

СВЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ВЧ-РАЗРЯДОВ
ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Н. А. Лашук, Е. Т. Протасевич, В. И. Толмачев, В. А. Хан
(Томск)

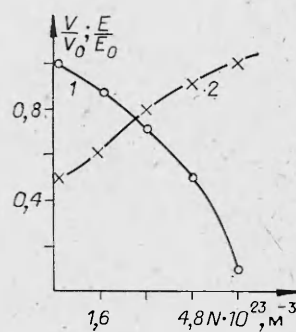
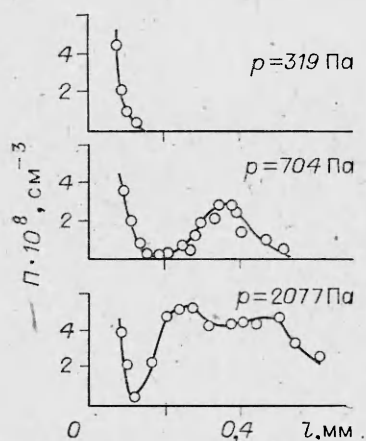
Необходимость исследования безэлектродных ВЧ-разрядов в азоте, в сухом * и влажном воздухе обусловлена целым рядом научных и технических приложений, среди которых отметим измерения характеристик мощного СВЧ-излучения [1], моделирование долгоживущего плазменного образования [2], создание в реальной атмосфере слоя, непрозрачного для радиоволн [3], плазмохимия [4, 5] и т. д.

Цель данной работы — выявление пространственных изменений формы плазменного образования ВЧ-разрядов в зависимости от давления и влажности воздуха, поиск режима, обеспечивающего наименьший объем, занятый плазмой, а также определение некоторых параметров плазмы ВЧ-разряда.

Эксперименты выполнены на частотах 5 и 37 МГц, 3 и 10 ГГц в кварцевых трубках с внутренними диаметрами 0,010; 0,013; 0,019; 0,080 и 0,090 м. В случае работы с сухим воздухом и азотом разряды возбуждались при давлениях 60—3000 Па, а их ионизация осуществлялась с помощью магнетронного генератора с максимальной выходной мощностью ~200 Вт на частоте 2,4 ГГц. Режим работы импульсный ($\tau = 1,50$ — $1,75$ мкс, $F = 300$ Гц). Разрядная трубка ($d = 1,3 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 1,5$ — $2,0$ м) помещалась в максимум стоячей волны H_{10} прямоугольного волновода. Диагностика плазмы вне волновода производилась резонаторным методом [6] на частотах 2,6—2,8 ГГц. В качестве задающего генератора служил клистрон К24. Измерительный резонатор работал на типе колебаний E_{010} и имел высоту $1,5 \cdot 10^{-2}$ м, а диаметр отверстия $1,6 \cdot 10^{-2}$ м. Для измерения пространственного распределения концентрации электронов резонатор перемещался вдоль разрядной трубки. Изменение частоты $\Delta\omega$ регистрировалось резонансным волномером с помощью осциллографа. Для измерения концентрации электронов был собран также простейший интерферометр ($\lambda = 8$ мм), рабочая длина волны которого выбрана из условия $\nu \ll \omega$, где ν — частота столкновений электронов, а ω — частота зондирующего сигнала. Измерительное плечо интерферометра подключалось через узкие стенки прямоугольного волновода таким образом, что исследуемая плазма находилась между рупорными антеннами с диэлектрическими линзами.

На фиг. 1 приведены кривые распределения концентрации электронов вдоль разрядной трубки. За начало отсчета принята середина узкой стенки прямоугольного волновода. В пределах погрешности измерений границы плазмы ВЧ-разряда и свечения совпадали. Из фиг. 1 видно, что форма и размер свечения в длинных трубках сильно зависят от давления газа. Так при $p \approx 319$ Па в трубке присутствуют только электроны, получающиеся за счет ионизации газа (азота) в волноводе ВЧ-полем. По мере удаления от широкой стенки волновода на расстояние $(2-3) \cdot 10^{-2}$ м их концентрация падает практически до нуля. С увеличением давления первичные электроны вызывают дополнительную ионизацию нейтрального газа в трубке на расстоянии $l \approx 0,35$ м от середины волновода и приводят к образованию зоны «вторичных» электронов, наблюдать которую легко

* Здесь и далее под сухим воздухом будем понимать воздух с концентрацией молекул в нем меньше 0,1%.



Ф и г. 2

Ф и г. 1

визуально по свечению газа в трубке. При этом область, занятая первичными электронами, практически не зависит от давления газа в трубке.

Максимальная концентрация вторичных электронов составляет $3 \cdot 10^8$ и $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ соответственно для давления 704 и 2077 Па. При дальнейшем увеличении давления до ~ 3000 Па свечение в трубке получалось равномерным по всей ее длине и обе области ионизации перекрывались. Частота столкновений электронов ν определялась из соотношения [7]

$$\nu = \frac{\Delta \left(\frac{1}{Q} \right) \omega_0^2}{2\Delta\omega_0},$$

где $\Delta(1/Q) = 1/Q - 1/Q_0$, а Q и Q_0 — соответственно добротность измерительного резонатора с плазмой и без плазмы. Для $p = 2077$ Па в максимуме концентрации вторичных электронов ($l = 0,35$ м) $\nu \simeq (1,12 - 1,35) \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

Непосредственный расчет n_e по фазовому сдвигу φ проводился по формуле [7]

$$\varphi = \frac{\omega}{2c} \frac{dn_e}{n_c},$$

где c — скорость света; d — диаметр плазменного столба; n_e — средняя плотность электронов; n_c — критическая концентрация электронов.

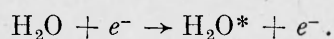
Измерения показали, что в рассматриваемом интервале давлений концентрация первичных электронов $n_e \sim 8 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Для определения изменения формы свечения ВЧ-разрядов в зависимости от влажности воздуха применялись трубки с внутренним диаметром $d \simeq 1,9 \cdot 10^{-2}$ м и длиной $l = 0,35$ м. Трубки находились при постоянном давлении p , равном 1, 2, 3 или 4 кПа. Как и в [8], в качестве источника ВЧ-мощности служил импульсный генератор ($f = 37$ МГц, $\tau = 30$ мс) с максимальной выходной мощностью в импульсе $P = 40$ кВт. Трубки подключались по схеме емкостного или индукционного разряда. Лучшее согласование ВЧ-генератора с импульсной нагрузкой получено при емкостном разряде. Ширина кольцевых электродов при этом $2 \cdot 10^{-2}$ м, расстояние $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-2}$ м. Изменение концентрации электронов во времени $n_e = f(t)$ после окончания ВЧ-импульса измерялось интерференционным методом [7]. Для нашего случая плазма квазинейтральна [8].

С появлением в разрядном объеме молекул H_2O объем плазмы и величина пробивной напряженности электрического поля претерпевали существенные изменения. На фиг. 2 в относительных единицах показано изменение объема свечения и пробивной напряженности электрического поля в зависимости от влажности воздуха (кривые 1 и 2 соответственно). Видно, что присутствие в разряде молекул H_2O заметно уменьшает объ-

ем, занимаемый плазмой (в 12—15 раз): Дальнейшее увеличение концентрации воды приводило к тому, что выходное напряжение ВЧ-генератора было недостаточным для обеспечения пробоя в трубке. Полученные значения пробивной напряженности находятся в согласии с [9], где отмечается, что пробивная напряженность E для паров воды выше, чем для сухого воздуха, когда $p \geq 533$ Па.

Уменьшение объема, занятого плазмой, и повышение электрической прочности смеси (воздух + H_2O) вызваны охлаждением электронов плазмы молекулами воды [5] за счет протекания реакции



Более подробно физические процессы, протекающие в неравновесном ВЧ-разряде с парами воды, рассмотрены в [4]. Начиная с концентрации молекул воды $N \simeq 1,6 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ свечение разряда становилось малиново-красным, что связано с возбуждением молекулярных полос, принадлежащих колебательному спектру H_2O [10].

Для рассмотрения сжатия плазмы внутренний диаметр трубки увеличен до $\sim 7,2 \cdot 10^{-2}$ м, а относительная концентрация молекул H_2O выбрана оптимальной с точки зрения обеспечения наименьшего объема (см. фиг. 2), занимаемого плазмой ВЧ-разряда. Эксперименты выполнены при начальном давлении ~ 4000 Па для случая, когда трубка была отпаянной.

Визуальные наблюдения показали, что свечение разряда при этом имеет яркий ореол, расположенный у поверхности плазменного образования, который исчезает при увеличении мощности, подводимой к разряду (~ 40 кВт). Концентрация плазмы, измеренная в 3-сантиметровом, 8- и 4-миллиметровом диапазонах длин волн, $n \gg 7,54 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, проведенные исследования показали, что форма свечения сильно зависит от давления внутри разрядной трубки и влажности газа. При определенных условиях эксперимента объем, занятый плазмой, получается наименьшим за счет охлаждения плазмы парами воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bekefi G., Orzechowski T. J. Giant microwave bursts emitted from a field-emission, relativistic-electron magnetron.— Phys. Rev. Lett., 1976, v. 37, N 6.
2. Протасевич Е. Т. Об одной возможности воздействия на погоду.— Письма в ЖТФ, 1981, т. 7, вып. 5.
3. Протасевич Е. Т. О методе охлаждения электронов в плазме газового разряда.— ВИНТИ № 342—83, 1983.
4. Браблец А., Каничка В., Протасевич Е. Т. Температура плазмы ВЧ-разряда в парах воды при низком давлении.— Химия высоких энергий, 1983, т. 17, № 3.
5. Русанов В. Д., Фридман А. А., Шолин Г. В. Физика химически активной плазмы с неравновесным колебательным возбуждением молекул.— УФН, 1981, т. 134, вып. 2.
6. Голант В. Е. Высокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968.
7. Хилд М., Уортон С. Микроволновая диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
8. Диденко А. П., Клименов В. А. и др. Высокочастотный разряд низкого давления в слабом магнитном поле.— ЖТФ, 1976, т. 46, вып. 2.
9. Bandel P. W., McDonald A. D. Microwave breakdown in air plus H_2O .— J. Appl. Phys., 1970, v. 41, N 7.
10. Rajaratnam A. Lu a K. T. Analysis of H_2O vibration-rotation spectra in the visible region.— J. Phys. B: Atom and Mol. Phys., 1982, v. 15, N 20.

Поступила 29/VI 1984 г.