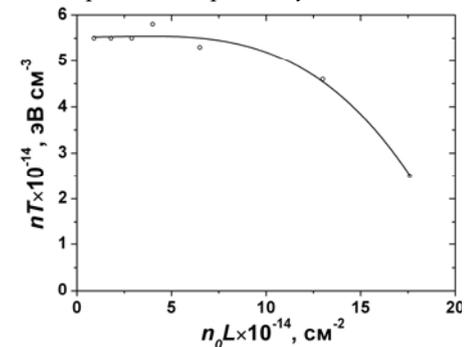


Рис.7. Зависимость энергосодержания плазмы от толщины сверхзвукового потока

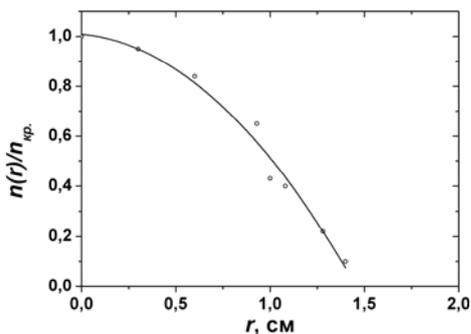


Рис.8. Радиальное распределение плотности плазмы, нормированной на величину критической плотности для зондирующего сигнала с длиной волны $\lambda = 8$ мм

Видно, что при умеренных затратах мощности ($0,6 \leq W \leq 5$ кВт) возможно образование плазмы с плотностью $\sim 1,7 \cdot 10^{13}$ см⁻³, энергосодержанием $\sim 5,5 \cdot 10^{14}$ эВ/см⁻³ (среднее значение T_e и $T_i \sim 15$ эВ) и поперечным размером $d_p \sim 3$ см при диаметре электронного пучка $d_b \leq 1$ см.

ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование стационарного пучково-плазменного разряда умеренной мощности ($W \leq 5$ кВт). Определены его макро- и микропараметры, а также пороговая мощность, при которой достигается плотность плазмы $N_p = N_{cr}$ для СВЧ-волны зондирования $\lambda = 8$ мм.

2. Использование элементов криотехники позволило обеспечить необходимые вакуумные условия и напряженности магнитного поля в условиях длительного стационарного режима.

3. Результаты работы могут быть использованы для получения стационарной плазмы в экспериментах по разделению вещества на элементы и их изотопы, для плазменного или ионного травления в чистом виде различных материалов, для модификации поверхностных свойств твердых тел и в решении других прикладных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.Н. Антонов, Ю.П. Блюх, Ю.А. Дегтярь, А.М. Егоров, О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, А.В. Лодыгин, М.Г. Любарский, Л.А. Митин, В.А. Мирошниченко, И.Н. Онищенко, В.Г. Свиченский, Г.В. Сотников, Я.Б. Файнберг. Пучково-плазменный генератор, основанный на взаимодействии электронного пучка с плазменно-волноводной структурой, ограниченной цепочкой индуктивно связанных резонаторов // *Физика плазмы*. 1994, т.20, №9, с.777-781.
2. В.И. Карась, Е.А. Корнилов, Я.Б. Файнберг. Линейный индукционный ускоритель зарядово-компенсированных ионных пучков для инерци-

ального УТС // *Украинский физический журнал*. 1998, т.43, №9, с.1181-1186.

3. Н.В. Исаев, А.И. Чмиль, Е.Г. Шустин. Ионные потоки из области пучково-плазменного разряда // *Физика плазмы*. 2004, т.30, №3, с.292-297.
4. Н.В. Исаев, М.П. Темиряева, В.П. Тараканов, Ю.В. Федотов. Пучково-плазменный разряд в слабом магнитном поле как источник плазмы для плазмохимического реактора // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2008, №4, с.169-173.
5. Ю.И. Латышев, Е.Г. Шустин, А.Ю. Латышев, Н.В. Исаев, А.А. Щепкин, В.А. Быков. Новый метод получения графеновых пленок большой площади в плазменном разряде // *Тезисы докладов 2^{го} Международного форума по нанотехнологиям*. Москва, октябрь 2009 г., с.465-467.
6. Н.В. Исаев, И.Л. Клыков, В.В. Песков, Е.Г. Шустин // *Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС*, 2010, с.317.
7. Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. Пристрій для розділення речовини на елементи / Є.І. Скібенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов // *Промислова власність. Офіційний бюлетень*. 2007, №10.
8. Е.И. Скибенко. Физико-технические аспекты создания устройства магнито-плазменного разделения вещества на элементы и их изотопы на основе пучково-плазменного разряда // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2009, №6, с.67-85.
9. Е.И. Скибенко. Пучково-плазменный разряд в плотной газовой среде и сильном магнитном поле, его особенности и возможные применения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2010, №4, с.219-225.
10. А.А. Серов. Релаксация электронного пучка в неоднородной плазме стационарного пучково-плазменного разряда умеренно низкого давления // *Физика плазмы*. 2009, т.35, №7, с.624-635.
11. А.А. Боброва, А.Е. Дубинов, М.И. Есин, С.В. Золотов, А.Н. Максимов, В.Д. Селемир, И.И. Сидоров, А.Ю. Шубин. Зондовые измерения функции распределения электронов в пучковой плазме итербия // *Физика плазмы*. 2011, т.37, №1, с.88-92.
12. А. с. №1019982. Устройство для напуска газа в замкнутую магнитную ловушку / Е.И. Скибенко, С.А. Круглов, А.Е. Сурков, В.Б. Юферов // *Бюллетень. Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки*. 1986, №25, с.281.

Статья поступила в редакцию 03.10.2011 г.

STATIONARY BEAM-PLASMA DISCHARGE FOR TECHNOLOGICAL PURPOSES

E.I. Skibenko, Yu.V. Kovtun, V.B. Yufarov

The papers presents the description of a stationary beam-plasma medium-power discharge. Experimental results are given as a series of parametric dependences characterizing the operation of an electron beam and a gas target, as well as, the behaviour of the plasma being formed.

СТАЦІОНАРНИЙ ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВИЙ РОЗРЯД ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЦІЛЕЙ

Є.І. Скібенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов

Наведено опис стаціонарного пучково-плазмового розряду помірної потужності і результати його експериментального дослідження у вигляді параметричних залежностей, які характеризують роботу електронної гармати, газової мішені, а також поведінку утвореної при цьому плазми.