

САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ГАУССОВА ПУЧКА МИКРОВОЛН В СОЗДАВАЕМОМ ИМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ В ПОДПОРОГОВОМ ПОЛЕ

© 2021 г. Г. М. Батанов^a, В. Д. Борзосеков^a, Л. В. Колик^a, Е. М. Кончечков^{a,*},
Д. В. Малахов^a, А. Е. Петров^a, К. А. Сарксян^a, В. Д. Степахин^a, Н. К. Харчев^a

^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: konchekov@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 19.11.2020 г.

После доработки 20.01.2021 г.

Принята к публикации 22.01.2021 г.

Микроволновый пучок (длина волны 4 мм, мощность 150–300 кВт) создает в воздухе волну ионизации в подпороговом поле в виде конгломерата нитевидных каналов, движущуюся навстречу пучку. Периферийная часть пучка испытывает рефракцию в плазме несамостоятельного разряда в УФ-ореоле нитевидных разрядов и самофокусировку в рекомбинирующей плазме за фронтом плазмоида из нитевидных каналов. Процесс самофокусировки периферийных участков волнового пучка вызывает локальные вспышки ионизации за фронтом головного плазмоида.

Ключевые слова: самофокусировка, самоподдерживающийся несамостоятельный разряд, подпороговый микроволновый разряд, газовый разряд, гиротрон

DOI: 10.31857/S0367292121060019

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на обширные исследования процессов взаимодействия микроволновых пучков с создаваемыми ими плазменными образованиями [1–3], вопросы нелинейной рефракции микроволнового излучения в таких образованиях остаются неизученными. Исключение, по-видимому, представляет работа [4], в которой наблюдалась самофокусировка лазерного пучка при генерации светодетонационной волны.

Подпороговый микроволновый разряд в воздухе при атмосферном давлении представляет собой ионизационную волну, движущуюся по газу навстречу волновому пучку. Головная часть этой ионизационной волны представляет собой конгломерат линейных разрядов (нитей), вытянутых вдоль вектора электрического микроволнового поля, погруженного в плазму несамостоятельного разряда УФ-излучения нитевидных разрядов (см, например, [5, 6]). Поперечный размер конгломерата нитей несколько меньше поперечного сечения волнового пучка. Вследствие этого можно ожидать рефракцию внешних участков волнового пучка, как на периферии конгломерата нитей, так и в области несамостоятельного разряда УФ-ореола.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент выполнялся с помощью микроволнового излучения гиротрона “Борец 75/0.8” (длина волны 4 мм). Сходящийся пучок волн с линейной поляризацией формировался эллиптическим зеркалом и имел сечение $20 \times 33 \text{ мм}^2$ в перетяжке волнового пучка. Протяженность каустики составляла ~ 20 см. Кольцевой инициатор разряда располагался на оси пучка в 10 см от центра каустики. Скорость фронта разряда измерялась локационным методом [7] по измерению граничной частоты биений отраженного и опорного сигналов. За кольцевым инициатором располагался экранированный детекторный узел для измерения прошедшего по оси пучка микроволнового излучения. На рис. 1 представлена схема эксперимента и фото головной части разряда. На рис. 2 представлены продетектированные сигналы отраженного излучения, смешанного с опорным сигналом и сигналы прошедшего излучения. Представленные на рис. 3 трехмерные спектры биений сигнала отраженного излучения, смешанного с опорным, демонстрируют понижение частоты биений по мере перемещения головной части разряда от инициатора к эллиптическому зеркалу, что соответствует замедлению распро-

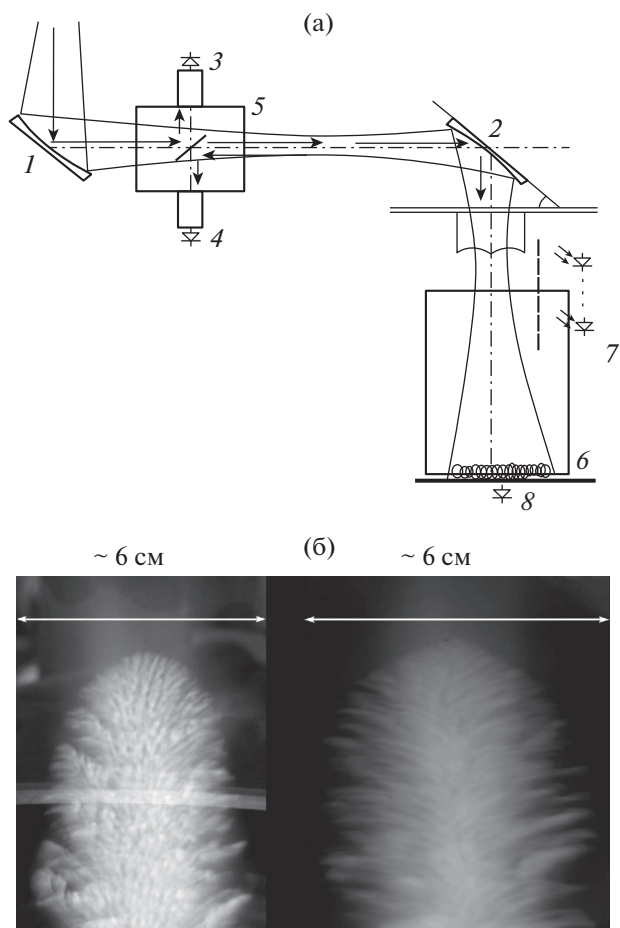


Рис. 1. а) — Схема эксперимента. 1, 2 — фокусирующие зеркала; 3 — детекторная секция регистрации мощности излучения гиротрона; 4 — детекторная секция регистрации отраженного излучения; 5 — квазиоптический ответвитель; 6 — кольцевой инициатор разряда; 7 — линейка УФ-детекторов; 8 — детекторная секция регистрации прошедшего излучения; б) — интегральные фотографии разрядов при мощности микроволн 180 кВт: слева — разряд 53508, длительность 5 мс, в плоскости нормальной к вектору электрического поля волны; справа — разряд 53510, длительность 5.5 мс, в плоскости вектора электрического поля волны.

странения разряда в течение микроволнового импульса.

Как видно на рис. 2 за передним фронтом микроволнового импульса возникает десятикратное ослабление прошедшего сигнала. Длительность прошедшего сигнала до перекрытия микроволнового пучка ~ 0.1 мс. При мощности излучения 170 кВт десятикратное ослабление прошедшего сигнала продолжается 0.75 мс. Средняя скорость в этом интервале времени, согласно рис. 3, составляет 1.5×10^4 см/с, т.е. фронт разряда в момент 52.75 мс оказывается в центре каустики (в перетяжке) волнового пучка, что и соответствует максимуму скорости согласно спектру на рис. 3.

Далее, по мере распространения фронта разряда наблюдается рост величины прошедшего излучения, второе его ослабление в течение ~ 0.75 мс и последующий рост с сильными колебаниями до конца импульса. Удвоение мощности микроволнового импульса вызывает сокращение интервала понижения уровня прошедшего излучения до 0.11–0.15 мс, что соответствует смещению фронта разряда почти до центра каустики согласно росту скорости (рис. 3). Таким образом, усиление прошедшего сигнала происходит после того, как фронт разряда пересечет координату центра каустики волнового пучка. Как следует из рис. 2 к концу импульса уровень сигнала прошедшего излучения достигает 1/2 величины прошедшего сигнала на переднем фронте импульса.

Головная часть разряда непрозрачна для микроволн из-за высокой концентрации плазмы в нитях ($\sim 10^{17}$ см $^{-3}$ [8]) и сильного поглощения при высоких частотах столкновений электрон-нейтрал при атмосферном давлении воздуха. Таким образом, за фронтом разряда формируется пучок волн кольцевой формы. На выпуклом фронте разряда в плазме его УФ-излучения, где плотность электронов нарастает к оси волнового пучка, рефракция смещает центр каустики пучка к регистрирующему микроволны детектору. За головной частью разряда кольцевой пучок распространяется в релаксирующей плазме возмущенного, возбужденного и нагретого головной частью газа. Если предположить, что ионизационный баланс в этой области сильно неоднородного микроволнового поля определяется процессами ударной электронной ионизации, электрон-ионной рекомбинации и прилипания электронов, т.е. частота электронной ионизации $\nu_i = \alpha_e N_e + \nu_a$ (где α_e — коэффициент рекомбинации, N_e — концентрация электронов, ν_a — частота прилипания электронов), то из-за сильной зависимости частоты ионизации от поля ($\nu_i = 4 \times 10^{-12} N_0 (E/E_0)^5$, где N_0 — концентрация нейтральных частиц, E_0 — величина пробойного поля при атмосферном давлении) даже при слабой зависимости коэффициента рекомбинации от температуры электронов ($\alpha_e = 10^{-7} (0.03/T_e)^{1/2}$, где T_e в эВ) следует ожидать сильного падения плотности плазмы по радиусу с периферии к оси волнового пучка [9]. Такой “провальный” профиль плотности плазмы может привести к фокусировке внутренней части кольцевого пучка [10]. И процесс рефракции в плазме УФ-ореола на фронте головной части разряда и процесс самофокусировки за фронтом головной части в релаксирующей плазме протекают в условиях сильного поглощения излучения из-за столкновений электрон-нейтрал при частоте столкновений большей частоты микроволнового излучения $\nu_{en} > \omega$. Это приводит к изменению величины и распределе-

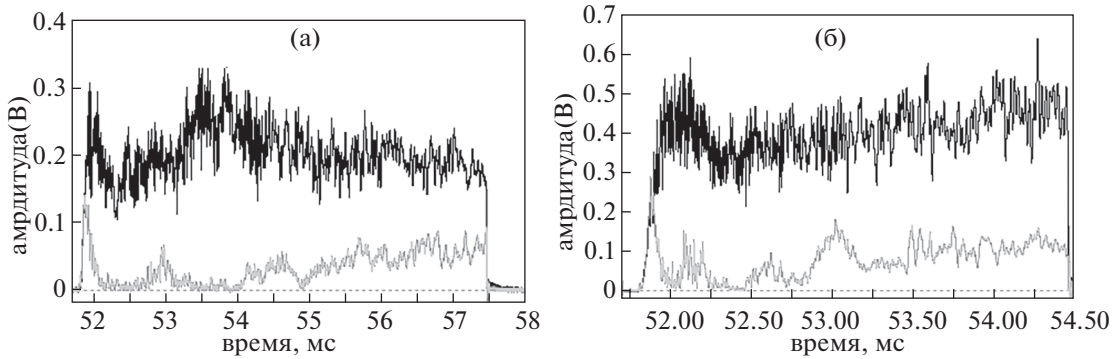


Рис. 2. Продетектированные сигналы отраженного излучения, смешанного с опорным сигналом (черная кривая) и сигналы прошедшего излучения (серая кривая). Разряды 50153 (170 кВ) (а) и 50162 (340 кВ) (б).

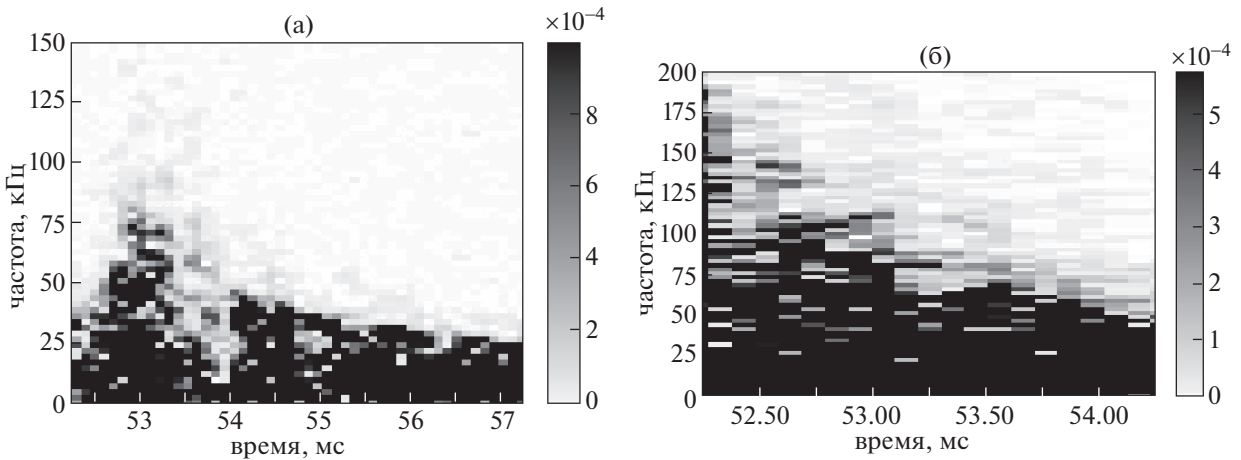


Рис. 3. 3D Фурье-спектры сигнала отраженного излучения в разрядах 50153 (а) и 50162 (б).

ния интенсивности прошедшего излучения и его временной эволюции. Действительно, длина поглощения $L_v = \frac{mcv_{en}}{4\pi N_e e^2}$, а угол сходимости пучка

$$\Delta\theta = \frac{c}{v_{en}\Delta r},$$

где e , m – заряд и масса электрона, c – скорость света, N_e – плотность плазмы, $v_{en} = 1.7 \times 10^{-7} N_0$ – частота электрон-нейтральных соударений, N_0 – концентрация нейтральных частиц. Положим $\Delta r = 1$ см, при характерной плотности электронов в ореоле $N_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [11] и невозмущенной концентрации молекул $N_0 = 2.7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ оценка дает $L_v = 4.3$ см, а $\Delta\theta = 0.4^\circ$. Время нагрева в плазме УФ-ореола и изменения концентрации газа в три раза ($\Delta\tau = \frac{\Delta T_g N_0}{\sigma E^2}$, где $\sigma = \frac{N_e e^2}{mv_{en}}$, E – напряженность поля волны, а ΔT_g – прирост температуры газа) составляет 4×10^{-5} с. Время рекомбинации на порядок меньше. Таким образом, в релаксирующей плазме за счет падения плотности плазмы на порядок величины, длина поглощения может вырасти и при уменьшении частоты

столкновений, а угол сходимости возрастает в несколько раз. При этом из-за перемещения фронта разряда вдоль оси волнового пучка возможно перемещение и областей его самофокусировки за фронтом разряда.

Однако вернемся к анализу временной эволюции сигналов прошедшего излучения (рис. 2). На переднем фронте импульса микроволнового излучения, при отсутствии разряда, микроволновое излучение достигает детектора прошедшего излучения. На осциллограмме сигнала прошедшего излучения в этот момент имеется крутой фронт. После возникновения разряда микроволновое излучение практически полностью поглощается в области разряда. Это приводит к глубокому провалу на сигнале прошедшего микроволнового излучения. Затем сигнал прошедшего микроволнового излучения несколько раз возрастает до уровня около 50% от уровня первого всплеска и снова падает почти до нуля. Дальше прошедшее микроволновое излучение выходит на уровень около 50% и колеблется около этого уровня. Длительность первого провала и первого повторного всплеска прошедшего через область разряда микроволнового излучения зави-

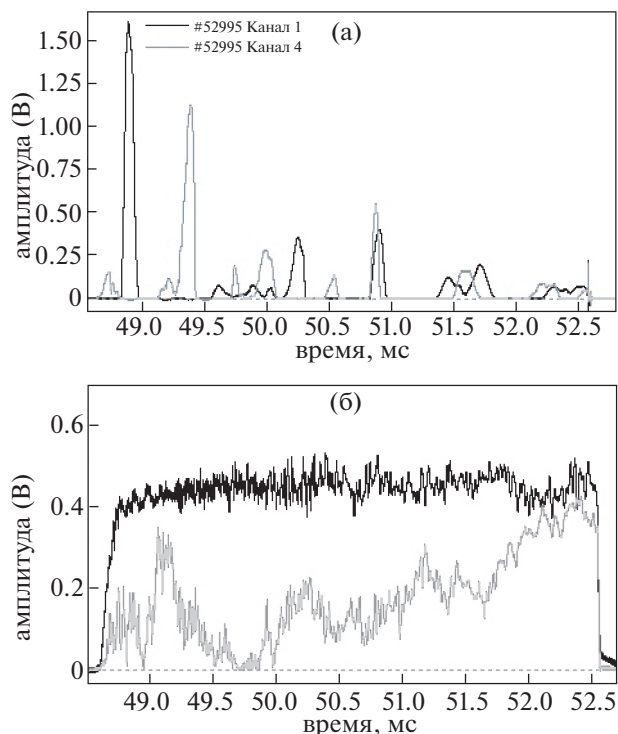


Рис. 4. а) Сигналы первого (черная кривая) и четвертого (серая кривая) диодов, расположенных на расстоянии 15 см, линейки детекторов УФ-излучения в разряде 52995. б) Продетектированные сигналы отраженного излучения, смешанного с опорным сигналом (черная кривая) и сигналы прошедшего излучения (серая кривая). Разряд 52995.

сит от мощности микроволнового излучения. С удвоением мощности микроволнового излучения длительность первого всплеска сокращается в четыре раза. В то же время, первый интервал низкого уровня прошедшего микроволнового излучения сокращается в 5–7 раз.

Возникновение второго провала в уровне прошедшего излучения и его последующие интенсивные колебания объясняются возникновением за головной частью разряда новых областей повышенной ионизации из-за фокусировки на оси волнового пучка излучения кольцевого пучка, возникающего за фронтом головной части разряда. Подтверждением этому служит регистрация повторных импульсов УФ-излучения после прохождения головной части разряда. Такие импульсы хорошо видны на рис. 4. Они регистрируются с помощью линейки из пяти коллимированных фотодиодов УФ-диапазона GUYA-S12SD, ориентированной вдоль микроволнового пучка. На рисунке приведены результаты регистрации сигналов отраженного и прошедшего микроволнового излучения и сигналов 1-го и 4-го диодов линейки, расстояние между которыми составляет 15 см. Первые всплески на 1-м и 4-м фотодиодах происходят на 48.9 мс и 49.4 мс, что соответствует ско-

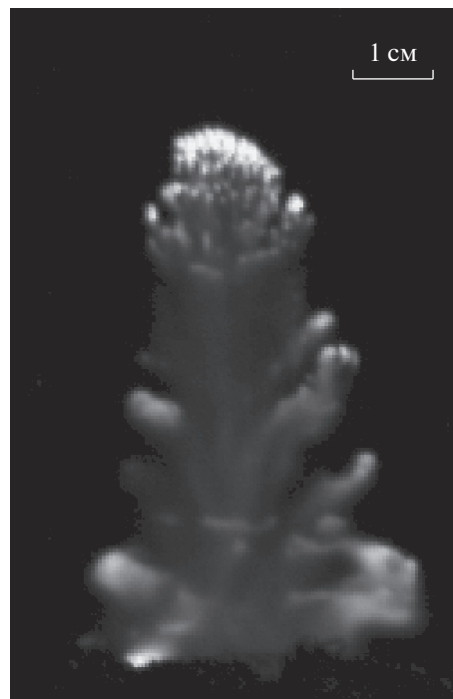


Рис. 5. Фотография разряда 59301. Мощность микроволнового излучения 250 кВт, экспозиция 5 мкс.

рости головного плазмоида 3×10^4 см/с и совпадает с результатами локационных измерений [12] в разряде 52995. Не анализируя детально форму сигналов, обратим внимание только на широкий провал в прошедшем сигнале в интервале 49.5–49.9 мс и соответствующие этому провалу всплески УФ-сигналов 1-го диода в интервале 49.6–50.1 мс и 4-го диода на 49.75 мс и в интервале 49.9–50.1 мс. Подтверждением образования за фронтом головного плазмоида вторичных плазмоидов могут также служить кадры видеокамеры (рис. 5, разряд 59301). Поскольку фото разряда – это проекция его свечения на плоскость, то яркое точечное свечение, отстоящее вдоль оси на размер диаметра и по радиусу на величину радиуса, можно интерпретировать как области ионизационной перегретой неустойчивости при огибании волновым пучком головной части разряда. Локальное усиление свечения на слабом фоне вблизи инициатора, по-видимому, можно приписать областям фокусировки кольцевого пучка в релаксирующей плазме в областях понижения концентрации нейтральных частиц, т.е. в условиях, близких к выполнению условий локального ионизационного равновесия: $\nu_i = \alpha_e N_e + \nu_a$. Естественно, ожидать усиление поглощения микроволн и ослабления прошедшего за разряд излучения в результате таких локальных в пространстве и во времени увеличений плотности плазмы. Таким образом, в некоторые интервалы времени, соответствующие провалам мощности в прошед-

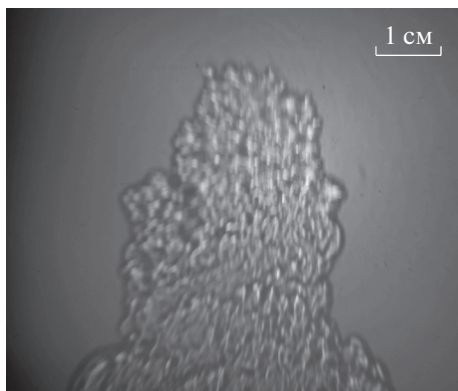


Рис. 6. Теневые фото возмущений плотности воздуха в области перетяжки волнового пучка. Мощность излучения 260 кВт. Инициатор на удалении ~26 см от перетяжки. Экспозиция 10 мкс, задержка относительно фронта микроволнового импульса 2.52 мс (разряд 56337).

шем излучении, на трассе волнового пучка существует более двух локализованных плазмоидов: на фронте разряда и на некотором расстоянии за фронтом. Этот второй и следующие плазмоиды оказываются результатом фокусировки периферийной части волнового пучка, распространяющегося в плазме УФ-ореола головного плазмоида и в релаксирующей плазме за ним. Действительно, согласно теневым фотографиям разряда [13, 14] (рис. 6) сечение головной части разряда, представляет собой конгломерат нитевидных разрядов, поперечник которых в перетяжке волнового пучка равен половине характерного диаметра волнового пучка, т.е. в головной части разряда может поглощаться только 39% мощности пучка. Еще около 40% мощности находится в кольце толщиной $\Delta r = 1$ см за областью конгломерата нитевидных разрядов (эта часть несамостоятельного разряда в УФ-ореоле, создаваемая излучением нитевидных каналов). Частично эта мощность поглощается в плазме несамостоятельного разряда УФ-ореола, а частично фокусируется в результате нелинейной рефракции на оси волнового пучка, вызывая дополнительную ионизацию газа, возмущенного прохождением головной части разряда. Таким образом, эффект самовоздействия волнового пучка увеличивает энергию микроволн, поглощаемую в плазме разряда.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В протяженных подпороговых микроволновых (СНС) разрядах при атмосферном давлении воздуха возникает своеобразное явление самовоздействия волнового пучка. Головная часть разряда — плазмоид, состоящий из конгломерата нитевидных каналов, создает за своим фронтом кольцевой пучок микроволн. В плазме несамостоятельного разряда УФ-ореола этого плазмоида

и релаксирующей (рекомбинирующей) плазме за ним, кольцевой пучок испытывает самофокусировку, создавая на оси пучка за головным плазмоидом новые локализованные области повышения плотности плазмы в виде отдельных плазмоидов.

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ № 17-12-01352-п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В., Литвак А.Г., Семенов В.Е. Электродинамика неравновесного разряда в волновых полях // В сб.: Высоочастотный разряд в волновых полях. Горький: ИПФ АН СССР. 1988. С. 41–135.
2. Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милух Г.М. Искусственная ионизованная область в атмосфере // Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, АН СССР, Москва, 1986. С. 184.
3. Matveyev A.A., Silakov V.P. // Phys. Rev. E. 1996. V. 54. № 4. P. 4121–4133.
4. Аскарьян Г.А., Манзон Б.М. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 27. В. 2. С. 113–117.
5. Batanov G.M., Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Magunov A.N., Silakov V.P., Tarasova N.M. // Plasma Physics and Plasma Electronics. Ed. L.M. Kovrizhnykh. Nova Science Publishers. Comack. 1985. P. 241–282.
6. Высоочастотный разряд в волновых полях, ИПФ АН СССР, Горький, 1988, С.В. Голубев, С.И. Грицинин, В.Г. Зорин, И.А. Косский, В.Е., Семенов СВЧ-разряд высокого давления в пучках электромагнитных волн, стр. 136–197.
7. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосекоев В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Косский И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 10. С. 952–960.
8. Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Davydov A.M., Kossyi I.A., Nefedov V.I., Sarksyian K.A., Kharchev N.K. // Journal of Physics: Conference series. 2017. № 907. P. 012022.
9. Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P. // Plasma Sources Science and Technology. 1992. V. 1. № 3. P. 207–220.
10. Аскарьян Г.А., Студенов В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. № 3. С. 113–116.
11. Бородачева Т.В., Голубев С.В., Зорин В.Г., Еремеев А.Г., Семенов В.Е. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. В. 1. С. 107–113.
12. Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Davydov A.M., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kossyi I.A., Petrov A.E., Sarksyian K.A., Stepakhin V.D., Kharchev N.K. // Plasma Physics Reports. 2018. V. 44. № 12. P. 1146.
13. Kossyi I.A., Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Davydov A.M., Sarksyian K.A., Kharchev N.K. // 24th International symposium on plasma chemistry Naples, Italy, June 9–14, 2019. Abstracts, ID73.
14. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосекоев В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Косский И.А., Моряков И.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 1. С. 88–94.