

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТЛЕЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В СИЛЬНО ПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

В. В. Осипов, Р. Б. Бахит, Ю. И. Бычков и А. Г. Филонов

Исследовалось развитие импульсного разряда в гелии при давлении 50 и 100 тор. Напряженность электрического поля составляла $13 \div 104$ кв/см, что превышало в $7 \div 175$ раз статическую пробивную напряженность. Показано, что в таком типе разряда имеет место в течение $24 \div 150$ нсек. стадия квазистационарного тлеющего разряда. На данной стадии разряда проведено спектроскопическое измерение интенсивностей переходов $4^3S \rightarrow 2^3P$ и $4^1S \rightarrow 2^1P$, что позволило рассчитать электронную температуру плазмы, составлявшую 10 ± 1 эв. Давление в разрядном промежутке длиной 4 см и плоскими электродами диаметром 6 см составляло 100 тор, напряженность электрического поля 13 кв/см, концентрация электронов в плазме разряда $6 \cdot 10^{12}$ см⁻³.

В в е д е н и е

В зависимости от величины перенапряжения, прикладываемого к промежутку, газовый разряд можно подразделить на три категории: с низким ($1 \div 15\%$), высоким ($20 \div 50\%$) и очень высоким (более 100%) перенапряжениями. Первый тип разряда, исследованный в работах [1, 2], характеризуется значительными временами запаздывания $\sim 10^{-6}$ сек. и наличием, до перехода в дугу, стадии тлеющего разряда. С повышением перенапряжения до $15 \div 50\%$ времена запаздывания резко сокращаются, развитие разряда происходит по стримерному механизму, основные стадии которого, согласно [3], — первоначальная лавина, стример, узкий слабоионизованный шнур, перемыкающий электроды, канал. Все предразрядные процессы происходят в области узкого шнура. Особенностью развития разряда при перенапряжениях более 100% является то, что ионизационные предразрядные процессы происходят во всем объеме газа между электродами. В течение некоторого интервала времени $10^{-8} \div 10^{-7}$ сек. имеет место разряд, по своим свойствам напоминающий тлеющий. В работе [4] показано, что в случае высокой напряженности электрического поля, в разрядном контуре могут протекать значительные токи, более 10^3 а, за счет ионизационных процессов в объеме газа между электродами. Результаты исследования временных характеристик разряда при $2 \div 20$ -кратных перенапряжениях и давлении воздуха 30 и 760 тор изложены в [5, 6]. Показано, что время запаздывания и длительность стадии квазистационарного тлеющего свечения сильно зависят от перенапряжения и давления газа.

Целью настоящей работы является определение длительности стадии квазистационарного тлеющего свечения в зависимости от напряженности электрического поля при давлении гелия 50 и 100 тор, а также измерение электронной температуры и концентрации электронов плазмы в указанной стадии разряда.

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Исследуемый разряд производился между плоскими медными электродами в камере, согласованной по волновому сопротивлению с передающим кабелем. Межэлектродное расстояние регулировалось от 0 до 60 мм. Генератор высоковольтных импульсов позволял подавать на промежуток одиночные импульсы напряжения длительностью до 150 нсек., длительностью фронта ~ 2 нсек. и амплитудой до 75 кв. Излучение плазмы разряда через смотровое окно и ахроматическую линзу проектировалось на плоскость, параллельную входной щели спектрографа типа ИСП-51. Сканирование изображения разрядного промежутка осуществлялось перемещением камеры в двух плоскостях. Размер области, излучение которой выделялось входной щелью, составлял $0.01 \times 1 \text{ мм}^2$. После спектрографа излучение выбранной длины волны попадало на фотокатод ФЭУ-36, чувствительность которого прокалибрована по источнику стандартного излучения, и далее через усилитель типа УЗ-5А на осциллограф. Осциллографирование напряжения на промежутке и излучения плазмы проводилось одновременно осциллографами типа И-2-7. Возможность сопоставления осциллограмм осуществлялась синхронным запуском обоих осциллографов импульсом напряжения от емкостного делителя.

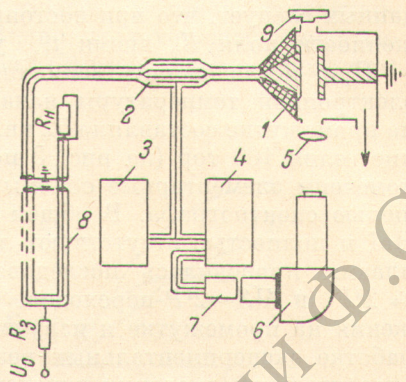


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

1 — исследовательская камера, 2 — емкостный делитель напряжения, 3, 4 — осциллографы, 5 — ахроматическая линза, 6 — спектрограф, 7 — ФЭУ, 8 — схема формирования высоковольтных импульсов, 9 — фотоаппарат.

Типичная осциллограмма напряжения на зазоре приведена на рис. 2. В стадии квазистационарного тлеющего разряда наблюдается равномерное свечение всего объема газа между электродами. При этом около катода отчетливо видна узкая темная полоска, по-видимому, соответствующая, как и в стационарном тлеющем разряде, катодному падению напряжения.

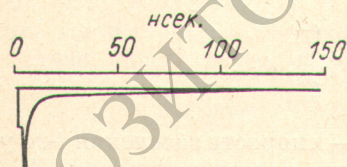


Рис. 2. Осциллограмма напряжения при 60-кратных переключениях и временах экспозиции 50 и 150 нсек.

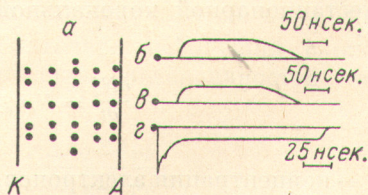


Рис. 3. Фотографии свечения (а) и осциллограммы излучения 4^3S-2^3P -переходов (б), излучения 4^1S-2^1P -переходов (в), напряжения на промежутке (д).

Результаты измерений для различных напряженностей поля и давления представлены в таблице, где U — напряжение, приложенное к промежутку, δ — межэлектродное расстояние, E_0 — начальная напряженность электрического поля, $U_{ст.}$ — статическое пробивное напряжение, t_{ϕ} — время формирования, состоящее из времени запаздывания разряда и быстрого начального спада, $t_{тл.}$ — длительность существования плазмы квазистационарного тлеющего разряда в промежутке. Из полученных

$p = 100$ тор						$p = 50$ тор					
U , кВ	δ , см	E_0 , кВ/см	$U_{ст.}$, кВ	$t_{ф.}$, нсек.	$t_{тл.}$, нсек.	U , кВ	δ , см	E_0 , кВ/см	$U_{ст.}$, кВ	$E_{ф.}$, нсек.	$t_{тл.}$, нсек.
52	4	13	1.9	3	150	52	4	13	1.22	3	150
52	2	26	1.22	3	150	52	2	26	0.86	3	100
52	1	52	0.86	3	50	52	1	52	0.6	3	35
52	0.5	104	0.6	3	28	52	0.5	104	0.41	3	20

данных следует, что при постоянном давлении газа с увеличением напряженности поля E_0 время $t_{тл.}$ уменьшается.

При исследовании величины пространственно-временных вариаций электронной температуры начальная амплитуда импульса напряжения на промежутке составляла 52 кВ, межэлектродное расстояние 40 мм, давление гелия 100 тор (на рис. 3 показан разрядный промежуток). Точками помечены элементарные объемы, излучение которых вырезалось входной щелью спектрографа. В общем спектре плазмы присутствуют все линии HeI и полностью отсутствуют линии HeII. Для определения параметров плазмы проводилась последовательная регистрация излучения $4^3S \rightarrow 2^3P$ - и $4^1S \rightarrow 2^1P$ -переходов. Справа показаны осциллограммы напряжения на промежутке и излучения соответствующих переходов. При обработке экспериментальных результатов получены среднестатистические относительные значения интенсивностей переходов и их отношения, причем на рисунке приведены те импульсы, параметры которых близки к среднестатистическим. Сопоставление осциллограмм показывает, что в пределах погрешности измерения нарастание интенсивности свечения и тока в промежутке происходит одновременно. Кроме того, можно утверждать, не прибегая к расчетам, что электронная температура плазмы в исследуемом интервале времени постоянна в пространстве и времени. Факт постоянства электронной температуры в пространстве подтверждается равномерным свечением плазмы разряда. Соотношения, по которым произведен расчет электронной температуры, приводятся ниже.

Концентрация и электронная температура квазистационарного тлеющего разряда

Уравнение, описывающее населенность возбужденного уровня в рамках нестационарной корональной модели, записывается следующим образом:

$$\frac{\partial N_i^*}{\partial t} = N_a n_e \langle \sigma_i v \rangle - N_i^* \sum_{p=1}^{i-1} A_{ip}, \quad (1)$$

где n_e — концентрация электронов, $\langle \sigma_i v \rangle$ — скорость заселения i -го уровня из основного состояния, N_a — заселенность основного уровня, A_{ip} — вероятность перехода.

Критерий применимости уравнения в такой записи [8]

$$n_e \leq 1.5 \cdot 10^{10} E_i^{1/2} [kT]^4, \quad (2)$$

где E_i — потенциал ионизации (возбуждение уровня i), kT — электронная температура в электронвольтах.

Таким образом, для гелия при $kT = 5 \div 20$ эв уравнение (1) справедливо, если соответственно $n_e \leq 9.4 \cdot 10^{12} \div 2.4 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Концентрация электронов в плазме оценивалась по проводимости, которая в свою очередь находилась из осциллограмм тока и напряжения на промежутке

$$g = \frac{4\delta J}{\pi d^2 U}. \quad (3)$$

Связь между концентрацией электронов и проводимостью плазмы можно представить как

$$n_e = \frac{g \sqrt{8m_e \frac{kT}{\pi}}}{e^2 \lambda_e}, \quad (4)$$

где U , J — напряжение и ток в промежутке, δ — межэлектродное расстояние, d — диаметр электродов, m и e — соответственно масса и заряд электрона, $\lambda_e = 1.3 \cdot 10^{-3}$ см — длина свободного пробега электрона при давлении 100 тор.

Изменение концентрации электронов в течение разряда, рассчитанное согласно (3) и (4), приведено на рис. 4. Видно, что с хорошей точностью можно принять $n_e = 6 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, т. е. критерий (2) выполняется с большим запасом.

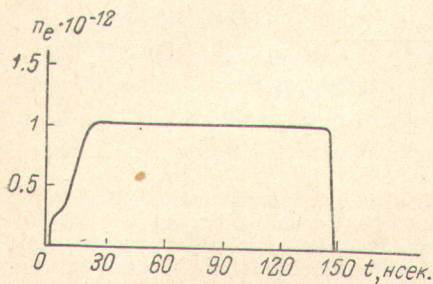


Рис. 4. Изменение концентрации электронов в течение разряда.

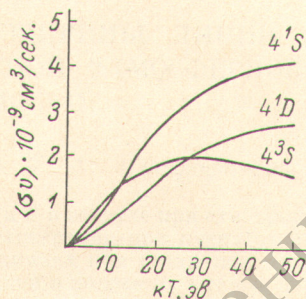


Рис. 5. Зависимость скорости заселения $\langle \sigma_{4^3S} v \rangle$, $\langle \sigma_{4^1S} v \rangle$ и $\langle \sigma_{4^1D} v \rangle$ от величины электронной температуры.

Оценки показывают, что при данном n_e время выгорания HeI в диапазоне температур 5 ÷ 20 эв составляет не менее 10^{-5} сек. Этим объясняется тот экспериментальный факт, что в спектре излучения наиболее интенсивны линии HeI, которые использовались нами для определения электронной температуры по отношению интенсивностей переходов HeI. Однако не все линии HeI, функции возбуждения которых известны, пригодны для этой цели. Как указывается в [7], в области концентраций 10^{11} см $^{-3} < n_e \leq 10^{13}$ см $^{-3}$ наиболее подходящей является пара линий $4^1S \rightarrow 2^1P$ 5048 и $4^3S \rightarrow 2^3P$ 4713 Å. Благодаря небольшой скорости изменения концентрации электронов отношение интенсивностей линии в этом случае можно записать как

$$\frac{I_{4^3S \rightarrow 2^3P}}{I_{4^1S \rightarrow 2^1P}} = \frac{\nu_{4^3S \rightarrow 2^3P} \langle \sigma_{4^3S} v \rangle A_{4^3S \rightarrow 2^3P} \Sigma A_{4^1S}}{\nu_{4^1S \rightarrow 2^1P} \langle \sigma_{4^1S} v \rangle A_{4^1S \rightarrow 2^1P} \Sigma A_{4^3S}},$$

где ν — частота соответствующих переходов.

Скорости возбуждения уровней $\langle \sigma_{4^3S} v \rangle$ и $\langle \sigma_{4^1S} v \rangle$, вычисленные по [9] как функция от kT , приведены на рис. 5.

Дальнейшее определение электронной температуры по известному отношению интенсивностей переходов $4^3S \rightarrow 2^3P$ и $4^1S \rightarrow 2^1P$ не представляет труда. После вычислений можно сделать следующий вывод. Электронная температура исследуемой газоразрядной плазмы в пределах ошибки равномерна в пространстве и времени и имеет довольно большую величину 10 ± 1 эв, что, по-видимому, является одной из причин столь быстрого нарастания объемного заряда в промежутке и установления квазистационарного состояния.

В заключение авторы благодарят Г. А. Месяца за постановку и обсуждение темы настоящей работы.

Литература

- [1] A. A. Dogan, *Z. Phys.*, *208*, 427, 1968.
- [2] M. C. Javenog, J. Meyer. *Austral. J. Phys.*, *22*, 155, 1969.
- [3] H. Tholl. *Z. Naturforsch.*, *25a*, 420, 1970.
- [4] Г. А. Месяц, В. В. Кремнев, Г. С. Коршунов, Ю. Б. Янкевич. *ЖТФ*, *39*, 75, 1969.
- [5] Ю. И. Бычков, В. В. Осипов, Ю. А. Курбатов, А. Г. Филонов. *Изв. вузов, физика*, № 9, 1971.
- [6] Ю. И. Бычков, Ю. И. Королев, В. Орловский. *Тр. IV Всесоюз. конф. по физике и генераторам низкотемпературной плазмы*, 460, Алма-Ата, 1970.
- [7] И. М. Подгорный, Г. В. Шолин. *ДАН СССР*, *160*, № 3, 1965.
- [8] R. W. P. McWhirtin. *Proc. Phys. Soc.*, *75*, 520, 1960.
- [9] Г. Д. Алхазов. *ЖТФ*, *40*, 97, 1970.

Поступило в Редакцию
21 января 1971 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины