

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОПТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ
В РЕЖИМЕ МЕДЛЕННОГО ГОРЕНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В РАЗРЯДЕ**
И.А.Буфетов, А.М.Прохоров, В.Б.Федоров, В.К.Фомин

Обнаружено гидродинамическое взаимодействие двух оптических разрядов в луче неодимового лазера. Получены экспериментальные доказательства движения газа как перед, так и за фронтом разряда в режиме медленного горения.

В настоящей работе впервые осуществлено медленное горение одновременно двух оптических разрядов в луче лазера и обнаружено их гидродинамическое взаимодействие¹⁾. По замедлению скорости движения встречных фронтов плазмы двух разрядов установлено движение холодного газа перед фронтом разряда. Этот факт является ключевым для формирования физической картины распространения разряда.

Эксперименты проводились в луче неодимового лазера, импульс генерации которого был гладким, длительностью 5 мсек и энергией $E \leq 8$ кДж¹. Излучение фокусировалось в лабораторный воздух линзой с $f = 1$ м. Диаметр пятна в перетяжке каустики 4 мм, длина каустики по уровню половины интенсивности 14 см. Малая величина поглощения излучения с $\lambda = 1,06$ мкм в плазме атмосферного воздуха позволяет инициировать разряд одновременно

¹⁾ Вопросы распространения и поддержания одиночного разряда рассматривались в ряде работ (см. ¹ и обзор ²).

в нескольких точках на оси луча. В данной работе разряд инициировался в двух точках каустики. Затравочная плазма создавалась пробоем воздуха излучением двух вспомогательных лазеров с модулированной добротностью. После инициирования наблюдалось (рис.1) движение одновременно четырех фронтов оптического горения: от каждой точки инициирования разряд распространялся в обе стороны по лучу лазера.

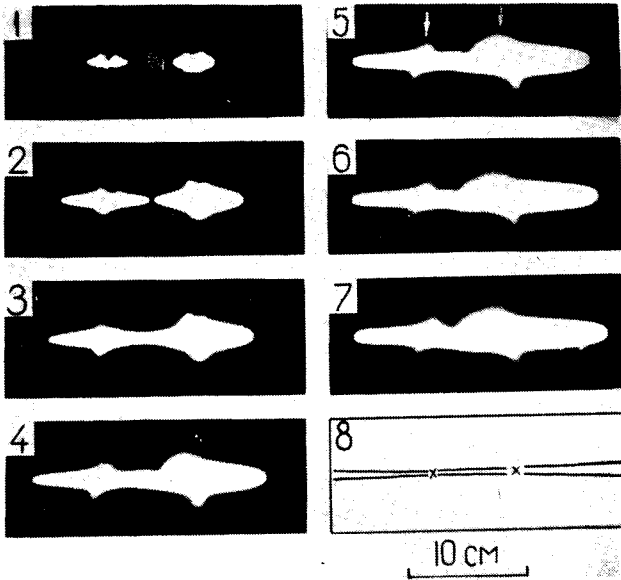


Рис. 1. Покадровая развертка развития оптического разряда при инициировании в двух точках: в перетяжке каустики и в 7 см перед ней. Излучение лазера падает справа налево: $E = 4,9$ кДж. 1) $t = 0,5$ мсек; 2) 1,5 мсек; 3) 2,0 мсек; 4) 2,75 мсек; 5) 3,25 мсек; 6) 3,75 мсек; 7) 4,25 мсек; 8) схема прохождения лазерного луча и расположения точек инициирования (x)

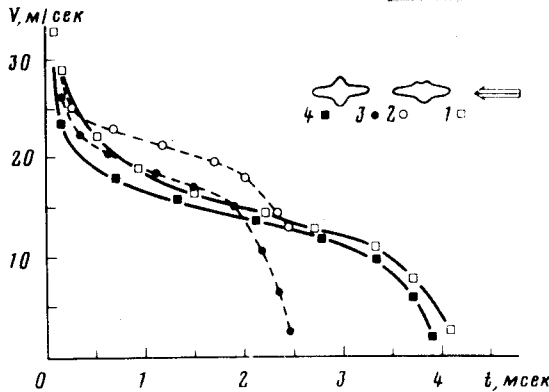


Рис. 2. Зависимость скорости распространения фронтов разряда от времени при инициировании в двух точках: ± 5 см от перетяжки каустики. $E = 4,3$ кДж. Справа сверху – схема разряда, стрелкой обозначено направление лазерного луча

На рис.2 представлены зависимости скоростей движения фронтов разряда от времени при инициировании в точках, симметричных относительно перетяжки каустики. На отрезке времени $t = 0,8 \div 1,7$ мсек от момента "поджига" все фронты распространяются с мало меняющимися скоростями. Но при сближении разрядов с $t \approx 1,7$ мсек наблюдается резкое снижение скоростей внутренних фронтов. Расстояние между ними в этот момент составляет $\sim 2,5$ см. При $t = 2,53$ мсек области, занятые светящейся плазмой, соединяются. Наблюдаемое снижение скорости фронтов 2 и 3 при их сближении говорит о гидродинамическом характере их взаимодействия, то есть о существовании потоков холодного воздуха, направленных от фронтов горения. Величина снижения скорости сближения внутренних фронтов от $V_2 + V_3 = 35$ м/сек ($t = 1,7$ мсек) до 15,5 м/сек ($t = 2,45$ мсек) свидетельствует о том, что скорость холодного газа перед фронтом горения в лабораторной системе отсчета составляет не менее 10 м/сек.

Так как перед фронтами горения имеются потоки холодного газа и поскольку давление в разряде можно считать выравненным (из-за малых величин наблюдаемых скоростей), то

в соответствии с законом сохранения импульса должны существовать потоки горячего газа от фронтов вглубь разряда. Наблюдаемая форма светящейся области разряда позволяет судить о характере движения горячего газа в разряде (рис.1). Диаметр этой области значительно превышает диаметр поддерживающего разряд луча. Локальный характер утолщений области светящейся плазмы (например, отмеченных ↓ на кадре 5, рис.1) говорит о газодинамическом их происхождении: в окрестности такого утолщения имеет место поток горячей плазмы, удаляющийся от оси разряда. При исключительно теплопроводностном механизме выноса энергии из зоны энерговыделения наблюдался бы разряд "гладкой" формы. Потоки горячего газа, которые распространяются (расширяясь и, соответственно, замедляясь) от фронтов каждого из отдельных разрядов (рис.1, кадр 2), сталкиваются в центральной части разряда. Как следствие, формируются потоки газа, направленные под углом к оси разряда. Наблюдаемые особенности в центральной части разрядов (кадр 2) объясняются этими потоками. Качественно картина столкновения потоков от фронтов соответствует решению задачи о соударении встречных струй³.

Новые данные о движении газа в разряде можно получить, наблюдая изменение формы светящейся области после соединения внутренних фронтов (рис.1, кадры 4 – 7). Оно может быть понято как следствие изменения движения газа внутри разряда. После прекращения потоков горячего газа от внутренних фронтов наблюдается процесс проникновения струй от внешних фронтов в прекративший свое движение горячий газ между двумя бывшими зонами столкновения потоков отдельных разрядов. Наблюдаемый при этом асимметричный характер движения относительно оси разряда не является исключением среди подобных процессов (например,⁴). Скорость проникновения струи, в первом приближении отождествленная со скоростью смещения особенностей на верхней кромке разряда к центральной его части, составляет для потока от переднего (правого на рис.1) фронта разряда ≈ 16 м/сек. Соответствующая наблюдаемая скорость для левой части разряда значительно меньше. В этом случае из-за меньшего начального диаметра потока газа (диаметры фронтов горения справа и слева отличаются приблизительно в два раза) отождествление скорости проникновения струи плазмы в покоящийся горячий газ со скоростью смещения особенностей формы разряда, по-видимому, менее достоверно. Пользуясь решением задачи о проникновении струи в покоящуюся жидкость⁵ и считая, что плотности в струе и в покоящемся газе одинаковы, получим, что скорость потока горячего газа вдвое выше скорости проникновения и составляет ≈ 30 м/сек. Отметим, что данная оценка получена для скорости потока горячего газа вдали от фронта горения, в окрестности которого она может быть значительно выше.

Таким образом, в данной работе получены экспериментальные доказательства движения газа как перед, так и за фронтом оптического разряда в режиме медленного горения. Полученные величины скоростей движения газа находятся в соответствии с моделью для расчета скорости движения фронта разряда ("горение в бесконечной трубе"), предложенной в¹. Представляет интерес проведение аналогичных опытов по взаимодействию сильно поглощающих разрядов, распространяющихся в двух различных лучах CO₂-лазера. Описанный здесь метод "столкновения" разрядов может быть использован и для исследования физических процессов при распространении оптических разрядов других типов, в том числе сверхзвуковых.

Литература

1. Буфетов И.А., Прохоров А.М., Федоров В.Б., Фомин В.К. Квантовая электроника, 1981, 8, 751.
2. Райзер Ю.П. УФН, 1980, 132, 549.
3. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости М.: изд. Наука, 1979.
4. Денщиков В.А., Кондратьев В.Н., Романов А.Н. Изв. АН СССР, МЖГ, 1978, №6, 165.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: изд. Наука, 1973.