

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ КОНТРАКЦИИ

Ю. Г. Козлов и А. М. Шухтин

Доказано существование значительного градиента плотности нормального газа при разряде постоянного тока в инертных газах. С помощью скоростной съемки исследовалось также развитие импульсного разряда. Опыты подтверждают предположения, высказанные в работе [1], о природе контракции положительного столба. Констрагированный шнур может изменять свою конфигурацию при наличии локального разогрева стенки трубки.

В работе [1] нами было показано, что неучет неоднородного распределения нормального газа по сечению разрядной трубки может привести к ошибочному толкованию причин контрагирования положительного столба разряда. Уменьшение плотности газа в некоторых точках сечения всего на 25% при низких электронных температурах может вызвать увеличение скорости ионизации на порядок и более. В присутствии рекомбинационных потерь в объеме, роль которых возрастает с увеличением общей плотности газа, а тем более в послесвечении импульсного разряда после остывания электронного газа, неоднородный разогрев может оказаться единственной причиной возникновения контрагирования столба.

Несмотря на это, долгое время подвергался сомнению сам факт неравномерного распределения нормального газа по сечению разрядной трубки, особенно в разряде постоянного тока. С нашей точки зрения, уменьшение плотности газа на оси разрядного промежутка при импульсном разряде является давно доказанным явлением. Достаточно упомянуть работы [2-4], в которых наблюдалось явление выгорания в парах металлов и в инертных газах. Правда разогрев газа может являться не единственной причиной уменьшения плотности нормального газа. Как уже упоминалось в работе [1], другой причиной может быть сильная ионизация газа, при которой, вообще говоря, не будут выполняться условия для сильного контрагирования столба.

В наших условиях [5] термический разогрев нормального газа, если не является единственной, то доминирующей причиной уменьшения плотности газа на оси разрядной трубки. При других условиях эксперимента, конечно, причиной этого явления может стать и сильная ионизация. Такая ситуация наблюдалась, по-видимому, в работе [6].

Мы попытались обнаружить градиент плотности нормального газа в разряде постоянного тока в неоне. Начальное давление в разрядной трубке в большинстве опытов составляло 15 тор. Схема установки не отличалась от той, которая использовалась в работе [5], с той лишь разницей, что интерферометр освещался не ртутной лампой, а гелий-неоновым лазером. Лазерный пучок коллимировался круглой диафрагмой диаметром 0.2 мм, что и определяло пространственное разрешение установки. Смещая лазерный пучок относительно разрядной трубки, мы могли определить изменение плотности нормального газа в различных точках сечения. Для определения n_a в разряде постоянного тока осциллографирование мало пригодно из-за больших времен установления режима горения при давлениях, больших 10 тор. При этом следует отметить, что нами наблюдался немонотонный характер процесса установления.

В данном случае мы пользовались следующим приемом. Наблюдался фототок в отсутствие разрядного тока, и затем он сравнивался с фототоком при включенном разряде. Фототок регистрировался микроамперметром, шкала которого градуировалась по максимумам и минимумам картины интерференции. Это позволяло легко определить разность фаз, а следовательно, и разность оптических длин в отсутствие и присутствии разряда.

Результаты измерений представлены на рис. 1 для $p=15$ тор и токов 25, 50 и 100 ма в неоне. Видно, что в некоторых случаях уменьшение n_a на оси разрядной трубки достигает 25% от первоначального значения. Итак, мы считаем доказанным, что даже в разряде постоянного тока существует градиент концентрации нормальных атомов в радиальном направлении.

Следующим этапом экспериментального изучения явления контракции явилось исследование динамики развития столба при импульсном разряде. Дело в том, что в большинстве случаев токовый шнур визуально плохо наблюдается. Трубка по сечению светится более или менее равномерно, так как глаз интегрирует свечение по всем стадиям процесса от момента пробоя до времен позднего послесвечения. Поэтому мы попытались сфотографировать радиальное распределение свечения в различные моменты времени с хорошим временным разрешением. Для того чтобы получить сведения о радиальном распределении электронов по сечению в различных стадиях импульсного разряда, мы использовали прибор УС-01 в качестве скоростного затвора. Длительность экспозиции во всех случаях была 1 мксек. Задержка относительно начала разряда момента фотографирования могла меняться ступенчато через 1 и более мксек. генератором сдвинутых импульсов Г5-4Б. Кроме того, что прибор позволяет получать хорошее временное разрешение, он обладает большим коэффициентом усиления по свету.

Съемка производилась с объективом ТАИР-3 с расстояния 2 м с использованием насадочных колец. При этом на выходном экране ЭОПа получалось усиленное изображение в масштабе 1 : 1.

Разрядная трубка фотографировалась сбоку, причем из всей ее длины диафрагмой шириной 3 мм вырезалась щель перпендикулярно оси трубки. Для того чтобы получить на фотографии изображение стенок, к последним прикреплялись маленькие зеркала под углом 45° к направлению фотографирования.

Фотоприставка позволяла получать более 200 кадров на одной пленке с интервалом 1 мксек. и более. Несмотря на то что была возможность фотографировать свечение разряда в отдельных линиях, мы фотографировали его только в интегральном свечении.

Следует указать, что распределение свечения не всегда говорит о распределении заряженных частиц. Все зависит от того, какой процесс рекомбинации играет основную роль в данный момент времени. Следовательно, свечение трудно связать с концентрацией электронов, и интерес данная работа может представлять лишь при сильных неоднородностях в распределении свечения, так как чаще всего (кроме времени прохождения импульса) свечение все-таки указывает на наличие электронов в том или ином сечении трубки.

Итак, запустив электронный затвор усилителя света с некоторой задержкой относительно исследуемого процесса и меняя задержку от кадра к кадру, мы получим кинограмму развития столба разряда. На рис. 2, а и в время между соседними кадрами составляет 1 мксек., а на рис. 2, б —

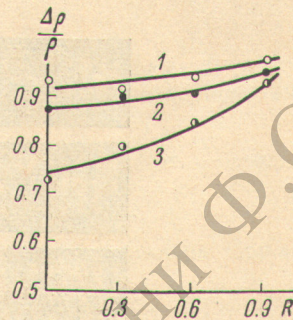


Рис. 1. Распределение плотности нормального газа по радиусу в разряде постоянного тока.

1 — $I=25$, 2 — 50, 3 — 100 ма.

3 мксек. Белые квадратики по бокам каждого кадра фиксируют положение стенки сосуда.

Во-первых, было замечено, что во время самого импульса свечение более или менее равномерно заполняет весь объем, однако уже на заднем фронте импульса образуется ярко светящийся шнур, занимающий весьма малую часть сечения трубки. Затем в послесвечении шнур долгое время сохраняет свои размеры и потом начинает медленно расширяться в радиальном направлении. Часто наблюдается повторное сжатие шнура, которое можно объяснить присутствием звуковой волны [7]. Это видно, например, на на рис. 2, б. По этим причинам визуальное наблюдение контракции при импульсном разряде в большинстве случаев и затруднено.

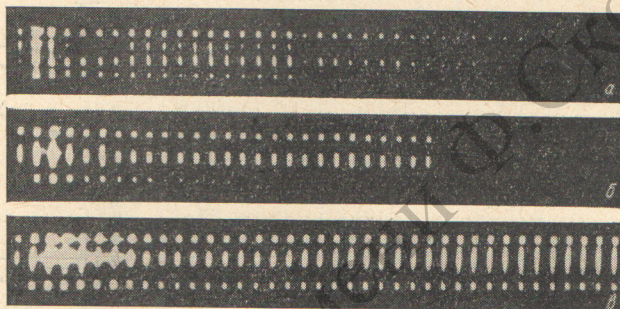


Рис. 2.

Локализация токового шнура, по нашим представлениям, связана с наличием градиентов n_a и n_e в момент пробоя. Допустим, что в какой-то точке данного сечения n_a слегка понижалась, либо начальная (малая еще) величина увеличилась. Причиной этому могут служить флуктуации плотности n_a за счет тепловых потоков внутри объема или присутствие звуковых колебаний. На распределение по сечению n_e в момент пробоя могут влиять индуктивные и емкостные связи разрядной трубки с проводниками, находящимися вблизи нее. В тех местах, где n_a понижена, а n_e повышена, скорость ионизации окажется выше [1], чем в других точках объема. Это приведет к образованию лавинообразного процесса. Стабилизация должна произойти при установлении распределений частиц в пространстве и потоков в радиальном направлении. Легко понять, что если время установления потоков и градиентов меньше длительности импульса, то должен сформироваться осесимметричный столб.

В данном случае важны соотношения между характерными временами: изменения T_e , наибольшим из которых является длительность импульса; временем диффузии τ_d , временем рекомбинации и временем теплоотвода τ_r . Различные соотношения между ними τ_p приведут к тому или иному распределению n_e и свечения по сечению. Кроме разобранных в [1] случаев, могут реализовываться случаи, когда шнур разряда будет локализован не симметрично, а хаотически. Рис. 2, а соответствует именно такому распределению n_e . Шнур идет около стенки. Это происходит тогда, когда на трубку подавались импульсы длительностью 5 мксек. с частотой 2 гц. Очевидно, осесимметричное распределение в этом случае не успевает установиться за время прохождения импульса, а влияние каждого предыдущего импульса на условия пробоя последующего ничтожно.

При увеличении частоты следования импульсов это влияние начинает сказываться. Газ не успевает остыть за промежуток времени между импульсами, и будет устанавливаться некий градиент n_a , а может быть и n_e , симметричный оси. Это приведет к симметризации шнура (рис. 2, б).

Особенно наглядно влияние градиента n_a на локализацию шнура проявляется в таком простом эксперименте. В режиме короткого импульса (≈ 5 мксек.) выбираем условия, когда даже при наблюдении невооруженным глазом видно, что шнур идет совершенно хаотически. Этого легко достигнуть, например в Хе, при давлениях $p > 5$ тор. Затем подогреваем небольшой участок стенки трубки, создавая тем самым искусственный градиент n_a , но не n_e . Шнур теперь будет проходить в этом сечении только через «горячее» место вплоть до полного его остывания. Таким образом, контракция в наших экспериментах носит, по-видимому, тепловой характер.

Литература

- [1] Ю. Г. Козлов. Опт. и спектр., 28, 654, 1970.
- [2] А. М. Шухтин. Канд. дисс. Л., 1952.
- [3] А. М. Шухтин, Ю. Г. Козлов, XIII совещ. по спектроскопии, Л., 1960.
- [4] M. A. Gusinov, J. V. Gerardo, J. T. Verdejen. Phys. Rev., 149, 91, 1966.
- [5] Ю. Г. Козлов. Опт. и спектр., 29, 8, 1970.
- [6] А. М. Шухтин, В. Н. Скребов, М. Н. Полянский. Опт. и спектр., 26, 568, 1969.
- [7] Ю. Г. Козлов, А. М. Шухтин. ЖТФ, 38, 10, 1968.

Поступило в Редакцию 8 декабря 1969 г.