

03
Влияние нагрева газа на генерацию сверхкороткого лавинного электронного пучка в импульсно-периодическом режиме

© Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: Lomaev@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 7 ноября 2014 г.)

Исследована генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) в азоте в импульсно-периодическом режиме. По распределению интенсивности неразрешенных вращательных переходов ($C^3P_u, v' = 0 \rightarrow B^3P_g, v'' = 0$) молекулы азота измерена газовая температура в разрядном промежутке в азоте атмосферного давления при частоте повторения импульсов возбуждения 2 kHz. Показано, что увеличение амплитуды тока СЛЭП в импульсно-периодическом режиме обусловлено нагревом газа за счет серии предыдущих импульсов, что приводит к увеличению приведенной напряженности электрического поля вследствие уменьшения плотности газа в зоне формирования разряда. Установлено, что при импульсно-периодическом режиме и формировании диффузного разряда число электронов в пучке при давлении азота $9 \cdot 10^3$ Pa увеличивается в несколько раз. Приведены зависимости числа электронов в СЛЭП от времени работы генератора.

Введение

Для получения в воздухе атмосферного давления значительного числа убегающих электронов (УЭ) в пучке за анодной фольгой ($> 10^{10}$) на промежуток подаются импульсы напряжения с субнаносекундным фронтом [1]. Генерация УЭ и рентгеновского излучения при повышенных давлениях различных газов наблюдается при разрядах в неоднородном электрическом поле, см. обзоры [2,3], в которых суммированы результаты исследования за последние годы, и ссылки в [2,3]. Для достижения максимальных амплитуд сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) используются катоды с малым радиусом кривизны и увеличенной длиной рабочей кромки [1,4,5]. Однако при значительном увеличении длины катода суммарная длительность тока пучка УЭ на полувысоте увеличивается и становится более 100 ps [6]. Причина — это генерация УЭ с разных участков катода в разное время из-за различия задержек прихода фронта волны напряжения. Поэтому для генерации СЛЭП с длительностью импульса тока ~ 100 ps поперечный размер катода с увеличенной длиной рабочей кромки должен быть ~ 4 см и менее. В работах [1,5] для решения этой проблемы применялся катод из параллельно натянутых проволочек. Кроме того, для получения максимальных токов пучка УЭ боковая поверхность газового диода должна быть сформирована диэлектриком проходного изолятора, внутренняя поверхность которого имеет форму конуса [1,5].

Известно, что ток пучка УЭ может быть увеличен при уменьшении давления (концентрации частиц газа) в разрядном промежутке [7–12]. Это может быть достигнуто за счет уменьшения давления газа [7,9–11], предварительно разряда в промежутке [8] или при нагреве газа в результате лазерного пробоя [12]. Как было показано

в работах [9–11], длительность импульса тока СЛЭП при уменьшении давления гелия, водорода и азота существенно не изменяется до давлений 10^2 – 10^3 Pa. Это позволяет увеличить амплитуду тока СЛЭП, сохраняя субнаносекундную длительность импульса тока пучка.

В импульсно-периодическом режиме нагрев газа предшествующими импульсами также может приводить к увеличению амплитуды тока СЛЭП. Этот режим был реализован в работе [13], где экспериментально было показано, что при формировании диффузного разряда в импульсно-периодическом режиме амплитуда тока СЛЭП (число электронов в пучке) увеличивается в несколько раз. Было высказано предположение, что это увеличение происходит за счет значительного нагрева газа в разрядном промежутке. Однако температура газа в области разряда не была измерена.

Цель настоящей работы — по распределению интенсивности неразрешенных вращательных переходов ($C^3P_u, v' = 0 \rightarrow B^3P_g, v'' = 0$) молекулы азота определить температуру газа в разрядном промежутке, а также измерить параметры СЛЭП при импульсно-периодическом режиме разряда. Настоящая работа является продолжением исследований генерации пучков убегающих электронов при частоте следования импульсов возбуждения 1 kHz и более, которые были начаты в работах [13–15].

Экспериментальная установка и методики

В экспериментах использовалась разрядная камера, показанная на рис. 1, на которую подавались импульсы напряжения от генератора NPG-15/2000N [16]. Генератор формировал импульсы напряжения с амплитудой

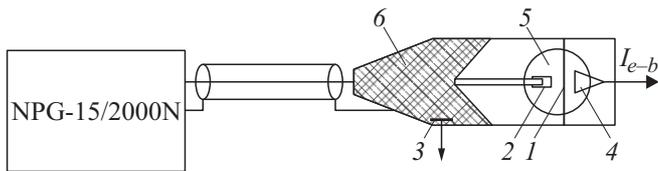


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — анод, 2 — катод, 3 — емкостной делитель напряжения, 4 — приемная часть коллектора, 5 — газовый диод, 6 — изолятор газового диода.

до 35 kV и частотой до 3.5 kHz, которые по кабелю длиной 3 м с волновым сопротивлением 75 Ω подавались на разрядный промежуток. Длительность импульса напряжения на полувысоте составляла ~ 6 ns при фронте ~ 2.5 ns на уровне 0.3–0.9 и работе на согласованную (75 Ω) нагрузку. Разрядная камера, которая заполнялась азотом, была подключена к газовому пульту с вакуумметром. Объем разрядной камеры равнялся ~ 200 см³, а газовой системы ~ 1000 см³. Межэлектродный промежуток в большинстве экспериментов равнялся 12 mm. В работе использовался трубчатый катод из нержавеющей стали диаметром 6 mm. Толщина кромки катода равнялась 200 μ m, кромка была округлена. Анодом служила сетка с прозрачностью 64% и размером отдельной ячейки 1 \times 1 mm. За основной сеткой на расстоянии 2 mm устанавливалась дополнительная сетка, которая экранировала коллектор от емкостного тока [17] и защищала коллектор от попадания на него разрядной плазмы. Вторая сетка имела прозрачность 30%. Отметим, что динамический емкостной ток возникает за счет зарядки емкости „сжимающегося“ конденсатора, который образуется между фронтом плотной плазмы, формирующейся во время пробоя в разрядном промежутке, и анодом [18]. В ряде экспериментов вторая сетка заменялась фольгой из алюминия толщиной 3 μ m или металлизированной (слой алюминия толщиной 0.2 μ m) пленкой из кимфоли (C₁₆H₁₄O₃) толщиной 2 μ m. При использовании анода из Al фольги или кимфоловой пленки, а также второй сетки с малой прозрачностью динамический емкостной ток коллектором не регистрировался. Для измерения тока пучка применялся конический коллектор с диаметром приемной части 20 mm. Амплитуды тока или число электронов в пучке, приводимые в работе, соответствуют амплитудам СЛЭП, регистрируемым в настоящей работе с площадки анодной фольги диаметром 20 mm. Центр этой площадки находился на продольной оси газового диода. Коллектор устанавливался за двумя сетками или за сеткой и фольгой. Потери тока пучка в сетках и фольге при измерениях не учитывались. Временное разрешение коллектора и всей системы регистрации было не хуже 0.1 ns. Сигналы с емкостного делителя, установленного в разрядной камере, шунта и коллектора подавались на осциллограф DPO70604 (6 GHz, 25 выборок за наносекунду). Свечение из разрядного промежут-

ка фотографировалось через боковое окно фотоаппаратом Sony A100. Спектры излучения регистрировались с помощью спектрометра Ocean Optics HR4000.

Экспериментальные результаты

Амплитудно-временные характеристики СЛЭП

Известно, что эффективная генерация СЛЭП наблюдается при формировании в промежутке диффузного разряда. Однако при атмосферном давлении воздуха и других газов увеличение частоты повторения импульсов в отсутствие прокачки газа через промежуток приводит к быстрому контрагированию разряда. При этом амплитуда тока СЛЭП существенно уменьшается, а дальнейшее увеличение частоты следования импульсов приводит к прекращению генерации СЛЭП (см., например, [19]). При амплитуде импульса напряжения 100 kV и более и высоких (> 100 Hz) частотах повторения в настоящее время удалось зарегистрировать только рентгеновское излучение [15,18,19]. Проведенные исследования подтвердили, что для формирования диффузного разряда при повышенных частотах необходимо использовать наносекундные генераторы со сравнительно малыми энергиями в импульсе. Это достигалось при наносекундной длительности импульса напряжения за счет уменьшения его амплитуды до десятков киловольт. Однако при таких напряжениях пришлось уменьшить рабочее давление азота до $9 \cdot 10^3$ Pa.

Свечение диффузного разряда в промежутке в импульсно-периодическом режиме показано на рис. 2. Фотографирование проводилось через боковое окно. При напряжении 25 kV и частоте следования импульсов

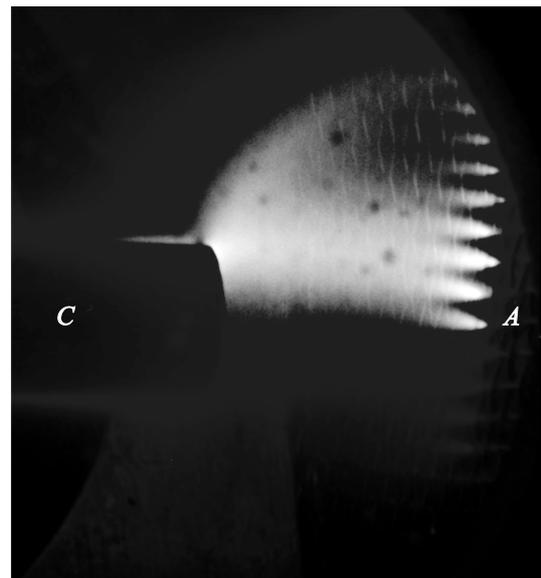


Рис. 2. Фотография разряда в азоте при давлении $9 \cdot 10^3$ Pa и частоте следования импульсов 1750 Hz. Напряжение генератора 25 kV. На свечении разряда у анода A видна структура сетки.

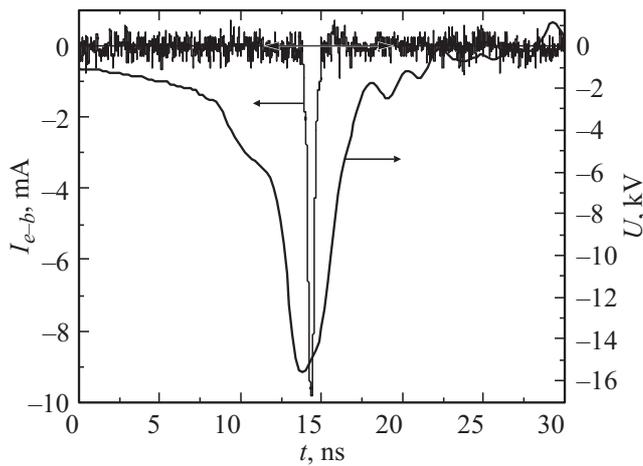


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока пучка I_{e-b} . Напряжение генератора 25 кВ, давление азота $9 \cdot 10^3$ Па, частота следования импульсов 2 кГц.

до 2.5 кГц разряд формировался около продольной оси разрядной камеры. При дальнейшем увеличении частоты или напряжения генератора положение плазменного образования в камере становилось нестабильным. На фотографиях свечения промежутка было видно, что разряд оставался диффузным, однако замыкался на различные участки анода. Соответственно в этих условиях амплитуда тока СЛЭП существенно изменялась от импульса к импульсу.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов напряжения на промежутке и тока СЛЭП при частоте следования импульсов 2 кГц. Видно, что при амплитуде импульса напряжения генератора 25 кВ пробой наступает при меньшем напряжении. Генерация импульса тока СЛЭП (момент времени, при котором импульс тока пучка регистрируется коллектором) совпадает с быстрым спадом напряжения на промежутке и ростом тока разряда. Длительность импульса тока СЛЭП на полувысоте в этом режиме равнялась ~ 440 пс. Осциллограмма тока пучка на рис. 3 представлена без учета поглощения в двух сетках. С его учетом амплитуда тока пучка была бы в ~ 5 раз больше. При увеличении амплитуды импульса напряжения генератора от 25 до 35 кВ напряжение пробоя увеличилось незначительно.

Влияние нагрева азота на число электронов в СЛЭП

Зависимости числа электронов в СЛЭП при двух напряжениях генератора от времени работы генератора при частоте следования импульсов 2.5 кГц приведены на рис. 4. Каждая точка на кривых рис. 4 получена при усреднении по 128 импульсам. Видно, что при напряжении 25 кВ число электронов в СЛЭП в течение ~ 70 с возрастает, а затем стабилизируется. Это связано с увеличением температуры азота в промежутке, а

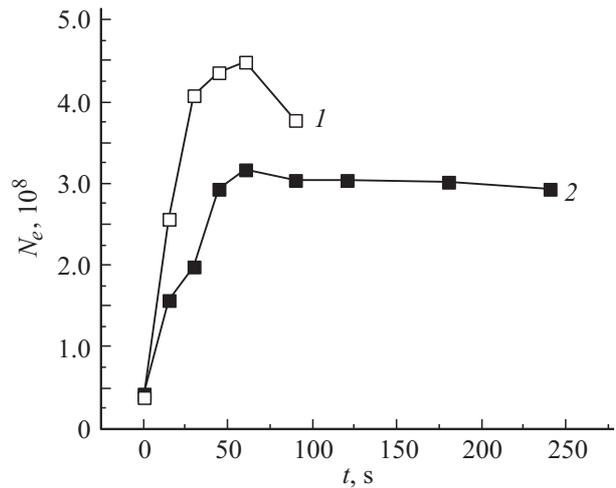


Рис. 4. Зависимость числа электронов N_e в СЛЭП от времени t после включения при частоте следования импульсов 2.5 кГц и напряжениях генератора 35 кВ (1) и 25 кВ (2).

после ~ 70 с — с ее стабилизацией. Форма разряда в промежутке в этих условиях существенно не изменяется и соответствует форме разряда, показанной на рис. 2. Увеличение напряжения генератора до 35 кВ, соответственно энергии в отдельном импульсе возбуждения в 2 раза при частоте следования импульсов 2.5 кГц дало заметное увеличение числа электронов в СЛЭП. Однако после ~ 60 с времени работы генератора положение плазменного образования в промежутке становилось нестабильным и число электронов в СЛЭП уменьшалось, а после 100 с работы генератора ток пучка УЭ коллектором не регистрировался. Разрядная камера при проведении данных экспериментов была подключена к газовому пульту с вакуумметром, с помощью которого в процессе работы контролировалось давление. Увеличение давления в газовой системе при работе генератора при напряжении 35 кВ и частоте следования импульсов 2.5 кГц составляло за 5 мин работы менее 10%.

Определение температуры газа в разрядном промежутке

Для определения температуры газа в зоне разряда T_g был использован спектральный метод. Он основан на измерении относительной интенсивности вращательной структуры электронно-колебательных переходов [20,21]. В частности, излучение второй положительной системы азота на электронном переходе $(C^3\Pi_u) \rightarrow (B^3\Pi_g)$ используется для измерения колебательной и вращательной температур в газоразрядной плазме, содержащей азот [22,23]. Известно, что температура газа T_g связана с вращательной температурой T_{rot} за счет процессов обмена энергией при неупругих столкновениях между молекулами. Число неупругих столкновений, требующихся для вращательно-поступательной релаксации, со-

составляет 4–6 [24]. Среднее время между столкновениями молекул $\bar{\tau}_{Coll}$ можно рассчитать согласно (1):

$$\bar{\tau}_{Coll} = \frac{1}{[N_2]\sqrt{2}\bar{v}\sigma}, \quad (1)$$

где $[N_2]$, \bar{v} , σ — плотность, средняя тепловая скорость и газокинетическое сечение молекул азота соответственно. Из (1) следует, что величина $\bar{\tau}_{Coll}$ обратно пропорциональна как плотности газа, так и тепловой скорости молекул газа. При давлении газа $9 \cdot 10^3$ Па и комнатной температуре время вращательно-поступательной релаксации τ_{R-T} составляет ~ 6 ns, что сопоставимо в условиях проведенных экспериментов с длительностью фазы энерговода в плазму разряда и соответственно фазы нагрева газа. Поэтому для уменьшения τ_{R-T} измерение T_g было проведено при давлении азота 0.1 МПа. Величина τ_{R-T} при атмосферном давлении составляет ~ 0.65 ns, что значительно меньше длительности фазы нагрева газа. Связь между величинами T_g и T_{rot} установлена в [25]:

$$T_g \approx T_{rot} \frac{B_e^0}{B_e^*} \approx 1.09 T_{rot}. \quad (2)$$

В (2) B_e^0 , B_e^* — вращательные константы состояний $X^1\Sigma_g^+$ и $C^3\Pi_u$ молекулы азота соответственно.

Измерение T_g газоразрядной плазмы азота проводилось при частоте следования импульсов возбуждения 2 kHz, атмосферном давлении и напряжении генератора 25 kV. Межэлектродный зазор при этом составлял 8 mm, а катод был выполнен в виде конуса. Спектр излучения электронно-колебательного перехода ($C^3\Pi_u, v=0$) \rightarrow ($B^3\Pi_g, v=0$) молекул азота и внешний вид разряда при данных условиях возбуждения приведены соответственно на рис. 5 и 6. Величина T_g , рассчитанная согласно (2) для данных условий, составила $\sim 820^\circ\text{K}$. Нагрев возбуждаемого объема газа за

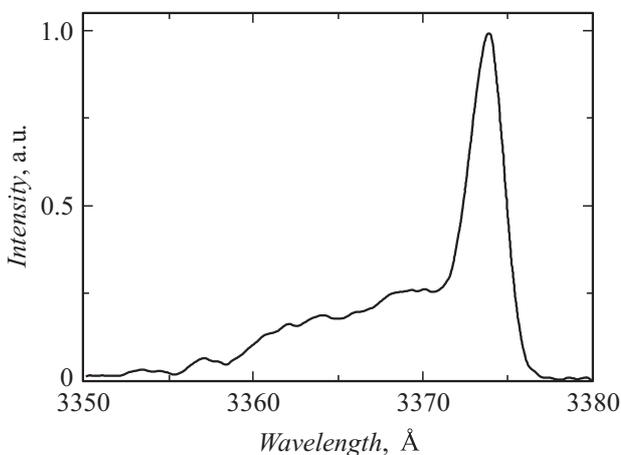


Рис. 5. Спектр излучения ($C^3\Pi_u, v'=0$) \rightarrow ($B^3\Pi_g, v''=0$)-переходов молекул азота в плазме разряда в азоте атмосферного давления. Частота следования импульсов 2 kHz, напряжение 25 kV, межэлектродный промежуток 8 mm, расход газа при его прокачке через разрядную камеру 10 L/min.

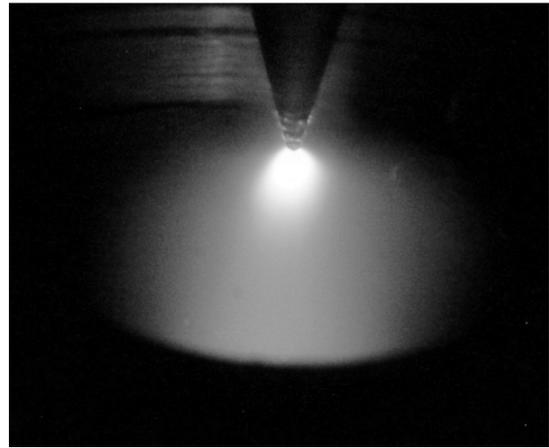


Рис. 6. Внешний вид разряда в азоте атмосферного давления. Частота следования импульсов 2 kHz, напряжение 25 kV, межэлектродный промежуток 8 mm, расход газа при его прокачке через разрядную камеру 10 L/min.

один импульс возбуждения, рассчитанный на основе известной величины энергосодержания отдельного импульса возбуждения при заданном напряжении генератора и величины возбуждаемого объема, оцениваемого приблизительно как объем плазменного образования на рис. 6, составил $\sim 60^\circ\text{K}$. Следовательно, для разогрева газа до $\sim 820^\circ\text{K}$ от исходной комнатной температуры требуется ~ 9 импульсов возбуждения при условии отсутствия энергопотерь из возбуждаемого объема. Для стабилизации и получения диффузной формы разряда при измерении T_g осуществлялась прокачка азота комнатной температуры через разрядную камеру с его последующим выбросом в атмосферу. Расход газа при его прокачке составлял 10 (L/min). Количество импульсов возбуждения, в течение которых при данных условиях происходит полная смена газа в возбуждаемом объеме, составляет ~ 120 импульсов. Из проведенных оценок следует, что температура газа в возбуждаемом объеме близка к $\sim 760^\circ\text{K}$ перед подачей на разрядный промежуток очередного импульса возбуждения. Из условия равенства давления в зоне разряда и оставшейся части разрядной камеры, а также из известного уравнения состояния идеального газа (3):

$$p = N k T \quad (3)$$

следует, что плотность газа в возбуждаемом объеме в ~ 2.8 раза ниже по отношению к плотности газа при нормальных условиях. В (3) p , N , T , k — давление, плотность, температура газа и постоянная Больцмана соответственно.

Обсуждение экспериментальных результатов

Основными отличиями импульсного и импульсно-периодического режимов разряда с точки зрения дости-

жения условий для генерации СЛЭП являются остаточная ионизация разрядного промежутка и изменение T_g в зоне разряда во втором случае. Остаточная ионизация газа приводит к уменьшению напряжения пробоя, а изменение температуры — к изменению плотности газа в зоне разряда. Оба фактора влияют на величину приведенной напряженности электрического поля E/N , где E — напряженность электрического поля, а N — плотность газа. Параметр E/N является ключевым с точки зрения ухода электронов в режим непрерывного ускорения и соответственно достижения условий генерации СЛЭП [3]. При проведении эксперимента по регистрации СЛЭП было обнаружено монотонное уменьшение напряжения пробоя от ~ 25 до ~ 16 кВ в течение первых ~ 70 с после включения (рис. 4, кривая 2). Это указывает на ~ 1.5 кратное уменьшение напряженности поля при пробое в случае установившегося режима разряда. В то же время, как следует из результатов измерения T_g , при прокачке газа ее величина в зоне разряда значительно (в ~ 2.8 раза) выше комнатной. При условиях регистрации СЛЭП — при давлении $9 \cdot 10^3$ Па, отсутствии прокачки газа и сохраняющемся уровне мощности возбуждения — следует ожидать больших значений температуры газа в зоне разряда. Соответственно значение параметра E/N , реализующегося при регистрации СЛЭП в установившемся режиме, значительно превышает его величину в первых импульсах после включения. Это является основной причиной наблюдаемого роста числа электронов СЛЭП на стадии выхода разряда в установившийся режим. Косвенным доказательством этого утверждения является большая длительность импульса тока СЛЭП на полувысоте ~ 440 ps. Так, в работе [11] (рис. 3) при уменьшении давления азота до $\sim 1.5 \cdot 10^2$ Па и амплитуде импульса напряжения 270 кВ длительность СЛЭП на полувысоте составила ~ 350 ps. Отметим, что вопрос о генерации убегающих электронов в микроканалах с пониженной плотностью газа вследствие нагрева обсуждался в работе [26].

Заключение

В настоящей работе в зоне диффузного импульсно-периодического разряда в азоте при атмосферном давлении спектральным методом определена температура газа. При частоте следования импульсов 2 кГц и амплитуде напряжения генератора 25 кВ она достигала $\sim 820^\circ\text{K}$. В то же время нагрев газа в разрядном объеме в течение отдельного импульса возбуждения, согласно оценкам, не превышает $\sim 60^\circ\text{K}$. Это означает, что температура газа в разрядной области перед приходом очередного импульса возбуждения оказывается не ниже $\sim 760^\circ\text{K}$ даже в условиях прокачки газа. Наблюдаемый рост числа электронов СЛЭП на стадии выхода разряда в установившийся режим при давлении $9 \cdot 10^3$ Па и частоте следования импульсов 2.5 кГц можно объяснить увели-

чением параметра E/N вследствие значительного роста температуры и соответственно уменьшения плотности газа в области разряда.

Установлено, что режим с увеличенной амплитудой тока СЛЭП можно стабилизировать без прокачки газа через промежуток при соответствующем выборе амплитуды импульса напряжения и частоты следования импульсов, а также сохранять параметры СЛЭП в течение единиц-десятков минут. По-видимому, подобные режимы генерации СЛЭП можно реализовать и при напряжениях генератора 100 кВ и более за счет сокращения длительности импульса до нескольких сот пикосекунд.

Исследование было выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 14-29-00052.

Список литературы

- [1] Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 80–85.
- [2] Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. // Plasma Devices and Operation. 2008. Vol. 16. N 4. P. 267–298.
- [3] Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. // International Review of Physics. 2012. Vol. 6. N 2. P.165–195.
- [4] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Бакит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 21. С. 79–87.
- [5] Костыря И.Д., Бакит Е.Х., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 84–87.
- [6] Shunailov A.S., Sharypov K.A., Shpak V.G., Yalandin M.I. // Proc. of the First Euro-Asian Pulsed Power Conf. Chengdu. China, 2006. Vol. 1. P. 415–418.
- [7] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564–568.
- [8] Коляда Ю.Е. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 16. С. 52–56.
- [9] Бакит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 12. С. 29–34.
- [10] Тарасенко В.Ф., Бакит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Шутько Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 60–67.
- [11] Tarasenko V.F., Baksh E.K., Burachenko A.G., Lomaev M.I., Sorokin D.A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38. N 10. P. 2583–2587.
- [12] Лисенков В.В., Шкляев В.А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 43–49.
- [13] Бакит Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 5. С. 480–488.
- [14] Ерофеев М.В., Бакит Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 2. С. 52–58.
- [15] Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Baksh E.Kh., Zhang D., Erofeev M.V., Ren C., Shut'ko Yu.V., Yan P. // J. of Appl. Phys. 2013. Vol. 113. N 3. P. 093 301.
- [16] Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г., Спичкин Г.Л. // ПТЭ. 2012. Т. 55. № 5. С. 99–102.
- [17] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 11. С. 118–122.

- [18] *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Burachenko A.G., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Baksht E.Kh., Yan P.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2013. Vol. 84. P. 053 506.
- [19] *Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Рукин С.Н., Словицкий Б.Г., Костыря И.Д., Орловский В.М.* // *ЖТФ.* 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 69–74.
- [20] *Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. Пер. с англ. / Под ред. С.Ю. Лукьянова. М.: Мир, 1971. 552 с.*
- [21] *Очкин В.Н.* *Спектроскопия низкотемпературной плазмы.* М.: Физматлит, 2006. 472 с.
- [22] *Britun N., Gaillard M., Kim Y.M., Kim K.S., Han J.G.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. Vol. 40. P. 1022–1029.
- [23] *Nassar H., Pellerin S., Musiol K., Martinie O., Pellerin N., Cormier J.-M.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. Vol. 37. P. 1904–1916.
- [24] *Phillips D.M.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1975. Vol. 8. P. 507–521.
- [25] *Оторбаев Д.К., Очкин В.Н., Рубин П.Л.* *Электронно-возбужденные молекулы в неравновесной плазме.* М.: Наука, 1985.
- [26] *Карелин В.И., Тренькин А.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2009. Т. 35. Вып. 9. С. 37–43.