

Ю. Ю. Протасов, В. В. Христофоров

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РЕГИСТРАЦИИ ОПТОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНДЕНСИРОВАННЫЕ МИШЕНИ

*Описаны разработанный экспериментальный комплекс и экспериментальный метод безконтактного измерения амплитудно-частотных характеристик и микроперемещений облучаемых лазерным излучением твердотельных мишеней в условиях импульсных или квазистационарных нагрузок в вакууме. Приведены экспериментальные оптомеханические характеристики, полученные с использованием разработанного измерительного комплекса, количественно описывающие динамику лазерных воздействий микроньютонового диапазона механических импульсов на конденсированные мишени при лазерной абляции и позволяющие оценить эффективность преобразования энергии лазерного излучения в кинетическую энергию ускоренных газово-плазменных потоков.*

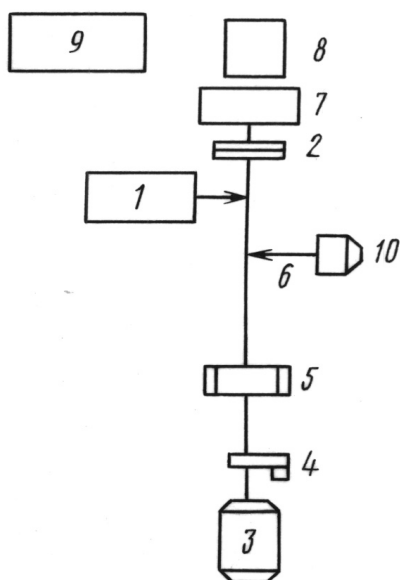
При исследовании спектра колебаний и деформаций элементов узлов машин и агрегатов в условиях многофакторных лучевых воздействий, измерении оптомеханических характеристик импульсных (или квазистационарных) лазерных и плазменных инжекторов, ускорителей и т.д. [1] часто необходимы измерения перемещений изделий  $\Delta x \approx 10^{-2} \dots 10^{-4}$  мм при частотах колебания до  $10^4$  Гц в вакууме. Известные методы контактного измерения малых отклонений (микрометрические винты, различные электромеханические индикаторы [2]) обладают низкой чувствительностью, инерционны (разрешающая частотная способность  $\sim 10-100$  Гц) и не позволяют регистрировать скорость микроперемещений изделий, а методы безконтактного оптического измерения в вакуумных условиях требуют применения сложной и громоздкой аппаратуры (интерферометров больших оптических полей с временной регистрацией в зоне воздействия и т.д.). Так, значительную сложность представляет измерение малых перемещений облучаемых аблирующих мишеней и их скорости в микро-наноньютоновом диапазоне механических импульсов в условиях лазерного воздействия в вакууме [3-5].

**Диагностическая аппаратура и экспериментальный метод.** Цель исследований, отраженных в настоящей работе, состояла в разработке такого метода бесконтактного измерения малых перемещений конденсированных мишеней и скорости изменения этих перемещений в

вакууме при импульсном лазерном воздействии, который позволял бы регистрировать амплитудно-частотные характеристики перемещения изделия ( $\Delta x \approx 10^{-3}$  мм) с частотой в сотни килогерц. Для регистрации малых перемещений изделия в вакууме при импульсных и частотных (импульсно-периодических) воздействиях была предложена теплеровская схема регистрации с временной разверткой поля визуализации в атмосферных условиях, содержащая лазерный зонд (рис. 1).

В месте измерения перемещения на изделии 1 жестко закрепляется в плоскости отклонения пластинка с острой передней кромкой, на которую фокусируется с помощью фокусирующего объектива 5 луч газового лазера 3. В зависимости от экспериментальных условий и спектральной чувствительности оптических приемников в диагностическом комплексе используются высокостабилизированные по частоте газоразрядные лазеры видимого диапазона — гелий-неоновый ( $\lambda_r \approx 0,6328$  мкм) и гелий-кадмиевый ( $\lambda_r \approx 0,4416$  мкм) лазеры типа ЛГ-126, ЛГ-416, работающие в режиме одномодовой генерации излучения с пятном в фокальной плоскости объектива, имеющим размер  $\sim 10\lambda_r$ . Модулированный прерывателем 4 лазерный луч через интерференционный светофильтр 2 попадает на коллимированный фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 7, максимум спектральной чувствительности которого принадлежит области спектра излучения лазера, усиливается широкополосным усилителем 8 и регистрируется осциллографом или цифровым прибором 9 (в зависимости от частотного диапазона измеряемых колебаний).

Для увеличения отношения сигнал/шум фотоэлектронного приемника или ФЭУ тракт светового луча экранируется световодом, и схемы питания ФЭУ высокочастотного усилителя и измерительных приборов



**Рис. 1.** Схема тягово-измерительного комплекса для регистрации малых перемещений:

1 — изделие; 2 — интерференционный светофильтр, 3 — газовый лазер (с длинами волн  $\lambda_1 \approx 6328 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_2 \approx 4416 \text{ \AA}$ ); 4 — дисковый прерыватель; 5 — фокусирующий объектив; 6 — нож Фуко; 7 — фотоприемник; 8 — широкополосный усилитель; 9 — осциллограф; 10 — пьезомикрометрическая платформа (датчик)

электрически разделяются. Измерение производится следующим образом: световой луч газового лазера фокусируется на острую кромку пластины, а перемещение пластины вызывает изменение светового потока  $I_{\text{св}}$ , регистрируемое ФЭУ с временной разверткой  $I_{\text{св}}(t)$ .

Регистрируемый сигнал представляет собой функцию амплитуды измеряемого отклонения во времени. Для определения величины отклонения в единицах длины и частоты колебания перед измерением производится тарировка измерительной схемы, которая заключается в следующем. Зондирующий луч лазера 3 фокусируется объективом 5 на кромку ножа Фуко 6, имеющего подвижку с помощью пьезомикроинтента 10 в соответствующих плоскостях. Изменяя положение ножа Фуко, изменяют амплитуду сигнала на регистрирующем приборе 9, определяют изменение амплитуды  $A_c$  сигнала фотоприемника в зависимости от перемещения  $\Delta\xi$  ножа Фуко и строят зависимость  $A_c$  от  $\Delta\xi$ . Для получения тарировочной кривой лазерный луч модулируется прерывателем 4 (механическим или электрооптическим) с частотой, близкой к частоте исследуемых колебаний. Допустимая разница частот определяется линейностью частотной характеристики усилителя осциллографа. Для частотного диапазона  $10^2 \dots 10^4$  Гц в качестве модулятора зондирующего излучения используют дисковый прерыватель с несколькими сотнями отверстий, имеющих размер, приблизительно равный диаметру коллимированного входа фотоприемника, который приводится во вращение высокооборотным электродвигателем или гелиевой микротурбиной.

Для обеспечения максимальной чувствительности схемы перед измерением лазерный луч фокусируется на кромку пластины таким образом, чтобы амплитуда сигнала, регистрируемого ФЭУ, соответствовала середине линейного участка тарировочного графика  $A_c(\Delta\xi)$ , при этом производится измерение и определяется отклонение (перемещение  $\Delta\xi$ ) по тарировочной кривой в единицах длины, так как при измерении частоты колебаний изделия для регистрации  $I_{\text{св}}(t)$  используется высокочастотный осциллограф и регистрируемый частотный диапазон ограничивается только полосой пропускания осциллографа ( $10^3 \dots 10^8$  Гц) и усилителя. Таким образом, описанный метод позволяет измерять отклонения  $\Delta x \approx 10^{-3}$  мм с частотой порядка килогерц (что определяется диаметром сфокусированного лазерного зондирующего луча, качеством фокусирующей оптики и изготовления острой кромки пластины). Разработанный метод позволяет решать как прямую оптомеханическую задачу (измерение перемещений при фиксированном силовом воздействии на изделие), так и обратную (получение количественных

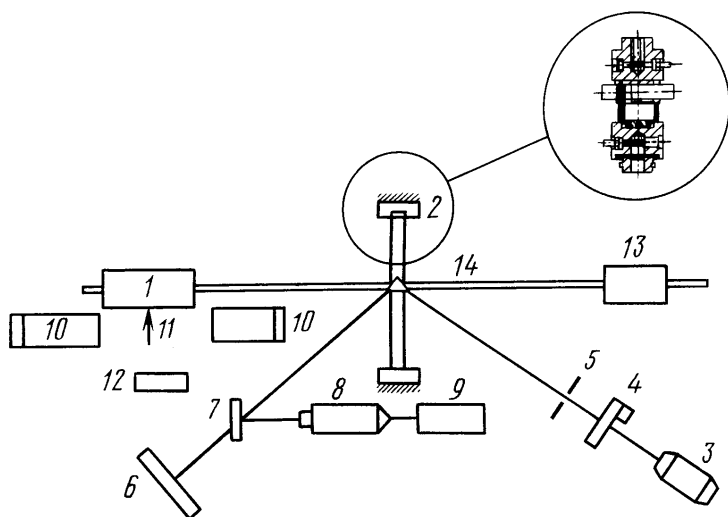
характеристик воздействия: его силы, импульса и т.д. при известных перемещении или скорости перемещения изделия).

Для тарировки измерительного комплекса (в координатах силы, импульса, воздействия, перемещения) в условиях импульсно-периодических воздействий микроньютонового диапазона использовалась оптомеханическая схема, представленная на рис. 2. Исследовалось перемещение диэлектрической мишени (изготовленной из полиформальдегида  $(\text{CH}_2\text{O})_n$  и имеющей массу 3,7 г) при фокусировке на ее поверхность мощного лазерного излучения (с параметрами  $E_{\text{и}} \approx 10^3$  Дж,  $t_{\text{и}} \approx 10^{-4}$  с), реактивном импульсе отдачи при светозероэрозии (лазерной абляции) мишени и разлете ее паров в вакууме. Угловое перемещение мишени  $I$ , установленной на крутильных весах 2 с торсионным подвесом, определялось при регистрации угла отклонения зондирующего лазерного коллимированного пучка, отраженного от зеркала 14 на оси весов. Среднемассовая скорость разлета паров мишени ( $\bar{v} \approx 10^5$  см/с) определялась с помощью голографического интерферометра 10 по методике, изложенной в работе [3]. Масса аблирующей мишени до и после импульсного лазерного воздействия определялась взвешиванием для количественного определения зависимости микроперемещения облучаемой мишени от динамических характеристик лазерного воздействия.

Выполненный анализ методических и аппаратурных погрешностей регистрации оптомеханических характеристик с использованием разработанного экспериментального метода показывает, что возможно определение микроперемещений мишеней и характеристик удельных механических импульсов отдачи в микро–наноньютоновом диапазоне с точностью 25–30 % в вакуумных условиях и 15–20 % в газовых средах конечного давления.

Как известно, при взаимодействии лазерного излучения с конденсированными мишенями в вакууме или газовой среде происходит испарение мишени и разогрев пара, а также прилегающих к мишени слоев газа до высокой температуры. В результате у поверхности мишени возникает область повышенного давления, в которой вещество приходит в газодинамическое движение и сообщает мишени механический импульс.

Наиболее информативной характеристикой оптомеханического взаимодействия и показателем эффективности преобразования лазерного излучения в кинетическую энергию газово-плазменных потоков аблирующей мишени является удельный механический импульс давления отдачи, определяемый следующим образом:  $C_{\text{м}} = P_0/I_0 = J/E_{\text{л}}$



**Рис. 2. Оптомеханическая схема тарировки измерительного комплекса:**

1 — изделие (мишень); 2 — крутильные весы с торсионным подвесом; 3 — зондирующий газовый лазер ЛГ-175; 4 — модулятор (прерыватель); 5 — коллимирующие диафрагмы; 6 — шкала угловых перемещений; 7 — светоделительная пластина; 8 — фотоприемник; 9 — осциллограф; 10 — голографический интерферометр на базе оптического стола УИГ-1М; 11 — силовой лазер ГОС 1001М; 12 — фокусирующая оптика; 13 — противовес; 14 — зеркало

[дин/Вт], где  $P_0$  — давление на облучаемой мишени, Па;  $I_0$  — интенсивность лазерного воздействия, Вт/см<sup>2</sup>;  $J$  — полный импульс передаваемой мишени, дин·с;  $E_{л}$  — энергия лазерного импульса, Дж. Отметим, что в условиях многофакторного импульсного лазерного воздействия на конденсированные мишени в вакууме экспериментальное определение удельного механического импульса отдачи (оптомеханического параметра воздействия  $C_M$ ) представляет особый интерес. На рис. 3, 4 представлены зависимости удельного механического импульса отдачи  $C_M$  для аблирующих мишеней, изготовленных из материалов  $(C_2F_4)_n$  и  $CsI+(CH_2)_n$ , от плотности энергии лазерного излучения  $E_{л}/S_0$  (плотности максимального потока мощности  $I_{0max}$ ) и давления  $P$  среды, окружающей мишень. Для сравнительной оценки механического импульса, сообщаемого ударной волной плоской и профилированной мишеням, использована зависимость  $C_M \approx f(E_0/S_0, I_0)$ , полученная на основании теоретической модели сильного сферически симметричного точечного взрыва. При этом предполагалось, что энергия этого взрыва равна измеренной в эксперименте энергии «лазерного взрыва» [5]. Это предположение позволяет объяснить наблюдаемую зависимость удельного механического импульса отдачи  $C_M$  от плотности энергии лазерного излучения  $E_{л}/S_0$ .

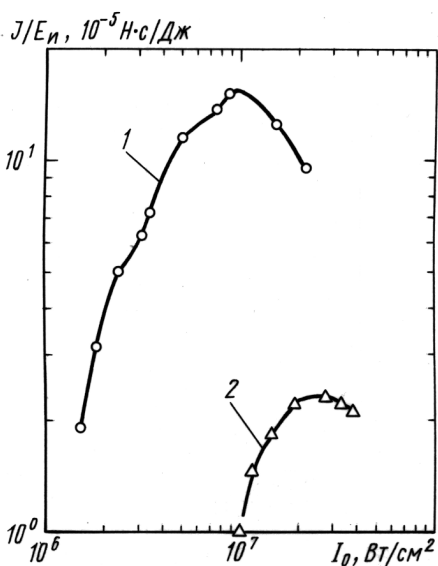


Рис. 3. Зависимость удельного механического импульса отдачи от плотности мощности лазерного импульса для плоских мишеней:

1 — диэлектрической ( $C_2F_4$ )<sub>n</sub>, 2 — металлической (Al)

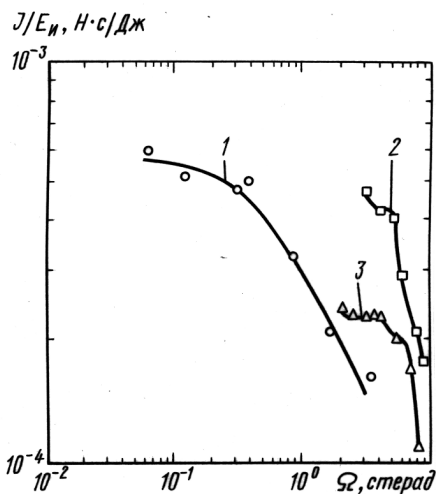


Рис. 4. Зависимость удельного механического импульса отдачи от телесного угла  $\Omega$  для профилированных мишеней:

1 — параболической, 2 — полусферической, 3 — конической

Оценки удельного механического импульса для сильного плоского «лазерного взрыва» близки к измеренным значениям  $C_M$  при регистрации полного механического импульса.

Описанные метод измерений и диагностический оптомеханический комплекс используются для стендового определения удельного импульса, механического импульса отдачи и скоростных характеристик импульсных лазерных ускорителей [5, 6], работающих с частотой повторения импульсов, и позволяют надежно измерять отклонения изделий  $\Delta x \approx 10^{-2} \dots 10^{-3}$  мм с рабочей частотой в десятки герц. Отметим, что данный диагностический метод и его приборная реализация позволяют также измерять микроперемещения и амплитудно-частотные характеристики объектов в микро–наноньютоновом диапазоне воздействия в изолированных от измерительного комплекса объемах и средах (т.е. в вакууме, камерах высокого давления, оптически прозрачных жидкостях и т.д.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р а д и а ц и о н н а я плазмотермика / Под ред. Ю.С. Протасова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 840 с.
2. В а с и л ь е в Л. А. Теневые методы. – М.: Наука, 1968. – 480 с.

3. Протасов Ю. С., Протасов Ю. Ю. Об эффективности двухкаскадного ускорения активных сред космических лазерных микродвигателей // Докл. РАН. – 2002. – Т. 387. – № 5. – С. 98–101.
4. Протасов Ю. С., Протасов Ю. Ю. Спектрально-яркостные характеристики приповерхностной лазерной плазмы аблирующих полимерных мишеней // Журнал прикладной спектроскопии. – 2003. – Т. 70. – № 1. – С. 58–62.
5. Protasov Yu. Experimental Research of Laser Thruster // AIAA. – № 2000-4417.
6. Протасов Ю. Ю., Семенов А. М. О коэффициенте отражения лазерного излучения светоэрозионных мишеней в вакууме // Журнал прикладной спектроскопии. – 2003. – Т. 70. – № 3. – С. 114–119.

Статья поступила в редакцию 09.04.2004

Юрий Юрьевич Протасов — д-р техн. наук, доцент кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области фотонной энергетики.

Yu. Yu. Protasov — D.Sc. (Eng.), assoc. professor of “Gas-Turbine and Non-Traditional Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of photon power-engineering.

Владимир Владимирович Христофоров — научный сотрудник объединенного УНЦ фотонной энергетики. Автор более 20 научных работ в области оптики конденсированных сред.

V.V. Khristoforov — researcher of United Center for Photon Power-Engineering. Author of more than 20 publications in the field of optics of condensed media.

---

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла из печати книга**

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

Учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов  
и др. Под ред. В.Н. Рождествина. – 2002. – 528 с. (в пер.)

Книга состоит из двух частей – “Лазерные оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды” и “Пассивные оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды”. В части I изложены физические основы лазерного зондирования, принципы построения лидарных систем экологического мониторинга и приведены примеры лидарных систем экологического мониторинга. Часть II посвящена физическим основам пассивного оптического контроля, принципам организации систем спутникового экологического мониторинга и построению пассивных оптико-электронных приборов дистанционного контроля окружающей среды. Приведены примеры спутниковой оптико-электронной аппаратуры для экологического мониторинга природной среды. Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который читают авторы в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов, обучающихся по направлению “Оптехника”, а также для научных и инженерно-технических работников приборостроительного профиля.

По вопросам приобретения обращаться по тел. 263-60-45;

e-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)