УДК 537.569

РАСПАД ПЛАЗМЫ НАНОСЕКУНДНОГО СВЧ-РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

А. Л. Вихарев, А. М. Горбачев, О. А. Иванов, В. А. Исаев, Н. Г. Колганов, А. Л. Колыско, М. М. Офицеров

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования распада плазмы наносекундного СВЧ-разряда в диапазоне давлений воздуха P = 4—60 торр. Установлено, что распад плазмы протекает в две стадии (быстрая и медленная) и при высоких давлениях на обоих этапах соответствует прилипательному распаду с различной эффективной частотой прилипания. На основании полученных результатов приведены оценки эффективности разрушения фреонов в атмосфере с помощью свободно локализованного СВЧ-разряда.

В последнее время активно обсуждается проблема разрушающего действия на озоновый слой Земли фреонов и предлагаются различные способы очистки атмосферы [1—4]. Один из таких способов [3] основывается на использовании

искусственной ионизованной области (ИИО) в атмосфере, создаваемой с помощью (в наиболее проработанном варианте) двух короткоимпульсных волновых пучков наземными антеннами. Интенсивность СВЧ-излучния в области пересечения пучков на заданной высоте превышает пороговый уровень для пробоя воздуха. Такой свободно лакализованный разряд создает в атмосфере плазму с электронной концентрацией $N_e \sim 10^{10} \div 10^{12}$ см$^{-3}$. После СВЧ-импульса на стадии распада плазмы электроны избирательно разрушают молекулы фреона за счет высокой скорости (константа 10^{-7}—10^{-9} см^3/с) процесса диссоциативного прилипания, например,

$$CFCl_3 + e \rightarrow Cl^- + CFCl_2;$$

$$CF_2CL_2 + e \rightarrow Cl^- + CF_2Cl.$$

Осуществлять такой разряд предполагается на низких высотах H = 10—20 км (ниже озонового слоя), где продукты разрушения фреонов вступают в химические реакции и в дальнейшем вымываются дождями. Такова идея метода [3]. Очевидно, что эффективность очистки (число разрушенных молекул фреона) существенным образом зависит от скорости распада разрядной плазмы. Так, процессы гибели электронов, не связанные с прилипанием к фреону (электрон-ионная рекомбинация и прилипание электронов к молекулам кислорода), приводят к снижению эффективности очистки. Особенно важно добиться медленного распада плазмы при низком содержании фреонов и высоком давлении воздуха, когда частота диссоциативного прилипания электронов к молекулам фреона ν_F намного меньше частоты трехтельного прилипания к кислороду.

Проведенные исследования СВЧ-разряда микросекундной длительности [5—8] показали, что медленный рекомбинационный распад плазмы в воздухе может быть реализован при высоких удельных энерговкладах. Это объясняется процессами отлипания электронов от отрицательных ионов кислорода при соударениях с активными (для процесса соударения) частицами, образовавшимися в разряде. В то же время в обсуждаемом методе очистки СВЧ-разряд рассматривается в основном как источник электронов, поэтому предусматриваются такие параметры СВЧ-излучения, при которых на ионизацию газа (создание электрон-ионных пар) будет тратиться основная доля СВЧ-энергии. Согласно результатам работы [9], такие условия реализуются при пробое газа СВЧ-излучением наносекундной длительность при напряженности электрического поля $E \approx (5—7)\, E_k$, где

$E_k = 30\, P\, (1 + \omega^2/\nu^2)^{1/2}$ — критическое поле, при котором частота ионизации ν_i равна частоте прилипания ν_a электронов к молекулам кислорода; ω — круговая частота поля; ν — частота столкновений электрона; P — давление воздуха.

К сожалению, следует отметить, что распад плазмы наносекундного СВЧ-разряда в воздухе до сих пор не изучен. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования распада плазмы такого разряда. Определены скорости распада плазмы при различных давлениях газа. Полученные результаты позволяют оценить число разрушенных молекул фреона в воздухе (при невысокой их доле на уровне $\sim 10^{-9} \div 10^{-8}$) в зависимости от скорости наблюдаемого распада плазмы.

Изучение распада плазмы наносекундного свободно локализованного СВЧ-разряда в воздухе было проведено при сравнительно низких энерговкладах. В качестве

источника электромагнитного излучения использовался релятивистский карсинотрон с длиной волны $\lambda = 0{,}8$ см, генерирующий импульсы длительностью $\tau = 5$ нс, мощностью $P = 10$ МВт и частотой повторения $F = 1$ Гц. Излучение вводилось внутрь вакуумной камеры диаметром 40 см и длиной 100 см. Камеру наполняли воздухом до давлений $P = 4$—60 торр. Разряд зажигался в фокусе цилиндрического зеркала (радиус кривизны $R = 16$ см) и имел поперечный размер ~0,3—0,5 см и длину ~20 см, т. е. объем плазмы был ~10 см^3. При энергии в СВЧ-импульсе, равной $W = P \cdot \tau = 5 \cdot 10^{-2}$ Дж, удельный энерговклад изменялся в диапазоне $5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-3}$ Дж/см^3 (при поглощаемой СВЧ-мощности от 10 или 100 % соответственно). Напряженность электрического поля в фокусе волнового пучка достигала E_0 ~20 кВ/см.

Электронная концентрация распадающейся плазмы измерялась открытым резонатором в режиме многократного сканирования частоты диагностического генератора [5, 10]. Открытый резонатор состоял из сферических зеркал диаметром 16 см с радиусом кривизны $R = 15$ см и расстоянием между зеркалами $L = 23$ см. В резонаторе возбуждался основной тип колебаний $TEM_{0,0,29}$ на длине волны $\lambda = 0{,}8$ см, добротность равнялась $Q \sim 3 \cdot 10^4$. Резонатор размещали в вакуумной камере, чтобы разряд зажигался вдоль его оси. Частота диагностического СВЧ-генератора изменялась по пилообразному закону в соответствии с временной разверткой осциллографа. При каждом импульсе свипирования на экране осциллографа регистрировалась резонансная кривая резонатора. Появление в последнем плазмы вызывало смещение резонансных кривых в соответствии с величиной ее плотности. Электронная концентрация определялась из измерений сдвига резонансной частоты резонатора по формуле [11]

$$N_e(t)/N = A^{-1} \cdot \Delta f(t)/f,$$

где форм-фактор A зависит от параметров резонатора и профиля распределения электронной концентрации. Общая длительность десятикратного сканирования составляла 100 мкс, поэтому весь временной ход распада плазмы регистрировался в одной реализации разряда.

Экспериментальные результаты исследования распадов плазмы приведены на рис. 1—2. На рис. 1 представлена зависимость обратной электронной концентрации от времени для различных давлений воздуха $P = 4$, 10, 30, 60 торр. Следует

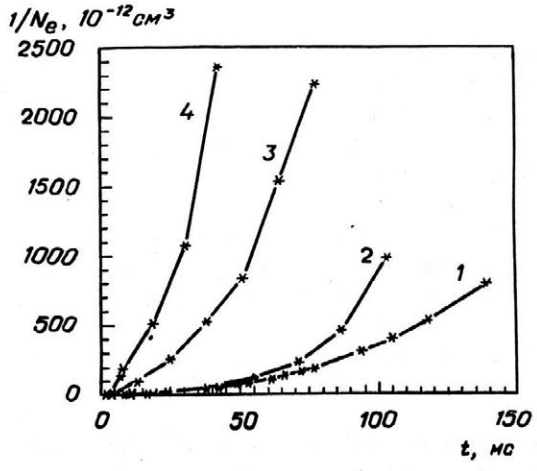


Рис. 1. Зависимость обратной электронной концентрации от времени: 1, 2, 3, 4 — кривые при давлениях воздуха P = 4, 10, 30 и 60 торр соответственно

отметить, что в воздухе при всех исследуемых давлениях концентрация электронов $N_e(t)$ уменьшается быстрее, чем если бы это происходило в случае электрон-ионной рекомбинации. Эти экспериментальные данные не могут быть проинтерпретированы на основании прилипательно-отлипательной модели, достаточно хорошо объясняющей результаты в экспериментах с использованием длинных СВЧ-импульсов [5—8]. Зависимость N_e^{-1} от времени не является линейной, поэтому сравним полученные результаты с известными процессами, которые могут определять распад плазмы — диссоциативным прилипанием, трехчастичным прилипанием и электрон-ионной рекомбинацией.

На рис. 2, а представлены экспериментальные результаты при давлении воздуха P = 10 торр. Как видно из рисунка, только первая стадия распада (t ~ 5 мкс) близка по скорости к электрон-ионной рекомбинации, затем наблюдается переход к экспоненциальному распаду с характерной частотой $\nu_{ae} \approx 8 \cdot 10^4$ с$^{-1}$. На этом же рисунке приведены расчетные кривые распада плазмы при начальной концентрации электронов после СВЧ-импульса такой же, как в эксперименте, и различных определяющих распад плазмы процессах: за счет только электрон-ионной рекомбинации (кривая 2) или трехтельного (кривая 3), или диссоциативного (кривая 4) прилипания с частотами $\nu_a = 140\ P^2$ и $\nu_{ad} = 2 \cdot 10^4\ P$ соответственно. Кривая 4 (см. рис. 2) рассчитана в предположении, что температура электронов в послеразрядный период остается достаточно высокой $T_e \approx 1$ эВ и представлена для оценки величины скорости наблюдаемого быстрого распада плазмы в воздухе.

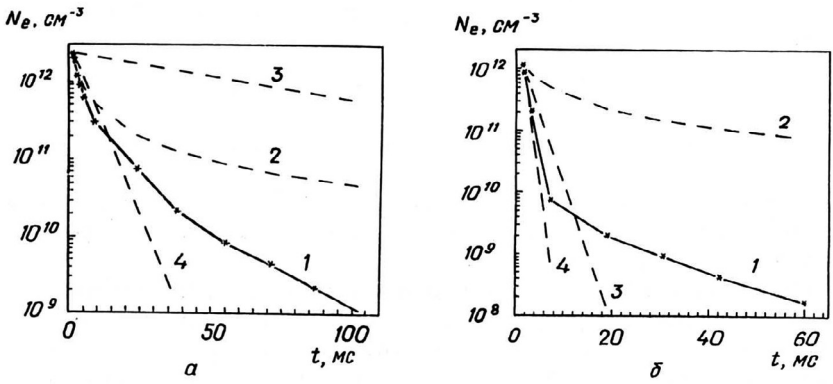


Рис. 2. Звисимость электронной концентрации от времени:
1 — эксперимент; расчетные кривые распада плазмы, определяемого: 2 — электрон-ионной рекомбинацией с коэффициентом $\alpha_{ei} = 2 \cdot 10^{-7}$ см^3/с, 3 — трехтельным и 4 — диссоциативным прилипанием с частотами ν(с$^{-1}$) = 140 P^2 и ν_{ad}(с$^{-1}$) = $2 \cdot 10^4$ P соответственно при P = 10 торр (а) и P = 60 торр (б)

При больших давлениях воздуха P = 60 торр (см. рис 2, б) наблюдались две стадии распада плазмы, имеющего прилипательный характер. Начальная стадия (t ≤ 8 мкс) может быть аппроксимирована характерной частотой $\nu_{ae} \approx 6 \cdot 10^5$ с$^{-1}$, которая близка к частоте диссоциативного прилипания, в то время как медленная часть распада (при t > 20 мкс) соответствует эффективной частоте $\nu_{ae} \approx 6{,}2 \cdot 10^4$ с$^{-1}$ более низкой, чем частоты трехтельного и диссоциативного прилипания при этом давлении. Тот факт, на начальном этапе распада скорость близка к скорости, определяемой диссоциативным прилипанием, может свидетельствовать о наличии значительной доли электронов с высокой энергией. Так как время релаксации электронной температуры до температуры газа за счет упругих электрон-молекулярных соударений не превышает в нашем случае одной микросекунды, а нагрева газа после СВЧ-импульса не наблюдалось, то можно предположить

существование какого-то механизма "подогрева" электронов, например, из-за столкновений второго рода с электронно-возбужденными или с колебательно-возбужденными молекулами [12, 13].

Из сопоставления экспериментальных кривых с расчетными следует, что реальный распад плазмы после наносекундного СВЧ-разряда происходит быстрее, чем за счет электрон-ионной рекомбинации, соответственно и эффективность разрушения фреона должна быть ниже, чем в рекомбинационном случае, как это предполагается в модели [3]. Оценки показывают, что для чисто рекомбинационного распада с коэффициентом рекомбинации $\alpha_{ei} = 2 \cdot 10^{-7}$ см^3/с в течение первых 100 мкс после одного СВЧ-импульса разрушается около 75 % фреона [3]. Так, для фреона-11, имеющего константу диссоциативного прилипания $K_F = 8{,}8 \cdot 10^{-8}$ см^3/с при температуре электронов $T_e \sim 0{,}03$ эВ, плотность молекул фреона (нормированная на первоначальную плотность N_{F0})

$$N_F(t)/N_{F0} = (1 - \alpha_{ei} \cdot N_{e0} \cdot t)^{-\gamma}$$

к моменту времени $t^* = 100$ мкс снижается до величины $\approx 0{,}25$. Здесь $N_{e0} = 10^{12}$ см$^{-3}$ — концентрация электронов, созданных СВЧ-разрядом, а $\gamma = K_F/\alpha_{ei}$.

Из приведенной формулы видно, что эффективность разрушения фреонов чрезвычайно сильно зависит от параметра γ и, следовательно, может значительно изменяться как от конкретного типа фреона, так и от коэффициента рекомбинации α_{ei}. Как показали эксперименты, распад плазмы имеет сложный характер, поэтому реальную эффективность разрушения фреона можно оценить, подставив в формулу

$$N_F(t)/N_{F0} = \exp(-K_F \int_0^t N_e\ (t)\, dt)$$

экспериментально наблюдаемую зависимость плотности плазмы от времени (см. рис. 2, а, б).

При давлении воздуха $P = 10$ торр величина $N_F(t^*)/N_{F0}$ равна 0,35, в то время как при высоких давлениях (P = 60 торр) — разрушение фреонов менее значительное $N_F(t^*)/N_{F0} \approx 0{,}85$.

Таким образом, в проведенных экспериментах установлено, что распад плазмы после наносекундного разряда в воздухе имеет сложный характер, определяемый во многом кинетическими процессами, протекающими на стадии ионизации газа. Значительная часть образованных электронов гибнет уже на начальной стадии распада в течение нескольких первых десятков микросекунд. Время жизни электронов было меньше, чем оно составляло бы в случае распада плазмы за счет электрон-ионной рекомбинации. Как показывают оценки, при наблюдаемой скорости распада плазмы эффективность разрушения фреонов после СВЧ-импульса при высоких давлениях воздуха (P = 60—90 торр, соответствующих высотам 15—20 км) будет в 6—7 раз ниже, чем при рекомбинационном распаде.

Литература

1. *Stix T. H.*//J. Appl. Phys. 1989. V. 66. № 11. P. 5622.

2. *Wong A. Y., Steinhauer J., Close R., Fukuchi T.*//Comments on Plasma Phys. Controlled. Fusion. 1989. V. 12. № 5. P. 223.

3. *Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Бархударов А. Э.* и др.//Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 9. С. 1198.

4. *Старик А. М., Фаворский О. Н., Хабаров О. С., Амелин Б. Н.*//Вестник РАН. 1993. Т. 63. № 12. С. 1082.

5. *Вихарев А. Л., Иванов О. А., Степанов А. Н.*//Физика плазмы. 1984. Т. 10. № 4. С. 792.

6. *Вихарев А. Л., Иванов О. Л., Степанов А. Н.*//ЖТФ. 1984. Т. 54. С. 1617.

7. *Вихарев А. Л., Иванов О. А., Степанов А. Н.*//Радиофизика. 1984. Т. 28. С. 36.
8. *Куликов В. Н., Мицук В. Е.*//Радиотехника и электроника. 1989. № 34. С. 2129.
9. *Гуревич А. В.*//УНФ. 1980. Т. 132. С. 658.
10. *Акулина Д. К., Нечаев Ю. И.*//Тр. ФИАН. 1973. Т. 65. С. 100.
11. *Голант В. Е.* Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. — М.: Наука, 1968. — 327 с.
12. *Дятко Н. А., Кочетов И. В., Напартович А.П.*//Высокочастотный разряд в волновых полях. — Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 9.
13. *Dyatko N. A., Kochetov I. V., Napartovich A. P.*//J. Phys. D: Appl. Phys. 1993. V. 26. P. 418.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 93-02-846).

Работа доложена на Международной конференции "Микроволновая плазма и ее применения".

PLASMA DECAY OF NANOSECOND MICROWAVE DISCHARGE IN AIR

A. L. Vikharev, A. M. Gorbachev, O. A. Ivanov, V. A. Isaev, N. G. Kolganov, A. L. Kolisko, M. M. Ofitserov

Institute of Aplied Physics, Russian Academy of Science, N. Novgorod, Russia

Results of experimental investigation of plasma decay of nanosecond microwave discharge at air pressure P = 4—60 torr are presented. It's founded, that plasma decay has two time stages (fast and slow). At high pressure these stages correspond to attachment decay with different effective attachment freguencies. On the basis of obtained results estimations of efficiency of freon destroy in athmosphere by fiely localised microwave discharge are performed.