УДК 533.915

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА НА ЕГО ПЛАЗМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, Е.И. Скибенко, Ю.В. Ларин, А.Н. Шаповал, В.Б. Юферов
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина
E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua

Определен элементный состав плотной газометаллической плазмы, состоящей из ионов (атомов) поджигающего газа Ar, материала катода Ti и остаточной атмосферы вакуумной камеры. Измерены параметрические и временные зависимости разрядного тока, средней плотности образованной плазмы. На стадии распада плотности плазмы проведены измерения частоты столкновений частиц плазмы, на основании которых была оценена электронная температура.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании основных параметров сепарационной плазмы [1-5], в том числе на основе отражательного разряда [2-4], которые необходимы и важны для определения главных характеристик сепарационных устройств – их производительности и энергетической эффективности, необходимо как можно точнее учесть влияние их технологических и физических показателей на эти параметры и характеристики. Это важно для прогнозирования и планирования промышленной и полупромышленной переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) в ближайшей и более отдаленной перспективе. К технологическим показателям следует отнести, например, ток и напряжение разряда, объем запасенной энергии в емкостном накопителе и других накопительных системах. В то же время важно проследить влияние технологических показателей на достижение требуемых значений физических величин (плотности плазмы, температуры, времени существования и др.). Поэтому целью данной работы являлось установление реальной связи и взаимного влияния показателей этих двух групп друг на друга, а также установление особенности их определения (измерения) на всех стадиях разряда от образования плазмы в импульсном отражательном разряде до ее распада в результате действия диффузионно-рекомбинационных механизмов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследование параметров плазмы в импульсном отражательном разряде проводилось на установке, представленной на Рис.1. Разрядная камера имела следующие размеры: внутренний диаметр 20 см, длина 200 см. Магнитное поле создавалось соленоидом, состоящим из шести катушек, две из них, торцевые, создают магнитные пробки с пробочным отношением 1.25, четыре средние – однородное по оси магнитное поле с максимальной напряженностью $H_0 \leq 9$ кЭ при напряжении питания от емкостного накопителя $U_H \leq 3$ кВ. Длительность импульса магнитного поля составляет 18 мс. Начальное давление в камере составляло 10^{-6} Торр, затем напускался поджигающий газ аргон до давления $1\cdot10^{-3}\ldots3\cdot10^{-2}$ Торр. Газометаллическая плазма образовывалась в результате разряда конденсаторной батареи емкостью 560 мкФ, напряжением до 3.8 кВ через балластное сопротивление номиналом 2.8 Ом между холодными катодами диаметром 100 мм и анодом (вакуумная камера). Плазма создавалась в среде поджигающего газа и распыленного материала катода. Катоды были выполнены из монометаллического титана.

При исследовании параметров газометаллической плазмы импульсного отражательного разряда с $N_e \sim10^{12}\ldots10^{14}$ см$^{-3}$ был задействован ряд диагностических методик и средств: СВЧ-интерферометрия на длинах волн λ = 8 и 4,13 мм; поперечное зондирование плазмы обыкновенной волной с λ = 4.13 мм; оптический спектрометр с рабочим диапазоном длин волн λ = 220…680 нм; пояс Роговского.

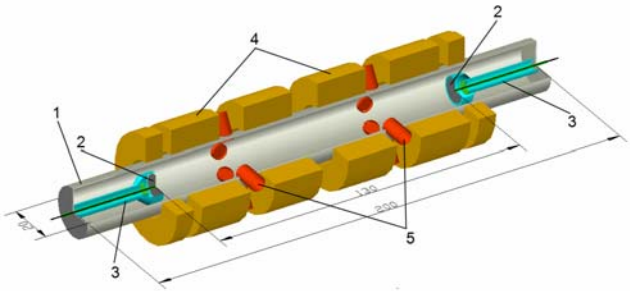

Рис.1. Схема установки импульсного отражательного разряда:
1 – вакуумная камера; 2 – катод; 3 – изолятор; 4 – магнитная система; 5 – диагностические порты

2.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения разрядного тока во времени в зависимости от приложенного напряжения $U_{dis.}$ (Рис.2,а,б) показали, что величина максимального значения тока $\bar{I}_{\max}$, усредненная по ряду измерений, линейно растет с увеличением приложенного напряжения (см. Рис.2,б, кривая 1) и достигает значения $\bar{I}_{\max}$=1.76 кА при $U_{dis.}$=3.8 кВ. Время $\bar{t}$ достижения $\bar{I}_{\max}$ (также усредненное), по сути дела, время переднего фронта тока разряда, уменьшается с увеличением напряжения (см. Рис.2,б, кривая 2), при этом измерения электронной плотности плазмы показали, что существует корреляция между $\bar{t}$ и временем нарастания

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. 2010. № 4.
Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (7), с.214-218.

плотности плазмы, которое также уменьшается с увеличением напряжения. Такая корелляция говорит о взаимосвязи времени $\bar{t}$ и скорости ионизации плазмообразующей среды, и действительно, при разряде в водороде (катоды с напыленным титаном) $\bar{t}$ ~200 мкс ($U_{dis.}$=3.6 кВ). Стоит отметить, что при $\bar{I}_{max}$ плотность плазмы $N_e >> 1.7\cdot10^{13}$ см$^{-3}$. Длительность разрядного тока составляет ~ 0.9 мс и слабо зависит от приложенного начального напряжения.

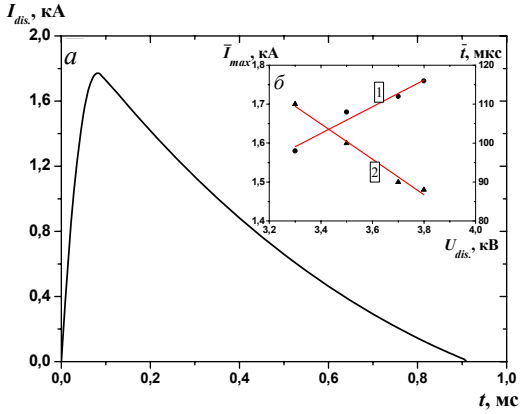

Рис.2. Зависимость разрядного тока от времени (а). Зависимость усредненного максимального значения тока (1)и усредненного времени его нарастания (2) от приложенного напряжения (б)

Для определения элементного и зарядового состава плазмы использовался спектрометр, работающий в режиме накопления, т.е. регистрировал интегральный спектр линейчатого излучения, выходящего из плазмы, за все время ее существования. Регистрация излучения из плазмы производилась через диагностическое окно, при этом спектрометр устанавливался на двух фиксированных расстояниях от диагностического окна. В первом случае, спектрометр находился в непосредственной близости от диагностического окна, что позволило фиксировать менее интенсивные спектральные линии, но при этом интенсивность наиболее ярких линий превосходила максимально возможную интенсивность, которую может зарегистрировать спектрометр и, в свою очередь, это практически не позволяло индифицировать спектральные линии, особенно в диапазоне 300…380 нм. Во втором случае, спектрометр размещался на расстоянии 40 см от диагностического окна. Это позволило фиксировать и индифицировать наиболее интенсивные спектральные линии. Результаты измерений интегрального линейчатого излучения для различных спектральных диапазонов в обоих случаях представлены на Рис.3,а,б,в,г. В интегральном спектре созданной плазмы присутствуют линии следующих атомов (ионов) и молекул (молекулярных ионов): Ar^+ – поджигающий газ; Ti^*, Ti^+ – материал катода; O^+, O_2^*, O_2^+, N_2^*, N_2^+ – следы остаточной атмосферы; H^*, C^+ – продукты десорбции со стенок разрядной камеры и диссоциации осколков разложения (крекинга) диффузионного масла. В данном разряде на стадии образования плазмы основным ионизационным процессом является ударная ионизация электронами из основного состояния [6]. Учитывая, что потенциал ионизации E_i атомов и молекул, присутствующих в плазме, находится в диапазоне от 6.82 эВ (Ti) до 15.75961 эВ (Ar) [7], можно сделать вывод, что температура электронов на этой стадии может быть на уровне 16 эВ и более. Также в плазме должны присутствовать в значительном количестве двукратно ионизированные ионы титана Ti^{+2} (E_i = 13.58 эВ), для остальных ионов второй потенциал ионизации превышает 24 эВ.

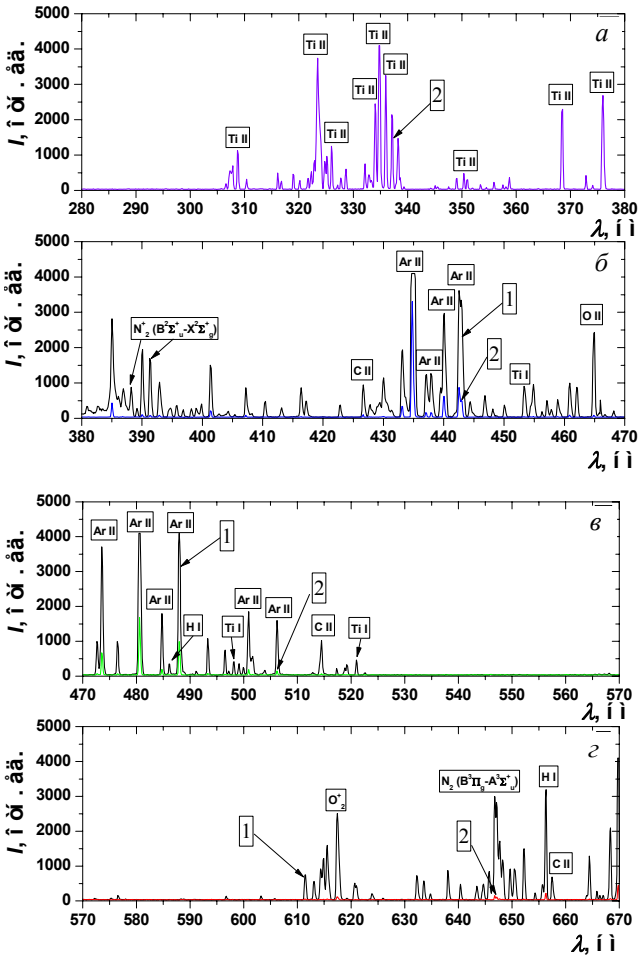

Рис.3. Спектрограмма интегрального линейчатого излучения плазмы в различных спектральных диапазонах ($U_{dis.}$=3,8 кВ, U_H=1,4 кВ; p=2·10^{-3} Торр): а – 280...380 нм; б – 380…470 нм; в – 470…570 нм; г – 570-670 нм. 1 – спектрометр возле диагностического окна; 2 – спектрометр на расстоянии 40 см от диагностического окна

Результаты измерений зависимости времени существования плазмы от приложенного напряжения для двух зондирующих волн – λ = 8 и 4,13 мм – представлены на Рис.4,а. Увеличение τ_{cutoff} можно объяснить тем, что с увеличением напряжения и, соответственно, запасенной энергии (удельного энерговклада в плазму) происходит увеличение степени ионизации нейтральной среды и температуры плазмы, косвенно это подтверждается увеличением максимального тока разряда, при этом скорость распада плазмы уменьшается в 1,3 раза (Рис.4,б).

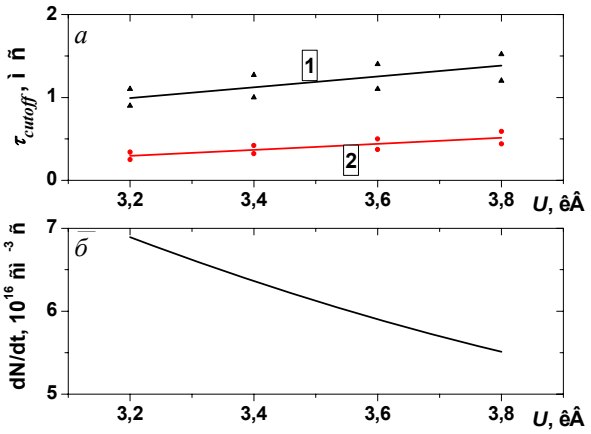

Рис.4. Зависимость времени существования плазмы (а), скорости распада плазмы (б) от напряжения разряда ($p_{\cdot}=2\cdot10^{-3}$ Торр, U_H=1,4 кВ). 1 – $N_e > 1{,}7\cdot10^{13}$ см$^{-3}$; 2 – $N_e \geq 6{,}5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$

Зависимость времени существования плазмы плотностью $N_e \geq 1.7\cdot10^{13}$ см$^{-3}$ и $N_e \geq 6.5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$ от давления представлена на Рис.5,а. Как видно, время существования плазмы увеличивается с увеличением давления. Это говорит о том, что увеличивается максимальная плотность плазмы. Действительно, при давлении $p_{\cdot}=1\cdot10^{-3}$ Торр не наблюдается отсечки СВЧ-сигнала на длине волны λ = 4,13 мм. Если предположить, что начальная плотность нейтральных частиц $N_0 \sim 3.5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$, количество поступивших в разряд атомов (ионов) титана $\sim 2\cdot10^{13}$ см$^{-3}$, степень ионизации плазмы близка к 100%, средний заряд ионов Z ~ 1, то максимальная плотность составит $\sim 5.5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$, то есть будет ниже критической плотности для λ = 4.13 мм СВЧ-сигнала. При давлениях более $1\cdot10^{-2}$ Торр наблюдается полная отсечка микроволнового сигнала λ = 4,13 мм. Это свидетельствует о значительном радиальном размере слоя с критической плотностью. Скорость распада плазмы, полученная из измерений плотности, увеличивается с увеличением давления, и в диапазоне $1\cdot10^{-3}\ldots3\cdot10^{-2}$ Торр изменяется в 1,6 раза (Рис.5,б). Увеличение скорости распада может быть связано с уменьшением электронной температуры и, как следствие, увеличением рекомбинации. Поэтому проведем сравнения параметров распадающейся плазмы при двух значениях давления нейтральной среды.

Временной ход плотности плазмы был определен с помощью микроволнового интерферометра по изменению фазы прошедшей волны СВЧ-сигнала с λ = 8 и 4.13 мм, результаты измерений представлены на Рис.6,а. Экстрапаляционные построения указывают на достижения плотности $N_e \geq 1\cdot10^{14}$ см$^{-3}$.

Зависимость обратной величины плотности 1/N от времени (Рис.6,б) свидетельствует о том, что в начальной стадии распада плазмы (временной интервал 2.7…4.9 мс ($p_{\cdot}=2.7\cdot10^{-3}$ Торр) и 5.7…7.2 мс ($p=3\cdot10^{-2}$ Торр)) она отвечает линейному закону изменения плотности. Во временном интервале 4.9…7.4 мс ($p=2.7\cdot10^{-3}$ Торр) и 7.2…9.3 мс ($p=3\cdot10^{-2}$ Торр) изменение величины N^{-1} происходит по экспоненциальному закону. Согласно [8], это свидетельствует о том, что на первом временном участке преобладает рекомбинация, а на втором – другой механизм потерь: начинает преобладать диффузия.

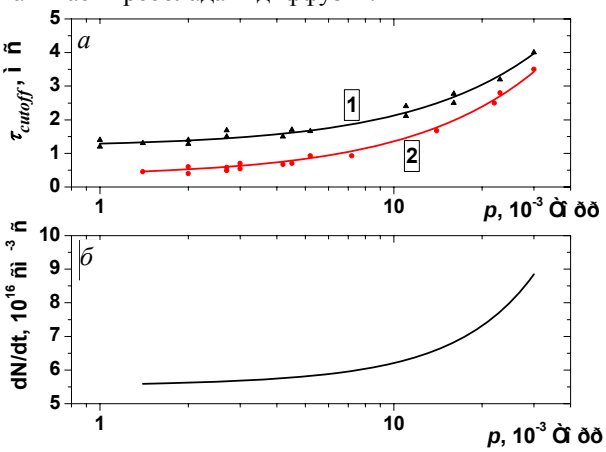

Рис.5. Зависимость времени существования плазмы (а), скорости распада плазмы (б) от давления ($U_{dis.}$=3.8 кВ, U_H=1.4 кВ). 1 – $N_e \geq 1.7\cdot10^{13}$ см$^{-3}$; 2 – $N_e \geq 6.5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$

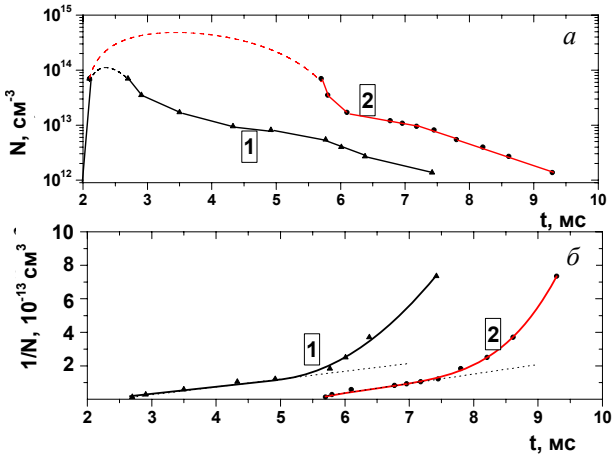

Рис.6. Временные зависимости величины средней плотности плазмы (а) $N_p^{-1}=f(t)$ на фазе распада плазмы ($U_{dis.}$=3,8 кВ, U_H=1,4 кВ). 1 – $p_{\cdot}=2{,}7\cdot10^{-3}$ Торр; 2 – $p_{\cdot}=3\cdot10^{-2}$ Торр. Пунктирная линия – экстраполяция

Для определения зависимости электронной температуры от времени использовались результаты амплитудно-временных измерений затухания микроволнового сигнала на длине волны λ = 4.13 мм в плазме. Средняя плотность определялась с помощью СВЧ-интерферометрии (см. Рис.6,а). Зная среднюю плотность плазмы и коэффициент затухания СВЧ-сигнала в плазме, можно определить среднюю частоту соударений в плазме [9]:

$$\bar{\nu} = \frac{\chi \cdot 2 \cdot c \cdot N_{crit.} \cdot \sqrt{1 - \bar{N}/N_{crit.}}}{l \cdot \bar{N}}, \qquad (1)$$

где χ – коэффициент поглощения СВЧ-сигнала в плазме; $l = 2r$ – поперечный размер плазменного столба; $\bar{N}$ – средняя плотность плазмы в данный момент времени; $N_{crit.}$ – критическое значение плотности плазмы, при котором для данной зондирующей длины волны происходит запирание (отсечка) сигнала; c – скорость света. С учетом рассеивания коэффициент поглощения можно представить в виде:

$$\chi = \ln \frac{f \cdot E_0}{E}, \qquad (2)$$

где E_0 – амплитуда падающей волны; E – амплитуда прошедшей волны; f – коэффициент рефракции, определяемый по методике [9].

Зависимость изменения средней частоты соударений от времени, вычисленная по формуле (1), приведена на Рис.7. Нарастание величины $\bar{\nu}$ в интервалах 2.7…4.9 мс (p=2.7·10^{-3} Торр) и 5.7…7.2 мс (p=3·10^{-2} Торр) объясняется падением электронной температуры, а дальнейшее уменьшение $\bar{\nu}$ после максимума связано с уменьшением плотности плазмы, так как к этому моменту времени температура электронов близка к тепловой. Эффективная частота соударений в плазме обуславливается соударением типа электрон-ион и электрон-нейтрал. Расчеты, согласно [10], показывают, что частота соударений типа электрон–нейтрал в данном случае составили примерно (1…8)·10^7 с$^{-1}$, что более чем на порядок меньше частоты соударений электрон-ион. Поэтому можно считать, что в нашем разряде преобладают электрон-ионные соударения, по которым можно оценить электронную температуру T_e [10]:

$$\nu_{ei} = \frac{5.5 \cdot N}{T_e^{3/2}} \ln\left(220 \frac{T_e}{N^{1/3}}\right). \qquad (3)$$

Оценка электронной температуры по формуле (3) показала, что при N_e = 3.5·10^{13} см$^{-3}$, температура электронов составляет $T_e \approx 0.5$ эВ (p= 2.7·10^{-3} Торр) и $T_e \approx 0.3$ эВ (p= 3·10^{-2} Торр) и уменьшается со временем. Таким образом, сделанное выше предположение об уменьшении электронной температуры с увеличением давления, является вполне оправданным и подтверждается экспериментально. Увеличение скорости распада плазмы от давления при плотностях N_e = (6.5…3.5)·10^{13} см$^{-3}$ связано с процессами рекомбинации.

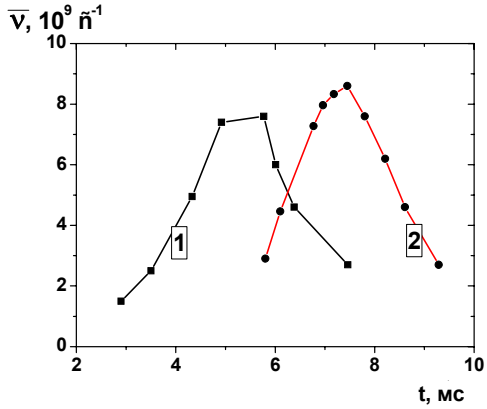

Рис.7. Зависимость средней частоты соударений в плазме от времени ($U_{dis.}$=3,8 кВ, U_H=1,4 кВ). 1 – p=2.7·10^{-3} Торр; 2 – p=3·10^{-2} Торр

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментов по определению параметров плотной газометаллической плазмы в импульсном отражательном разряде можно сделать следующие выводы:

1. В состав образованной плазмы входят ионы поджигающего газа Ar, материала катода Ti и остаточной атмосферы вакуумной камеры.

2. Величина максимального значения тока разряда $\bar{I}_{max}$ линейно растет с увеличением приложенного напряжения, при этом время достижения $\bar{I}_{max}$ коррелирует с временем нарастания плотности плазмы и взаимосвязано со скоростью ионизации плазмообразующей среды.

3. Время существования плазмы растет с увеличением приложенного напряжения и, соответственно, запасенной энергии (удельного энерговклада в плазму).

4. Увеличение скорости распада плазмы в диапазоне плотностей N_e = (6.5…3.5)·10^{13} см$^{-3}$ при увеличении давления связано с понижением электронной температуры и, как следствие, увеличением рекомбинационных потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Пат. 38780 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. Пристрій для розділення речовини на елементи / Є.І. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.І. Скибенко, В.Б. Юферов // *Промислова власність. Офіційний бюлетень.* 2009, №1.
3. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Системы с самовозбуждением ВЧ-колебаний для создания, нагрева и сепарации многокомпонентной плазмы // *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля» (37).* 2008, №794, в.1, с.115-120.
4. Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, И.Н. Онищенко, В.Б. Юферов. Исследование и выбор оптимального профиля пространственного распределения плотности плазмы для магнитоплазменных сепарационных технологий // *Журнал технической физики*. 2009, т.79, №9, с.138-141.
5. E.I. Skibenko, Yu.V. Kovtun, V.B. Yuferov. Plasma for injector-of separable material based on the beam-plasma discharge for ion-atomic separation technologies // *Ukrainian Journal of Physics*. 2008, v.53, №4, p.361-365.
6. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, А.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Определение эффективных скоростей ионизации многокомпонентных газовых и газопаровых смесей электронным ударом // *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля» (44).* 2009, №880, в.4, с.97-102.
7. Л.В. Гурвич, Г.В. Карачевцев, В.Н. Кондратьев, Ю.А. Лебедев, В.А. Медведев, В.К. Потапов, Ю.С. Холеев. *Энергия разрыва химических связей. Потенциал ионизации и сродство к электрону*. Москва: «Наука». 1974, 351с.
8. Дж. Хастед. *Физика атомных столкновений.* Москва: «Мир». 1965, 710с.
9. Л.А. Душин, А.И. Скибенко. *Микроволновые методы исследования плазмы I. Диагностика по затуханию и отсечке микроволн.* Харьков: ФТИ АН УССР. 1966, 36с.

10. В.Л. Гинзбург. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. Москва: «Государственное издательство физико-математической литературы». 1960, 552с.

Статья поступила в редакцию 01.06.2010 г.

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF A PULSED REFLEX DISCHARGE ON ITS PLASMA CHARACTERISTICS

Yu.V. Kovtun, A.I. Skibenko, E.I. Skibenko, Yu.V. Larin, A.N. Shapoval, V.B. Yuferov

The elemental composition of a dense gas-metal plasma comprising ions (atoms) of the igniting gas Ar, cathode material Ti and residual atmosphere of the vacuum chamber is determined. The parametric and time dependences of a discharge current and an average density of plasma formed are measured. At the stage of plasma density decay, the measurements were carried out of the plasma particle collision rate. Basing on the data obtained the electron temperature is evaluated.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНОГО ВІДБИВНОГО РОЗРЯДУ НА ЙОГО ПЛАЗМОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ю.В. Ковтун, А.І. Скібенко, Є.І. Скібенко, Ю.В. Ларін, А.М. Шаповал, В.Б. Юферов

Визначено елементний склад густої газометалевої плазми, яка складається з іонів (атомів) запалювального газу Ar, матеріалу катода Ti і залишкової атмосфери вакуумної камери. Виміряно параметричні і часові залежності розрядного струму, середньої густини створеної плазми. На стадії розпаду густини плазми проведено вимірювання частоти зіткнень частинок плазми, на підставі яких була оцінена електронна температура.