

СКОРОСТНАЯ НАНОСЕКУНДНАЯ ФОТОРЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕВИДИМОМ (УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ) СВЕТЕ С ПОМОЩЬЮ АЗОТНОГО ЛАЗЕРА. НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦУГА УДАРНЫХ ВОЛН

Г.А.Аскарьян, А.В.Юркин

Институт общей физики РАН

117942 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 августа 1993 г.

После переработки 30 августа 1993 г.

Описана простая и эффективная методика скоростной наносекундной фоторегистрации быстрых процессов, использующая самокороченные импульсы УФ света лазера на азоте. С ее помощью выявлены новые процессы в физике ударных волн: генерация цуга ударных волн в воздухе и в воде при пульсациях энерговыделения (колебания тока разрядного контура), позволяющая исследовать внутреннюю область ударной волны; направленное распространение ударных волн в потоке нагретого или легкого газа, отмечена возможность использования цуга ударных волн для эффективного отражения радио и светового излучения и т.п.

В физике ударных волн и высоких плотностей энергии есть много проблем, неисследованных и даже не поставленных из-за отсутствия быстрого и эффективного регистратора высокого разрешения.

1. Для фоторегистрации быстрых процессов в экспериментальной и прикладной физике обычно применяются в качестве источника коротких вспышек света лазеры с управляемой модулированной добротностью [1]. Мы использовали более простой способ получения коротких и ультракоротких вспышек – лазеры на самоограниченных переходах, дающих вспышки генерации только на фронте нарастания тока разряда [2–4] из-за самоограничений переходов вследствие нарушения условий генерации [2–4]. Наиболее интересным оказался лазер на азоте [2–4], дающий импульс ультрафиолета с длительностью $1 \div 10$ нс (в некоторых случаях до пикосекунд [2]) с длиной волны $\lambda = 337$ нм, оказывающего сильное фотографическое действие на фотоэмульсию, но слабо поглощаемого в воде, воздухе, плазме, кварце. Малая длина волны обеспечивает малые дифракционные искажения. Мы использовали один из самых маломощных азотных лазеров – ЛГИ-21 [4], дающий импульсы длительностью $\ll 10$ нс, с энергией $\simeq 1$ мкДж, расходимостью $3 \cdot 10^{-3}$ рад, импульсной мощностью $\simeq 1$ кВт, который может работать с частотой посылок $10 \div 100$ Гц и в режиме одиночных импульсов с внешним запуском. При малых частотах повторения в таких лазерах с продольной накачкой распределение излучения имеет кольцевой профиль, что не мешает использовать световоды с различными длинами для получения серии фотографий с интервалом $1 \div 10^3$ нс (в этом случае запуск быстрого регистрируемого процесса можно осуществить прямо от вспышки лазера), но для съемок напрямую в режиме одиночных импульсов желателен сплошной профиль луча. Его можно получить из трубчатого с помощью конденсоров из аксиконов или аксикона и простой линзы (в зависимости от степени расходимости формирования кольцевого распределения), вырезать часть излучения из кольца или вырезать с помощью шторного затвора один – два импульса из установившихся посылок лазера, имеющих

хорошее распределение. В этом случае можно осуществить запуск исследуемого процесса от импульса накачки, от лазерного импульса (и далее – в режиме дробления луча для покадровых съемок) или от предыдущего лазерного импульса с необходимой задержкой. Отметим, что для лазеров с поперечной накачкой образуется сплошное распределение интенсивности.

Для регистрации наших задач мы избрали более простой путь: обнаружив, что вблизи лазера кольцевой луч еще не сформировался и распределение интенсивности близко к однородному, мы поместили вблизи лазера линзу, цель которой была не только сделать луч более однородным, но и увеличить площадь, освещаемую лучом.

Отметим попутно возможность визуализации или фотографирования многократно повторяемого процесса в свете люминесценции экрана (например, сильно люминесцирует бумага) для многократно повторяемого процесса на частотах вспышек, дающих однородное распределение (например, 100 Гц), идущих с нужным запаздыванием.

2. Для исследования ударных волн в воздухе и воде использовался искровой разряд между электродами. Параметры разрядного контура подбирались так, что можно было получить быстрое многократное энерговыделение.

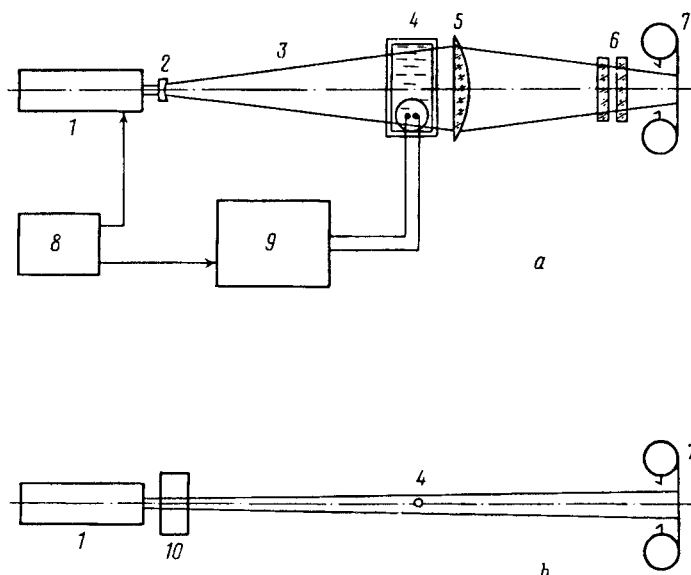


Рис.1. Схема установки для регистрации ударных волн с помощью азотного лазера: *a* – 1 – лазер ЛГИ-21, 2 – линза с фокусным расстоянием $F = 10$ см, 3 – луч лазера, 4 – исследуемый объект (кювета с жидкостью с искровым разрядником или газовый слой над искровым разрядником и над горелкой), 5 – линза с фокусным расстоянием $F = 25$ см, 6 – фильтры для защиты открытой пленки от света искры, дневного света и ослабления света лазера, 7 – фотоаппарат без объектива, 8 – схема задержки, запускающая лазер, 9 – блок запуска схемы задержки и поджига, и питания искры; *b* – то же для вырезания импульсов из последовательности вспышек лазера с однородным распределением, 10 – затвор для вырезания импульса луча лазера

На рис.1 дана схема установки. Лазер 1 через линзу 2 с фокусным расстоянием 10 см давал луч 3, который "освещал" (видимость по люминесценции)

на расстоянии 1,5 м зону искрового разрядника площадью 6×6 см, после чего поджимался линзой 5 с фокусным расстоянием 25 см прямо на пленку фотоаппарата 7, помещенного на расстоянии 50 см от поля ударных волн. (Применение объектива нежелательно из-за поглощения УФ стеклянными линзами и клейками). Перед фотоаппаратом помещались фильтры (УФС) для отсеки видимого света, ослабления излучения искры и ослабления лазерного излучения. Сигнал с управляющего блока 8 поджигал блок 9 разряда искры и запускал схему задержки 8, которая через нужное время включала лазер.

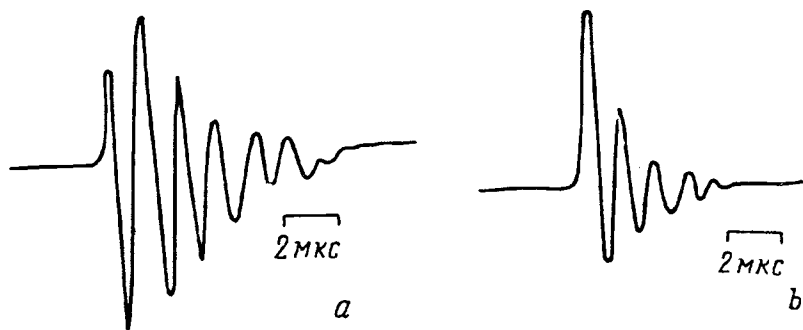


Рис.2. Осциллограмма разряда с пояса Роговского: *a* – разряд в воздухе, *b* – разряд в воде

Разрядный ток искры регистрировался поясом Роговского с собственной индуктивностью несколько мкГн и емкостью (подводящего кабеля и входной осциллографа) порядка 100 пФ. Емкость разрядного конденсатора 0,05 мкФ, напряжение 10 кВ, запасенная энергия 2,5 Дж. На рис.2 даны осциллограммы тока по показаниям пояса Роговского: *a* – для разряда в воздухе, *b* – для разряда в воде.

Уже первые снимки опережения ударной волны, вошедшей в трубу, ударной волны, шедшей вне трубы (рис.3 *a* – искра на расстоянии 0,5 см от входа в трубу длиной 2 см и диаметром 6 мм, показали высокое разрешение и четкость снимков, что связано не только с качеством излучения, но и с отсутствием люминесценции фотопленки. Эти качества методики позволили выявить следующие новые эффекты и новые направления современной газогидродинамики.

Обнаружение внутренней структуры ударных волн, связанной с пульсацией энерговыделения (см. рис.3 *b, c, d*). Это явление раздвигает рамки таких простых решений, как однократный точечный взрыв, и позволяет исследовать распространение ударных волн внутри ударных волн, получая новую информацию о внутренних процессах внутри ударной волны. Отметим, что такое зондирование внутренней области весьма ценно, так как простейшие решения получены в предположении постоянства адиабаты, что явно нарушается в сильных ударных волнах, содержащих внутри себя гетерофазные области (зону огненного шара, зоны сильного колебательного возбуждения, ведущих себя аномально, когда по ним проходит новая ударная или сильная звуковая волна, которая может являться не только подпитывающей основную, более сильную, но и зондирующей ее внутренние параметры). Эксперимент показал, что, вопреки ожиданиям, вторичные волны не догоняют первую, а движутся

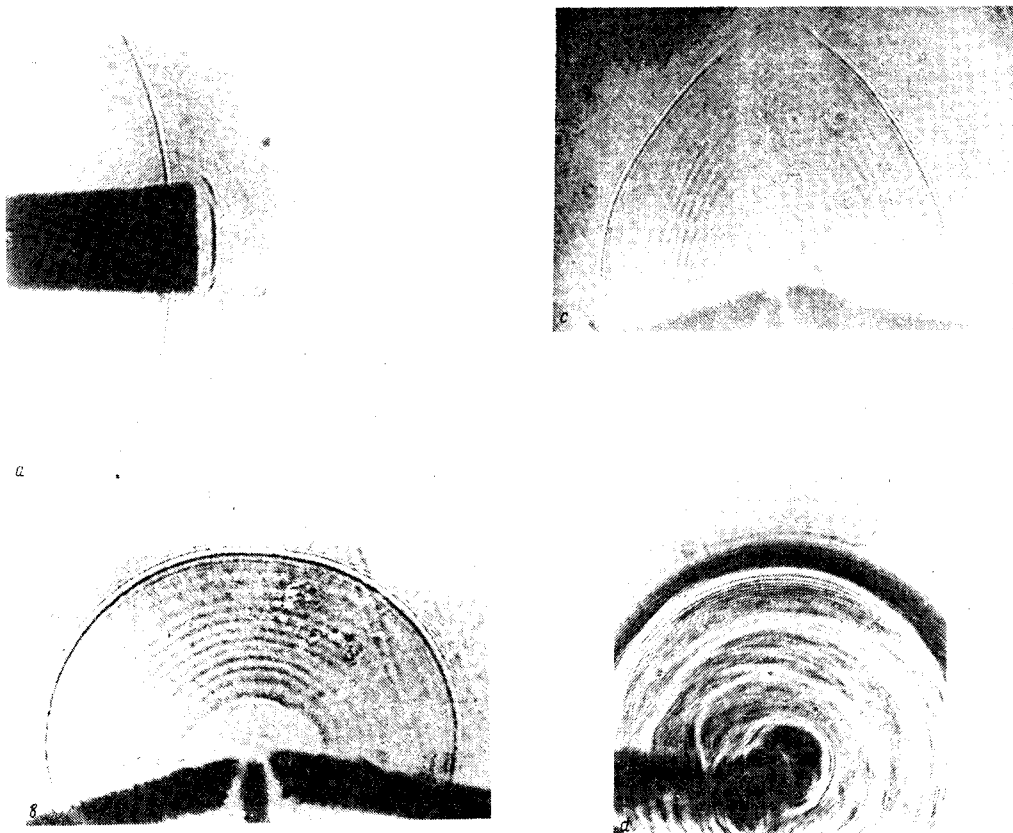


Рис.3. Мгновенные снимки ударных волн: *a* – ударная волна, падающая на трубку, выходит из нее раньше, чем ударная волна, идущая вверх трубы. Задержка съемки 30 мкс; *b* – цуг ударных волн от пульсирующего взрыва от токовых колебаний в разрядной цепи искры в воздухе. Масштаб – толщина электродов 2 мм. Задержка 30 мкс; *c* – ударная волна внутри пламени свечи. Видна направленность распространения ударной волны по пламени. Задержка 10 мкс; *d* – ударная волна от искры в воде. Видна генерация цуга волн. Задержка 3 мкс

почти эквидистантно, во всяком случае на рассматриваемых расстояниях.

Обнаружение направленности распространения ударных волн по восходящей струе горячего от пламени (или более легкого) газа (рис.3*c*) открывает широкие возможности исследования этого явления для различных потоков, скоростей движения при инъекции затопленных или конвекционных струй нагретого или более легкого газа. Исследования проводились в пламени свечи, и была обнаружена четкая вытянутость фронтов ударных волн по пламени свечи.

Был исследован также цуг ударных импульсов в воде (рис.3*d*); расстояние между ударными волнами весьма близко к расстоянию, проходимому сильным звуком за пол-периода осцилляции.

Цуг ударных волн представляет интерес и как объект, вызывающий сильное рассеяние радиоволн или света из-за высокой интенсивности отражения и рассеяния скачками высокой плотности и резкостью границ (напомним, что в сильных ударных волнах повышение плотности в слое сжатия доходит до плот-

ности $\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}\rho_0$, где γ – показатель адиабаты и ρ_0 – начальная плотность газа, что во много раз превосходит уплотнения в звуковых волнах, где $\Delta\rho \ll \rho_0$). Это может быть использовано для регистрации и анализа цуга, ретрансляции радиоволн сеткой волн сжатия от пульсирующих СВЧ разрядов, создаваемых на высоте. Отметим возможность многократного (в том числе резонансного) усиления ограждения при совпадении фаз отражения.

Особо выделяются возможности усиления воздействия цуга ударных волн из-за возможности подбора резонанса раскачки колебаний и осыпи сред, подвергаемых деструкции, что существенно при литотрипсии, обработке и других процессах.

Исследование и применение цуга ударных импульсов только начинается и избранный нами способ генерации – пульсирующий искровой разряд в воздухе и в воде- и методика регистрации могут быть весьма полезны.

В заключение авторы выражают благодарность Н.П.Дацкевичу за полезные советы по азотному лазеру.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-02-15438).

-
1. А.С.Дубовик, Фотографическая регистрация быстротекущих процессов, изд. 3-е, ч.4, гл.20. М.: Наука (1984).
 2. О.Звелто, Принципы лазеров, изд. 3-е, М.: Мир (1990).
 3. К.И.Крылов, В.Т.Прокопенко, В.А.Тарлыков. Основы лазерной техники. Л.: Машиностроение (1990).
 4. В.В.Кюн, В.Г.Самородов, Ю.М.Толкунов, Импульсно-периодические азотные лазеры, Обзоры по электронной технике, сер. II, вып. 2, с.1437 (1989).