

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. П. Виноградов, Л. Г. Голубчиков, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, Теплеровская установка с импульсным рубиновым лазером для исследования плазменной оболочки, *ТВТ*, 1967, том 5, выпуск 2, 343–348

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.220.255.141

5 ноября 2024 г., 02:10:03



УДК 537.525.1

ТЕПЛЕРОВСКАЯ УСТАНОВКА С ИМПУЛЬСНЫМ РУБИНОВЫМ ЛАЗЕРОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБОЛОЧКИ

*В. П. Виноградов, Л. Г. Голубчиков, Н. В. Филиппов,
Т. И. Филиппова*

Построена теплеровская установка с импульсным рубиновым лазером мощностью 2 Мвт и длительностью импульса ~ 40 нсек. Получены мгновенные фотографии последовательного движения плазменной оболочки, образующейся при импульсном разряде в разреженных газах. Эти фотографии позволяют сделать некоторые выводы о форме и структуре оболочки в заданный момент времени развития разряда.

Цель настоящей работы — дальнейшая разработка оптических методов исследования быстро движущихся плазменных оболочек путем фотографирования их в проходящем свете. Скоростная съемка быстрых импульсных процессов в собственном свете дает картину распределения свечения областей нагретого газа, которое не всегда можно отождествить с распределением плотности частиц. Поэтому было решено построить теплеровскую установку для получения мгновенных фотографий разряда в проходящем свете и попытаться более верно увидеть строение плазменной оболочки и распределение плотности в ней. Ввиду большой яркости свечения самой плазмы подходящим источником света мог быть только импульсный рубиновый лазер.

Теплеровская установка и разрядная камера. Оптическая схема установки показана на рис. 1. Основу ее составляли объективы двух зрительных труб ЗРТ-452 11 и 13. Источником света служил конец светопровода 9 диаметром 1 мм. Светопровод был введен, во-первых, для того, чтобы получить равномерное заполнение светом объектива 11 (достаточно длинный светопровод хорошо перемешивает световые пучки), во-вторых, он позволяет отдельно настраивать генератор света и собственно теплеровскую установку. Изображение конца светопровода точно совмещалось с отверстием в диафрагме 14. Диаметр отверстия в диафрагме выбирался из следующих соображений: он должен быть достаточно мал для обеспечения необходимой чувствительности и уменьшения количества света из плазмы; он должен быть велик, так как им определяется пространственное разрешение. Для выбранного диаметра отверстия (1 мм) разрешающая способность, приведенная к объективу $\delta \approx 1,2 \frac{\lambda}{D} \approx 5,5 \cdot 10^{-2}$ см при $\lambda = 0,7 \cdot 10^{-4}$ см, $D = 0,1$ см, $l = 65$ см. Объектив 15 изображает область между объективами 11 и 13 на фотоплёнке 17. При появлении в этой области каких-либо оптических неоднородностей, например плазменных сгустков с градиентом плотности в направлении, перпендикулярном оптической оси, часть лучей из источника света отклоняется и не попадает в отверстие диафрагмы 14.

В результате оптические неоднородности выглядят более темными по сравнению с общим светлым фоном. Минимальный градиент плотности плазмы, который может вызывать заметное изменение освещенности на пленке, можно оценить по формуле, приведенной в [1]

$$|\nabla N_e|_{\min} \frac{1}{Lk\lambda d} \left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{\min}$$

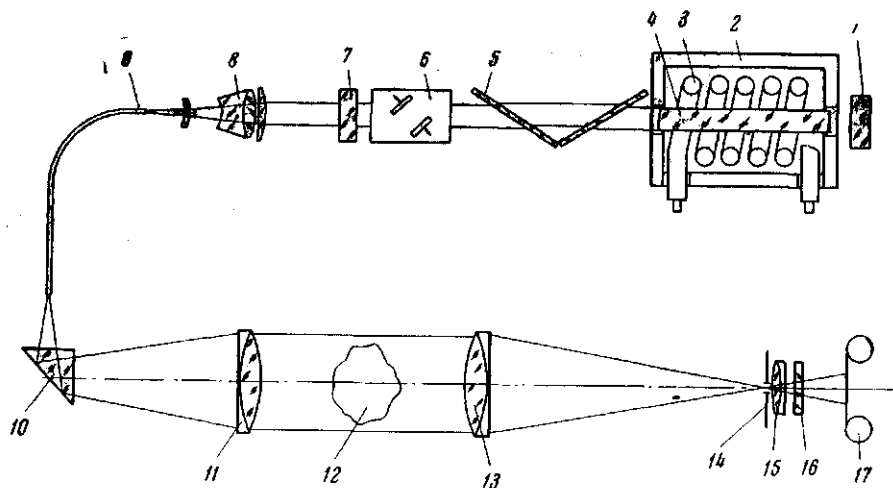


Рис. 1. Оптическая схема установки:

1 — диэлектрическое зеркало (98% отражения); 2 — отражатель; 3 — лампа ИФК-10000; 4 — рубиновый стержень ($l = 110$ мм, $d = 9$ мм); 5 — стеклянные пластинки, расположенные под углом Брюстера; 6 — ячейка Керра; 7 — диэлектрическое зеркало (87% отражения); 8 — объектив Юпитер-11; 9 — светопровод; 10 — поворотная призма; 11, 13 — объективы ЗРТ-452; 12 — плазма; 14 — диафрагма; 15 — объектив $f = 210$ мм; 16 — фильтр КС-18; 17 — фотоплёнка (фотоаппарат «Зенит-С»)

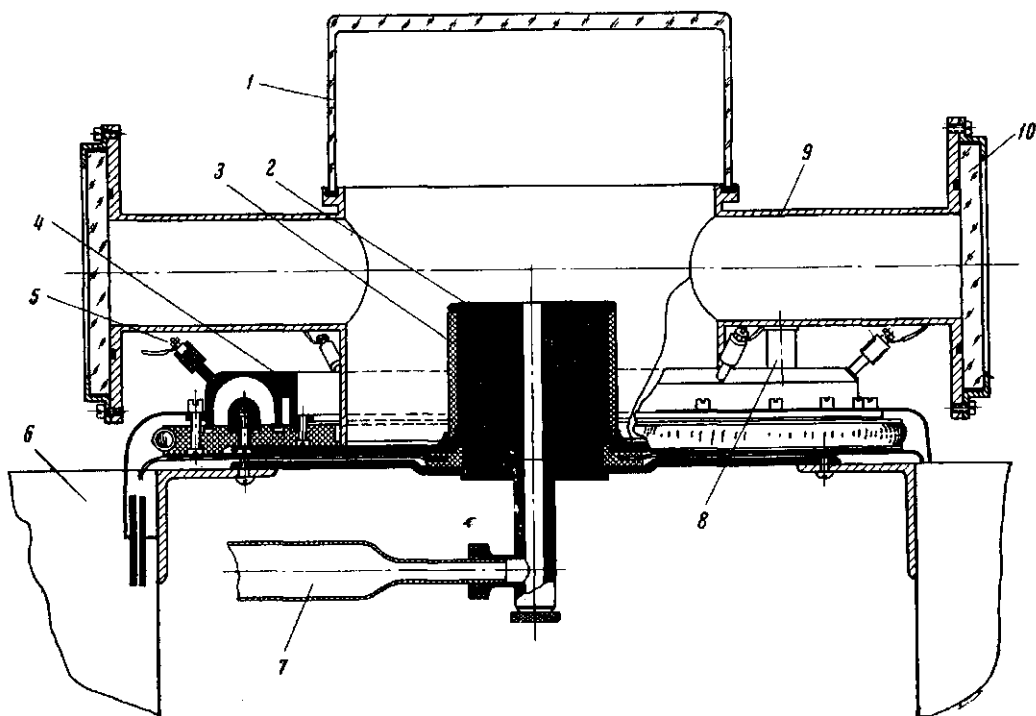


Рис. 2. Разрядная камера:

1 — стеклянный колпак для фотографирования разряда сверху; 2 — внутренний медный электрод диаметром 60 мм; 3 — фарфоровый изолятор; 4 — корпус вакуумного разрядника; 5 — поджигающие свечи; 6 — батарея конденсаторов емкостью 96 мкФ; 7 — система отпачки камеры; 8 — система отпачки разрядника; 9 — внешний электрод с трубами $\varnothing 40$ мм для защиты от разлетающейся плазмы; 10 — стеклянные окна для съемки оболочки

Здесь $(\Delta I/I)_{\text{min}}$ — относительное изменение освещенности, которое можно различить на пленке; d — минимальный поперечный размер неоднородности; λ — длина волны излучения рубинового лазера $\sim 7000 \text{ \AA}$; L — длина пути светового пучка в плазме. В нашем случае величина L довольно неопределенна, так как она меняется при изменении диаметра и толщины оболочки. На тех стадиях движения оболочки, когда она вся видна в поле зрения, можно принять $L \approx 2 \text{ см}$.

Контроль за работой лазера осуществлялся с помощью ФЭУ-13, помещенного за задним зеркалом лазера. Выход ФЭУ был нагружен большим сопротивлением, так что выходной импульс интегрировался и подавался без усилителя непосредственно на пластины осциллографа ОК-25 или ОК-21 (см. рис. 3). Интегрирование импульса ФЭУ полезно, во-первых, потому, что амплитуда сигнала в 2—3 раза больше, чем при обычном включении; во-вторых, по величине импульса можно судить о количестве света, попавшего на фотозуммирующую; в-третьих, легко контролировать даже на развертке 500 мксек появление паразитных импульсов. Длительность импульса лазерного излучения, полученная из этих осциллограмм, $\sim 40 \text{ нсек}$, а усредненная по импульсу мощность $\sim 2 \text{ Мвт}$.

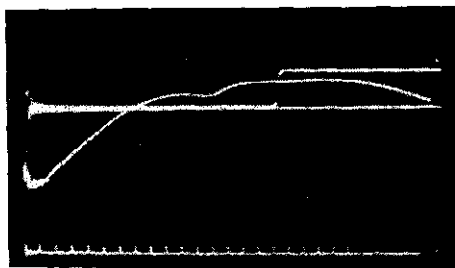


Рис. 3. Осциллограмма производной тока и импульса с ФЭУ. Метки времени 0,2 мксек

Теплеровская установка располагалась над разрядной камерой, схема которой приведена на рис. 2. Работа камер подобного типа подробно рассмотрена в [2—4]. Развитие разряда происходит здесь несколько сложнее чем в обычных прямых разрядных камерах. Сразу после пробоя ток скиннируется около внешней поверхности фарфорового изолятора 3. Образующая плазменная оболочка под давлением магнитного поля движется сначала в стороны, затем вверх и потом уже к оси камеры. Часть оболочки, сходящаяся к оси, движется с наибольшей скоростью, образуя при сжатии плазменное образование, температура и плотность которого зависят от параметров установки и начальных условий разряда. Нами использовалась батарея из шести конденсаторов общей емкостью 96 мкф. Рабочее напряжение $U_6 = 8 \text{ кВ}$, ток разряда $\sim 500 \text{ кА}$, начальная производная тока $4 \cdot 10^{11} \text{ А/сек}$. Начальное давление водорода или дейтерия менялось от 1 до 8 мм рт. ст.

Одновременно с фотографированием плазменной оболочки с помощью теплеровской установки производилась скоростная съемка собственного свечения плазмы на СФР в режиме фоторегистратора. Для этого в металлической стенке камеры на высоте 0,75 см над поверхностью внутреннего электрода была прорезана щель длиной 6 см. На одной линии со щелью с двух сторон от нее располагались концы светопроводов диаметром 0,05 мм. Другие концы светопроводов освещались лазером. Таким образом, на фоторазвертке по обе стороны от изображения щели появлялись точки, соответствующие моменту съемки теплеровской фотографии.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 4 представлена серия фотографий разряда в водороде при $p_0 = 2 \text{ мм рт. ст.}$ и $U_6 = 8 \text{ кВ}$. На теплеровской установке за каждый разряд можно получить только одну фотографию. Для получения последовательной серии снимков движущейся оболочки производилось несколько разрядов при одинаковых начальных условиях, менялась только задержка момента съемки относительно начала разряда. Общие закономерности в развитии разряда и движения оболочки ввиду их устойчивой повторяемости наблюдаются хорошо, в то время как неустойчивости, развивающиеся в оболочке после сжатия,

плохо повторяются от разряда к разряду и поэтому их трудно изучать детально.

На рис. 4а оболочка поднялась над электродом и движется вверх и к центру. Движение к центру здесь не видно, так как диаметр электрода в два раза больше поля зрения. Во многих случаях оболочка представляется в виде двух темных полос, соответствующих ее внутреннему и внешнему краю (области с положительным и отрицательным градиентом плотности). Можно сказать, что передний край оболочки представляет собой фронт ударной волны. Роль поршня играет токовый слой, заднему краю которого соответствует вторая темная полоса с большим градиентом плотности ча-

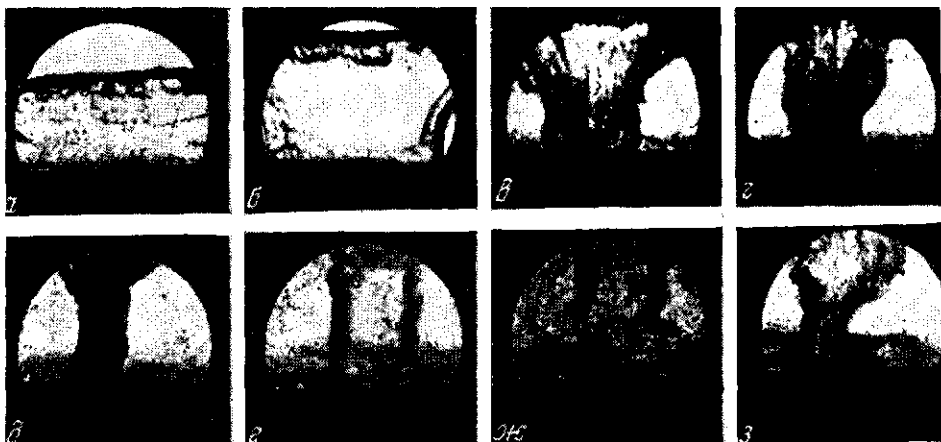


Рис. 4. Теплеровские фотографии разряда в водороде при $p_0 = 2$ мм рт. ст.

Время съемки (мксек) указано от начала процесса: а — 1,65, б — 1,8, в — 2,2, г — 2,6, д — 3,0, е — 3,25, ж — 3,45, з — 3,6

стиц. Сказанное выше хорошо иллюстрируется рис. 4б, где в поле зрения появилась и та часть оболочки, которая движется к центру. Отношение скоростей ударной волны и токового слоя, движущихся вверх (рис. 4а, б), примерно равно 4 : 3, как в плоском случае. На рис. 4в — д видно дальнейшее движение оболочки и схождение ее в центре со скоростью $(3 \div 5) \cdot 10^8$ см/сек. Общая толщина оболочки растет по мере движения и достигает 0,7 см перед сжатием. На рис. 4е — з хорошо заметно образование перетяжки у самой поверхности электрода. В расходящейся после сжатия оболочке начинает развиваться желобковая неустойчивость (рис. 4з).

На рис. 5 приведена такая же серия теплеровских фотографий вместе со целевой разверткой собственного свечения плазмы. Каждая фотография сфазирована с фоторазверткой описанным выше методом. Сравнивая их, можно заметить, что передний край свечения на фоторазвертке совпадает с передней границей оболочки, видимой на фотографиях, т. е. с фронтом ударной волны, а внешний край совпадает с задней границей, т. е. с токовым поршнем. Минимальные размеры пинча также совпадают с хорошей точностью.

Полученные фотографии подтвердили наблюдавшуюся ранее неоднородность распределения плотности в оболочке (рис. 4 а, б и рис. 5). Почти на всех фотографиях конечной стадии движения оболочки заметны темные горизонтальные полосы, отделенные иногда от поверхности электрода светлым промежутком. Эти полосы соответствуют поднимающимся медным парам; их направленная скорость порядка $5 \cdot 10^9$ см/сек.

На отдельных фотографиях, где оболочка особенно симметрична можно обнаружить эффект поджатия токового слоя, расходящийся после кумуляции ударной волной.

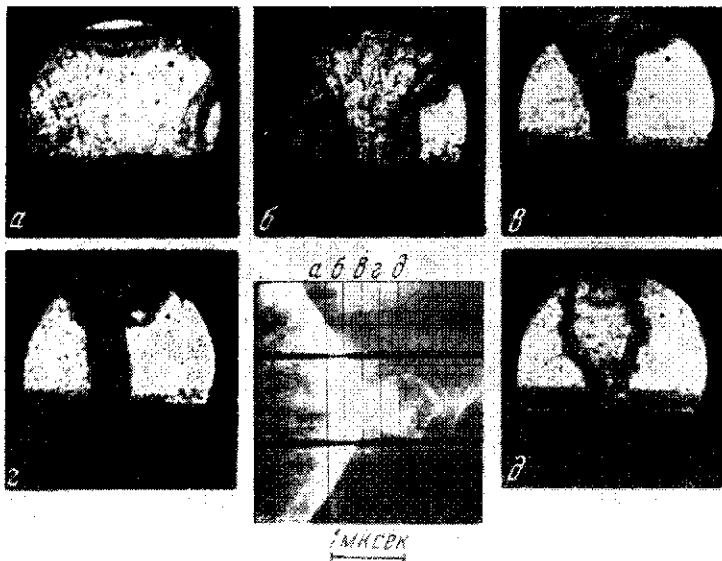


Рис. 5. Теплеровские фотографии, сфазированные с фоторазверткой собственного свечения плазмы при разряде в водороде ($p_0 = 2$ мм рт. ст.; $U_0 = 8$ кв; $C = 96$ мкф)

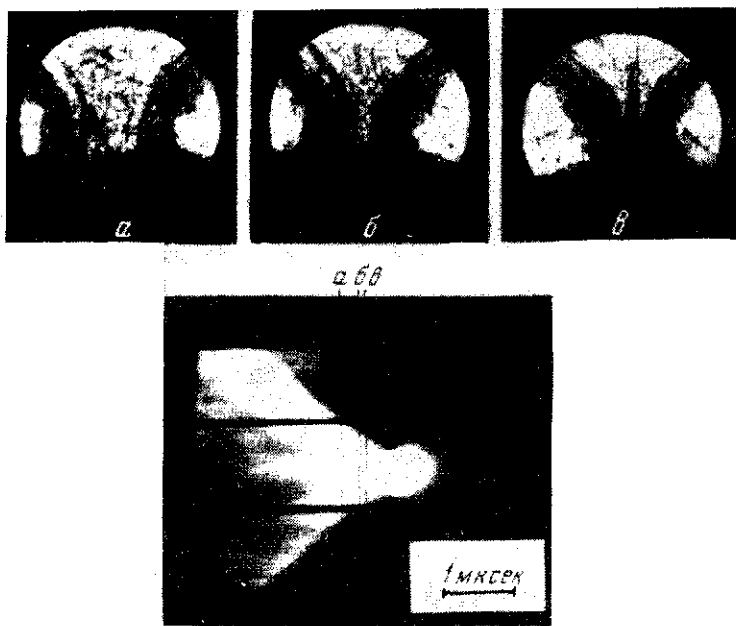


Рис. 6. Фоторазвертка и теплеровские фотографии плазменной оболочки при разряде в дейтерии ($U_0 = 8$ кв, $C = 96$ мкф, $p_0 = 4$ мм рт. ст.)

Движение оболочки в дейтерии (рис. 6) характеризуется теми же особенностями, что и в водороде. При увеличении давления в разрядной камере уменьшается скорость движения оболочки и увеличивается ее толщина. Ударная волна движется к оси заметно быстрее токового слоя. При давлении 8 мм рт. ст. и выше уже трудно говорить о сформировавшейся оболочке

ке. В центре камеры сжимается практически одна ударная волна, токовый поршень размазан и пинч практически не образуется.

Рассмотрим осциллограмму производной тока через камеру (см. рис. 3). Здесь отклонение производной вниз соответствует увеличению тока. Всякое увеличение производной (отклонение вниз) при наличии движущейся оболочки с током, кроме других причин, происходит также из-за того, что какая-то часть оболочки замедляется или останавливается. При этом в уравнении баланса напряжений в контуре

$$U_c - IR - L \frac{dI}{dt} - I \frac{dL}{dt} = 0.$$

член $I(dL/dt)$ уменьшается, что приводит к увеличению второго и третьего членов. На осциллограмме виден изгиб вниз на 1,4—1,6 мсек после начала разряда. Затем (2,2 мсек) производная опять уменьшается, так как быстро растет индуктивность за счет движения оболочки к оси камеры. Второй изгиб вниз происходит примерно через 2,6 мсек от начала разряда и соответствует остановке токового слоя, когда плазменная оболочка имеет минимальный радиус. При тщательной фазировке фоторазверток, тепловых фотографий и осциллограмм в момент прихода к оси камеры передней границы оболочки (фронта ударной волны) плавный ход производной не меняется. Это говорит о том, что ток течет не по всей толщине плазменной оболочки, а в основном сосредоточен в ее задней части в слое, толщиной несколько миллиметров.

Поэтому можно считать обоснованным представление плазменной оболочки в виде магнитного поршня (токового слоя с неоднородным распределением плотности по азимуту) и идущей впереди него ударной волны, причем толщина плазменной оболочки, т. е. расстояние между фронтом ударной волны и токовым слоем, зависит в основном от начальных условий разряда.

Авторы выражают благодарность Г. В. Голубу, В. Д. Иванову, В. В. Комиссарову и Г. В. Коршунову за полезное обсуждение результатов и помощь в работе.

Институт атомной энергии
им. Курчатова

Поступила в редакцию
9 X 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. U. Ascoli-Bartoli, S. Martellucci, Mazzucato. Il Nuovo Cimento, 32, № 2, 1964.
2. Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, В. П. Виноградов. Nuclear Fusion, P2, Suppl. 1962.
3. Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова. Докл. на II Международной конференции по физике плазмы и управляемым термоядерным реакциям, Калхэм, 1965.
4. Ю. А. Колесников, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова. Доклад на VII Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Белград, 1965.