

УДК 533.9

## Особенности развития пучково-плазменного разряда в газе высокого давления и перспективы его использования

Г. П. Березина, В. С. Ус

*Изучена динамика стационарного пучково-плазменного разряда при давлении нейтрального газа  $10^3$ —1 Торр. Выделены три режима разряда, два из которых по свойствам отличаются новизной и ранее не исследованы. В разряде обнаружены диссипативные неустойчивости с различными инкрементами. Исследована генерация потоков ионов и проведены эксперименты по "сухой" очистке ими поверхности металлических образцов. Указаны области давлений нейтрального газа, в которых разряд может эффективно использоваться для неравновесной плазмохимии.*

PACS: 52.35.-g; 57.77.Fv

*Ключевые слова:* пучково-плазменный разряд, пучково-плазменная неустойчивость, диссипативная неустойчивость, неравновесная плазмохимия.

### Введение

Несмотря на стремительный рост количества попеременно опережающих друг друга теоретических и экспериментальных исследований пучково-плазменного разряда (ППР), к началу проведения наших исследований оставалось мало изученным взаимодействие электронного пучка с нейтральным газом высокого давления. В данной работе приведены результаты исследования коллективного взаимодействия нерелятивистского стационарного электронного пучка с образованной им слабоионизованной плазмой в атмосфере атомарных и молекулярных газов в области давлений  $P \sim 10^3$ —1 Торр.

Метод "сухой" обработки поверхности металлических образцов, основанный на бомбардировке их интенсивным потоком ускоренных ионов, дает высокое качество получаемых в дальнейшем покрытий. Развитие метода определяется разработкой источника интенсивных потоков ионов низкой и средней энергии ( $E \sim 10$ —500 эВ), что исключает возможность имплантации частиц в образец. ППР позволяет получить необходимые для такого метода очистки поверхности потоки ионов. Сильнонеравновесная плазма со значительным отрывом электронной температуры от ионной представляет существенный интерес для плазмохимии

и плазменной технологии [1]. Использование для этой цели ППР является перспективным, поскольку при развитии в нем пучковой неустойчивости и взаимодействии электронов плазмы с волнами реализуется высокая степень неравновесности плазмы [1, 2]. Химия процессов в такой системе обеспечивается столкновениями электронов с молекулами и атомами.

### Описание экспериментальной установки

#### Методики измерения параметров пучка и плазмы

Изучение взаимодействия электронного пучка с образованной им плазмой в продольном однородном магнитном поле проводилось на установке, блок-схема которой представлена на рис. 1 [3]. Установка состояла из следующих основных узлов: электронной пушки, плазменной камеры (области взаимодействия пучка с плазмой), системы перепада давлений между камерой электронной пушки и плазменной камерой, коллектора тока пучка, патрубка для ввода в область разряда диагностической аппаратуры, механического натекаателя с баллоном рабочего газа, магнитного соленоида и блоков питания.

В экспериментах использовалась трехэлектродная электронная пушка, инжектор которой состоял из катода с электронным подогревом, прикатодного электрода и анода. Система перепада давлений обеспечивала последовательную дифференциальную откачку рабочего газа на пути следования электронного пучка к камере взаимодействия.

**Березина Галина Петровна**, старший научный сотрудник.  
**Ус Виктор Сергеевич**, старший научный сотрудник.  
Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт".

Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1.

Тел. (057) 335-64-21.

E-mail: berezina@kipt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 15 мая 2010 г.

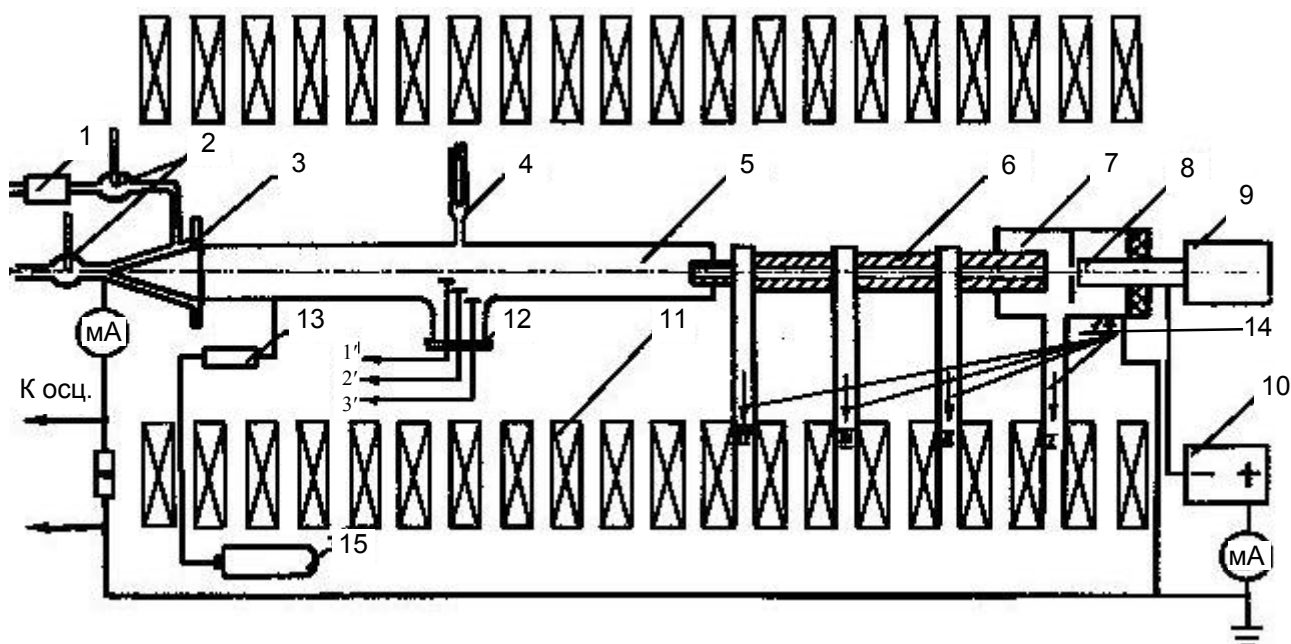


Рис. 1. Блок-схема установки:

1 — устройство для измерения скорости потока воды; 2 — термометры для измерения температуры воды, охлаждающей коллектор; 3 — коллектор тока пучка; 4 — датчик давления газа; 5 — плазменная камера; 6, 14 — система дифференциальной откачки газа; 7 — камера пушки; 8 — электронная пушка; 9, 10 — блоки питания; 11 — катушки соленоида; 12 — патрубок для ввода в область разряда диагностической аппаратуры; 13 — механический натекатель; 15 — баллон с рабочим газом

Плазменная камера представляла собой трубку из молибденового стекла, радиус и длина которой, соответственно, равны  $3 \cdot 10^{-2}$  и  $8 \cdot 10^{-1}$  м. Посередине камеры, перпендикулярно ее оси, был впаян стеклянный патрубок, внутри которого располагались элементы, служащие для диагностики ППР: токовые датчики, зонды, пьезодатчик, пластины с термопарами. Эта аппаратура попеременно вводилась в область плазменного разряда и вакуумно уплотнялась на изоляторах торцевого фланца. Коллектор тока пучка — медный конус, охлаждаемый водой, температура которой измерялась на входе и выходе. Подача рабочего газа в область взаимодействия электронного пучка с плазмой осуществлялась со стороны коллектора тока пучка с помощью механического натекателя.

Электронная пушка, система перепада давлений, плазменная камера и коллектор тока пучка находились в продольном однородном магнитном поле с напряженностью до 1200 Э. Неоднородность напряженности поля не превышала 1,5 %. Токопрохождение пучка  $\sim 95$  %. Параметры электронного пучка в стационарном режиме: ток  $I \leq 100$  мА, энергия  $E = 7,5$  кэВ,  $n_p/n_o \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ , где  $n_p$  и  $n_o$  — плотности электронов плазмы и нейтрального газа.

Ток пучка измерялся в цепи коллектора, одновременно служившего калориметром для измерения энергии пучка. Электронная температура  $T_e$  и плотность плазмы  $n_p$  вычислялись при обработке зондовой характеристики стандартным методом [4].

Энергия ионного потока вдоль радиуса системы измерялась с помощью миниатюрного пятисеточного анализатора типа "тормозящее поле".

Для определения давления потока частиц в радиальном направлении разряда использовался пьезодатчик, который представлял собой металлическую пластину из алюминиевой фольги толщиной  $\delta = 10^{-5}$  м и площадью  $S = 6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, соединенную с пьезоэлементом. Пластина имела стационарное положение относительно оси пучка  $R = 3 \cdot 10^{-2}$  м. Калибровка пьезодатчика осуществлялась с помощью шарика заданной массы, падающего с известной высоты, или физического маятника [5].

Радиальный поток тепла из разряда (температура нейтрального газа) оценивался с помощью ряда идентичных пластин из нержавеющей стали (толщина пластины  $\delta_1 = 10^{-4}$  м и площадь  $S_1 = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>) с подсоединенными к ним термопарами (хромель—алюмель), которые располагались по радиусу плазменной камеры ( $R = 10^{-2}$ ;  $2 \cdot 10^{-2}$ ;  $3 \cdot 10^{-2}$  м от оси). Одновременно проводились измерения тока частиц на эти пластины.

Регистрация низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) колебаний тока электронного пучка производилась на широкополосном осциллографе. Для бесконтактного измерения ВЧ-полей ( $E_z$ -компонента) в области разряда применялись зонды. В экспериментах осуществлялся постоянный контроль давления рабочего газа в плазменной камере и камере электронной пушки.

### Экспериментальные результаты

В изучаемой области давлений рабочего газа выделены три режима ППР, отличающиеся как визуально, так и протекающими в них процессами. Исследованы режимы развития ППР для следующих газов: Ar, CO<sub>2</sub>, Ar (50 %) + CO<sub>2</sub> (50 %), H<sub>2</sub>, He, Xe, воздух. Ниже приведены результаты, полученные для аргона.

К 1-му режиму ( $P \leq 10^{-2}$  Торр) относим известный режим пучково-плазменного взаимодействия, который характеризуется:

эффективным образованием плазмы по всему диаметру плазменной камеры;

возбуждением и излучением колебаний на плазменной частоте (600—900 МГц);

потерями энергии электронного пучка до 25 % (рис. 2, 3);

нагревом нейтрального газа (рис. 2, 4);

нарастающим с ростом давления газа потоком частиц в радиальном направлении разряда, который оказывает давление и выносит тепло на стенку плазменной камеры (см. рис. 2);

генерацией потока ионов в поперечном направлении разряда с плотностью тока  $j \sim 10\text{--}12$  мА/см<sup>2</sup> (энергия  $E \leq 100$  эВ).

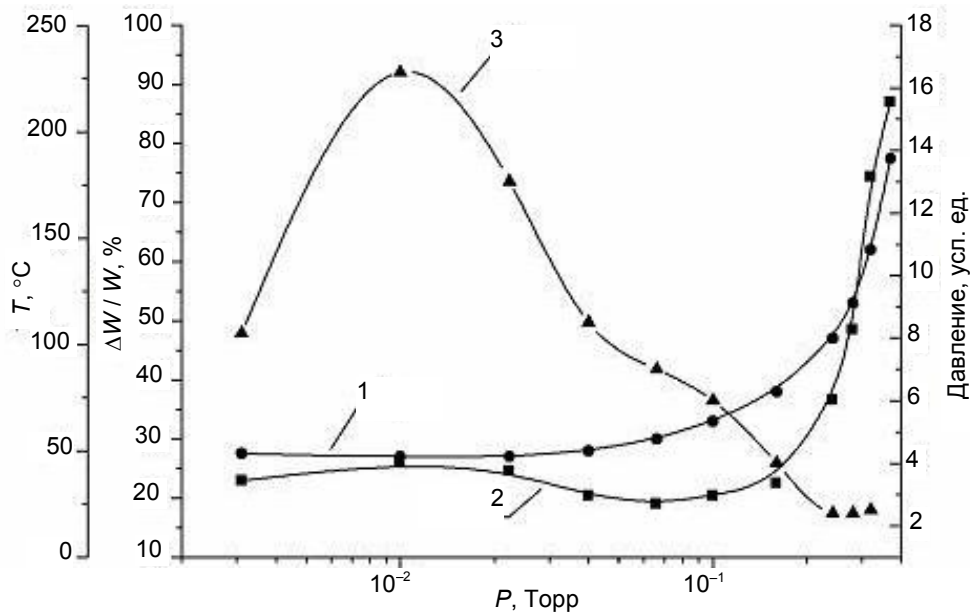


Рис. 2. Зависимость характеристик разряда от давления аргона в плазменной камере (энергия пучка  $E = 7,5$  кэВ, ток  $I = 100$  мА):

1 — потери энергии электронного пучка; 2 — температура нейтрального газа; 3 — давление потока частиц на расстоянии от оси пучка  $R = 3 \cdot 10^{-2}$  м

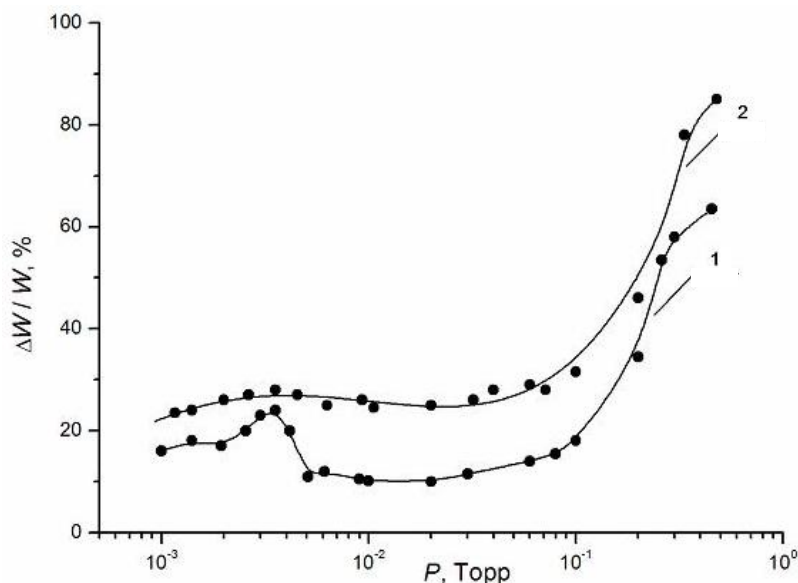


Рис. 3. Зависимость потерь энергии электронного пучка от давления аргона в плазменной камере.

Ток пучка: 1 — 60 мА; 2 — 100 мА

В конце 1-го режима в разряде создаются условия для развития диссипативной неустойчивости с инкрементом  $\gamma_1$ . Вблизи порогового значения давления ( $P \sim 10^{-2}$  Торр) разряд претерпевает резкие изменения. Широкий плазменный столб скачком переходит в узкий шнур, немногим превышающий диаметр самого электронного пучка, который вплоть до давления  $P \sim 5 \cdot 10^{-2}$  Торр визуально сохраняет свой диаметр. С ростом давления газа на фоне узкого плазменного шнура вдоль оси разряда в направлении к катоду образуется вытянутое по оси яркое плазменное образование длиной в несколько сантиметров.

Ряд отличительных особенностей разряда в области давлений  $P \sim 10^{-2}—10^{-1}$  Торр позволяет выделить его в режим 2, это:

возбуждение в разряде НЧ-колебаний, наблюдаемых в виде модуляции тока пучка на коллекторе [6]. С увеличением давления частота этих колебаний принимает ряд дискретных значений: 100, 50 и 20 кГц;

возрастание диаметра и яркости свечения разряда ( $P \geq 5 \cdot 10^{-2}$  Торр);

генерация интенсивных ВЧ-колебаний на плазменной частоте ( $P \geq 5 \cdot 10^{-2}$  Торр) в условиях модуляции НЧ-колебаниями на частоте десятков килогерц (глубина модуляции до 30 %);

возрастание потерь энергии электронного пучка с ростом давления (см. рис. 2, 3);

нагрев нейтрального газа (см. рис. 2, 4);

генерация убывающего с ростом давления газа потока частиц в радиальном направлении разряда,

который оказывает давление и выносит поток тепла на стенку камеры (см. рис. 2);

рост температуры и плотности электронов плазмы с ростом давления (рис. 5);

регистрация ионного тока с плотностью  $j \sim 1$  мА/см<sup>2</sup> ( $5 \cdot 10^{-2} \leq P \leq 10^{-1}$  Торр).

При давлении рабочего газа  $P \sim 10^{-1}$  Торр характеристики разряда изменяются:

полностью прекращается генерация НЧ- и ВЧ-колебаний;

значительно уменьшается радиальный поток частиц из разряда (см. рис. 2);

температура электронов плазмы достигает максимального значения (см. рис. 5);

прекращается ионный ток у границы разряда.

В области давлений газа  $P \sim 10^{-1}—1$  Торр разряд приобретает совокупность новых свойств, по которым может быть отнесен к режиму 3. С ростом давления газа наблюдается:

возрастание потерь энергии электронного пучка вплоть до 80 % (см. рис. 2, 3);

нагрев нейтрального газа (см. рис. 2, 4);

охлаждение электронной компоненты плазмы при возрастании ее плотности (см. рис. 5).

Результаты проведенных экспериментов показывают, что эффективность взаимодействия электронного пучка с образованной им плазмой в газе высокого давления во всех трех режимах возрастает с ростом тока пучка (см. рис. 3) и зависит от сорта газа. Она максимальна для газов с массовым числом  $A \geq 40$ : Ar, CO<sub>2</sub> и смесь Ar (50 %) + CO<sub>2</sub>(50 %).

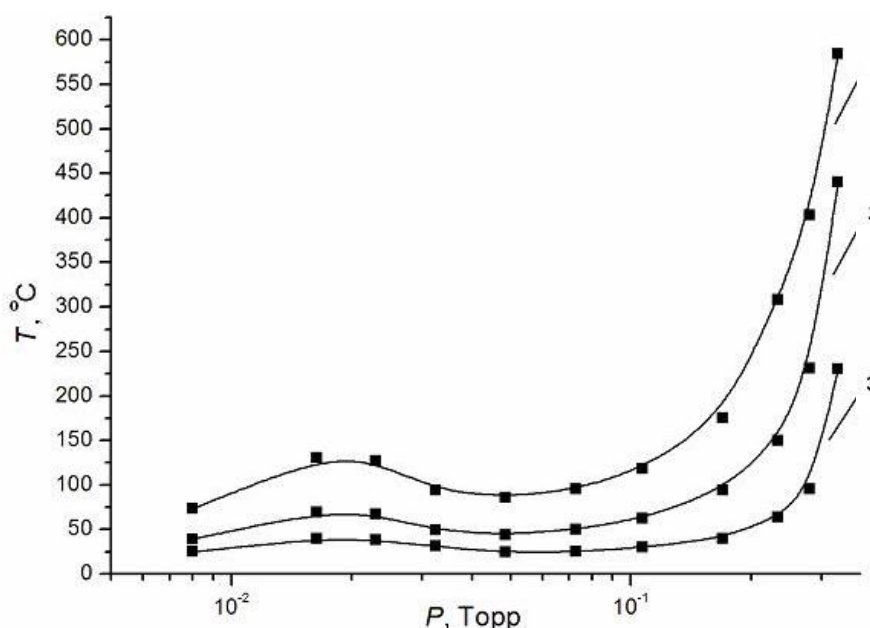


Рис. 4. Зависимость температуры нейтрального газа от давления аргона на разных расстояниях от оси пучка:  
1 —  $R = 10^{-2}$  м; 2 —  $R = 2 \cdot 10^{-2}$  м; 3 —  $R = 3 \cdot 10^{-2}$  м

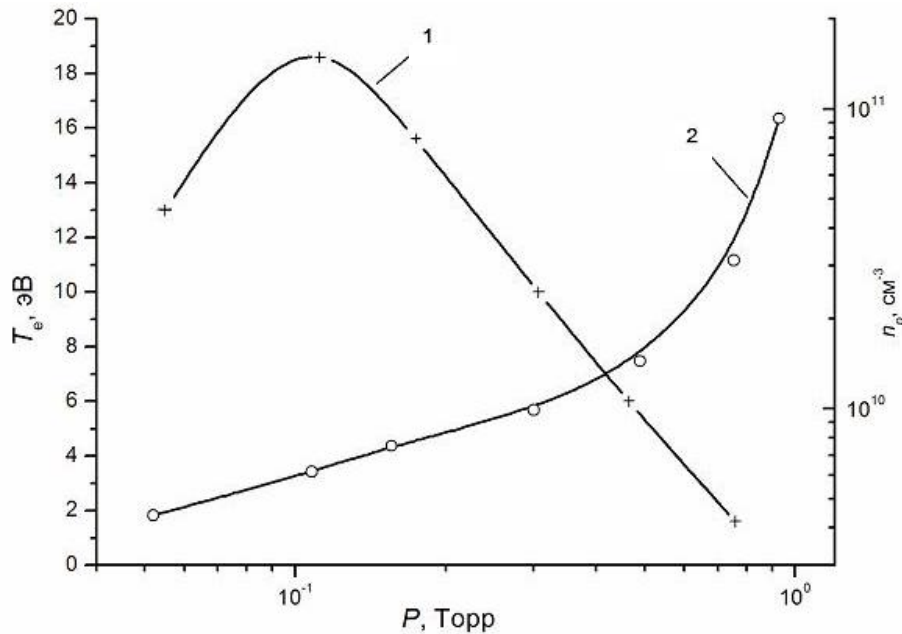


Рис. 5. Зависимость температуры и плотности электронов плазмы от давления аргона:

1 — изменение температуры; 2 — изменение плотности

Эксперименты, проведенные на других газах, показали, что по процессам, протекающим в разряде, наиболее близок к аргону углекислый газ. Ряд характерных для 2-го и 3-го режимов процессов таких, как генерация НЧ- и ВЧ-колебаний, направленного по радиусу потока частиц, аномально высокие потери энергии электронного пучка, нагрев нейтрального газа, изменение диаметра и яркости свечения разряда в зависимости от давления газа также наблюдаются при работе с этим газом, однако максимальные значения этих величин меньше по сравнению с данными, полученными для аргона. В атмосфере других газов (Н<sub>2</sub>, Не, воздух, Хе) разряд узкий, немногим превышающий диаметр самого электронного пучка, генерация колебаний выражена слабо, потери энергии пучком невелики либо полностью отсутствуют.

### Обсуждение полученных результатов

#### Динамика ППР в зависимости от давления газа

Как следует из предыдущего раздела, с ростом плотности нейтрального газа характеристики разряда заметно меняются. Выполнение соответствующего неравенства между волновыми параметрами разряда (частотой столкновений частиц плазмы  $\nu$ , инкрементом колебаний  $\gamma$  и плазменной частотой  $\omega_p$ ) определяет тип пучковой неустойчивости, развивающейся в условиях 1-го и 2-го режимов ППР.

В 1-м режиме в разряде были зарегистрированы ВЧ-колебания в области сотен мегагерц. Это плазменные колебания — результат развития пуч-

ково-плазменной неустойчивости. Такой процесс наблюдается при давлении аргона  $P \leq 9 \cdot 10^{-3}$  Торр, где выполняется соотношение  $\nu < \omega_p$ ,  $\gamma$ . Потери энергии  $\Delta W/W$  в этом режиме составляют 25 %, где  $\Delta W = W - W_1$ ,  $W$  и  $W_1$  — энергия пучка до и после взаимодействия с плазмой (см. рис. 3).

Зависимость инкремента колебаний и частоты столкновений от давления газа для этого режима определена в работе [7]:

$$\gamma \sim P^{1/6}; \quad \nu \sim P \quad (\nu \ll \gamma). \quad (1)$$

С ростом плотности газа увеличивается частота столкновений, что приводит к сильному затуханию плазменных колебаний и в конечном итоге к срыву пучково-плазменной неустойчивости. К этому моменту параметры системы плазма—пучок таковы, что частота столкновений между электронами и ионами плазмы удовлетворяет [2] соотношению:

$$\gamma_1 < \nu < \omega_p, \quad (2)$$

$$\text{где } \gamma_1 = \sqrt{\frac{\omega_p \cdot \omega_b^2}{2\nu}};$$

$\omega_b$  — плазменная частота пучка.

Как следует из работы [2], на линейной стадии взаимодействия с плазмой моноэнергетического пучка, т. е. когда инкремент  $\gamma/k > v_{Tb}$ , где  $k$  — волновое число,  $v_{Tb}$  — тепловая скорость электронов пучка, существует неустойчивость с инкрементом  $\gamma_1$ .

В наших экспериментах неравенство (2) выполняется в конце 1-го режима и определяет развитие в разряде диссипативной неустойчивости. Нелинейная стадия взаимодействия характеризуется появлением теплового разброса у первона-

чально моноэнергетического пучка ( $v_{tb} > \gamma/k$ ). Пучок термализуется (становится кинетическим). Это приводит к затуханию колебаний и срыву неустойчивости, что позволяет пучку свободно проходить через плазму без существенных изменений его энергии (система плазма—пучок является устойчивой, разряд — узкий). Срыв неустойчивости определяет переход разряда в режим 2. Полученные результаты находятся в соответствии с теорией, о чем свидетельствуют кривые, представленные на рис. 3.

Когда частота столкновений между электронами плазмы становится настолько большой, что выполняется соотношение

$$\gamma_2 < \omega_p < \nu, \quad (3)$$

где  $\gamma_2 = \sqrt{\frac{n_b \cdot k u v}{n_p}}$

(здесь  $u$  — скорость пучка,  $n_b$  и  $n_p$  — плотности частиц пучка и плазмы), устойчивость системы плазма—пучок нарушается.

Инкремент  $\gamma_2$  соответствует диссипативной неустойчивости для случая 2, рассмотренного в [2]. Диссипативная неустойчивость с инкрементом колебаний  $\gamma_2$  развивается при давлении газа  $P \geq 5 \cdot 10^{-2}$  Торр. Следствием ее развития являются возбуждение ВЧ-колебаний на плазменной частоте, возрастание поперечного сечения и яркости свечения разряда. На кривых потерь энергии пучка (см. рис. 3) наблюдается начало второго максимума. Отмечается также рост температуры и плотности электронов плазмы (см. рис. 5). Совокупность перечисленных свойств разряда свидетельствует о том, что в этой новой, ранее не исследованной области давлений ( $5 \cdot 10^{-2} \leq P \leq 10^{-1}$  Торр), наблюдается повышение эффективности взаимодействия пучка с плазмой. Проведенные расчеты показали, что параметры нашего разряда в указанной области давлений находятся в соответствии с неравенством (3). В формулах (2), (3) частота столкновений электронов плазмы с нейтралами  $\nu_e$  вычислялась по формуле [8]:

$$\nu_e = 2,91 \cdot 10^{-6} n_p \ln \Lambda T_e^{-3/2} s^{-1}, \quad (4)$$

где  $n_p$  и  $T_e$ (эВ) — плотность и температура электронов плазмы;

$\ln \Lambda$  — кулоновский логарифм.

Поскольку плазма в наших экспериментах является слабоионизованной, при расчетах вместо плотности электронов  $n_p$  в формулу (4) подставляли плотность нейтрального газа  $n_0$  для соответствующего давления, а величина  $\ln \Lambda$  выбиралась порядка 10.

Вблизи давления  $P \sim 10^{-1}$  Торр в разряде прекращается генерация ВЧ- и НЧ-колебаний, температура электронов плазмы достигает

максимального значения, отсутствует ионный ток у границы разряда. Расчеты показывают, что при этом давлении нарушаются условия выполнения неравенства (3). Разряд переходит в 3-й режим, в котором наблюдаются аномально высокие потери энергии электронного пучка (см. рис. 3) (исключительно за счет парных соударений), нагрев нейтрального газа (см. рис. 4), охлаждение электронной компоненты плазмы и рост ее плотности (см. рис. 5).

Можно предположить, что наблюдаемое во 2-м режиме разряда яркое плазменное образование, движущееся с ростом давления нейтрального газа вдоль оси разряда в направлении к катоду, является локальным источником повышенной ионизации в разряде молекул аргона и требует проведения дополнительных исследований. Аналогичный результат был получен в работе Н. В. Исаева с сотрудниками [9] при близких к нашим параметрам пучка, однако в более слабом магнитном поле. Последнее несовпадение оказалось существенным при рассмотрении возможности использования в наших экспериментах предложенного А. А. Рухадзе с сотрудниками [10] объяснения такого эффекта.

### Механизмы генерации НЧ-колебаний

Как было показано в предыдущих разделах, при развитии пучково-плазменной и диссипативных неустойчивостей ППР представляет собой широкий плазменный столб по диаметру камеры, в котором наблюдается возбуждение ВЧ-ленгмюровских колебаний. В результате нелинейных эффектов распада ВЧ-колебаний генерируются НЧ-колебания.

Ранее нами было установлено [6], что при прохождении электронного пучка через аргон ( $P \sim 10^{-2}$ — $10^{-1}$  Торр) в нем возникают НЧ-колебания с частотой 100—20 кГц, наблюдаемые в виде модуляции тока пучка на коллекторе. Был предложен макроскопический механизм возникновения НЧ-колебаний. Показана возможность реализации в условиях разряда автоколебательного режима взаимодействия пучка с газом. По-видимому, модуляция ВЧ-колебаний низкочастотными (десятки килогерц) при развитии диссипативной неустойчивости во 2-м режиме связана с такого типа НЧ-неустойчивостью, наблюдаемой в тех же условиях.

Вне зависимости от механизма генерации НЧ-колебания ответственны за нагрев, ускорение и перезарядку ионов в разряде. Как уже упоминалось, при низких (1-й режим) и более высоких (2-й режим) давлениях газа плотность ионного потока в разряде составляла, соответственно,  $j \sim 10$ — $12 \text{ mA/cm}^2$  и  $j \sim 1 \text{ mA/cm}^2$ .

На рис. 2 кривые 2, 3 демонстрируют вынос тепла на боковую стенку плазменной камеры и дав-

ление, оказываемое на нее нейтральными частицами и ионами в зависимости от давления аргона. Появление нейтральных частиц в разряде связано с процессами перезарядки быстрых ионов аргона в электрических полях НЧ-колебаний. Из рис. 2 следует, что, нарастая в 1-м режиме, давление нейтральных частиц и ионов на границе 1-го и 2-го режимов достигает максимума, затем начинает спадать. С развитием диссипативной неустойчивости во 2-м режиме спад замедляется вплоть до давления  $10^{-1}$  Торр, когда в разряде полностью прекращается генерация ВЧ- и НЧ-колебаний.

### Возможные применения ППР в новых режимах

На основании полученных данных авторами были проведены эксперименты по очистке поверхности металлов потоком ионов из разряда. ППР осуществлялся в атмосфере гелия и аргона при давлении  $7,5 \cdot 10^{-3}$  Торр (1-й режим). В качестве образцов использовалась медь и немагнитная нержавеющая сталь. Отрицательный потенциал на поверхности образца не превышал 100 В. Напряженность магнитного поля  $H \sim 500\text{—}700$  Э. Ларморовский радиус ионов гелия для  $H \sim 700$  Э порядка  $7 \cdot 10^{-2}$  м и он значительно превышает эту величину для ионов аргона. Скорость очистки при плотности тока ионов  $j \sim 10\text{—}12$  мА/см<sup>2</sup> составляла  $8\text{—}10$  мкм/ч.

2-й режим разряда реализуется при большей плотности рабочего вещества, большей температуре плазменных электронов и меньшей плотности ионного потока. Этот режим привлекателен с точки зрения использования в неравновесной плазмохимии. Заключение о пригодности разряда для поставленной цели можно сделать, привлекая к рассмотрению температурную зависимость от давления нейтрального газа (см. рис. 5). С учетом ограничения на температуру плазменных электронов [2] существуют две области давлений:  $P \sim 5 \cdot 10^{-2}$  Торр (2-й режим) и  $P \sim 3 \cdot 10^{-1}$  Торр (3-й режим), в которых реализуется возможность использования нашего разряда для плазмохимии ( $T_e \leq 10$  эВ). Однако при давлении  $P \sim 3 \cdot 10^{-1}$  Торр частота соударений в разряде становится настолько большой, что обуславливает незначительный прирост энергии электронов между двумя соседними соударениями, который может быть недостаточным для осуществления реакции диссоциации молекул рабочего вещества, не говоря уже о процессах ионизации, для которых энергия должна быть гораздо большей. По всей видимости, если такая возможность и существует, то разряд будет характеризоваться равновесными плазмохимическими процессами ( $T_e \sim T_i$ , где  $T_i$  — температура ионов плазмы).

По результатам проведенных исследований, учитывая оптимальное давление газа для получе-

ния большой плотности рабочего вещества, ограничение на температуру плазменных электронов и соблюдение условий неравновесности частиц плазмы ( $T_e \gg T_i$ ), разряд во 2-м режиме следует считать перспективным для применения в плазмохимии, к примеру, для разложения металлосодержащих соединений, в частности карбониллов, находящихся в парообразной фазе. Полученные в разряде ионы металла с помощью приложенного к образцу потенциала осаждаются на его поверхности, создавая металлическое покрытие.

### Заключение

Изучены два новых режима (2 и 3) взаимодействия нерелятивистского электронного пучка со слабоионизованной плазмой в условиях больших частот столкновений, свойства которых существенно отличаются от известных ранее. Определена зависимость от давления газа характеристик разряда: потеря энергии пучка, температуры нейтрального газа, давления потока частиц, оказываемого на стенку плазменной камеры, температуры и плотности электронов плазмы.

Установлены области по давлению газа, в которых в разряде наблюдаются неустойчивости: пучково-плазменная и диссипативные с двумя различными инкрементами. С ростом плотности газа в разряде обнаружены срыв диссипативной неустойчивости с инкрементом  $\gamma_1$ , свободное прохождение пучка через плазму (система плазма—пучок устойчива) и развитие диссипативной неустойчивости с инкрементом  $\gamma_2$ . Результаты экспериментов находятся в согласии с теорией.

Определены условия, в которых реализуется автоколебательный режим взаимодействия пучка с газом на низких частотах.

В разряде зарегистрированы потоки ионов, появление которых обусловлено возникновением НЧ-колебаний за счет нелинейных эффектов распада ВЧ-колебаний в условиях развития пучково-плазменной (1-й режим) и диссипативных (1-й и 2-й режимы) неустойчивостей, либо действия макроскопического механизма возбуждения НЧ-колебаний (2-й режим). Плотность ионного потока зависит от давления газа.

Проведены эксперименты по "сухой" очистке поверхности металла ионами из разряда. Сформулированы условия, при которых разряд может использоваться для неравновесной плазмохимии. Обнаружена область повышенной ионизации молекул газа, положение которой вдоль оси разряда зависит от его параметров, в частности от давления газа. Указаны массовые числа рабочего газа, при которых в условиях больших частот столкно-

вений наблюдается эффективное взаимодействие с ним электронного пучка.

#### Л и т е р а т у р а

1. Иванов А. А. Итоги науки и техники. Физика плазмы. — М.: ВИНТИ. 1982. Т. 3.
2. Иванов А. А., Соболева Т. К. Неравновесная плазмохимия. — М.: Атомиздат. 1978.
3. Березина Г. П. // Докл. АН УССР. Физ.-мат. и техн. науки. 1989. Серия "А". № 7. С. 58.

4. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат. 1969.
5. Комельков С. В. и др. Физика плазмы и проблемы УТР. — М.: Изд-во АН СССР. 1958. Т.1.
6. Березина Г. П., Блюх Ю. П. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 6. С. 811.
7. Файнберг Я. Б. // Атомная энергия. 1961. Т. 11. Вып. 2. С. 313.
8. <http://ru.science.wikia.com/wiki/Плазма>.
9. Исаев Н. В., Чмилъ А. И., Шустин Е. Г. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 3. С. 292.
10. Исаев Н. В., Рухадзе А. А. и др. // Там же. 2005. Т. 31. № 11. С. 1026.

## Features of development of the beam-plasma discharge in high pressure gas and prospects of its use

G. P. Berezina, V. S. Us

National Science Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology",

1 Akademicheskaya str., Kharkov, 61108, Ukraine

E-mail: berezina@kipt.kharkov.ua

*Dynamics of the stationary beam-plasma discharge at the  $10^{-3}$ —1 Torr pressure of neutral gas was studied. Three regimes of the discharge were found, two of which are different on properties, have novelty, and not investigated earlier. Two dissipative instabilities with different increments were discovered. Generation of ion streams was investigated, and experiments on "dry" clearing of surface of metal samples by them have been carried out. Areas of pressure in which the discharge can effectively be used for nonequilibrium plasma chemistry have been determined.*

PACS: 52.35.-g; 57.77.Fv

*Keywords:* beam-plasma discharge, beam-plasma instability, dissipative instability, nonequilibrium plasma chemistry.

Bibliography — 10 references.

Received May 15, 2010

\* \* \*