

## О КОЭФФИЦИЕНТАХ РАСПАДА НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ВОЛЬФРАМОВОГО ПРОВОДНИКА В ВОДЕ

*О.А. Федорович, Л.М. Войтенко*

*Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины, Киев, Украина*

*E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua*

Приводятся результаты экспериментального определения коэффициентов распада неидеальной плазмы, образующейся при взрыве вольфрамовых проводников в воде. Исследованы коэффициенты распада при плотностях электронов от  $10^{20}$  до  $5,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . С уменьшением концентрации электронов в указанном диапазоне коэффициенты распада увеличиваются от  $4 \cdot 10^{-18}$  до  $1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3/\text{с}$  при яркостной температуре  $(7 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ К}$ . Приводятся предположительные механизмы увеличения коэффициентов распада с уменьшением концентрации электронов.

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие в веществах в экстремальных состояниях до настоящего времени изучены недостаточно. Мало изучены и рекомбинационные процессы в неидеальной плазме (НП). В работах [1, 2] было показано, что отличие экспериментальных коэффициентов распада при концентрации электронов  $10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$  от расчетных [3, 6] может достигать шести порядков, и уменьшается по мере снижения концентрации электронов в плазме. Со всем не исследованы экспериментально коэффициенты распада плазмы при более высоких концентрациях электронов. За последнее время появилось несколько теоретических работ, в которых пытаются дать объяснение экспериментально наблюдаемому замедлению процесса рекомбинации неидеальной плазмы [7, 8, 9]. НП является неудобным объектом для теории, так как сильное межчастичное взаимодействие усложняет использование стандартных методов теоретической физики. А результаты, получаемые в разных теоретических работах даже одних и тех же авторов, зачастую получают прямо противоположные [3, 7]. Экспериментальных же данных по коэффициентам распада также нет. Это связано с отсутствием методик измерения параметров неидеальной плазмы. По уширению Штарка линии водорода серии Бальмера  $H_\alpha$  (656,3 нм) можно определить концентрации электронов до  $N_e \leq 10^{19} \text{ см}^{-3}$  [10, 11]. Но и здесь для получения правильных результатов измерения концентрации  $N_e$  по уширению требуется существенная корректировка контура реабсорбированной линии  $H_\alpha$  [12, 13].

По сплошному спектру надежно определить концентрацию электронов можно только до концентраций  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Это связано с тем, что при более высоких концентрациях электронов из спектра водорода исчезают линии  $H_\gamma$ ,  $H_\beta$ , а при  $N_e > 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и самая интенсивная линия  $H_\alpha$  (656,3 нм). Сравнение результатов определения излучательной способности при  $N_e > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , полученных разными авторами, указывает на противоречивость данных [14, 15]. Кроме этого, для измерения излучательной способности сплошного спектра необходимо знание оптической толщины канала ( $\tau$ ) и распределение температуры по каналу. Корректно измерить оптическую

толщину сплошного спектра методом просвечивания в плазме импульсного разряда в воде (ИРВ) не удастся [16]. Данные по измерению оптической толщины методом просвечивания в капиллярном разряде, приведенные в [15], могут быть не совсем точными при высоких концентрациях электронов. Это связано с тем, что просвечивание проводилось при помощи гелий-неонового лазера с длиной волны 632,8 нм [15]. Но, при высоких значениях концентрации электронов  $N_e$  линия водорода Бальмера  $H_\alpha$  (656,3 нм) может уширяться на  $\pm 30 \text{ нм}$  [10-13] и величина оптической толщины, измеренная на указанной длине волны, может быть в несколько раз завышена. В работе [17] приведена методика определения  $\tau$  плазменного канала в воде по распределению интенсивности в крыле реабсорбированной линии водорода  $H_\alpha$ . Значения  $\tau$  в области 632,8 нм при  $N_e > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , полученные по этой методике, достаточно большие, а величины излучательной способности водородно-кислородной плазмы оказались значительно меньше рассчитанных по различным теоретическим моделям [14]. Поэтому, по мнению автора работ [14, 18] при концентрациях электронов  $N_e > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  использовать значение величины излучательной способности для измерений  $N_e$  нельзя, так как значения  $N_e$  будут занижены.

При более высоких концентрациях электронов надежных диагностик  $N_e$  нет. А измерить можно только яркостную температуру плазмы по интенсивности излучения сплошного спектра плазмы на определенной длине волны. При  $N_e \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  плазменная частота попадает в область видимого спектра, поэтому измерять температуру можно только на участке спектра в области более коротких длин волн, чем наблюдаемая плазменная частота [19]. В области же плазменной частоты наблюдается провал интенсивности в 4-10 раз на участке спектра  $\sim \pm 50 \text{ нм}$ , а в более длинноволновой области спектра излучение из канала также сильно запирается [19]. Интенсивность излучения в длинноволновой области в 3-5 раз ниже, чем в области с длиной волны, меньшей длины волны, соответствующей плазменной частоте.

Кроме всего этого, плотную неидеальную плазму можно получать в лабораторных условиях только на

протяжении очень коротких промежутков времени, что затрудняет ее диагностику и исследования.

Целью настоящей работы является получение экспериментальной зависимости коэффициентов распада от концентрации электронов при  $N_e > 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования коэффициентов распада неидеальной плазмы при  $N_e > 10^{20} \text{ см}^{-3}$  проводились при импульсном электрическом взрыве проводников (ВП) из вольфрама в воде. Параметры установки, на которой проводились исследования, следующие: емкость накопительной батареи  $C=14,6 \text{ мкФ}$ , индуктивность разрядной цепи  $L=0,43 \text{ мкГн}$ . Начальное напряжение на батарее могло изменяться от 3 до 37 кВ, а запасаемая батареей энергия достигала 10 кДж. Период разряда в режимах короткого замыкания составлял 15,5 мкс. Длина разрядного промежутка  $l=40 \text{ мм}$ . Для иницирования разряда использовался проводник из вольфрама диаметром 320 мкм. Это связано с тем, что для получения более высоких концентраций электронов необходимо использовать разряд в парах металла, у которого потенциал ионизации значительно ниже, чем у водорода и кислорода. Первый потенциал ионизации атома вольфрама составляет 7,86 эВ [20]. Второй потенциал ионизации - 16,1 эВ. Третий, к сожалению, найти не удалось [20]. Потенциал ионизации водорода 13,595 эВ, кислорода - 13,614 эВ, а второй потенциал иона кислорода 35,108 эВ [20]. Кроме этого, для диссоциации молекул воды на водород и кислород необходимо потратить 9,5 эВ. ( $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}+\text{O}+\text{H}$ )— 9,5 эВ.

Поэтому понятно, что на получение однократной или двукратной ионизации атомов вольфрама затрачивается намного меньше энергии. В то же время иницирующий разряд проводник из вольфрама при электрическом взрыве нагревается до температур  $13 \cdot 10^3 \text{ К}$  (при температуре кипения  $6000 \pm 300 \text{ К}$ ) [21], что свидетельствует о его существенном перегреве. При таких высоких температурах значительно облегчается электрический пробой паров вольфрама, энергия ионизации которого меньше энергии ионизации атомов водорода и кислорода, а значит, можно получить большую плотность тока в канале и высокую концентрацию электронов. А учитывая сравнительно низкую энергию второй ионизации W, сравнимую с энергией ионизации H и O, можно ожидать и второй ионизации ионов вольфрама и получение более высокой концентрации электронов, чем при разрядах в воде с малым количеством примесей атомов вольфрама. Особенностью электрического разряда в воде является то, что ударная волна, образующаяся при взрыве, не светится, в отличие от ударной волны при взрыве в газах. А инерционные свойства воды, как квазинесжимаемой жидкости, позволяют удерживать плазменный канал от быстрого расширения. При этом, при больших скоростях ввода энергии удается получить достаточно высокие концентрации электронов в плазме паров металлов, особенно вольфрама. Типичная осциллограмма

электрического взрыва в воде проволоки из W диаметром 320 мкм приведена на Рис.1.

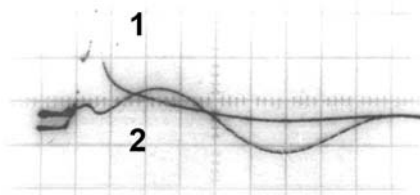


Рис.1. Осциллограммы падения напряжения на разрядном промежутке(1) и тока (2) в разряде для проволоки из W диаметром 300 мкм, U = 20 кВ, длиной 40 мм; скорость развертки- 2,5 мкс/дел

Особенностью измерений является то, что сигналы с омического делителя с постоянной времени  $< 25 \text{ нс}$  и коаксиального шунта специально разработанной конструкции, имеющего сопротивление  $R=6,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$ , подавались непосредственно на пластины осциллографа С1-51 (С8-17), что исключало погрешности усилителей, повышало точность измерений электрических характеристик и, соответственно, мощности и вводимой в канал энергии.

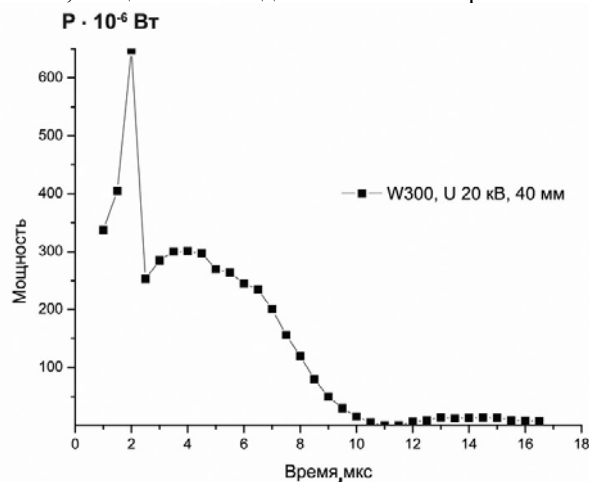


Рис.2. Зависимость мощности, введенной в канал, от времени (W 300 мкм, U= 20 кВ, длина разрядного промежутка 40 мм)

На Рис.2 приведена зависимость мощности, выделяющейся в канале при ВП из W при начальном напряжении на батарее 20 кВ, от времени. Из приведенного выше рисунка следует, что основной вклад мощности, а соответственно и энергии, происходит в первый полупериод, вкладом энергии во втором и последующих полупериодах можно пренебречь. Поэтому мы практически наблюдаем чистый распад плазмы вольфрама без подкачки энергии в последующие полупериоды. Вкладывается энергия в канал примерно 10 мкс, а релаксация плазмы происходит более 140 мкс. Зависимость яркостной температуры плазменного канала от времени приведена на Рис.3. Как следует из рисунка яркостная температура в первые 20 мкс ниже  $7 \cdot 10^3 \text{ К}$ , за исключением момента в первые микросекунды, когда еще металлический проводник (или пары вольфрама W) удается нагреть до  $13 \cdot 10^3 \text{ К}$  до его пробоя и получения плазменного канала.

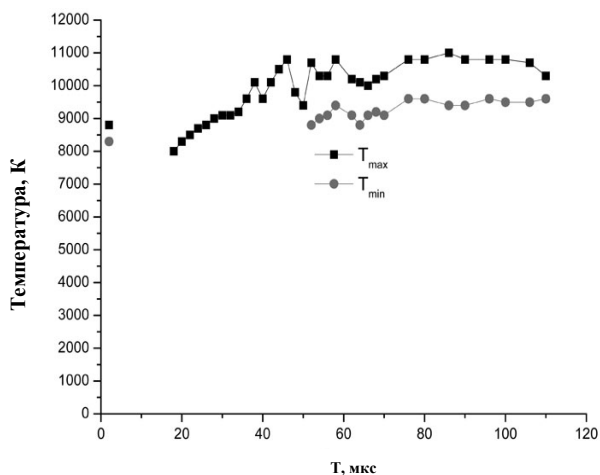


Рис.3. Зависимость яркостной температуры плазменного канала от времени ( $W=300$  мкм,  $U=20$  кВ, длиной 40 мм; скорость развертки 2,5 мкс/дел.;  $\lambda=475$  нм)

При нагреве проводника до температуры  $>7 \cdot 10^3$  К удастся зарегистрировать сплошной спектр, но нет ни одной линии излучения и поглощения (Рис.4,а), а величина оптической щели превышает  $\Delta E > 5,5$  эВ. Величина оптической щели – это разница между потенциалом ионизации и энергией наиболее высокого наблюдаемого в спектре уровня возбуждения.

В эти моменты времени  $N_e > 7 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, поэтому плазменная частота попадает в фиолетовую область, и излучение из плазмы не выходит на протяжении первых 20 мкс. По мере релаксации плазменного канала (а как видно на Рис.2 энергия в плазменный канал не вкладывается) за счет внутренней энергии происходит его расширение и уменьшение концентрации электронов. При этом начинает появляться сплошной спектр излучения (поглощения) в области спектра 490...560 нм (Рис.4,б). На 23 мкс проявляются в поглощении линии, соответствующие только самым нижним уровням (переходам) спектра, а энергия самого верхнего наблюдаемого уровня не превышает 2,97 эВ. При этом величина оптической щели составляет 4,66 эВ.

С дальнейшим уменьшением концентрации, на 53 мкс появляются линии поглощения с верхним уровнем 4,91 эВ, а величина щели соответственно составляет 3,66 эВ.

В последующие моменты времени, по мере уменьшения концентрации электронов, появляются линии со все более высокими верхними уровнями. На 83 мкс величина оптической щели составляет  $\Delta E = 3,06$  эВ, а на 133 мкс –  $\Delta E \approx 2$  эВ. Для определения концентрации электронов в поверхностном слое плазмы можно воспользоваться связью между величиной оптической щели и концентрацией электронов.

В работах [8, 9, 22-24] показано, что между величиной «оптической щели» и концентрацией электронов существует связь. Но теоретические работы, особенно при высоких значениях  $N_e$ , дают зависимости, существенно отличающиеся одна от другой. Поэтому воспользуемся эмпирической зависимостью величины оптической щели от  $N_e$ , приведен-

ной в работе [25]. В этой же работе приведены экспериментальные результаты и других авторов [26], которые не противоречат данным работы [25]. Эмпирическая формула имеет следующий вид (для однократной ионизации):  $\Delta E = 1,32 \cdot 10^{-5} \cdot N_e^{0,26}$ , где  $\Delta E$  – величина оптической щели в электронвольтах;  $N_e$  – концентрация электронов в кубическом сантиметре [25].

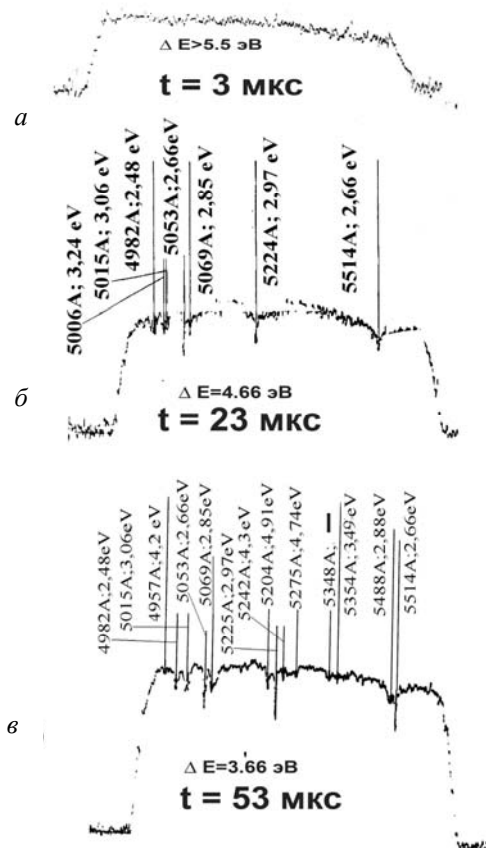


Рис.4. Запись спектра в области 4900...5600 Å в различные моменты времени (условия те же)

Результаты определения концентрации электронов при ВП из W диаметром 320 мкм, полученные по приведенной выше эмпирической формуле, с течением времени приведены на Рис.5.

Как видно из рисунка ход концентрации электронов уменьшается практически линейно (в полупологарифмическом масштабе) с течением времени. На Рис.6. приведены результаты изменения коэффициента распада в плазме разряда.

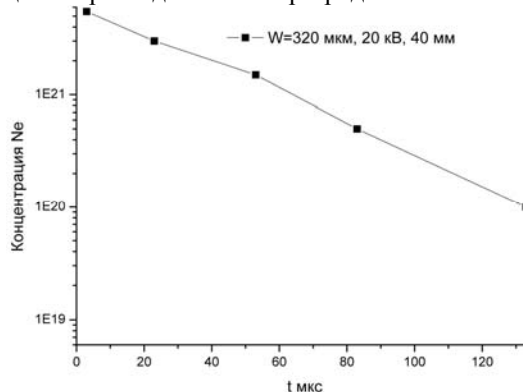


Рис.5. Зависимость хода во времени концентрации электронов. Условия те же

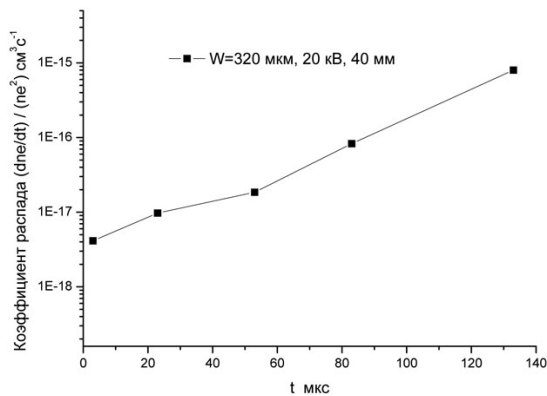


Рис.6. Зависимость коэффициента распада НП от времени. Условия те же

В двойном логарифмическом масштабе также получается линейное уменьшение коэффициента распада плазмы с увеличением концентрации электронов и уменьшением количества наблюдаемых линий поглощения вольфрама (Рис.7).

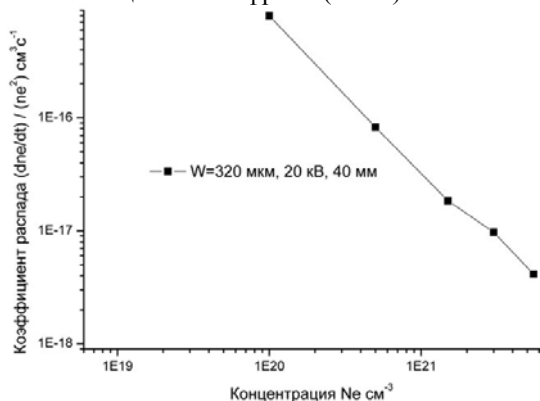


Рис.7. Зависимость коэффициента распада НП от концентрации электронов

В работах [1, 2] были получены результаты зависимостей коэффициентов распада водородно-кислородной плазмы от концентрации электронов, а в данной – вольфрамовой плазмы. Сравнение результатов приведено ниже. На Рис.8. отображены экспериментальные зависимости коэффициентов распада от концентрации электронов в диапазоне  $2 \cdot 10^{17} \leq N_e \leq 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . Как следует из рисунка, результаты достаточно хорошо сшиваются, зависимость коэффициента распада от концентрации электронов хорошо совпадает независимо от рода ионов, как и следует из теоретических предсказаний [27]. Однако, эти совпадения только качественные, но не количественные. В большинстве теоретических расчетов коэффициент рекомбинации (а соответственно, и коэффициент распада) должен увеличиваться с увеличением концентрации электронов и ионов [3, 27]. С точки зрения тройной рекомбинации (электрон-электрон-ион) такие результаты на первый взгляд являются логичными, так как коэффициент рекомбинации должен увеличиваться с количеством возможных столкновений, а следовательно, с увеличением концентрации электронов и ионов. Это справедливо для низких концентраций  $N_e$  ( $N_i$ ). Но при высоких концентрациях электронов ( $N_e > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) начинают существенно возрастать микрополя в плазме, которые приводят вначале к очень большому уширению ли-

ний, а потом и к их исчезновению из спектра. Таким образом, уменьшается количество уровней, на которые возможен захват электронов и, несмотря на увеличивающуюся частоту столкновений, рекомбинационные процессы замедляются. Только в работах [7-9] приведены теоретические обоснования снижения коэффициента рекомбинации с увеличением степени неидеальности плазмы. В работе [7] предполагается, что механизм рекомбинации при сильном электрон-ионном взаимодействии носит не тройной характер (электрон-электрон-ион), а скорее бинарный характер (электрон-ион).

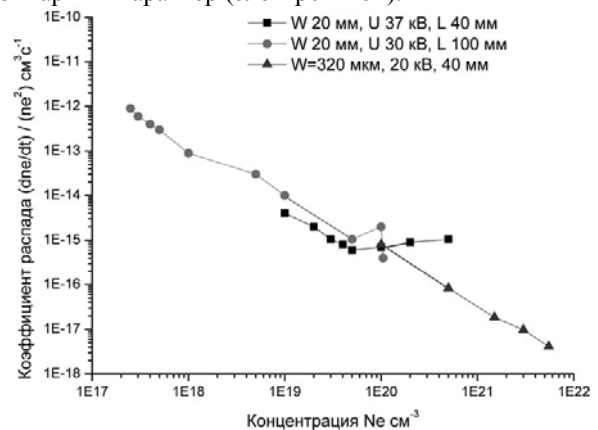


Рис.8. Зависимость коэффициента распада НП от концентрации электронов в широком диапазоне  $N_e$

В работах [8, 9] найдено, что зависимость столкновительной рекомбинации от неидеальности плазмы имеет максимум при  $\Gamma_{ee} \sim 1$ . В сильно неидеальной плазме скорость рекомбинации уменьшается с увеличением  $\Gamma_{ee}$ . При малых значениях  $\Gamma_{ee}$  результаты согласуются с моделью трехчастичной рекомбинации. В [8, 9] anomalous уменьшение скорости рекомбинации в НП объясняется образованием щели между ветвями энергетических спектров, которые соответствуют парам и свободным электронам (исчезновением энергетических уровней отдельных атомов в плотной плазме). Следует, однако, отметить, что в приведенном эксперименте линии излучения и поглощения водорода и кислорода в спектрах не наблюдаются, что может свидетельствовать о том, что разряд происходит исключительно в парах атомов вольфрама. С другой стороны, концентрации электронов, наблюдаемые при разрядах в парах вольфрама, выше  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . При таких концентрациях они и не должны наблюдаться, так как самая интенсивная линия  $H_\alpha$  (656,3 нм), согласно работе [25], не реализуется при концентрации электронов в плазме  $(4 \dots 5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а линии кислорода – еще при более низких концентрациях. Следует, однако, отметить еще два момента при определении концентрации электронов по реализовавшимся верхним уровням тех или других атомов. Первый – необходимость убедиться, что линии поглощения принадлежат плазменному каналу, а не окружающей плазменный канал воде, в которой также часто наблюдается поглощение в резонансных линиях  $\text{Na}_1$  и  $\text{Ca}_1$ ,  $\text{Ca}_2$ , что хорошо видно при подсветке от постороннего источника. Второй момент – необходимо пользоваться новыми справочными данными для

линий, которые приводятся в [20], так как уровни и длины волн в справочниках [28, 29] не всегда соответствуют реальным длинам волн, или очень близки к ним. Энергии переходов могут отличаться на несколько электронвольт, что может привести к ошибкам при определении  $N_e$  по величине «оптической щели».

Следует также заметить, что концентрацию электронов между 3 и 23 мкс не удалось определить, так как спектр излучения в видимом диапазоне здесь полностью экранирован из-за того, что находится в длинноволновом участке спектра за областью плазменной частоты. В более поздние моменты времени диагностика  $N_e$  по величине «оптической щели» проводится надежно. В поверхностных слоях плазменного канала линии ионов вольфрама также не наблюдались.

## ВЫВОДЫ

Коэффициенты распада неидеальной плазмы из атомов и ионов вольфрама при  $N_e > 10^{20} \text{ см}^{-3}$  уменьшаются с увеличением концентрации электронов в НП и наоборот.

Концентрация электронов в поверхностном слое плазменного канала определялась по эмпирической формуле зависимости «оптической щели» от концентрации электронов. Скорость распада неидеальной плазмы при высоких концентрациях электронов ( $N_e > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) увеличивается с увеличением количества линий вольфрама, появляющихся в спектрах излучения-поглощения.

Интенсивность излучения сплошного спектра также увеличивается с увеличением количества уровней в спектре.

## ЛИТЕРАТУРА

1. О.А. Федорович, Л.М. Войтенко. Экспериментальні дослідження коефіцієнта розпаду неідеальної плазми імпульсних розрядів у воді // *Український фізичний журнал*. 2008, т.53, №5, с.451-457.
2. О.А. Федорович, Л.М. Войтенко. О коэффициентах распада неидеальной плазмы импульсных разрядов в воде при концентрациях электронов  $2 \cdot 10^{20} \geq N_e \geq 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2008, №4, с.288-293.
3. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. *Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы*. М.: «Атомиздат», 1982, 378 с.
4. Д. Бейтс, А. Далгарно. Электрон-ионная рекомбинация // *Атомные и молекулярные процессы* / Под ред. Д.Бейтса. М.: «Мир», 1964, с.224-247.
5. N. D'Angelo. Recomb. of ions and electrons // *Ph. Rev.* 1961, v.121, №2, p.505-507.
6. Ю.К. Куриленков. О влиянии неидеальности на коэффициент рекомбинации плотной плазмы // *ТВТ*. 1980, т.18, №6, с.1312-1314.
7. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. Коэффициенты рекомбинации в неидеальной плазме // *ДАН*. 1987, т.296, №33, с.576-578.
8. Lankin, G. Norman. Density and Nonideality Effects in Plasmas // *Contribution to Plasma Physics* 49. 2009, №10, p. 723-731.
9. А.В. Ланкин. Ограничение возбужденных атомных состояний и столкновительная рекомбинация в неидеальной плазме // *Автореф. дис. ... канд. физ-мат наук*. Москва, 2010, ОИВТ, 22 с.
10. Г. Грим. *Уширение линий в плазме*. М.: «Мир», 1978, 492 с.
11. В.В. Матвиенко, А.Ю. Попов, О.А. Федорович. К вопросу об использовании линий излучения для измерения параметров плазмы импульсного разряда в воде // *Теория, эксперимент, практика разрядноимпульсной технологии*. Киев: «Наукова думка», 1987, с.14-22.
12. О.А. Федорович. Методика восстановления контуров реабсорбированных линий излучения в плазме высокого давления // *Материалы 12-й Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. Николаев: «Атолл», 2005, с.9-12.
13. О.А. Федорович. Об особенностях определения концентрации электронов по штарковскому уширению линии  $H_\alpha$  в неоднородной плотной плазме // *Материалы 13-й Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. Николаев, 2007, с.118-119.
14. А.Ю. Попов, О.А. Федорович. Об излучательной способности неидеальной плазмы импульсного разряда в воде в диапазоне спектра 350...700 нм // *Тез. Докладов IV ВНТК «Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности»*. Николаев, 1988, с.13-14.
15. Т.В. Гаврилова, В.П. Аверьянов, И. Витель и др. Спектр поглощения плотной плазмы водорода в области серии Бальмера // *Оптика и спектроскопия*. 1997, т.82, №5, с.757-764.
16. О.А. Федорович. Методика экспериментального определения оптической толщины плазменного канала методом просвечивания и возможности ее применения для импульсных разрядов в воде // *Ядерная физика та енергетика*. 2008, № 1, с.43-51.
17. О.А. Федорович. Методика экспериментального определения оптической толщины плазменного канала импульсных разрядов в воде по контуру реабсорбированной линии водовода  $H_\alpha$  // *Ядерная физика та енергетика*. 2010, №1, с.97-107.
18. О.А. Федорович. Определение концентрации электронов импульсного разряда в воде на стадии релаксации по интенсивности сплошного спектра // *Материалы 13-й Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. Николаев: «Атолл», 2007, с.28-30.
19. О.А. Федорович. О влиянии плазменной частоты на сплошной спектр излучения неидеальной плазмы импульсного разряда в воде в видимом диапазоне // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»* (6), 2009, №4. с.283-287.
20. NIST: Ground Levels and Ionisation Energies. <http://Physics.nist.gov/IonEnergy/tblnew.html>
21. О.А. Федорович. Экспериментальные измерения температуры взрывающихся проволок из вольфрама // *Материалы 13-й Международной школы-*

- семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». Николаев, 2007, с.56-57.
22. *Методы исследования плазмы* / Под. ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: «Мир», 1971.
  23. Г.А. Кобзев, Ю.К. Куриленков, Г.Э. Норман. К теории оптических свойств неидеальной плазмы // *ТВТ*. 1977, т.15, №1, с.193-196.
  24. В.С. Воробьев, А.Л. Хомкин. Влияние флуктуации потенциала в плазме на заселенность высоковозбужденных состояний атомов // *Физика плазмы*. 1982, т.8, №6, с.1274-1284.
  25. О.А.Федорович. Эмпирическая формула зависимости величины «оптической щели» в НП от концентрации электронов в диапазоне  $10^{17} < n_e < 10^{22} \text{ см}^{-3}$  // *Материалы XI Международной научной школы семинара «Физика импульсного разряда в конденсированных средах»*. Николаев: «Атолл», с.11-13.
  26. Б.Г. Жуков, В.Г. Масленников, Г.К. Тумакаев. О коэффициентах поглощения неидеальной плазмы ксенона в видимой области спектра // *ЖТФ*. 1981, т.51, №10, с.2194-2196.
  27. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. Кинетика ударно-радиационной ионизации и рекомбинации // *УФН*. 1972, т.107, №3, с.353-386.
  28. Ч. Корлисс, У. Бозман. *Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов*. М.: «Мир», 1968, 562 с.
  29. В.К. Прокофьев, С.М. Райский и др. *Таблицы спектральных линий*. М.: «Наука», 1977, 800 с.

Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.

#### **ABOUT FACTORS OF DISINTEGRATION OF NONIDEAL PLASMA AT EXPLOSION OF THE TUNGSTIC CONDUCTOR IN WATER**

*O.A. Fedorovich, L.M. Vojtenko*

Results of experimental definition of disintegration coefficient of the nonideal plasma, formed at explosion of tungsten wires in water, are resulted. Disintegration coefficient are investigated at electron density from  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  to  $5,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . With reduction of concentration in the indicated electron density range disintegration coefficients increase from  $4 \cdot 10^{-18}$  to  $10^{-15} \text{ см}^3 / \text{s}$  at brightness temperature  $(7 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ K}$ . Supposed mechanisms of increase in disintegration coefficient with reduction of electron concentration are presented.

#### **ПРО КОЕФІЦІЄНТИ РОЗПАДУ НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ ПРИ ВИБУХУ ВОЛЬФРАМОВОГО ПРОВІДНИКА У ВОДІ**

*O.A. Федорович, Л.М. Войтенко*

Приведено результати експериментального визначення коефіцієнтів розпаду неідеальної плазми, що утворюється при вибуху вольфрамових провідників у воді. Досліджено коефіцієнти розпаду при концентраціях електронів від  $10^{20}$  до  $5,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Зі зменшенням концентрації електронів у зазначеному діапазоні коефіцієнти розпаду збільшуються від  $4 \cdot 10^{-18}$  до  $1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3 / \text{с}$  при яскравішій температурі  $(7 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ K}$ . Приводяться можливі механізми збільшення коефіцієнтів розпаду зі зменшенням концентрації електронів.