

02; 04; 09

“ВЫГОРАНИЕ” ФРЕОНА В МИКРОВОЛНОВОЙ ВОЛНЕ ПРОБОЯ В АЗОТЕ

© Г.А.Аскаръян, Г.М.Батанов, С.И.Грицинин, Е.Г.Корчагина,
М.А.Мисакян, А.В.Сапожников, В.П.Силаков

Институт общей физики РАН,
117942 Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 6 февраля 1995 г.)

Изучены особенности волны пробоя и распада плазмы в азоте и его смесях с фреоном-10 при давлениях 3–30 Тор в сфокусированном пучке мощного 8-миллиметрового гиротрона. Показано, что распад плазмы при энерговкладах 0.16–0.32 эВ/мол свидетельствует о полном “выжигании” фреона при его концентрациях в смесях до 2–4%, что, по-видимому, может быть объяснено разложением молекул фреона при тушении ими электронно-возбужденных молекул азота. Показано, что локальная энергетическая цена разложения молекул фреона составляет примерно 8 эВ. В связи с этим могут быть предложены высокоэффективные способы трансформации фреонов с использованием волн пробоя.

1. Вопрос о механизмах разложения фреонов в микроволновом разряде в настоящее время обсуждается в связи с предложениями очистки тропосферы от озоноразрушающих фреонов, борьбы с их аварийными выбросами и технологиями преобразования озоноразрушающих фреонов в экологически безопасные модификации [1–4]. Наши эксперименты до сих пор были выполнены в подпороговых сверхзвуковых волнах ионизации при высоких давлениях газа (так называемый инициированный разряд) [5]. Такой разряд характеризуется сильной пространственной неоднородностью, проявляющейся в развитии совокупности “нитей” — каналов с высокой плотностью плазмы и температуры. Анализ результатов экспериментов [6,7] показал, что полное разрушение фреонов может происходить как непосредственно в каналах за счет высокой плотности плазмы и электронной температуры, так и в междуканаловых областях за счет ультрафиолетового излучения каналов.

Это было подтверждено измерениями распада плазмы после окончания микроволнового импульса [4,6,7], так как наблюдался замедленный распад плазмы по сравнению с ожидавшимся быстрым устранением электронов из плазмы в результате их диссоциативного прилипания к молекулам фреонов.

В связи с этим естественно было поставить вопрос о характере процессов разложения фреонов в отсутствие в разряде нитевидных структур с высокими параметрами плазмы, в том числе и вопрос о разложении из-за диссоциативного прилипания электронов. Для этой цели может быть выбран режим волны пробоя при амплитудах поля выше критического поля пробоя $E_{0\text{ср}}$ и давлениях газа, когда частота электрон-нейтральных соударений ν_e меньше циклической частоты волны ω . Режимы такого разряда подробно изучались многими ответственными и зарубежными авторами (см., например, обзоры [8,9]).

В настоящей работе мы поставили себе задачу измерить разложение фреона-10 (CCl_4) в разряде в азоте¹ при давлениях 3–30 Тор и выяснить, насколько примесь фреона к азоту влияет на распад плазмы после окончания микроволнового импульса.

2. Эксперименты были выполнены с помощью 500кВт гиротрона фирмы ГИКОМ (Н. Новгород), дающего излучение на длине волны 8мм. Излучение фокусировалось полистироловой линзой с фокусным расстоянием 40 см в камеру диаметром 50 см и длиной 140 см (объем $V_k \simeq 2.75 \cdot 10^5 \text{ см}^3$). Характерный радиус гауссова пучка в фокусе $a_F(r = 0) = 1.55 \text{ см}$, так что угол сходимости пучка $2\theta = 2(k_0 a_F)^{-1} = 0.16$. Длительность импульса гиротрона варьировалась от 10 до 100 мкс. Камера откачивалась форвакуумным насосом до давления 10^{-3} Тор и наполнялась до давления 3–6 Тор фреоном-10 (CCl_4), а затем напускался технически чистый азот до давления 150–300 Тор. Далее смесь откачивалась до рабочего давления (3–30 Тор).

Измерения плотности плазмы были выполнены с помощью трехканального интерферометра, работавшего на длине волны 2.5 мм. Излучающие и приемные рупоры интерферометра были расположены между линзой и фокусом, так что сечение, в котором располагались оси диагностических пучков, отстояло от фокуса пучка мощного излучения на 32 см ($z_1 = 32 \text{ см}$). Расстояние между рупорами интерферометра было равно 13 см, а пространственное разрешение в направлении, поперечном к осям диагностических пучков было не хуже 2 см. Временное разрешение около 0.1 мкс.

Концентрация фреона в смеси до и после обработки в разряде измерялось с помощью инфракрасного спектрометра ИКС-29 фирмы ЛОМО (Санкт-Петербург). Измерения выполнялись по поглощению линии 790 см^{-1} .

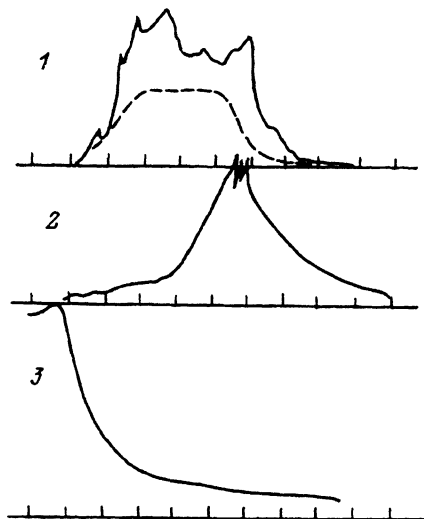
Измерения плотности плазмы и ее распада были выполнены с помощью однократных импульсов (частота следования не более 0.1 Гц). Разложение фреона в разряде выполнялось при длительности импульса 100 мкс при частоте следования 0.5 Гц.

Мощность излучения в фокальной плоскости измерялась с помощью калориметра и составляла обычно примерно 400 кВт, так что максимальная интенсивность излучения в фокусе на оси пучка достигала 60 кВт/см^2 (амплитуда поля в фокусе $E_0 = 6.6 \text{ кВ/см}$). В сечении интерферометра напряженность поля падала до 0.5 от поля в фокальной плоскости, а характерный радиус гауссова пучка в этом сечении $a_F(32) = 3 \text{ см}$, так что в этом сечении поле пучка почти однородно (на

¹ Использование азота позволяет, по-видимому, наиболее уверенно трактовать результаты экспериментов.

Рис. 1. Осциллограммы микроволновых сигналов.

1 — огибающие сигналов излучения, прошедшего через разрядную камеру, 10 Тор азота, 2 мкс/дел: сплошная кривая — сигнал при полной мощности излучения, штриховая — сигнал при критической мощности; 2 — огибающая сигнала фазового детектора интерферометра, 2 мкс/дел, 10 Тор азота; 3 — огибающая сигнала фазового детектора интерферометра после окончания микроволнового импульса, 30 Тор азота, 10 мкс/дел, длительность импульса излучения 50 мкс.



удалении 1.5 см от оси оно уменьшается лишь на 12%). Как мы увидим далее, высокая импульсная мощность гиротрона и большая длительность импульса позволяли развиваться разряду в большом объеме и на значительном удалении от фокуса, что позволяло вести измерения плотности плазмы в достаточно протяженной и однородной по радиусу области поля. Это позволило нам повысить чувствительность интерферометрических измерений.

3. Предварительно было изучено образование и распад плазменного облака в азоте без примеси фреона, так как в литературе отсутствуют подробные данные о характеристиках микроволнового разряда в азоте при столь высоких мощностях и длительностях излучения. Прежде всего измерены критические поля импульсного пробоя. Длительность импульса составляла 10 мкс. Импульс имел форму трапеции с длительностью переднего фронта 3–4 мкс, плато 5 мкс и спадом 1.5 мкс (кривая 1 на рис. 1). Критическое поле определялось по мощности, которая была необходима для возникновения световой вспышки пробоя в фокальной области. Значения таким образом определенных амплитуд критических полей $E_{0\text{ cr}}$ приведены в таблице 1. Там же приведены соответствующие им значения $E_{\text{eff cr}}/[M] = E_{0\text{ cr}}/[M] \{2(1 + \omega^2/v_e^2)\}^{1/2}$. Как видно из таблицы, среднее значение $E_{\text{eff cr}}/[M] \approx 100 \text{ Td}$, что находится в соответствии с литературными данными.

Таблица 1.

P , Тор	v_e/ω	$E_{0\text{ ср}}$, кВ/см	$E_{\text{eff cr}}/[M]$, Td	$[e]_0$, 10^{12} см^{-3}
3	0.07	2.45	125	3.6
10	0.26	2.0	99	2.9
15	0.38	2.0	96	2.9
30	0.72	2.3	100	3.3
45	1.15	—	—	3.3
140	3.57	6.6	91	—

Измерения временной эволюции плотности плазмы были выполнены при полной мощности излучения, когда амплитуда поля в фокусе составляла 6.6 кВ/см, а в сечении камеры, в которой располагались рупора интерферометра, 3.3 кВ/см. Как видно из кривой 2 на рис. 1, плотность плазмы быстро возрастает (за 2–3 мкс) до своего максимального значения после выхода мощности излучения на плато. При этом амплитуда микроволновой мощности, регистрируемой через окно в заднем фланце разрядной камеры, падает примерно в 2 раза по сравнению с сигналом в отсутствие разряда (рис. 1, сплошная кривая 1). При этом видны колебания сигнала, что, видимо, свидетельствует о динамической перестройке распределения плотности плазмы в разряде.

При увеличении длительности импульса до 100 мкс плотность плазмы сохранялась на том же уровне, который достигался за первые 10–20 мкс. Однако увеличение длительности до 100 мкс приводило к сильному замедлению распада, как это отчетливо видно из кривой 3 на рис. 1, где приведена часть сигнала фазового детектора, соответствующая моментам времени после выключения излучения.

Средние значения плотности плазмы для различных давлений азота также приведены в табл. 1. В пределах ошибок измерений они близки друг к другу и в 5 раз ниже критической плотности плазмы. Следует отметить, что величины средней плотности, полученные нами, близки к результатам, приводимым в работе [8] для давления азота 2 Тор.

4. В разрядах с примесью фреона также были определены критические поля пробоя (табл. 2). Примесь фреона, как и ожидалось, ведет к росту критического поля, в чем мы видим проявление эффекта диссоциативного прилипания электронов к молекулам фреона. Свечение разряда в смесях азота с фреоном имело тот же характер, что и для чистого азота без примеси. Однако наблюдалась существенная задержка в развитии пробоя в сечении интерферометра (рис. 2, кривая 2) по сравнению с разрядом в чистом азоте. Кроме того, рост плотности плазмы до своего максимального значения также существенно замедлился и вместо 2–3 составлял 10–15 мкс. Заметим, что определенные нами пороговые поля для смесей почти во всех изученных случаях превышают амплитуду поля в сечении интерферометра (3.3 кВ/см). Таким образом, в случае смеси азота с фреоном мы имеем распространение разряда в область подпороговых полей. По-видимому, это может быть связано с небольшим (1–4%) отражением излучения от плазмы.

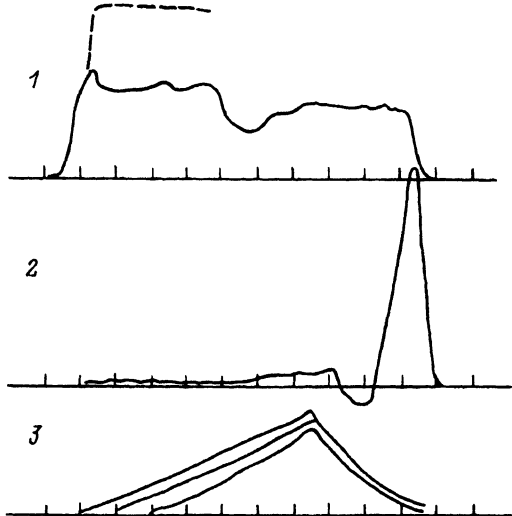
Средние плотности плазмы и в случае смесей оказываются по величинам такими же, как в случае разряда в чистом азоте. Однако длительность спада плотности после выключения поля несколько укорачивается. Существенное укорочение длительности распада наблюдалось при 20% фреона в смеси. В этом случае задний фронт импульса

Таблица 2.

$P, \text{Тор}$	3			10		15		30			50	55
$[\text{CCl}_4]/[M], \%$	2	4	20	4	20	0.2	4	0.2	4	20	4	2
$E_{0 \text{ cr}}, \text{кВ/см}$	3.64	3.87	5.34	3.46	5.34	3.0	3.87	3.6	4.96	6.0	6.0	6.6
$E_{\text{eff cr}}/[M], \text{Td}$	185	197	272	171	263	144	185	155	213	258	188	195
$k_i, 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$	5.33	7.03	22.8	3.6	20.5	1.44	5.37	2.18	9.66	19.2	5.74	6.66
$k_a, 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$	2.67	1.75	1.14	0.9	1.03	7.2	1.34	10.9	2.4	0.96	1.44	3.33
$[\epsilon]_0, 10^{12} \text{ см}^{-3}$	1.5	2.1	1.6	2.4	2.1	4.0	2.0	4.5	3.5	—	—	—

Рис. 2. Осциллограммы микроволновых сигналов.

1 — огибающие сигналов излучения, прошедшего через разрядную камеру, 4%-ная смесь фреона в азоте, давление 30 Тор, 10 мкс/дел, длительность микроволнового импульса 100 мкс: штриховая кривая — сигнал в отсутствие разряда, сплошная — сигнал в присутствии разряда; 2 — огибающая сигнала фазового детектора интерферометра, 4%-ная смесь фреона в азоте, давление 30 Тор, 10 мкс/дел, длительность микроволнового импульса 100 мкс; 3 — огибающие сигналов фазового детектора интерферометра, 4%-ная смесь фреона в азоте, давление 15 Тор, 2 мкс/дел, длительность микроволновых импульсов 80 мкс, наложение сигналов трех одиночных импульсов.



фазового детектора совпадал по длительности с задним фронтом микроволнового импульса.

5. Результаты измерения разложения фреона-10 приведены на рис. 3 и 4. Поскольку объем камеры существенно превышал объем разряда (примерно в $1.7 \cdot 10^3$ раз), то требуется продолжительное время для заметного изменения концентрации фреона в камере даже при полном разложении фреона в каждом импульсе в объеме разряда

$$T = (\Delta[\text{CCl}_4]) / [\text{CCl}_4]_0 V_k / V_d f,$$

T — постоянная времени экспоненциального уменьшения концентрации фреона в объеме газовой смеси, облучаемом последовательностью микроволновых импульсов.

Выбранная нами частота следования импульсов $f = 0.5$ Гц была вполне достаточна для диффузионного замещения газа между импульсами в объеме разряда, т. е. в каждом последующем импульсе обрабатывалась новая порция смеси.

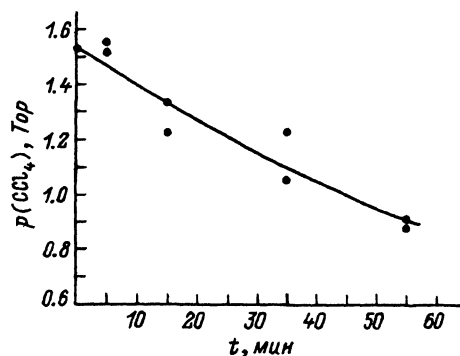


Рис. 3. Выгорание фреона-10 при воздействии микроволнового разряда. Мощность 400 кВт, длительность импульса 100 мкс, частота следования 0.5 Гц, давление 5%-вой смеси 30 Тор.

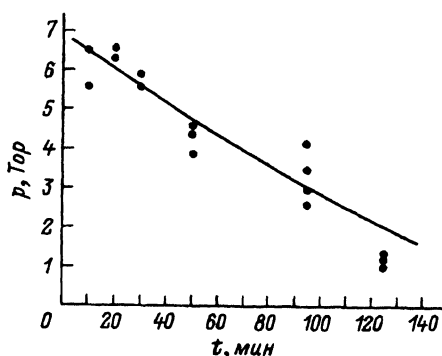


Рис. 4. Выгорание фреона-10 при воздействии микроволнового разряда. Мощность 400 кВт, длительность импульса 100 мкс, частота следования 0.5 Гц, давление 20%-вой смеси 31 Тор.

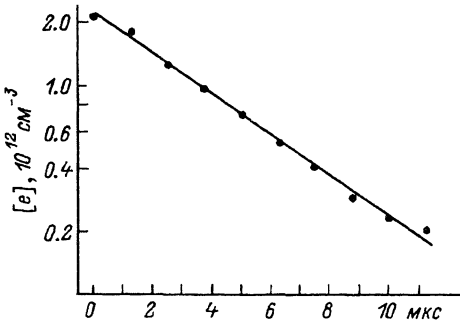


Рис. 5. Распад плазмы в азоте (10 Тор, длительность микроволнового импульса 10 мкс).

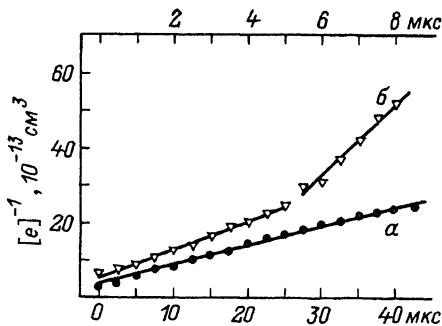


Рис. 6. Распад плазмы в азоте и в смеси с фреоном.

a — 30 Тор азота, длительность импульса 50 мкс, нижняя шкала времени; *b* — 4%-ная смесь, давление 10 Тор, длительность импульса 40 мкс, верхняя шкала времени.

Как видно из сопоставления кривых рис. 3 и 4, увеличение начальной концентрации фреона в смеси в 4 раза приводит к уменьшению скорости разложения примерно в 2 раза. Это можно было бы приписать уменьшению объема разрядной области. Однако, по-видимому, полностью двукратное уменьшение скорости разложения не может быть объяснено таким образом. Действительно, время начала роста плотности плазмы в сечении интерферометра увеличивается с 80 мкс для 5%-ной смеси до 96 мкс для 20%-ной смеси (в последнем случае было зарегистрировано увеличение плотности плазмы к концу 100 мкс импульса до $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$).

Энергетическая цена разложения фреона-10 может быть оценена по начальному участку кривых на рис. 3, 4 $\Delta \epsilon_F = P_0 \tau_0 \cdot f \Delta t / V_k \Delta [CCl_4]$, где P_0 , τ_0 — импульсная мощность излучения и длительность импульса. Для случая 5%-ной смеси $\Delta \epsilon_F \approx 60 \text{ эВ/мол}$. В случае 20%-ной смеси $\Delta \epsilon_F \approx 20 \text{ эВ/мол}$.

6. Обратимся теперь к обсуждению результатов измерений. Как мы уже видели (табл. 2), увеличение концентрации фреона в азоте ведет к существенному повышению критических полей. Кроме того, увеличивается задержка в начале роста плотности плазмы и уменьшается скорость самого роста плотности. Наблюдается также увеличение скорости распада плазмы, особенно существенное для 20%-ной смеси. Эти особенности выявляются при сопоставлении характеристик разряда в смесях и в чистом азоте. Поэтому остановимся на параметрах плазмы и ее распада при разряде в азоте. Прежде всего наблюдается ограничение максимальной плотности плазмы значением около $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, что существенно ниже критической плотности $1.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Это ограничение может быть вызвано понижением поля из-за рефракции излучения в плазме и его поглощения [8], что ведет к снижению частоты ионизации. Эффект поглощения должен особенно сильно проявляться при давлениях 15, 30 Тор, так как характерная длина поглощения при этом составляет $\delta \approx 1-2 \text{ см}$.

Как видно из рис. 1, с увеличением длительности импульса увеличивается длительность распада плазмы. Обработка осциллограмм (рис. 5, 6) показывает, что меняется сам характер распада. При малых длительностях облучения спад плотности экспоненциальный,

при больших длительностях — комбинационный. По-видимому, мы имеем дело с плазмой, состоящей из комплексных ионов N_4^+ . Действительно, характерное время образования таких ионов в результате тройных столкновений $N_2^+ + N_2 + N_2 \rightarrow N_4^+ + N_2$ составляет при 10 Тор $(k[N_2]^2)^{-1} \simeq 0.2$ мкс. Скорость электрон-ионной рекомбинации комплексных ионов в азоте для нашего примера составляет $(\alpha_e[e])^{-1} \simeq 0.5$ мкс даже при средней энергии электронов 0.3 эВ (столь высокая электронная температура на стадии распада может быть обязана возбуждению колебаний азота). Это расхождение еще усиливается при уменьшении импульса, как это видно из рис. 6, а. Таким образом, мы имеем здесь дело с аномально долго живущей плазмой, как это имело место в работе [10], в которой большое время жизни было приписано эффекту ассоциативной ионизации азота. Обсуждение наблюдаемого и в данном случае эффекта аномально медленного распада плазмы требует специального рассмотрения и выходит за рамки настоящей работы. Здесь мы только хотели бы отметить сам факт такого наблюдения.

Примесь фреона в азоте должна была бы не только повысить критические поля пробоя и снизить скорость ударной ионизации, но и на несколько порядков ускорить распад из-за процессов диссоциативного прилипания электронов. Даже 0.2% примеси фреона к азоту при давлении 10 Тор должно было дать характерное время устранения электронов меньше $2 \cdot 10^{-8}$ с, в то время как мы имеем рекомбинационный спад с характерным временем 1–3 мкс (рис. 6). Итак, как и в случае подпорогового разряда [4,6,7], приходим к выводу о полном разложении фреона в объеме разряда в каждом микроволновом импульсе. В качестве механизма выгорания фреона может быть предложен процесс диссоциации молекул фреона при столкновении их с электронно-возбужденными молекулами азота, на который было обращено внимание в [7]. Простую оценку можно сделать по уравнениям баланса частиц

$$[N_2^*]' = k^*[N_2][e] - k_a[N_2^*][CCl_4], \quad (1)$$

$$[CCl_4]' = -k_a[N_2^*][CCl_4]. \quad (2)$$

Если принять константу тушения близкой к постоянной для молекул кислорода ($k_a \simeq 10^{-10}$ см³/с), то характерное время установления возбуждения и тушения $(k_a[CCl_4])^{-1} \simeq 1$ мкс для 2%-ной смеси при давлении 10 Тор. Поэтому количество выгоревшего фреона можно оценить как

$$\Delta[CCl_4]/[N_2] = k^* \int_0^{\Delta\tau} [e] dt = \frac{1}{2} k^*[e]_0 \Delta\tau,$$

если принять линейный рост плотности плазмы за время $\Delta\tau$.

Основной вклад в постоянную k^* дает возбуждение состояний B , W^3 , B' , A . Учет возбуждения только этих состояний при $E_{\text{эф}}/[M] = 160$ Тд дает значение $k^* \simeq 2 \cdot 10^{-9}$ см³/с и $\Delta[CCl_4]/[N_2] = 3 \cdot 10^{-2}$ при $\Delta\tau = 15$ мкс и $[e]_0 = 2 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Как мы видим, данного механизма вполне достаточно для полного выгорания фреона в смесях с концентрацией не выше 2%. Но его явно не хватает для 20%-ных смесей, что и подтверждается опытом.

Другим механизмом выгорания может быть диссоциативное прилипание на активной стадии разряда. Константа этого процесса может быть определена из функции эффективного сечения от средней энергии электронов [11] или из значений пороговых полей для использованных нами смесей, если принять неизменность средних энергий электронов при добавлении фреона к азоту. Результаты таких оценок приведены в табл. 2, там же даны расчетные значения константы скорости ионизации азота при критических полях пробоя смеси (оценки сделаны на основе аппроксимационных формул, приводимых в обзоре [12]). Наибольшее значение константы прилипания $9 \pm 2 \cdot 10^{-9}$ см³/с соответствует $E_{\text{eff}}/[M] = 150$ Td, наименьшее $1.6 \pm 0.3 \cdot 10^{-9}$ см³/с — 190 Td. Этот результат совпадает с оценками по зависимости сечения прилипания от средней энергии электронов, если учесть, что указанным выше значениям поля соответствует рост средних энергий электронов от 2 до 3 эВ.

Приняв константу прилипания равной $k_F = 10^{-8}$ см³/с, получим следующую оценку степени выгорания фреона за время роста плотности 15 мкс $\Delta[\text{CCl}_4]/[\text{CCl}_4]_0 = (1/2)k_F[e]_0\Delta\tau = 0.15$.

Еще меньший вклад в выгорание фреона, видимо, может дать ионизация молекул фреона электронным ударом. Чтобы характерное время ионизации сравнялось с длительностью роста плотности плазмы, необходимо иметь сечение ионизации 10^{-15} см² при средних энергиях электронов 2–3 эВ, что нереально. По той же причине вряд ли может быть эффективен и прямой процесс диссоциации фреона при электронном ударе.

Остановимся теперь на оценке энергетической цены деструкции молекул фреона. Выше мы сделали такую оценку исходя из полной энергии микроволнового импульса. Однако, как мы видим (рис. 1 и 2), сигнал излучения, принимаемый за разрядом через окно в торце камеры, показывает лишь ослабление до 0.5 первоначальной величины. При сильном поглощении излучения в разряде при давлениях в диапазоне 10–30 Тор такое неполное ослабление, видимо, может быть объяснено рефракции периферийных частей микроволнового пучка, когда разреженная плазма выполняет роль рассеивающей линзы.² Однако удельный энерговклад в плазме в области интерферометра может быть рассчитан исходя из амплитуды поля и плотности плазмы

$$\Delta\varepsilon_1 = e^2 E_0^2 \nu_e \int_0^{\Delta\tau} [e] dt / 2m(\omega^2 + \nu_e^2) [M] = e^2 E_0^2 \nu_e [e]_0 \Delta\tau / 4m(\omega^2 + \nu_e^2) [M].$$

Оценка дает $\Delta\varepsilon_1 = 0.16 - 0.32$ эВ/мол, что при полном выгорании фреона дает значение $\Delta\varepsilon_F = \Delta\varepsilon_1 [M] / [\text{CCl}_4]_0 = 4 - 8$ эВ/мол для 4%-ной смеси.

Более высокие цены, полученные из кривых выгорания в предположении использования полной энергии импульса, по-видимому, связаны с потерями мощности излучения из-за рефракции и из-за поглощения сверх необходимого уровня при длительном облучении одного и того же участка плазменного облака.

² Такой эффект наблюдался И.А. Коссым с коллегами еще в 1973 г.

7. Таким образом, изучены особенности особенности волны пробоя и распада плазмы в азоте и его смесях с фреоном-10 при давлениях 3–30 Тор в фокусированном микроволновом пучке на значительном удалении (40 лин волн) от фокальной плоскости. Установлено, что плотность плазмы ниже критической в 5–10 раз. Показано, что распад плазмы в азоте происходит медленнее, чем это следует из данных о коэффициентах рекомбинации. В соответствии с теоретическими ожиданиями установлено повышение амплитуды критических полей пробоя в смесях с фреоном и уменьшение скорости ударной ионизации. Наблюдаемый распад плазмы при энерговкладах 0.16–0.32 эВ/мол свидетельствует о полном разложении фреона в смесях при концентрациях не более 2–4%. По-видимому, это связано с процессами тушения молекулами фреона электронно-возбужденных молекул азота.

Оценки показали, что локальная энергетическая цена разложения молекул фреона лежит в диапазоне 4–8 эВ/мол, что близко к энергии диссоциации. В связи с этим могут быть предложены высокоэффективные методы использования пучка микроволн для разложения и трансформации процентных примесей фреона в режиме волны пробоя. Высокая эффективность использования энергии микроволн может быть достигнута при высокоскоростном сканировании микроволнового луча по пространству, например, с помощью вращающегося зеркала. При этом рабочие смеси фреона с азотом могут быть, вероятно, использованы в плазмохимических реакторах для модификации фреонов.

Авторы бесконечно признательны Российскому фонду фундаментальных исследований и Международному научному фонду, поддержавших настоящую работу финансами и морально (проект № 93-02-1698 РФФИ и MCG 000 ISF).

Список литературы

- [1] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Баргударов А.Э. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. Вып. 9. С. 500–504. Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 9. С. 1198–1210.
- [2] Askaryan G.A., Batanov G.M., Barkhudarov A.E. et al. // ISPP-13 "Piero Caldirola". Industrial Applications of Plasma Physics / Ed. G. Bonizzoni, W. Hooke, E. Sindoni. Bologna, 1993. P. 463–483.
- [3] Askaryan G.A., Batanov G.M., Barkhudarov A.E. et al. // J. Phys. D. 1994. Vol. 27. P. 1311–1318.
- [4] Askaryan G.A., Batanov G.M., Gritsinin S.I. et al. // Strong Microwaves in Plasmas. IPF. N. Novgorod. 1993. Vol. 1. P. 227–257.
- [5] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А. и др. // Труды ФИАН. Т. 160. М.: Наука, 1985. С. 174–202.
- [6] Batanov G.M., Gritsinin S.I., Korchagina T.G. et al. // Comments Plasma Physics. Controlled Fusion. 1994. Vol. 16. N 2. P. 113–127.
- [7] Askaryan G.A., Batanov G.M., Gritsinin S.I. et al. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1994. To be published.
- [8] Визарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В. и др. // ИПФ АН СССР. Горький, 1988. С. 41–135.
- [9] Безменов И.В., Русанов В.В., Силаков В.П. // Тр. ИОФАН. Т. 47. М.: Наука, 1992. С. 74–107.
- [10] Грицинин С.И., Косый И.А., Силаков В.П. и др. // ТВТ. 1986. Т. 24. № 4. С. 662–667.
- [11] Electron-Molecule Interactions and Their Applications / Ed. L.G. Christophoron. Orlando: Academic Press. 1984. Vol. 1, 2.
- [12] Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P. Plasme Sources Sci. Technol. 1992. Vol. 1. P. 207–220.