

УДК 533.9±537.525.1

ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЫ
ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА
В ЗАМКНУТОЙ ТРУБКЕ С КСЕНОНОВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

Гаврилов В. Е.

Описываются спектроскопические методики экспериментального определения температуры и плотности (давления) плазмы электроразрядных импульсных трубчатых ламп с ксеноновым наполнением, а также приводятся результаты определения этих величин, выполненного в зависимости от плотности разрядного тока и прочих параметров производимого разряда. Дается сравнение результатов работы с результатами других экспериментальных и расчетных работ.

Научный интерес к плазме импульсных разрядов, осуществляемых при давлении свыше 10^5 Па, во многом определяется перспективами ее использования в качестве высокоинтенсивного источника света. Весьма широкое распространение в различных отраслях науки и техники при этом получили, как известно, электроразрядные импульсные трубчатые лампы с ксеноновым наполнением. Относительно высокий КПД преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения, большая величина светящейся поверхности и удобства в эксплуатации позволяют им в целом ряде случаев иметь неоспоримые преимущества по сравнению с иными импульсными плазменными излучателями.

Положительные качества в сочетании с многообразием условий применения неоднократно стимулировали проведение экспериментальных исследований указанных ламп в различных лабораториях наших и зарубежных. В отечественной и иностранной научно-технической литературе было опубликовано соответственно большое число работ, посвященных определению всевозможных характеристик излучения этих ламп, а также величины их удельного электрического сопротивления, предельной нагрузки и срока службы в режиме номинальных параметров производимого разряда. Результаты исследований, выполненных до 1975 г., подробно изложены в [1]. Однако несмотря на наличие многочисленного экспериментального материала, представленного в литературе авторами опубликованных работ, эффективность использования ксеноновых импульсных ламп часто оставляет желать лучшего. Сложившееся положение объясняется тем обстоятельством, что в большинстве проводившихся исследований искомые характеристики ламп получались лишь в зависимости от электрического режима разряда и параметров, обуславливаемых их геометрическими размерами или же начальным давлением ксенона в трубке. Физическое состояние плазмы, реализующейся в объеме ламп, и зависимости, связывающие ее оптические и электрические свойства с параметрами данного состояния, оставались при этом, как правило, неизвестными, поэтому результаты, получавшиеся в опытах с лампами различными исследователями, оказывались часто неоднозначными и, что самое важное, не позволяли должным образом обосновать последовательный расчет рассматриваемых ламп, при помощи которого можно было бы предсказать характеристики их излучения с достаточной для практики точностью. Теоретический расчет этих ламп из-за принципиальных трудностей, вызываемых сложностью учета влияния межчастичного взаимодействия на энергетическую структуру атомов плазмы [2, 3], дает низкую точность

результатов и потому может быть использован лишь в качестве грубого приближения.

В настоящей работе описывается спектроскопическая методика диагностики и приводятся результаты определения температуры и плотности (давления) плазмы ксеноновых импульсных ламп — основных параметров ее термодинамического состояния. Значительная часть этих результатов в широкой печати публикуется впервые.

Экспериментальная установка

Работа велась на экспериментальной установке, состоящей из разрядного контура, оптической схемы и измерительной аппаратуры [4]. Накопительная емкость разрядного контура составляла 400—800 мкФ, индуктивность цепи разряда — 10—30 мкГк, сопротивление потерь — 0.02—0.03 Ом. Величина начального напряжения на емкости контура варьировалась в процессе эксперимента от 0.5 до 5 кВ. Это позволяло при длительности импульса разрядного тока, примерно равной 300 мкс, а также размерах ламп, определяемых межэлектродной длиной 5—25 см и внутренним диаметром трубки 0.5—1.5 см, изменять плотность электрической мощности разряда в диапазоне 10^5 — 10^6 Вт/см². Мощность определялась в работе посредством графической обработки осциллограмм импульсов тока, снимавшихся с помощью малоиндуктивного шунта, включаемого в цепь контура. В целях устранения наводки на измерительные приборы разрядный контур вместе с лампой помещался в металлический кожух. Излучение лампы, по интенсивности которой осуществлялась диагностика плазменного столба разряда, выводилось через отверстие в стенке последнего.

Оптическая схема установки включала в себя проектирующую линзу (кварцевый ахроматический объектив с фокусным расстоянием 15 см), монохроматор типа ДМР-4 со стеклянными призмами, ослабляющие фильтры и диафрагмы. Изображение ближней к линзе поверхности стенки трубки испытываемой лампы строилось в плоскости входной спектральной щели монохроматора с двухкратным увеличением. При данном увеличении, а также соответствующим образом подобранных размерах диафрагм, располагавшихся вблизи линзы и на входной щели монохроматора, пространственное разрешение оптической схемы установки было высоким — составляло примерно 0.05×0.2 мм². Ее спектральное разрешение оказывалось равным 0.2—1 нм. Фильтры (из серии НС) предназначались для ослабления интенсивности эталонного источника излучения (ЭВ-45), использовавшегося для калибровки чувствительности установки. В качестве приемника излучения служил ФЭУ-51. Сигналы с него регистрировались осциллографом С8-11 (на первом этапе исследования — ОК-17М). Временное разрешение сигналов на экране осциллографа составляло около 10^{-7} с.

Температура плазмы

Величина температуры плазмы T , достаточно однородной [4, 5] и локально равновесной в рассматриваемых условиях, определялась нами из выражения закона Кирхгофа—Планка

$$b_{\lambda} = b_{\lambda p}(T) (1 - e^{-\tau_{\lambda}}) \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{нм}) \quad (1)$$

по ее спектральной плотности, яркости b_{λ} и спектральной поглощательной способности $(1 - e^{-\tau_{\lambda}})$, измерявшихся в направлении диаметра трубки. Яркость находилась при этом путем сравнения с интенсивностью эталонного источника света, а поглощательная способность — методом просвечивания кратковременным импульсом излучения вспомогательного источника. Погрешность определения температуры, оцениваемая с учетом результатов, получавшихся на нескольких длинах волн, составляла 3—5%.

Представляло интерес изучить зависимость, связывающую максимальную за время разряда температуру плазмы с импульсным значением плотности разрядного тока j , фиксировавшегося всякий раз при измерениях b_{λ} и $(1 - e^{-\tau_{\lambda}})$. Результаты исследования этой зависимости показали, что с ростом плотности

тока температура монотонно повышается и достигает при $j \approx 2-20$ кА/см² значений, равных 12 000—20 000 К. Однако рассматриваемая связь является функцией неоднозначной. Заметное влияние на температуру оказывают также начальное давление ксенона P_0 и поперечное сечение полости трубки S . Экспериментальные точки, соответствующие различным j , P_0 и S , ложатся, как

выяснилось, на кривые, аналитически достаточно правильно (рис. 1) описываемые выражением

$$T = 3.5 \cdot 10^3 \left(\frac{S}{P_0} \right)^{1/16} (j)^{1/4} \text{ К}, \quad (2)$$

где S дано в см², P_0 — в Па и j — в А/см².

Следует отметить, что выражение (2) надежно можно использовать только

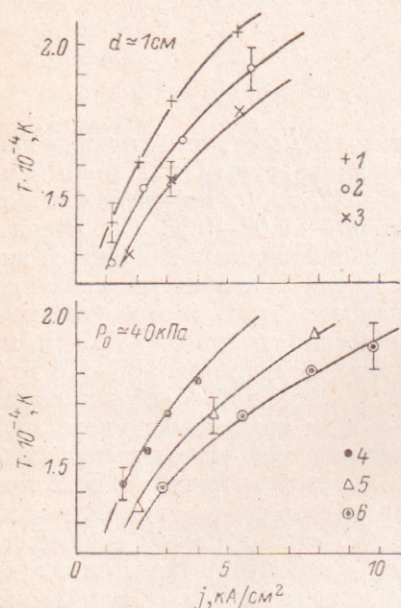


Рис. 1. Зависимости температуры плазмы от плотности тока, полученные при различных начальных давлениях ксенона и диаметрах трубки.

Точки 1—3 соответствуют $P_0 \approx 6.7, 26.7$ и 80 кПа; 4—6 — $d \approx 1.6, 0.75$ и 0.45 см; сплошные кривые — расчету по (2).

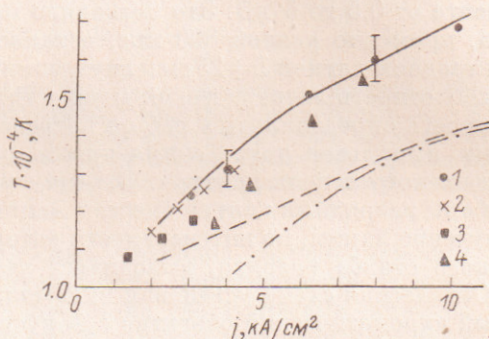


Рис. 2. Зависимости температуры от плотности тока, определенные при одинаковых примерно условиях в настоящей работе, а также в других экспериментальных и расчетных работах.

Точки 1 отражают наши результаты, 2 — результаты [4], 3 — [7], 4 — [8], штриховая кривая — результаты расчета [9] и штрихпунктирная — [10]. $d \approx 0.7$ см, $P_0 \approx 53$ кПа.

при плотности тока $j \geq 3$ кА/см²: в том случае, когда полость трубки целиком заполняется плазмой [4, 5]. Его нельзя применять в условиях капиллярного ($S < 0.1$ см²) и короткодействующего ($\tau_p < 100$ мкс) разрядов.

На рис. 2 дано сопоставление результатов определения температуры плазмы одной из обследованных ламп ($S \approx 0.43$ см², $P_0 \approx 53$ кПа), полученных в настоящей работе, а также авторами других экспериментальных [6—8] и расчетных [9, 10] работ. Оно показывает, что полученные нами результаты согласуются в целом с опытными данными указанных работ и превышают на 20—30 % результаты расчетов. Это расхождение с расчетами объясняется тем, что при решениях уравнения баланса мощности разряда в них (расчетах) завышался сильно поток излучения плазмы по сравнению с ее реальным радиационным потоком, устанавливающимся экспериментально [11, 12].

Плотность (давление) плазмы

Плотность плазмы в канале производимого разряда определялась нами двумя независимыми методами. В основе первого метода лежали результаты исследования распределения температуры по объему электроразрядной трубки [4, 5]. Эти результаты совместно с данными, вытекающими из условий постоянства давления в различных точках объема трубки и неизменности общей массы газа в трубке, позволили получить выражение, определяющее концентрацию тяжелых частиц (атомов+ионов) ксенона в разряде

$$n_2 = n_0 \frac{V}{V_1} \left(1 + \frac{1 + n'_{e1}}{1 + n'_{e2}} \frac{T_1}{T_2} \frac{V_2}{V_1} \right)^{-1} \text{ см}^{-3}, \quad (3)$$

где n_0 — концентрация атомов ксенона в холодной трубке, задаваемая величиной P_0 ; n'_{e1} , n'_{e2} , T_1 , T_2 — степени ионизаций и значения температур в горячей V_1 и относительно холодной V_2 (пристеночной + заэлектродной) частях объема трубки V соответственно. Степени ионизаций n_e/n_2 (n_e — концентрация электронов) вычислялись по формуле Саха. Второй метод определения плотности основывался на измерениях полуширины контура поглощения спектральной линии водорода H_α , добавлявшегося в небольшом количестве к ксенону.

По измеренной полуширине контура поглощения данной линии определялась концентрация электронов [13], а по ней с помощью формулы Саха находилась величина плотности плазмы n_2 в целом. Погрешность определения n_2 , осуществляемого посредством указанных методов, составляла 15–20 %.

В условиях проводившегося нами эксперимента отношения V_1/V_2 и T_2/T_1

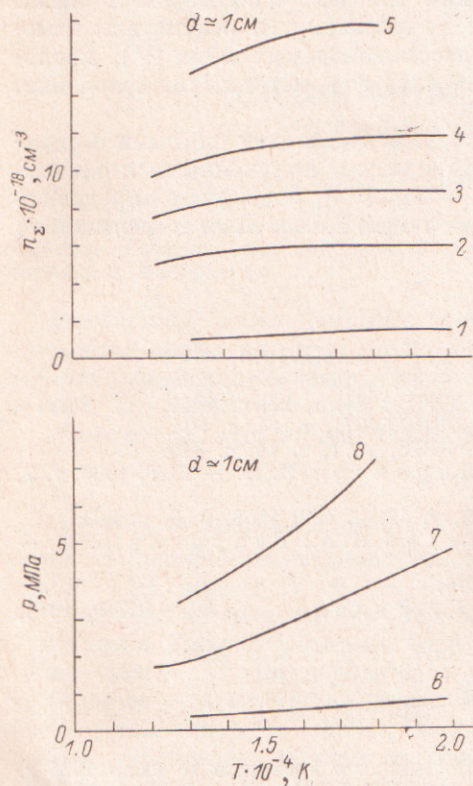


Рис. 3. Кривые зависимостей плотности и давления плазмы от ее температуры, определенных при различных значениях начального давления ксенона в трубке. P_0 , кПа: 1 (6) — 6.7, 2 — 26.7, 3 (7) — 40, 4 — 53 и 5 (8) — 80.

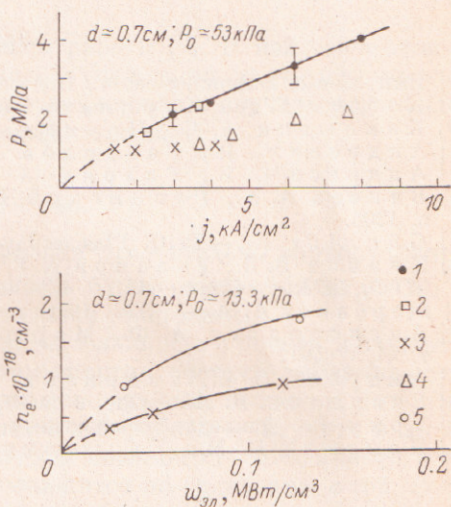


Рис. 4. Кривые зависимостей давления плазмы от плотности тока, а также концентрации электронов от плотности электрической мощности разряда, установленных при равноценных условиях в данной работе и в других экспериментальных работах.

1 — наши результаты, 2 — [6], 3 — [7], 4 — [8], 5 — [14].

ограничивались значениями, равными 0.7–0.9. Соответственно с этим первоначальная плотность газа n_0 в центре трубки (объеме V_1) уменьшалась во время разряда вследствие перераспределения между горячей и относительно холодной частями ее объема на 10–30 % (заметнее всего при малых P_0 , d и T). Второй метод определения n_2 давал схожие значения.¹

На основании экспериментальных данных о температуре и плотности из уравнения состояния

$$P = (1 + n'_e) n_2 kT \text{ Па} \quad (4)$$

находилось давление плазмы. Величины плотностей и давлений, установленные таким образом для ряда ламп в функции от температуры, представлены на рис. 3, откуда видно, что давление плазмы исследовавшихся ламп достигало в пределе

¹ Этот метод использовался нами только при $n_0 \leq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, так как в условиях более форсированных режимов разряда не удавалось осуществить просветку плазмы в области спектральной линии H_α .

7 МПа. Полученные нами сведения относительно давления (плотности) плазмы ксеноновых импульсных ламп сравниваются на рис. 4 с результатами его экспериментального определения, выполненного при аналогичных условиях в [6-8, 14]. Сравнение показывает, что полученные нами значения P согласуются со значениями, измеренными в [7], и превышают примерно в 2 раза значения, установленные в [6, 8]. Наблюдаемое расхождение с результатами [6, 8] автор статьи склонен объяснить большими погрешностями, допускаясь в [6, 8] при определении величины давления плазмы испытываемых ламп. На то же самое обстоятельство указывают, по-видимому, и результаты измерения электронной концентрации плазмы рассматриваемых ламп [14], произведенного аналогично с [6] методом лазерной интерферометрии (см. сравнение, изображенное на рис. 4).

Приведенные результаты совместно с экспериментальными данными о спектральном показателе поглощения ксеноновой плазмы, полученными в зависимости от параметров ее состояния (см., например, [12]), позволяют определить всевозможные характеристики излучения рассматриваемых ламп и оптимально использовать их в различных приложениях.

Литература

- [1] Импульсные источники света / Под ред. И. С. Маршак. М., 1978.
- [2] Кобзев Г. А., Куриленков Ю. К. — ТВТ, 1978, т. 16, с. 464.
- [3] Каклюгин А. С., Норман Г. Э. — ТВТ, 1984, т. 22, с. 1041.
- [4] Андреев С. И., Гаврилов В. Е. — ЖПС, 1971, т. 14, с. 524.
- [5] Андреев С. И., Гаврилов В. Е. — ЖПС, 1971, т. 14, с. 310.
- [6] Бакеев А. А., Ровинский Р. Е., Широкова И. П. — ТВТ, 1969, т. 7, с. 4203.
- [7] Günther K. — Beitr. Plasmasphysik, 1970, v. 10, p. 469; 1968, v. 8, p. 383.
- [8] Иванов В. В., Розанов А. Г., Семюхин И. А., Стариков Б. В. — ЖТФ, 1973, т. 43, с. 445.
- [9] Щербakov А. А. — ЖПС, 1971, т. 15, с. 610.
- [10] Александров А. Ф., Маршак И. С., Рухадзе А. А. — ЖТФ, 1974, т. 44, с. 491.
- [11] Андреев С. И., Гаврилов В. Е. — ТВТ, 1970, т. 8, с. 203.
- [12] Гаврилов В. Е. — Опт. и спектр., 1985, т. 59, в. 6, с. 1012.
- [13] Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М., 1978.
- [14] Попович М. М., Урошевич В. В. — ТВТ, 1971, т. 9, с. 627.

Поступило в Редакцию 16 июля 1986 г.