

04:09:12

## Особенности микроволновой волны пробоя в азоте и кислороде

© Г.М. Батанов, И.А. Косый, Н.И. Малых, А.А. Матвеев,  
А.В. Сапожников, В.П. Силаков

Институт общей физики РАН, Москва

Поступило в Редакцию 4 декабря 1996 г.

В работе исследовалась временная эволюция электронной плотности в микроволновых разрядах в азоте и кислороде. Показано, что кинетические процессы отлипания электронов от отрицательных ионов или ассоциативной ионизации электронно-возбужденных молекул газа играют заметную роль в явлении взаимного воздействия надпорогового микроволнового излучения и разрядной плазмы.

В последнее время при изучении микроволновых разрядов в молекулярных газах начали учитывать роль многообразных элементарных процессов в динамике развития разряда. Наибольшее внимание пока было уделено роли отлипания электронов от отрицательных ионов кислорода при распаде плазмы [1–3]. Так, в [1] было показано, что распад плазмы в воздухе замедляется с ростом энерговклада. В [2] процессами отлипания был объяснен рост плотности электронов в несамостоятельном разряде. В [3] эффект отлипания объяснен реакциями с атомарным и возбужденным кислородом. Процессы ассоциативной ионизации также могут играть важную роль в динамике разряда. В [4–7] было показано, что ассоциативная ионизация ведет не только к поддержанию "долгоживущей" плазмы, как это имело место в [8], но и к взрывному росту электронной концентрации в микроволновом поле, который при этом меняет электродинамику разряда. Можно ожидать, что к бурному росту плотности электронов могут привести также и процессы отлипания при накоплении отрицательных ионов в разрядах с примесью кислорода или паров воды.<sup>1</sup> В связи с этим представляет интерес проследить за временной эволюцией электронной плотности при протекании разрядов

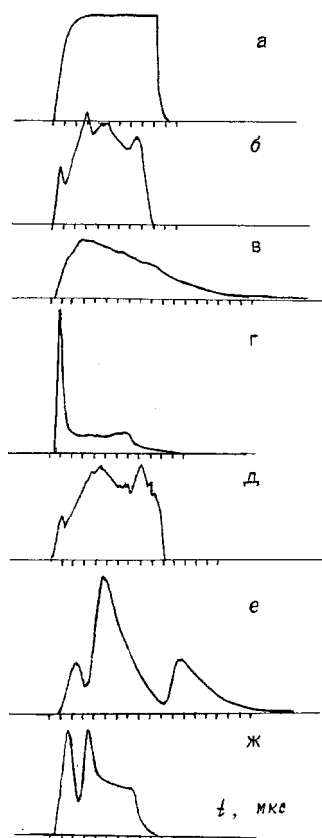
<sup>1</sup> На возможность проявления такого механизма нарастания электронной концентрации в воздушной плазме в послеразрядный период ранее указывал О.А. Иванов (1984 г., ИПФ РАН)

в азоте и кислороде в широкоапертурных микроволновых пучках. Разряд в этих газах при давлениях около 10–20 Тор имеет характер волны пробоя (см., например, [9,10]), причем в случае слабосходящихся пучков ослаблена роль ионизационно-полевых неустойчивостей, приводящих к расслоению плазмы и росту концентрации электронов до или выше критического значения. Поэтому естественно ожидать, что в таких разрядах роль элементарных кинетических процессов проявляется наиболее отчетливо.

Эксперименты были выполнены с 8 мм излучением 500 кВт гиротрона. Гауссов пучок когерентных электромагнитных волн со слабой эллиптичностью фокусировался полистироловой линзой в откачиваемую камеру и имел в фокальной плоскости характерный радиус  $a_F = 1.8$  см и характерную протяженность каустики  $l_F = ka_F^2 = 25$  см. При измерениях варьировались давление рабочего газа (10–20 Тор) и длительность микроволнового импульса.

Концентрация электронов определялась с помощью интерферометра по набегу фазы 2 мм диагностического излучения, пропускаемого через плазму. Ширина диагностического пучка при этом составляла 1 см, ось его была смещена на 5 см относительно центра каустики в сторону линзы.

Характер эволюции средней по пространству концентрации электронов  $n_e$ , как это видно из осциллограмм сигналов фазового детектора интерферометра (рис. 1), в условиях протекания разрядов в азоте и кислороде различен. Для разряда в азоте характерен быстрый рост плотности электронов на переднем фронте микроволнового импульса, затем замедление темпа его роста, переход функции  $n_e(t)$  через максимум с последующим слабым спадом ее еще до окончания действия микроволнового импульса на плазму и экспоненциальный спад концентрации электронов после прохождения этого импульса. При разряде в кислороде начальный рост величины  $n_e$  происходит медленнее, чем в азоте, а кроме того, через 1–2 мкс (во время действия электромагнитного излучения) наблюдается более контрастный спад этой величины. Но наибольшее различие между разрядами в азоте и кислороде заключается в том, что вслед за первым всплеском электронной плотности в кислороде возникают второй и третий, причем и тот и другой даже после выключения микроволнового импульса (рис. 1, *e*). При высокой надпороговости электрического поля, характерной для настоящих измерений (амплитуда поля  $E_0 = 6$  кВ/см), пробой газа происходит на переднем фронте

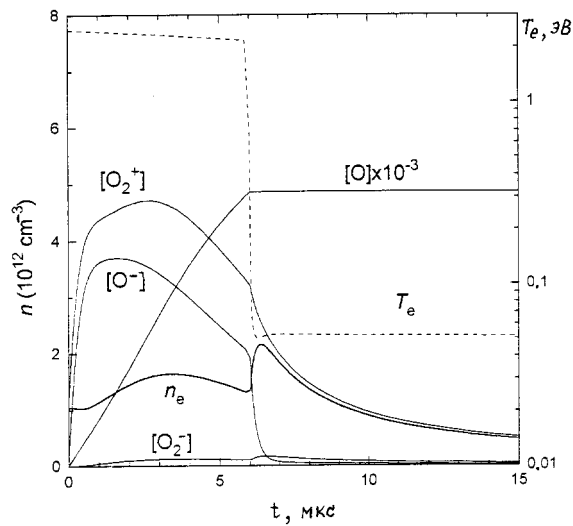


**Рис. 1.** Осциллограммы сигналов мощности микроволнового излучения на оси пучка в торце камеры (*а, б, д*), сигналов фазового набег интерферометра (*в, с*) и с фотоумножителя (*г, ж*). *а* — сигнал без разряда; *б, в, г* — азот, 10 Тор; *д, е, ж* — кислород, 10 Тор.

микроволнового импульса. Об этом свидетельствует пик на переднем фронте сигнала с детектора микроволн, расположенного на задней стенке камеры на оси пучка и характеризующего интенсивность излучения, прошедшего через разряд (рис. 1, *б, д*), а также резкие передние фронты сигналов, поступающих с фотоумножителя (рис. 1, *г, ж*), который был

установлен так, чтобы регистрировать свечение разряда из фокальной области. Рост концентрации электронов при пробое по всей длине каустики ведет к ослаблению поля в фокальной области за счет явления поглощения и рефракции волн. По-видимому, с этим связано ограничение максимального среднего значения электронной концентрации величиной  $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Для наблюдаемых волн пробоя характерным было отсутствие зависимости максимальных значений функции  $n_e(t)$  от напряженности электрического поля. Снижение мощности излучения в 3 раза не приводило к изменению средней концентрации электронов в первом максимуме.

Описанное явление сравнительно нетрудно интерпретировать в рамках чисто электродинамической модели надпорогового разряда [9]. Однако всплеск электронной концентрации, наблюдаемый в кислороде в послеразрядный период, указывает на важную роль кинетических процессов в динамике микроволновой плазмы. В самом деле, в этом случае процесс нарастания величины  $n_e$  может быть связан с явлением сильного падения скорости протекания высокопороговых реакций диссоциативного прилипания электронов к атомам кислорода (т.е. с явлением деградации основного канала наработки отрицательных ионов в молекулярном кислороде в области разряда) и переходом к режиму, в котором реакции отлипания электронов от частиц  $\text{O}^-$  из-за взаимодействия последних с атомами кислорода и электронно-возбужденными молекулами доминируют над реакциями трехчастичного прилипания электронов к частицам  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}$  и  $\text{O}_3$ . Предложенный механизм объяснения эффекта всплеска концентрации электронов в послеразрядный период подтвердился результатами численных расчетов. Они были выполнены для условий, близких к условиям, в которых проводились эксперименты. При этом использовалась кинетическая схема [11], дополненная процессами колебательной кинетики молекул кислорода. Константы скорости реакций с участием электронов определялись на основе численного решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергии. Результаты одного расчетного варианта представлены на рис. 2. Из него видно, что явление всплеска электронной концентрации во время действия и после выключения электромагнитного импульса получило не только качественное, но и количественное обоснование в рамках описанной выше разветвленной кинетической схемы свободлокализованного неравновесного разряда в молекулярном кислороде.



**Рис. 2.** Результаты расчета параметров разряда в кислороде для условий:  $p = 10$  Тор,  $T_0 = 300$  К, разогрев газа рассматривается в изохорическом приближении;  $E_0(t)/[O_2]\sqrt{2} = (6.9 - 3 \cdot 10^5 t)10^{-15}$  В · см<sup>2</sup>, длительность микроволнового импульса 6 мкс.

Важно отметить, что результаты расчетов убеждают нас в универсальности (для рассматриваемой серии экспериментов) механизма появления наблюдаемых пиков электронной плотности как во время действия микроволнового импульса, так и после его отключения. Сказанное становится понятным, если проанализировать осциллограммы излучения разряда и плотности электронов. Они показывают, что именно с падениями интенсивности светового сигнала из разряда, т.е. с уменьшением амплитуды напряженности электрического поля в области разряда (из-за явлений поглощения и рефракции электромагнитных волн), связано появление всплесков средней концентрации электронов в кислородной плазме.

Аналогичные результаты были получены нами также для разрядов в парах воды, их смесях с азотом и кислородом и в воздухе.

В случае протекания надпорогового волнового разряда в азоте наблюдается только один яркий пик свечения плазмы (см. рис. 1, з) на

переднем фронте электромагнитного импульса. При этом концентрация электронов достигает своего максимума спустя 1–1.5 мкс после такого всплеска свечения, т. е. после падения поля. Отмеченный прирост плотности электронов (при уменьшении свечения плазмы) приписывается нами процессам ассоциативной ионизации электронно-возбужденных молекул азота (см. [4–8]).

Следствием пространственно-временного изменения электронной концентрации плазмы в разряде должно быть пространственное перераспределение микроволнового поля, которое в свою очередь должно сказываться на характере пространственно-временной динамики зарядовой компоненты ионизованного газа. В нашем случае такое перераспределение поля регистрируется как эффект смещения фокуса пучка микроволн вдоль направления распространения излучения (этот эффект наблюдался и подробно исследовался И.А. Коссым с сотрудниками еще в 1972 г.). Усиление электрического поля в зафокальной области приводит к образованию "зафокальных" плазмоидов как в азоте, так и в кислороде. Интересно отметить, что наибольшее смещение фокуса пучка микроволн приходится именно на те моменты времени, когда средняя электронная концентрация в фокальной плоскости пучка невозмущенных микроволн достигает своего максимального значения. Это видно из сопоставления осциллограмм сигналов, поступающих с интерферометра (рис. 1, в, е) и детектора, регистрирующего микроволновое излучение на оси пучка (рис. 1, б, д). В итоге получается, что кинетические процессы отлипания электронов от отрицательных ионов или ассоциативной ионизации электронно-возбужденных молекул газа играют заметную роль в явлении взаимного воздействия надпорогового микроволнового излучения и разрядной плазмы.

Таким образом, распространение в кислороде волны пробоя, создаваемой сфокусированным пучком микроволн, сопровождается появлением всплесков электронной концентрации. Появление таких всплесков как во время, так и после разряда определяется кинетическими процессами отлипания электронов от частиц  $O^-$ . При исследовании надпорогового микроволнового разряда в азоте повторные всплески концентрации электронов не были обнаружены. Анализ волн пробоя в обоих газах показал существенное влияние разрядной плазмы на характер распространения микроволнового излучения. Оно проявилось в виде смещения фокуса пучка вдоль направления распространения этого излучения и образования "зафокальных" плазмоидов.

Авторы признательны РФФИ за поддержку работы (проект 96-02-16162а).

## Список литературы

- [1] Вихарев А.Л., Иванов О.А., Степанов А.Н. // ЖТФ. 1984. Т. 64. № 8. С. 1617–1619.
- [2] Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г. и др. Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. С. 136–197.
- [3] Баиадзе К.В., Куликов В.Н., Мицук В.Е. Физика низкотемпературной плазмы. Материалы VIII Всесоюзной конф., Минск 1991. С. 45–46.
- [4] Силаков В.П. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. В. 10. С. 1209–1213.
- [5] Силаков В.П. // Препринт МИФИ. 1990. № 10. 12 с.
- [6] Безменов И.В., Русанов В.В., Силаков В.П. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 1992. № 30. 28 с.
- [7] Безменов И.В., Русанов В.В., Силаков В.П. // Тр. ИОФАН. 1994. Т. 47. С. 74–107.
- [8] Грицинин С.И., Косый И.А., Силаков В.П. и др. // ТВТ. 1986. Т. 24. № 4. С. 662–667.
- [9] Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В., Литвак А.Г., Семенов В.Е. Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. С. 41–135.
- [10] Иновенков И.Н., Ким А.В., Ракова Е.И., Семенов В.Е., Чухин А.Е. // Препринт ИПФ АН. 1990. № 271. 1990. 28 с.
- [11] Kossyi I.A., Kostinsky A.Ya., Matveyev A.A., Silakov V.P. // Pl. Sources Sci Technol. 1992. V. 1. P. 207–220.