

**В.Г. Бородин, В.М. Комаров, С.В. Красов, В.А. Малинов, В.М. Мигель,
Н.В. Никитин, В.Н. Чернов, А.В. Чарухчев**

Исследование структуры ударных волн, возникающих в остаточном газе при разлете лазерной плазмы

*Научно-исследовательский институт комплексных испытаний
оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

Поступила в редакцию 9.03.2000 г.

С помощью многокадровой интерферометрии исследована структура сильных ударных волн (УВ), возникающих при разлете лазерной плазмы в остаточный газ. Обнаружено, что наряду со сферической ударной волной, образуются конические УВ. На поздних стадиях движения конические УВ проявляются как выступы относительно сферической. Показано, что такие выступы непосредственно не связаны с гидродинамической неустойчивостью сферической УВ.

При воздействии мощного лазерного импульса на твердотельную мишень, помещенную в газ с низким давлением, образуется плазма, которая, действуя на окружающий газ как плазменный поршень, формирует в последнем сильную ионизирующую ударную волну. Исследования представляют интерес вследствие ограниченного объема экспериментальных данных по сильным УВ, структура и динамика движения которых отличаются от хорошо изученных слабых волн [1]. Практическое значение экспериментальных исследований связано с изучением и моделированием различного рода процессов, необходимых, в частности, для разработки методов диагностики плазмы, нагреваемой мощным лазерным излучением.

Сильные ионизирующие УВ, возбуждаемые мощным лазерным излучением, регистрировались и исследовались различными методами. В ряде работ рассмотрены вопросы устойчивости УВ. В работе [2] изучались особенности разлета лазерной плазмы (ЛП) в зависимости от давления окружающего мишень газа. Было установлено, что ударно-волновая структура с разделением контактной границей лазерной плазмы и ударной волны газа возникает в области давлений $p > 1$ мм рт. ст. В работе [3] показано, что при давлениях $p = (1 \div 5)$ мм рт. ст. фронт ударной волны имеет гладкую квазисферическую форму. Неоднородности и неустойчивости, присущие давлениям $10^{-1} < p < 1$ мм рт. ст., не возникают. Стратификация излучения и неоднородность наблюдаются за фронтом УВ в глубинных слоях в виде «скобы».

В [4] исследована начальная стадия движения сферической УВ, формируемой в остаточном газе под действием высокотемпературной ЛП при $p = 16$ мм рт. ст. Эксперименты проводились со сферическими мишенями из стекла и полистирола. При облучении сферических мишеней, не отмечены неустойчивости в динамике УВ [4, 5].

В работе [6] показано, что часть энергии ЛП при преобразовании в энергию УВ теряется. Потери происходят за счет вылета из плазмы без взаимодействия с УВ ионов, составляющих высокоэнергетичный хвост максвелловского распределения. Неустойчивости в динамике сильных УВ исследовались в работе [7]. Эксперименты проводились в диапазоне плотностей мощности лазерного пучка на поверхности мишени ($10^{12} \div 10^{14}$) Вт/см². Давление окружающего газа поддерживалось большим 1 мм рт. ст. На

тенеграммах наблюдались области фронта УВ, значительно выступающие вперед относительно соседней сферической части. Эти области УВ, названные авторами [7] «аневризмами», свидетельствуют, по их мнению, о неустойчивости динамики сильных УВ.

Были обнаружены следующие особенности, связанные с возникновением аневризм: последние в большинстве случаев возникают при давлении окружающего газа больше 1 мм рт. ст. и при поздних временах разлета (> 50 нс), аневризмы появляются вблизи оси лазерного пучка, но иногда встречаются на значительном расстоянии от оси, неоднородность в распределении интенсивности в лазерном пучке не играет основной роли в создании аневризма.

В данной работе исследовались особенности формирования структуры ударных волн при воздействии на твердотельную мишень субнаносекундного импульса неодимового лазера в диапазоне плотностей мощностей ($8 \cdot 10^{13} \div 8 \cdot 10^{16}$) Вт/см². Эксперименты проводились на лазерной установке «Прогресс» [8]. Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 1.

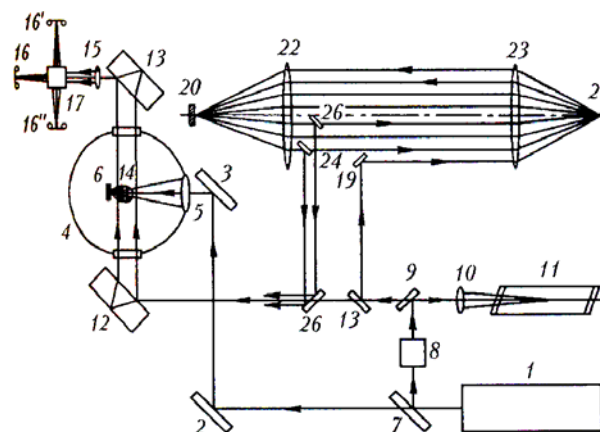


Рис. 1. Оптическая схема установки

Мощный лазерный пучок с энергией до 20 Дж и длительностью импульса 0,2 нс формировался в усилительном канале 1. С помощью зеркал 2 и 3 пучок направлялся в камеру с мишенью 4 и фокусировался объективом 5 на мишень

6. Излучение, отраженное зеркалом 7, преобразовывалось нелинейным кристаллом 8 во вторую гармонику. Излучение второй гармоники с энергией 20 мДж с помощью зеркала 9 и линзы 10 фокусировалось в кювету 11 ВКР-компрессора, заполненную метаном. За счет процессов ВКР-компрессии [9] формировался отраженный назад импульс длительностью 0,02 нс. Плотность энергии в сечении пучка диаметром 8 мм составляла 15 мДж/см^2 , длина волны стоксова излучения 0,625 мкм. Часть пучка поступала на интерферометр Сиркса, образованный зеркалами 12 и 13, в одном из плеч которого находился объект исследования 14. Интерферометр настраивался на полосы конечной ширины, плоскость локализации которых сопрягалась объективом 15 с плоскостью регистрации 16 (16', 16''). Элемент 17 – разветвитель изображений, полученных в разные моменты времени. Временной интервал между зондирующими импульсами формировался на линии задержки, образованной зеркалами 20 и 21 и линзами 22 и 23. Часть излучения на линию задержки направлялась элементами 18 и 19. Элементами 24 и 25 осуществлялся вывод двух импульсов, задержанных относительно друг друга. Зеркалом 26 зондирующий пучок направлялся в интерферометр и использовались для регистрации объекта в более поздние моменты времени.

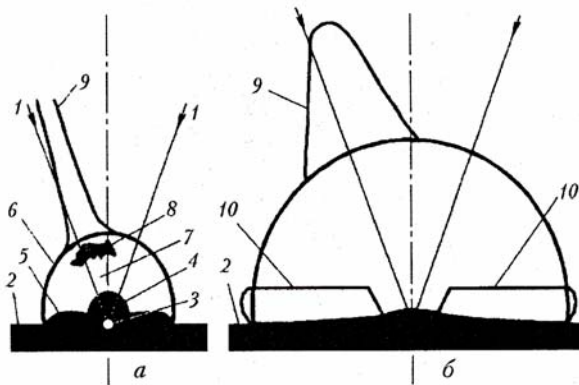


Рис. 2. Основные элементы структуры ударных волн через 5 (а) и 65 нс (б) после воздействия греющего импульса

На рис. 2 для наглядности изображены основные элементы структуры УВ, которые можно наблюдать на интерферограммах (рис. 4), обсуждаемых далее в работе. Лазерный пучок диаметром 120 мм фокусировался объективом с фокусным расстоянием 170 мм, распространялся в конусе, ограниченном краевыми лучами 1, и концентрировался на поверхность мишени 2 в точке 3. Диаметр фокального пятна с учетом расходимости лазера составлял 15 мкм. Для определения влияния плотности мощности на исследуемые процессы в ряде экспериментов осуществлялась расфокусировка пучка: последний фокусировался в точку, расположенную на некотором расстоянии Δ под поверхностью мишени. Начальная стадия формирования ударной волны соответствует времени регистрации $t = 5$ нс после воздействия на мишень греющего импульса (см. рис. 2,а). Непосредственно вблизи поверхности располагается зона непрозрачности, состоящая из двух частей: сферической 4 (непосредственно над точкой фокусировки 3) и плоской 5. Между сферической УВ 6 и зоной непрозрачности различаются два слоя газа: относительно однородный 7 и сильно турбулизированный 8, примыкающий к заднему фронту сферической УВ. В области, перед фронтом сферической УВ, распространяется коническая ударная волна

9, ось которой располагается вдоль радиуса, исходящего из точки 3 фокусировки пучка. На рис. 2,б изображена более поздняя стадия развития УВ, соответствующая 65 нс после воздействия на мишень греющего импульса; здесь 10 обозначает плоскую УВ.

В эксперименте измерялись следующие параметры: E_L – энергия лазерного пучка; Δ – величина расфокусировки; p – давление окружающего мишень газа. По этим данным с учетом известного размера фокального пятна рассчитывалась плотность мощности q в зоне облучения мишени. Время экспозиции каждого кадра соответствовало длительности зондирующего импульса и составляло 0,02 нс.

УВ инициировались при воздействии лазерного импульса длительностью 0,2 нс на толстую плоскую мишень из фторопласта. Эксперименты проводились при различных давлениях p от 1 до 60 мм рт. ст. Представленные результаты (рис. 4,б – д) получены при давлении окружающего мишень воздуха 15 мм рт. ст. Однако все характерные для этих условий особенности УВ, сохраняются, начиная примерно с 5 и до 40 мм рт. ст. При дальнейшем повышении давления и сохранении плотности мощности лазерного излучения наблюдаются пробы газа (рис. 3) и образование цилиндрической УВ, локализованной вдоль оси лазерного пучка (процессы при $p > 40$ мм рт. ст. не рассматривались в данной статье). При $p \leq 5$ мм рт. ст. набег фазы, создаваемый УВ в зондирующем пучке, близок к пределу чувствительности однопроходowego интерферометра и УВ слабо визуализируются.

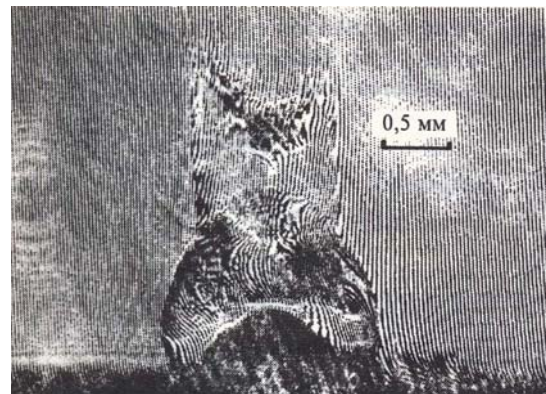


Рис. 3. Интерферограмма ударной волны при пробе газа через 5 нс после воздействия на мишень греющего импульса

Типичная интерферограмма, на которой отражены основные особенности начальной стадии формирования УВ, представлена на рис. 4,а. Результат получен при следующих условиях эксперимента: $E_L = 13$ Дж, $\Delta = 200$ мкм, $p = 15$ мм рт. ст., $q = 8 \cdot 10^{13}$ Вт/см², $t = 5$ нс. Горячая разлетающаяся лазерная плазма, оставляющая сферическую часть зоны непрозрачности, формирует сферическую УВ. Плоская часть зоны непрозрачности возникает вследствие испарения части материала мишени, вызванного распространением тепловой волны из зоны, облучаемой лазерным пучком. Отчетливо наблюдается коническая УВ, ось которой располагается вдоль радиуса, исходящего из точки 3 фокусировки пучка. На более поздней стадии процесса (рис. 4,б) при $t = 65$ нс сферическая зона непрозрачности исчезает, а плазма, возникшая за счет испарения части материала мишени, образует плоскую ударную волну, распространяющуюся нормально к поверхности мишени.

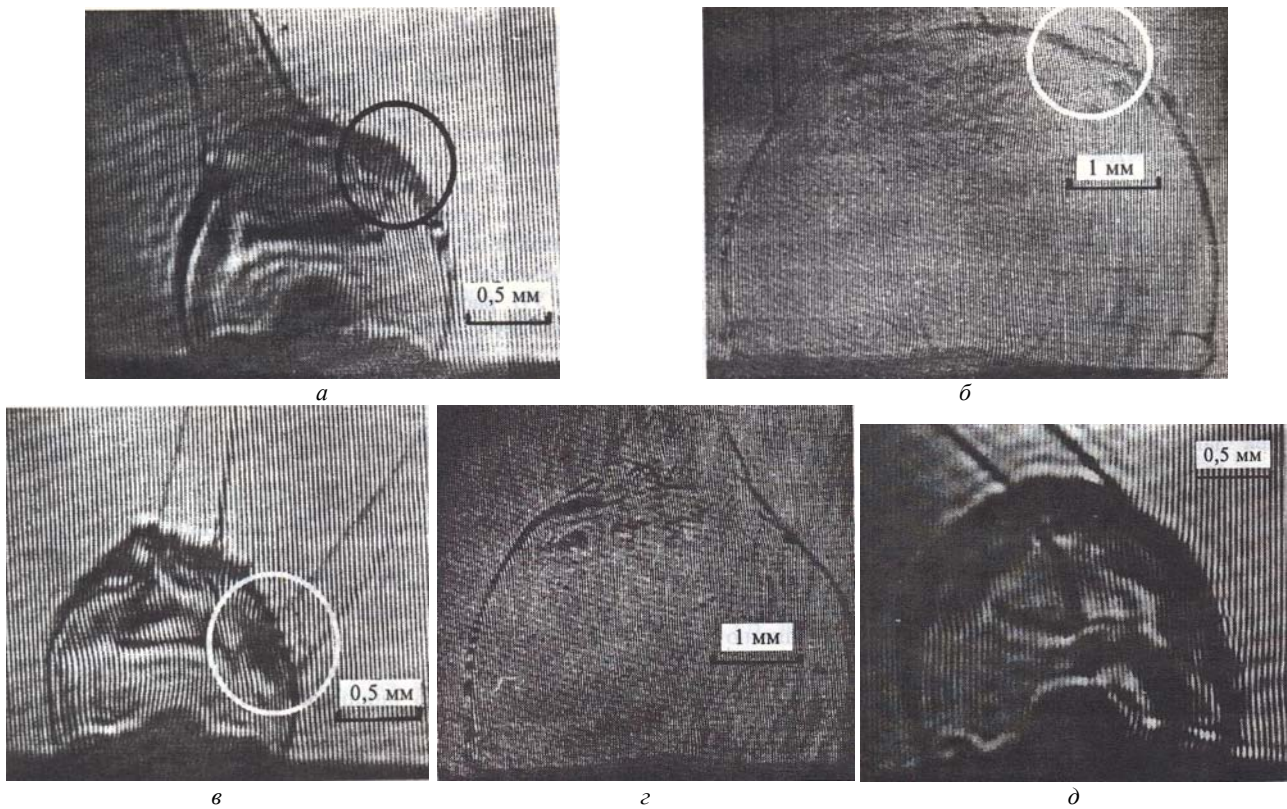


Рис. 4. Интерферограммы ударных волн: $q = 8 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$, $t = 5$ (а), 65 нс (б); $q = 8 \cdot 10^{16} \text{ Вт/см}^2$, $t = 5$ (в), 65 нс (г); $q = 2,6 \cdot 10^{16} \text{ Вт/см}^2$, $t = 5$ нс (д)

В данном эксперименте коническая УВ возникает внутри области, занятой фокусируемым лазерным пучком и можно предположить, что она связана с неоднородным прогревом окружающего газа, вызванным неоднородным распределением излучения в пучке. Однако при повышении плотности мощности до $q = 8 \cdot 10^{16} \text{ Вт/см}^2$ наблюдались несколько подобных УВ, некоторые из них располагались вне области, занятой лазерным пучком (на рис. 4,в отмечена кружком). Результат зарегистрирован при $E_{\text{л}} = 9 \text{ Дж}$, $\Delta = 0 \text{ мкм}$, $p = 15 \text{ мм рт. ст.}$ Коническая УВ, локализованная вблизи оси фокусируемого лазерного пучка (рис. 4,в), трансформируется на более поздней стадии при $t = 65 \text{ нс}$ в выступ, заметно выходящий за пределы сферической УВ (рис. 4,г). Структура выступа сходна с известными «аневризмами», упоминавшимися в [7]. Следовательно, по крайней мере некоторый класс «аневризм» представляет собой позднюю стадию развития конических УВ и его, по-видимому, не следует рассматривать как результат неустойчивости сферических ударных волн.

В ряде экспериментов с помощью фазовых пластин [9] формировалось сглаженное распределение интенсивности. Отношение перепада интенсивности в фокальном пятне к среднему уровню не превышало 3%, при этом размер пятна возрастал до 140 мкм, а плотность мощности снижалась до $8 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$. При этом не наблюдалось конических УВ, расположенных вне конуса, ограниченного краевыми лазерными лучами. Таким образом, появление конических УВ не связано непосредственно с неоднородным распределением интенсивности в греющем пучке. При относительно невысокой плотности мощности ($q \approx 10^{14} \text{ Вт/см}^2$) возникают волны, локализованные вблизи оси лазерного пучка. По-

вышение q до уровня $\approx 10^{17} \text{ Вт/см}^2$ приводит к образованию нескольких конических УВ, оси которых могут быть ориентированы под большим углом к оси фокусируемого лазерного пучка.

В данной работе не ставилась задача определить причину возникновения конических УВ. Возможно, они образованы в результате пролета быстрых частиц, упоминавшихся в [6]. Косвенным подтверждением этому может служить результат, представленный на рис. 4,д. Эксперимент проведен при следующих параметрах: $E_{\text{л}} = 10 \text{ Дж}$, $\Delta = 0 \text{ мкм}$, $p = 15 \text{ мм рт. ст.}$, $q = 2,6 \cdot 10^{16} \text{ Вт/см}^2$, $t = 5 \text{ нс}$. Коническая УВ имеет заметно искривленную форму в пределах области ударно сжатого газа и сходна с траекторией заряженных частиц в магнитном поле, которое, как известно, спонтанно возбуждается в неоднородной лазерной плазме и может достигать значительных величин [11].

В области за фронтом сферической ударной волны у «основания» каждой конической УВ наблюдается зона с высоким уровнем неоднородности. На интерферограммах она проявляется в виде более темных участков, имеющих сложную пространственную форму. Не вдаваясь в детали эксперимента, отметим, что потемнения свидетельствуют о значительном градиенте показателя преломления в упомянутых зонах, который приводит к рефракции лучей в зондирующем пучке на угол, превосходящий апертуру репродукционного объектива 15 (см. рис. 1).

Анализ экспериментальных данных показывает, что такие зоны неоднородности непосредственно связаны с отмеченными выше особенностями УВ. Так, неоднородность в ударно сжатом газе (на рис. 4,а обозначена кружком) приводит на поздней стадии развития ($t = 65 \text{ нс}$) к

образованию заметного выступа (рис. 4,б, отмечен кружком) перед фронтом сферической УВ. Сходная по структуре неоднородность (рис. 4,г, отмечена кружком) сопровождается возникновением конической УВ. При этом наиболее сильным коническим УВ, располагающимся вблизи оси греющего лазерного пучка, соответствуют более развитые зоны неоднородности, расположенные за фронтом сферической ударной волны.

Характерной особенностью зон неоднородности и фронта сферической УВ является внесение ими в зондирующий пучок искажений типа винтовых дислокаций. На интерферограммах с опорным пучком такие области визуализируются как расщепление интерференционных полос и представляют собой конечный результат превращения исходно гладкой когерентной волны в сложный топологический объект, содержащий локальные спиральные области [12]. Отметим, что подобные структуры возникают в спекл-искаженных полях при распространении лазерного пучка в турбулентной атмосфере.

Таким образом, в статье показано, что при разлете в остаточный газ плазмы, инициируемой излучением неодимового лазера с плотностью мощности на поверхности облучаемого объекта ($8 \cdot 10^{13} \div 8 \cdot 10^{16}$) Вт/см² и субнаносекундной длительностью импульса, кроме сферической ударной волны образуются конические УВ, которые образуются как вне, так и внутри области, занятой лазерными пучками, следовательно, их появление не связано непосредственно с неоднородным прогревом газа лазерным пучком. Однако при формировании гладкого распределения интенсивности в греющем пучке конические УВ локализируются в основном вблизи оси пучка. На поздней стадии развития сфериче-

ский волновой фронт приобретает сложную форму: наблюдаются выступы, значительно опережающие основную сферическую УВ. С помощью многокадровой интерферометрии показано, что некоторые из этих выступов представляют собой позднюю стадию развития конических УВ, и их не следует рассматривать как результат неустойчивости динамики сферических УВ.

1. Зорев Н.Н., Склизков Г.В., Шиканов А.С. // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. Вып. 4. С. 1104 – 1113.
2. Ананьин О.Б., Быковский Ю.А., Ступицкий Е.Л. и др. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2313–2316.
3. Ананьин О.Б., Быковский Ю.А., Еремин Ю.В. и др. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 7. С. 869–872.
4. Зорев Н.Н., Склизков Г.В., Шиканов А.С. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. Вып. 9. С. 421 – 424.
5. Васин Б.Л., Ерохин А.А., Зорев Н.Н. и др. // Труды ФИАН. 1983. Т. 133. С. 51 – 145.
6. Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н. и др. Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 26. 304 с.
7. Stamper J.A., Ripin V.H. // Phys. Fluids. 1988. V. 31. 11. P. 3353 – 3361.
8. Алексеев В.Н., Бордачев Е.Г., Бородин В.Г. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1984. Т. 48. № 8. С. 1477 – 1484.
9. Бородин В.Г., Горбунов В.А., Гулидов С.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1989. Т. 53. № 8. С. 1467–1473.
10. Бородин В.Г., Красов С.В., Шацев А.Н. и др. // Оптический журнал. 1996. № 12. С. 33 – 38.
11. Гурвич А.В. // ЖЭТФ. 1978. Т. 74. С. 539 – 552.
12. Бобров Б.Д. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 7. С. 886 – 890.

V.G. Borodin, V.M. Komarov, S.V. Krasov, V.A. Malinov, V.M. Migel, N.V. Nikitin, V.N. Chernov, A.V. Charukhchev. Structure of laser-driven blast wave expanding in an ambient gas.

Structure of laser-driven strong blast wave front expanding in a low-pressure ambient gas is investigated with multiframe interferometer. It is found that conical blast waves are produced along with spherical blast waves. At late stages of wave motion the conical waves appear as projections ahead on a spherical wave. It is shown that these projections are not immediately connected with hydrodynamical instability of spherical blast wave.