

Объединение ударных волн, создаваемых движущимся оптическим пульсирующим разрядом

Г.Н.Грачев, А.Г.Пономаренко, В.Н.Тищенко, А.Л.Смирнов,
С.И.Грашкеев, П.А.Стаценко, М.И.Зимин, А.А.Мякушина,
В.И.Запругаев, А.И.Гулидов, В.М.Бойко, А.А.Павлов, А.В.Соболев

Исследованы газодинамические возмущения, создаваемые разрядом. Подтверждены механизм объединения ударных волн и критерии его проявления.

Ключевые слова: пульсирующий разряд, ударные волны, взаимодействие излучения с веществом.

Механизм объединения ударных волн (МОВ) [1], создаваемых оптическим пульсирующим разрядом (ОПР), представляет интерес в качестве метода преобразования импульсно-периодического (ИП) лазерного излучения в низкочастотные волны давления газов или магнитного поля [2, 3]. Цель настоящей работы – экспериментальная проверка МОВ и критериев его проявления, теоретически найденных в [1–3].

Используемый в опытах движущийся ОПР впервые реализован в работах [4–6], где описаны метод его возбуждения, результаты предварительных исследований и схема установки. Поэтому условия проведения экспериментов рассмотрим кратко. ОПР создавался импульсами излучения CO_2 -лазера [7], следовавшими с частотами $f = 6 - 30$ кГц при средней мощности ~ 1.5 кВт. Длительность импульсов составляла ~ 1 мкс, а энергия была равна $50 - 80$ мДж. Пробой развивался на переднем фронте импульсов за время $100 - 150$ нс. ОПР поглощал $40\% - 50\%$ энергии импульса q , если интенсивность в фокусе была близка к порогу пробоя, и до $70\% - 80\%$ при двух-трехкратном превышении над порогом.

Для перемещения ОПР вдоль оптической оси z использовалась оптико-механическая система, основанная на зеркальном телескопе Кассегрена. Неподвижное вогнутое сферическое зеркало имело диаметр 24 см, рассеивающее зеркало диаметром 3.5 см перемещалось пневматическим устройством, при этом фокус и горящий в нем ОПР двигались навстречу падающему излучению. Скорость распространения ОПР была постоянной, нестабильность его параметров (q , f и скорости движения V_0) составляла примерно $\pm 5\%$. Длина пути ОПР (~ 50 см) ограничивалась мощностью лазера и размером камеры, в которой создавался разряд. Мощность импульсов ($\sim 100 - 300$ кВт) была недостаточна для оптического

пробоя воздуха. Опыты проводились в аргоне или в смеси аргона с гелием при давлении $P_0 = 1$ атм.

Измерялись параметры лазерного излучения и скорость движения ОПР. Плазменные и газодинамические возмущения, создаваемые этим разрядом, регистрировались с использованием датчика давления и теневых фотоснимков. Датчик располагался на пути движения ОПР на расстоянии 40 см от точки его старта и был удален на 2 см от оси z ; приемная площадка была ориентирована к ней под углом 20° . Центр оптического поля теневой фоторегистрации (экспозиция 0.5 мкс) находился на оси z , на расстоянии ~ 25 см от точки старта ОПР. Диаметр оптического поля составлял 10 см. Время регистрации возмущений, создаваемых ОПР, было меньше времени прихода волн, отраженных от стенок камеры, в зону измерений. В опытах варьировались следующие параметры: скорость движения ОПР V_0 – от 100 м/с до $C_0 = 320$ м/с (скорость звука в аргоне), частота f – от 6 до 30 кГц (верхний предел ограничен сверху порогом оптического пробоя газа); энергия импульсов и интенсивность излучения в фокусе уменьшались примерно как $1/f$.

Фотоснимок движущегося ОПР показан на рис.1. Импульсно-периодическое излучение последовательно создавало искры длиной $L \sim 0.5$ см. В зависимости от V_0 (при $f = 25$ кГц) след ОПР состоял из изолированных распадающихся лазерных искр или представлял собой непрерывный плазменный канал, если расстояние между искрами было малым. Ударные волны создавались в результате теплового расширения искр.



Рис.1. Фотоснимки движущегося в аргоне ОПР: свечение отдельных лазерных искр при $f = 25$ кГц и $V_0 = 260$ м/с (а) и свечение непрерывного плазменного канала при $f = 25$ кГц и $V_0 = 75$ м/с (б). Затвор фотоаппарата работает в режиме ручной выдержки. Излучение падает слева направо, фокус и ОПР движутся ему навстречу.

Г.Н.Грачев, А.Г.Пономаренко, В.Н.Тищенко, А.Л.Смирнов, С.И.Грашкеев, П.А.Стаценко, М.И.Зимин, А.А.Мякушина. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: tishchenko@mail.nsk.ru, root@lateh.nsk.ru, pon_dlp@mail.nsk.ru

В.И.Запругаев, А.И.Гулидов, В.М.Бойко, А.А.Павлов, А.В.Соболев. Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: bvm@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 23 марта 2006 г.

Рассмотрим механизм объединения ударных волн [1, 2]. В сплошной среде периодически создаются ударные волны, начальная скорость которых много больше скорости звука C_0 , а скорость V_0 перемещения источника ударных волн меньше C_0 . Если параметры ОПР соответствуют критериям объединения, то фазы сжатия ударных волн объединяются, создавая низкочастотную квазистационарную волну, длина которой линейно зависит от числа импульсов и намного превышает длины фаз сжатия отдельных ударных волн.

При этом отсутствуют ограничения на тип среды, энергию и природу источника пульсаций, создающего ударные волны. На основе расчетов универсальный характер МОВ и его критериев доказан для газов [2], а также для плазмы с магнитным полем [3], где формируется квазистационарная волна магнитного и вихревого электрического полей.

Рассмотрим сферический источник ударных волн. Для неподвижного ОПР критерии их объединения выполняются во всех направлениях, поэтому квазистационарная волна сферически симметрична. При движении ОПР со скоростью $0 < V_0 < C_0$ ударные волны объединяются, преобразуясь перед ОПР в квазистационарные волны. Зона возмущений представляет собой шар, в котором последние занимают сегмент. Если ОПР создается ИП излучением, то передний фронт квазистационарных волн уходит на бесконечность, а задний фронт находится вблизи ОПР. Повторяющиеся цуги (пакеты) лазерных импульсов создают периодические квазистационарные волны. Внутри цугов импульсы должны соответствовать критериям объединения.

Взаимодействие ударных волн зависит от параметров q, f, V_0, P_0, C_0 и L . Лазерные импульсы должны быть короткими, т. е. должно выполняться условие $t_r < (q/P_0)^{1/3}$, где t_r берется в мкс, q – в Дж, а P – в атм (при $q \sim 1 - 5$ Дж и $P_0 = 1$ атм имеем $t_r < 0.9 - 1.5$ мкс) [2]. В этом случае газ на протяжении времени t_r неподвижен. Скачок давления в искре и доля энергии, уносимая ударными волнами, максимальны. Длину искр можно не учитывать, если $L < R_d = 2.19(q/P_0)^{1/3}$ (R_d – динамический радиус, расстояние, на котором давление в ударной волне становится близким к P_0). В эксперименте $R_d \approx L \approx 0.6$ см, и можно использовать критерии объединения для сферического источника ударных волн [1, 2].

Решение задачи описывается [1, 2] безразмерными частотой повторения импульсов $\omega = fR_d/C_0$ и скоростью движения ОПР $M_0 = V_0/C_0$. Это означает, что каждой точке на плоскости (M_0, ω) соответствует множество значений размерных параметров. Существуют три основные частоты, найденные с использованием расчетов: $\omega_0 \approx 2.5M_0$, $\omega_1 \approx 0.65(1 - M_0)$ и $\omega_2 \approx 5.8(1 - M_0)^{1.5}$.

При ω/ω_0 ОПР создает неразрывный канал, в случае $1/\omega = 1/\omega_1$ расстояние между искрами равно длине ударной волны, а при $\omega = \omega_2$ ударная волна догоняет задний фронт квазистационарной волны за время между импульсами. Частоты позволяют выделить на плоскости (M_0, ω) четыре области, в которых воздействие ОПР на газ качественно различно.

Область I: $\omega_0 > \omega \approx \omega_2$ – ОПР создает квазистационарную волну.

Область II: $\omega_1 < \omega < \omega_2$ и $\omega < \omega_0$ – переходная область для МОВ. Квазистационарная волна модулирована по амплитуде, глубина которой возрастает по мере приближения ω к ω_1 .

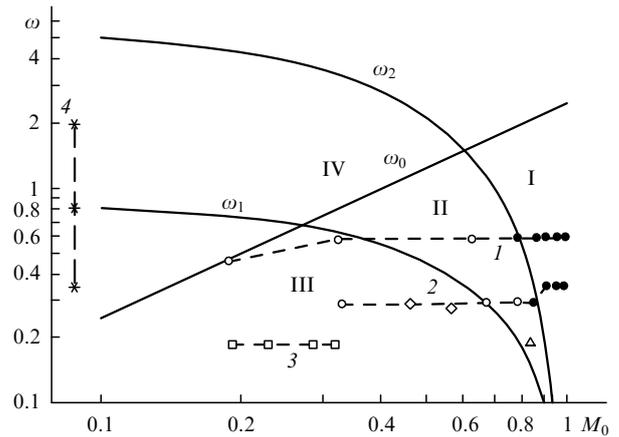


Рис.2. Граничные частоты ω возникновения МОВ в зависимости от скорости M_0 (I–IV – характерные области взаимодействия ОПР с газом). Точки на кривых 1–3, а также отдельная точка (Δ) – эксперимент при движении ОПР в аргоне ($P_0 = 1$ атм); черные точки соответствуют случаю, когда ОПР создает квазистационарную волну, светлые – ее отсутствию. Представленные зависимости получены при $f = 25 - 30$ кГц, $W_r \approx 750$ Вт (1), $f = 12 - 15$ кГц, $W_r \approx 580 - 670$ Вт (2), $f = 12$ кГц, $W_r \approx 200$ Вт (3); 4 – ОПР в струе аргона [8], истекающей в воздух ($M_0 = 0$), Δ – $f = 6.5$ кГц, $W_r \approx 550$ Вт, \diamond – ОПР в смеси 70 % He + 30 % Ar, $P_0 = 1$ атм, $C_0 \approx 550$ м/с, $V_0 = 315$ м/с, $f = 25$ кГц.

Область III: $\omega_0 > \omega < \omega_1$ – ударные волны не взаимодействуют, МОВ не работает.

Область IV: $\omega > \omega_0$ – ОПР создает непрерывный плазменный канал. Пробои происходят в плазме предшествующих искр, если отсутствует механизм или метод выноса плазмы из фокальной области. КПД преобразования излучения в ударную волну низкий.

Частоты $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ и области I–IV показаны на рис.2. В эксперименте, цель которого – подтверждение правильности определения этих частот и областей, использовалась следующая методика. В опытах варьировались параметры ОПР, каждый набор которых соответствовал точке на плоскости (M_0, ω) . Некоторые из этих точек приведены на рис.2. Если сигналы давления и теневые фотоснимки соответствуют объединению волн, результаты эксперимента обозначены черными точками, в противном случае – светлыми. Опыты проводились следующим образом. При фиксированной частоте повторения импульсов осуществлялось возбуждение ОПР с разными скоростями V_0 . На рис.2 точки на кривых 1 и 2 соответствуют варьированию V_0 при $f \sim 12 - 15$ и $25 - 30$ кГц. Средняя мощность W_r ИП излучения, поглощаемого в ОПР, изменялась от 200 до 750 Вт. Приведены данные для $f = 6$ кГц и ОПР в смеси аргона и гелия, в которой скорость звука велика. Зависимость 4 относится к эксперименту с ОПР, горевшему в узкой струе аргона, истекающей в воздух [8]. Струя выносила плазму из зоны горения. Наблюдалось слабое проявление объединения волн, поскольку $\omega = 2$ ($f = 120$ кГц) мало по сравнению с ω_2 .

На рис.3 показаны сигналы датчика давления и теневые фотоснимки ОПР, параметры которого соответствуют областям I и III. В области III ударные волны не взаимодействуют – соседние ударные волны разделены во времени и в пространстве (см. рис.3,а,б). Увеличение давления соответствует приближению ОПР к датчику. Эффект Доплера проявляется в различии частот прихода ударных волн на датчик для приближающегося и удаля-

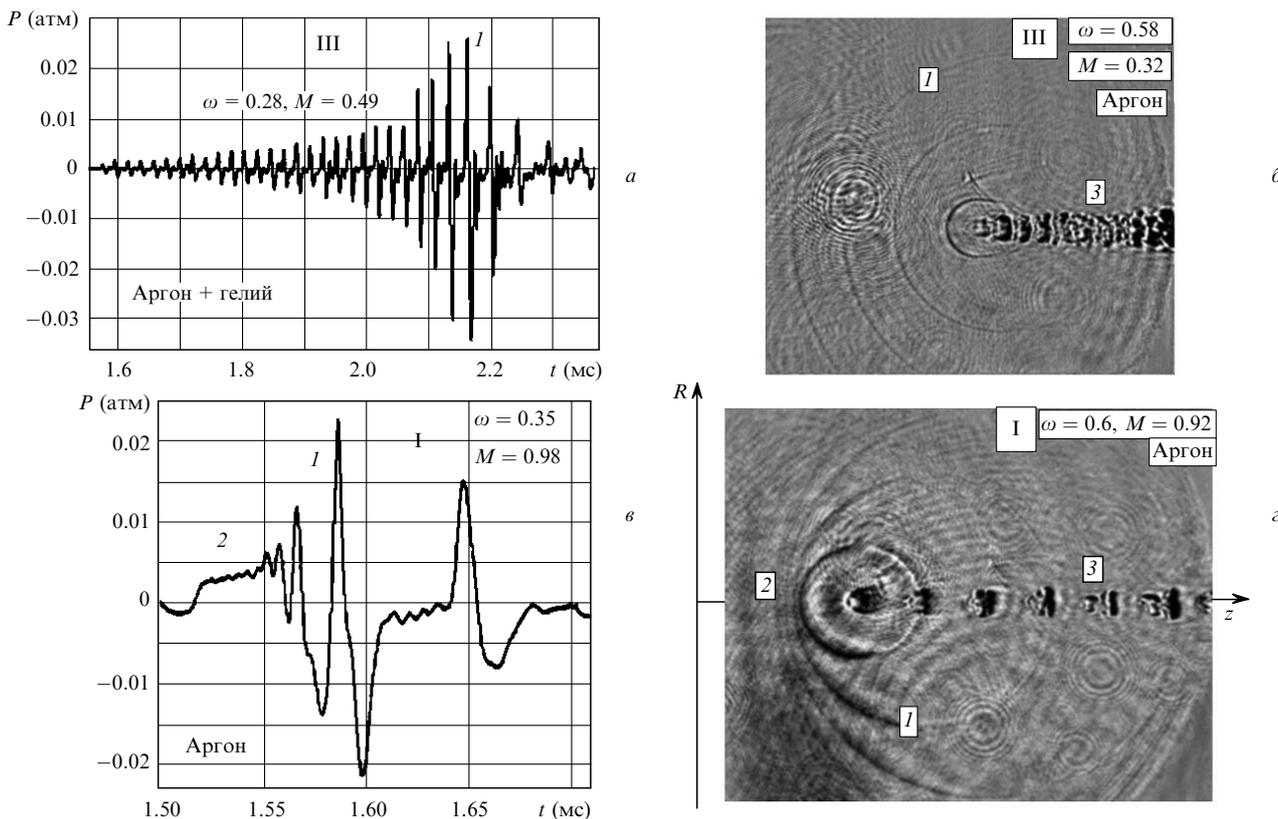


Рис. 3. Изменение во времени давления ударных волн, создаваемых движущимся ОПР (а, в), и теневые фотоснимки (б, г) (ОПР движется справа налево вдоль оптической оси z навстречу лазерному излучению, в момент прохождения ОПР мимо датчика давление максимально); 1 – ударные волны, 2 – квазистационарные волны, 3 – распадающиеся лазерные искры. Эксперименты проводились при следующих параметрах: смесь 70 % He + 30 % Ar, $P_0 = 1$ атм, $V_0 \sim 260$ м/с, $f = 25$ кГц, $q = 31$ мДж (а), $V_0 = 103$ м/с, $f = 30$ кГц, $q = 24$ мДж (б), $V_0 = 314$ м/с, $f = 14.5$ кГц, $q = 45$ мДж (в) и $V_0 = 294$ м/с, $f = 30$ кГц, $q = 26$ мДж (г).

ющегося ОПР. Как видно из рис. 3, б, ОПР, параметры которого соответствуют точке на плоскости (M_0, ω) , близко расположенной к ω_0 , создает непрерывный канал. За время между импульсами фокус не успевает выходить из плазмы предыдущих искр.

На рис. 3, в, г иллюстрируется объединение ударных волн перед движущимся ОПР, параметры которого M_0 и ω соответствуют области I. Перед ОПР фазы сжатия отдельных ударных волн объединяются в квазистационарную волну, длина которой растет по мере движения ОПР. Видно, как очередная ударная волна догоняет задний фронт квазистационарной волны. Если M_0 и ω соответствуют области II, то в эксперименте наблюдается модуляция давления квазистационарной волны. Измерения проведены в аргоне при $f = 6$ кГц и в смеси аргона с гелием при $f = 25$ кГц. Некоторые точки на плоскости (M_0, ω) показаны на рис. 2 (\triangle и \diamond). В смеси газов скорость ОПР не превышала ~ 320 м/с, однако ударные волны не объединялись, т. к. скорость звука ~ 550 м/с и M_0, ω соответствовали области III.

Таким образом, с использованием импульсно-периодического излучения CO_2 -лазера создан оптический пульсирующий разряд, движущийся в газе со скоростью ~ 320 м/с. Двумя методами (измерение давления и теневые фотоснимки) подтвержден механизм объединения ударных волн и его критерии. Перспективы различных применений ОПР, например в лазерном двигателе [9], связаны с использованием излучения со средней мощностью более 5 кВт, малой длительностью импульсов и частотой их повторения десятки или сотни килогерц. Такие пара-

метры достижимы в лазерах с непрерывной накачкой активной среды и модуляцией добротности резонатора [7, 10, 11].

Работы по этому тематическому направлению выполнялись при поддержке СО РАН (Интеграционный проект № 152) и РФФИ (грант № 03-02-17716).

1. Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **33** (9), 823 (2003).
2. Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **34** (10), 941 (2004).
3. Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф. *Квантовая электроника*, **36** (1), 56 (2006).
4. Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Стаценко П.А., Трашкеев С.И. *Труды VI Межд. конф. «Прикладная оптика»* (С.-Петербург, 2004, т. 4, с. 3).
5. Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Стаценко П.А., Тищенко В.Н., Трашкеев С.И. *Квантовая электроника*, **35** (11), 973 (2005).
6. Пономаренко А.Г., Грачев Г.Н., Тищенко В.Н., Запрягаев В.И., Гулидов А.И., Бойко В.М., Павлов А.А., Смирнов А.Л., Соболев А.В., Трашкеев С.И. и др. *Отчет по интеграционному проекту СО РАН № 152* (ИЛФ СО РАН, ИТПМ СО РАН, 2005).
7. Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Shulyat'ev V.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4165**, 185 (2000).
8. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Запрягаев В.И., Смирнов А.Л., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **32** (4), 329 (2002).
9. Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **34** (12), 1143 (2004).
10. Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Tischenko V.N., Tret'jakov P.K. *Laser Phys.*, **6** (2), 376 (1996).
11. Аполлонов В.В., Кийко, Кислов В.И., Суздальцев А.Г., Егоров А.Б. *Квантовая электроника*, **33** (9), 753 (2003).