

УСТОЙЧИВОСТЬ И ОДНОРОДНОСТЬ РАЗРЯДА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Л.Н.ОРЛОВ, О.Л.ГАЙКО, В.В.НЕВДАХ, Я.И.НЕКРАШЕВИЧ
Институт физики НАН Беларуси, 220600 Минск, пр.Ф.Скорины, 68
e-mail: orlov@dragon.bas-net.by

Аннотация. Теоретически и экспериментально исследованы критерии устойчивости и однородности плазмы газового разряда, возбуждаемой одновременно постоянным и ВЧ токами; показана возможность получения стационарных однородных разрядов в больших объемах газа при доле ВЧ энерговклада до 30%.

Введение. Для решения целого ряда практически важных задач, в том числе – для создания газовых лазеров большой мощности (Райзер и др., 1995; Hall, Hill, 1987), требуется обеспечить однородное возбуждение достаточно больших объемов газа. Известно, однако, что в разряде постоянного тока (РПТ) величина вкладываемой в разряд мощности и достижимый объем возбуждаемого газа ограничены существованием плазменных неустойчивостей, основными из которых являются ионизационно-перегревная неустойчивость, прилипание/отлипание электронов, ступенчатая ионизация и максвеллизация электронов (Райзер, 1987; Велихов, Ковалев, Рахимов, 1987). При этом скорость ионизации нелинейно зависит от концентрации электронов n_e , неравномерно распределенной по объему, что приводит к лавинообразным локальным изменениям n_e и шнурованию разряда. В этом отношении высокочастотный разряд (ВЧР) обладает рядом существенных преимуществ – здесь снижается роль большинства плазменных неустойчивостей, что позволяет возбуждать большие объемы газа без стратификации разряда. Однако для практического использования такой разряд несколько сложнее из-за проблем с дороговизной ВЧ генераторов и их согласованием с нагрузкой. Представляет интерес теоретически и экспериментально исследовать возможности комбинированного возбуждения разряда и определить минимальную долю ВЧ мощности, достаточную для стабилизации разряда в больших объемах газа.

Эксперимент. Нами выполнена серия измерений устойчивости и однородности стационарного разряда при одновременном наложении постоянного и ВЧ полей на разрядный промежуток, схематически показанный на Рис.1. Разрядная кювета, помещенная в не показанный на рисунке заполняемый газом герметичный объем, была образована двумя расположенными на расстоянии 77 мм друг от друга пластинами 1 и 2 размером 80 x 100 мм, разделенными латунными трубками 3 и прокладками из тефлона.

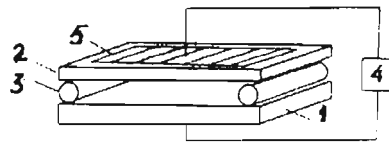


Рис. 1. Схема разрядной кюветы

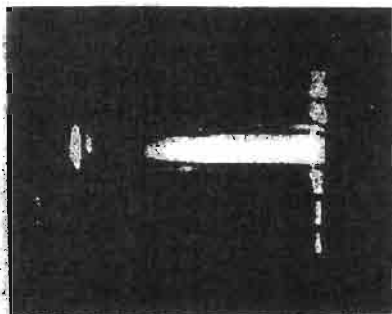
В молекулярных газах стационарный тлеющий РПТ в такой кювете зажигался

только при малых давлениях (обычно – менее 7 Торр) и имел вид узкого светящегося столба, показанного на Рис. 2а. По мере повышения давления или увеличения тока разряда его сечение вначале плавно, а затем резко, практически лавинообразно сужалось – происходило контрагирование столба с переходом к дуговому разряду. При больших давлениях газа (свыше 35 Торр) стационарный РПТ вообще не зажигался, при достаточно высоком напряжении питания происходили лишь периодические пробои разрядного промежутка.

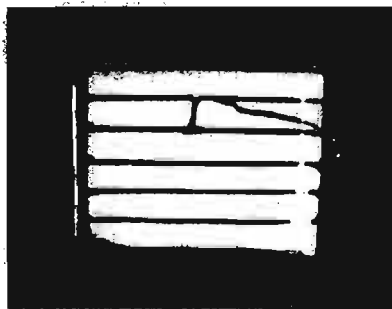
При наложении дополнительного ВЧ поля стационарный разряд удавалось зажечь при любых давлениях газа вплоть до 75 Торр, причем он достаточно равномерно заполнял весь объем разрядного промежутка (Рис. 2б). Исследования показали, что практически при всех изучавшихся токах, давлениях и составах смеси такой комбинированный разряд был весьма однороден и стабилен. Проведенные спектроскопические исследования показали, что параметры плазмы такого разряда вполне пригодны для создания инверсной населенности и получения лазерной генерации в различных газах и газовых смесях (Орлов, 1997). При этом характерно, что использование комбинированного возбуждения позволило почти в 1,5 раза повысить предельный энерговыход в плазму без ухудшения однородности разряда.

Одним из существенных вопросов при таких измерениях было определение минимальной доли ВЧ энергии, достаточной для поддержания стационарного разряда в такой системе. Показано, что эта доля существенно зависит от давления и состава газа, однако даже для достаточно больших давлений (порядка 50 Торр) она не превышала 35 % от величины полной энергии, вкладываемой в разряд. Когда же эта доля становилась меньше, вначале происходило плавное сужение области однородного разряда, а затем – его катастрофическая стратификация.

Было обнаружено еще одно практически важное обстоятельство – оказалось, что если после зажигания стационарного комбинированного разряда прекратить подачу ВЧ энергии, в течение довольно значительных промежутков времени (от мс до нескольких секунд) разряд продолжал гореть без существенных изменений параметров плазмы и контрагирования. Это открывает интересные возможности весьма экономичного поддержания стационарного однородного разряда в больших объемах газа путем использования наряду с источником постоянного тока генератора коротких импульсов ВЧ напряжения с частотой следования порядка 100 Гц.



а)



б)

Рис. 2. Фотографии интенсивности разряда, снятые через прозрачный электрод при РПТ (а) и при комбинированном возбуждении (б)

Обсуждение результатов. Согласно существующей теории плазмы газового разряда (Райзер, 1987) наблюдавшееся нами повышение устойчивости и однородности РПТ в результате наложения дополнительного ВЧ поля связано с осцилляциями амплитуды ВЧ поля с частотой ω , в следствие чего его амплитуда достаточна для ионизации газа только в течение малой доли периода, за которую практически все процессы, ведущие к плазменным неустойчивостям, не успевают установиться – в результате при комбинированном возбуждении расширяется диапазон параметров, при которых плазма устойчива и увеличивается допустимый энерговклад.

Согласно работе (Елецкий, 1977) стабильность любого типа разряда может быть описана с помощью *инкремента неустойчивости* плазмы Ω - величины, обратно пропорциональной времени установления неустойчивостей. Как показано в работе (Райзер, 1987), для РПТ эта величина записывается в виде:

$$\Omega_d = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\sigma_0 E^2}{p} \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln N} \quad (1)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ - показатель адиабаты, $\sigma = e n \mu_e$ - электронная проводимость плазмы, μ_e - подвижность электронов, E - напряженность поля, p - давление газа, а для переменного поля $E_r = E_0 \cos \omega t$ произвольной частоты

$$\Omega_{RF} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{j_0 E_0}{2p} \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln N} \quad (2)$$

где

$$j_0 = \frac{\sigma \mu_e E_0 v_i (E_0 / N)}{\beta_r (BN / E_0)^{1/2}} = \sigma E_0 \quad (3)$$

Величины инкрементов (1) и (2) различаются лишь значениями проводимости плазмы, числовым коэффициентом $1/2$ и значением эффективной амплитуды ВЧ поля, слабо зависящим от частоты:

$$E_* = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v_i}{v_i^2 + \omega^2} \quad (4)$$

при давлениях порядка 30 Торр для большинства газов при частотах возбуждения от 10^3 до 10^{10} Гц $\omega \ll v_i$, т.к. частота столкновений v_i имеет порядок величины 10^{11} с $^{-1}$. Несложно показать, что при этом равная стабильность РПТ и ВЧР достигается, когда отношение амплитуд обоих полей равно

$$\frac{E_0}{E} = 1 + \frac{E_0}{BN} \ln \left[2 \left(\frac{E}{E_*} \right) \left(\frac{BN}{E_*} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

оценки показывают, что амплитуда ВЧ поля, не приводящего к контрагированию разряда, может быть в 1,15 – 1,22 раза больше, чем в РПТ, а следовательно в ВЧР может быть достигнут в 1,4 – 1,5 раз больший предельный энерговклад – это неплохо коррелирует с результатами наших измерений.

Для случая комбинированного возбуждения, следуя работе (Рахимова, 1975), оценим минимальную долю ВЧ энергии W , которую необходимо добавить к постоянному току, чтобы разряд оставался стационарным, а их суммарная энергия Q не приводила к стратификации разряда. Для случая, когда ВЧ поле с достаточно высокой частотой перпендикулярно направлению постоянного поля, в предположении, что сечения упругих и неупругих соударений электронов с частицами газа практически не зависят от их энергии, можно записать следующее выражение:

$$\frac{W}{Q} = \frac{(1 + \delta^2)}{\delta} \frac{(T_1)^{1/2}}{\int_0^{\pi/2} (1 + \delta^2 \cos^2 x) dx} \ln^{1/2} \frac{\omega \int_0^{\pi/2} \beta dt}{\beta (T_{\max})^{1/2} (1 + \delta^2)^{1/2}} \quad (6)$$

Несложно показать, что при фиксированном Q это выражение имеет минимум, когда квадрат отношения амплитуд постоянного и ВЧ полей (δ^2) близок к $1/2$, т.е. разряд остается стабильным даже когда амплитуда ВЧ поля не превышает $1/3$ от E . Это также находится в неплохом соответствии с результатами наших измерений. При коллинеарном направлении полей доля ВЧ поля должна быть почти в 1,5 раза больше.

Простейшие оценки подтверждают предположение о том, что комбинированный разряд, в котором для поддержания устойчивости и однородности используются короткие импульсы с большой скважностью, может быть более стабилен, чем при наложении дополнительного ВЧ поля. Действительно, в случае, когда период колебаний в 100 раз превышает длительность импульса, инкремент неустойчивости (2) может в 5 раз превышать инкремент неустойчивости РПТ (1), причем минимальная доля импульсной мощности в этом случае не превышает 20 % от полной мощности без ухудшения устойчивости разряда.

Заключение. Таким образом, проведенные измерения и оценки показали, что использование комбинированного возбуждения (когда к разрядному промежутку наряду с постоянным, подводится дополнительно ВЧ или импульсное напряжение) позволяет обеспечить поддержание и горение однородного стационарного разряда в больших объемах газа. Одной из наиболее значительных областей практического использования такого разряда является создание мощных газоразрядных лазеров; показанная возможность не только увеличения рабочего объема газа, но и существенного возрастания удельного энерговклада при сохранении требуемых параметров плазмы и возможности работать при более высоких давлениях газа открывает новые перспективы для создания лазеров высокой мощности, например высокоэффективных CO_2 лазеров с мощностью генерации свыше 100 кВт в непрерывном режиме.

Литература

- Велихов Е., Ковалев А., Рахимов А. Физические явления в газоразрядной плазме, М., Атомиздат, 1987.
- Елецкий А., Рахимов А. - в кн.: Химия плазмы, М., 1977, вып.4
- Орлов Л.Н., Некрашевич Я.И. Особенности возбуждения частиц в высокочастотном емкостном разряде. ЖПС. 1997, Т.64, №3, С.291-296.
- Налартович А., Старостин А. - в кн.: Химия плазмы, М., 1979, вып. 6.
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда, М., 1987
- Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостной разряд, М., Наука, 1995.
- Рахимова Т., Рахимов А.. Физика плазмы, 1975, т.1, с. 854.
- Hall D., Hill C.: in "Handbook of molecular lasers", M.Dekker Inc., NY, 1987, p. 165 - 258