

04;12

Получение и диагностика низкотемпературной эрозионной плазмы высокого давления

© Е.М. Голубев, А.М. Пухов, В.Л. Смирнов

Всесоюзный научный центр "ГОИ" им. С.И. Вавилова,
199034 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 28 декабря 1995 г.)

Капиллярный разряд с испаряемой стенкой (КРИС) находит применение в качестве источника плотной низкотемпературной плазмы с контролируемыми параметрами, что позволяет изучать ее термодинамические и оптические свойства. Химический состав плазмы КРИС задается только материалом стенки и не зависит от газа, в атмосфере которого происходит разряд. В КРИС были получены экспериментальные данные по оптическим свойствам сильноионизованной плотной плазмы при температурах $T = 3-4 \cdot 10^4$ К [1-4]. Концентрация атомов в такой плазме в 10^2-10^3 раз меньше концентраций ионов, и это обстоятельство затрудняет получение информации по влиянию неидеальности плазмы на ее непрерывное и линейчатое излучение вблизи границы фотоионизации атомов с основного уровня, где это влияние может быть особенно наглядным. Поскольку параметр взаимодействия $\gamma = e^2(n_e + n_i)^{1/3}kT$, то устранение этой преграды естественно связать с понижением температуры. Кроме того, снижение T в условиях КРИС при сохранении высоких давлений $P \gtrsim 100$ атм позволило бы создать малогабаритные стандарты яркости, излучающие подобно абсолютно черному телу, нагретому для $T = 1-2 \cdot 10^4$ К. В настоящей работе излагаются результаты исследований, направленных на получение такой плазмы с помощью КРИС.

Разряд реализуется в парах материала стенки капилляра, нагреваемых за счет интенсивного энерговыделения в его объеме и выдуваемых через открытые торцы капилляра в виде плазменных струй. Достоинством разряда являются квазистационарность, а также сравнительно высокая однородность параметров в пределах капилляра. Один из режимов КРИС, осуществляемый при токе $I = 10$ кА через отверстие радиусом $r = 0.1$ см и длиной $l = 1$ см в текстолите ($C_{37}H_{47}O_{16}$) или в близком по составу оргстекле, был выбран в качестве рабочего режима стандарта яркости [5], излучающего с температурой 40 000 К в видимой и УФ областях спектра. В [6] были предложены расчетные зависимости T_0 и P_0 в центре капилляра от его длины l , радиуса r и тока разряда I

$$T_0 = \frac{I^{0.39}}{r^{0.55}l^{0.04}}, \quad P_0 = \frac{I^{1.34}l^{0.93}}{r^{2.95}}.$$

Если допустить, как это делается в указанной работе, применимость соотношений (1) в широком диапазоне T и P , то необходимое снижение температуры при

сохранении высокой плотности должно достигаться при $I = 2$ кА, $r = 0.1$ см и $l \gtrsim 2$ см.

Реализация поставленной задачи, т.е. получение плотной низкотемпературной плазмы с применением КРИС, исходно представлялась возможной двумя разными путями, которые и были обследованы в работе. На первом пути предполагается, что мы недостаточно знаем свойства КРИС в режиме, которые удалены от хорошо обследованных. В частности, расчеты [6] в предположении, что боковая поверхность излучает как абсолютно черное тело, как правило, некорректны, поскольку в реальных условиях степень черноты ϵ значительно отличается от 1. Возможно поэтому вариация таких характеристик, как I , l и r , может привести к желаемому результату, если резко расширить их диапазон. Иными словами, здесь допускается, что соотношения в ряде режимов не работают, связи характеристик оказываются иными и реализуется их сочетание, более благоприятное для снижения температуры при достаточно высоком давлении. Это направление поиска так или иначе связано с традиционным методом генерации плазмы в КРИС.

Второй путь, который представляется возможным, сводится к тому, что КРИС генерирует плотную плазму при $T = 40\ 000$ К, которая истекает в другой капилляр, соосный и плотно прилегающий к первому, через графит-

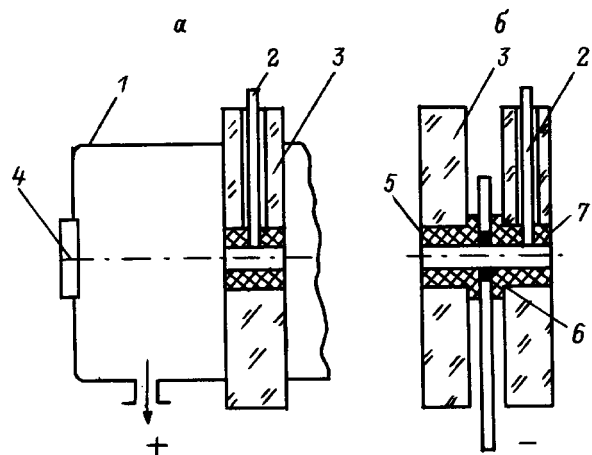


Рис. 1. Вакуумная разрядная камера (а) и составной капилляр (б). 1 — корпус, 2 — акустический стержень пьезодатчика, 3 — диафрагма с капилляром, 4 — кварцевое окно, 5 — КРИС генератор, 6 — графитовый электрод, 7 — сопло.

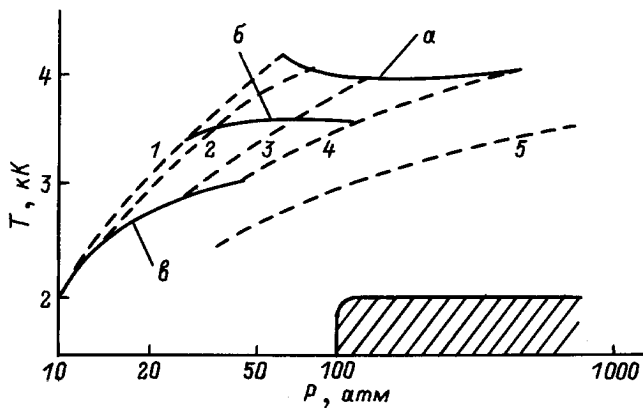


Рис. 2. Обследованная область температур и давлений плазмы КРИС в оргстекле при $l = 1$ см и $I = 9$ кА (*a*); 6.6 кА (*б*), 2.6 кА (*в*), $r = 0.15$ (*1*), 0.13 (*2*), 0.12 (*3*) и 0.10 см (*4*) и в полиэтилене при $l = 4$ см, $2 \leq I \leq 4$ кА и $r = 0.11$ см (*5*).

товый электрод. Этот второй капилляр не имеет токовой подпитки и служит лишь ограничителем или соплом для плазменной струи первого. Давление в его пределах падает, но не столь сильно, как температура, и можно предположить, что неидеальность плазмы здесь заметно возрастает. На указанный составной капилляр следует смотреть как на существенную модификацию КРИС с целью приспособления его к поставленной задаче.

Разрядное устройство показано на рис. 1, *a* и представляет собой вакуумную камеру, которая разделена на две равные части изоляционной диафрагмой с запрессованным в нее капилляром, ось которого совпадает с осью камеры. Правая и левая ее части подключены к искусственной LC-линии блока питания стандарта яркости ИСИ-1, формирующей трапецеидальный импульс тока с амплитудой 10 кА и длительностью 30 мкс, когда в качестве нагрузки используется стандартный капилляр. Уменьшение тока разряда достигалось, во-первых, за счет уменьшения зарядного напряжения и, во-вторых, путем увеличения волнового сопротивления линии.

Регистрация излучения осуществлялась при наблюдении вдоль оси капилляра с помощью кварцевого спектрографа ИСП-28, а также фотоэлектрическим методом в длинах волн 610 и 225 нм при помощи монохроматора ДМР-4 и ФЭУ с автономным питанием. Абсолютные измерения яркости излучения проводились методом сравнения с излучением стандартного капилляра, который размещался в вакуумной камере вместо исследуемого. Импульсное давление измерялось с помощью специально изготовленного пьезодатчика с бронзовым акустическим стержнем диаметром 1 мм по аналогии с [7]. Подключение датчика к плазме осуществлялось через отверстие в боковой стенке капилляра, как это показано на рис. 1. Для калибровки использовались 1) стандартный капилляр, давление в котором равно 450 атм и ранее было измерено независимыми методами; 2) метод падающего стержня, согласно которому при

столкновении двух одинаковых стержней давление в зоне контакта $P = \rho v c_s$, где ρ и c_s — плотность материала стержня и скорость звука в нем, v — скорость падения стержня относительно зоны контакта. Были определены параметры плазмы в капиллярах, изготовленных из полиэтилена и органического стекла. Плотность тока изменялась в диапазоне 15–300 кА/см².

На рис. 2 приведена область значений давления и яркостной температуры в $\lambda = 610$ нм для плазмы оргстекла как функция тока I и радиуса капилляра r при длине 1 см. Штриховкой отмечена соответствующая поставленной задаче зона $T \leq 20000$ К и $P \geq 100$ атм, что свидетельствует о несовпадении областей существования плазмы КРИС и низкотемпературной плотной плазмы. Из рис. 2 видно также, что увеличение длины капилляра до 4 см в полиэтилене при $r = 0.11$ см сближает границы областей. По-видимому, можно добиться их перекрытия путем значительного увеличения l , однако это внесет технические усложнения и лишит разряд свойства квазистационарности. В целом на этом пути сделан вывод о том, что плазма с давлением $P \geq 100$ атм имеет слишком высокую температуру $T \geq 30000$ К; линии атомов наблюдаются в поглощении и принадлежат холодной зоне плазменной струи, истекающей в вакуумную камеру.

На рис. 1, *б* представлена конструкция предлагаемого для понижения температуры составного капилляра в режиме, когда слева находится капилляр-генератор, а справа — сопло. В процессе работы за счет переключения LC-линии капилляры могут меняться местами. Предполагается, что наблюдение излучения будет осуществляться через тонкую щель в сопле, площадь которой меньше его поперечного сечения. На рис. 3 приведены осциллограммы интенсивности излучения плазмы составного полиэтиленового капилляра для $\lambda = 610$ нм, полученные при наблюдении со стороны генератора (*a*) и сопла (*б*) для $l = 1$ см. Видно, что интенсивность излучения плазмы сопла, за исключением первых пяти мкс, квазистационарна и в несколько раз слабее излучения плазмы генератора. Сравнение осциллограмм давления плазмы для генератора (*a*) и сопла (*б*), представленных на рис. 3, говорит о совпадении этих характеристик с учетом небольшой разницы на переднем фронте импульса, которая связана с задержкой при заполнении сопла плотной холодной плазмой. Характер осциллограмм не

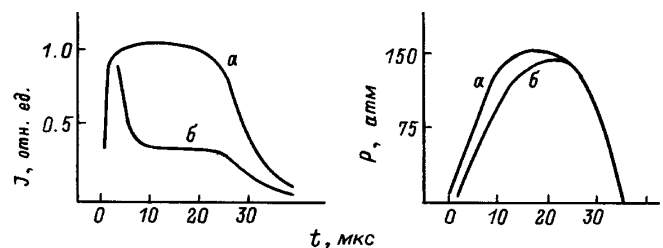


Рис. 3. Интенсивность излучения J ($\lambda = 610$ нм) и давление P плазмы полиэтилена в составном капилляре при $r = 0.1$ см для капилляра-генератора $l = 1$ см (*a*) и сопла $l = 1$ см (*б*).

Параметры плазмы полиэтилена в составном капилляре при $r = 0.1$ см для генератора, $I = 9$ кА (a) и сопла (b)

Параметр	b		
	a	$l = 0.5$ см	$l = 1.0$ см
$T, \text{К} (610 \text{ нм})$	40 000	25 000	19 000
$T, \text{К} (225 \text{ нм})$	40 000	27 000	19 000
$P, \text{атм}$	150	—	150

меняется при смещении длины волны наблюдения к $\lambda = 225$ нм и уменьшении длины сопла до 0.5 см. Значения яркостной температуры на торцах плазменного столба получены при наблюдении со стороны капилляра-генератора и со стороны сопла для двух длин последнего и приведены в таблице. Здесь же представлены величины максимального давления в генераторе и сопле.

В заключение отметим, что давление в сопле можно варьировать в значительных пределах, изменяя параметры плазмы в капилляре-генераторе. Увеличение длины сопла расширяет в сторону меньших значений диапазон температур, которые в нем реализуются.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 95-02-03971а.

Список литературы

- [1] Огурцова Н.Н., Подмошенский И.В., Шелемина В.М. // Опт. и спектр. 1964. Т. 16. Вып. 6. С. 949-957.
- [2] Белов С.Н., Огурцова Н.Н., Подмошенский И.В. // Опт. и спектр. 1968. Т. 25. Вып. 5. С. 684-688.
- [3] Пухов А.М. // ЖПС. 1975. Т. 22. № 1. С. 128-130.
- [4] Широков М.Ф., Муравенко В.Г., Борисов Е.К., Лопатин Ю.В. // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Киев, 1975. Т. 2. С. 127.
- [5] Демидов М.И., Огурцова Н.Н., Подмошенский И.В. // ЖПС. 1970. Т. 12. № 2. С. 365-367.
- [6] Белов С.Н. // ЖПС. 1978. Т. 28. № 4. С. 605-611.
- [7] Голубев Е.М., Огурцова Н.Н. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 4. С. 732-735.