

## **О верификации методов определения импульса отдачи в микронаноньютоновом диапазоне при лазерной абляции твердотельных мишеней**

© В.И. Захаров, Е.Ю. Локтионов, Ю.С. Протасов, Ю.Ю. Протасов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Россия

*Выполнен сравнительный анализ методов экспериментальной регистрации оптико-механических характеристик, в том числе малых и сверхмалых импульсов отдачи ( $I_M \sim 10^{-12} \dots 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с}$ ) при взаимодействии мощного лазерного излучения ( $I_0 \sim 10^5 \dots 10^{15} \text{ Вт/см}^2$ ) с твердотельными мишенями. Обсуждаются области применения, чувствительность, пространственная и временная разрешающая способность, сложность инструментальной реализации этих диагностических методов, а также взаимное соответствие результатов, полученных с их использованием.*

**Ключевые слова:** лазерная абляция, удельный механический импульс отдачи, нано- и пиконьютоновый диапазон, экспериментальные методики.

**Введение.** Для регистрации оптико-механических характеристик при лазерной абляции используется ряд методов, регистрирующих непосредственно механический импульс (баллистические [1] и торсионные [2] маятники, метод комбинированной интерферометрии [3]), силу (тензоэлектрические [4] и МЭМС-датчики силы и момента) и давление (пьезоэлектрические датчики [5]) отдачи на поверхности аблирующей мишени, возникающие в результате генерации светоэрозионного паро-газоплазменного потока. Данные об эффективности генерации импульса отдачи важны для разработки технологий лазерно-плазменных инжекторов [6], ускорителей [7] и двигателей [8], установок лазерного термоядерного синтеза [9], а также для понимания процессов лазерной абляции в целом [10]. Особенностью большинства применяемых динамических методов определения импульса отдачи является необходимость их калибровки. Корректность процедуры калибровки может оказать существенное влияние на достоверность получаемых результатов [11]. Следует также отметить, что при использовании в одном эксперименте двух различных методов регистрации импульса отдачи результаты могут существенно различаться [12].

Необходимость стандартизации методов измерения (оценки) удельного механического импульса отдачи назрела давно, поэтому в работе международного коллектива авторов [13] внимание уделено прежде всего стандартизации понятий, относящихся к описанию режимов лазерного воздействия (длительность и энергия импульса излучения, площадь пятна фокусировки), а о методах регистрации результатов воз-

действия (импульс отдачи, массовый расход абляции) упоминается вскользь. Широкий диапазон энергомощностных и импульсно-периодических режимов лазерного воздействия ( $I_0 \sim 10^5 \dots 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>) не позволяет остановиться на каком-либо одном методе.

Особенностью таких измерений является и то, что для дальнейшего анализа [14] полученный результат нормируется на величину подведенной энергии лазерного излучения, а не поглощенной или непосредственно затраченной на абляцию, что оправданно при техническом анализе. Энергия, затраченная на абляцию, с учетом спектрального коэффициента отражения  $R$  (для ряда веществ  $R \sim 0,95$  и более) и рассеяния тепловой энергии в объеме мишени (доля рассеянной энергии даже при фемтосекундном воздействии может приближаться к единице [15]), т. е. энергия лазерного излучения, затраченная непосредственно на генерацию механического импульса, может быть значительно меньше подведенной, что существенно для физического анализа процессов.

Цель данной работы — экспериментальный сравнительный анализ известных методов регистрации оптико-механических характеристик лазерной абляции твердотельных мишеней с точки зрения чувствительности, области применения, сложности реализации, достоверности и взаимного соответствия получаемых результатов.

**Краткий обзор методов регистрации импульса отдачи.** Баллистические маятники используются для определения полного механического импульса, сообщенного мишени, путем регистрации максимального угла отклонения маятника. Строго говоря, баллистически называются маятники, взаимодействующие с некоторой массой (например, пулей, снарядом), в то время как в случае лазерной генерации тяги корректнее говорить об импульсных маятниках. Как правило, жесткий подвес таких маятников располагается вертикально и для уменьшения трения опирается на основание игольчатыми или бритвенными ножками [12]. Значительно реже используются подпружиненные маятники с горизонтальным коромыслом [16].

Хотя физические маятники обладают пространственно неоднородным распределением массы, для малых колебаний принимается следующее допущение о величине момента инерции  $I_\Omega$ :

$$I_\Omega = m_p g_0 l_c \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2,$$

где  $m_p$  — масса маятника;  $g_0$  — ускорение свободного падения;  $l_c$  — расстояние от оси вращения до центра масс;  $T$  — период колебаний. Как правило, импульс (сила  $F(t)$ ) сообщается в точке маятника, не совпадающей с его центром масс, а отстоящей на некотором расстоянии  $r_c$ , что приводит к возникновению момента  $\tau_p$ , а следовательно, и

углового ускорения; в конечном итоге маятник отклоняется на некоторый угол  $\theta$ :

$$F(t)r_p = \tau_p = I_\Omega \ddot{\theta}(t).$$

Интегрируя это выражение по времени, получают значение полного импульса:

$$I_M = \frac{I_\Omega \dot{\theta}(0)}{r_p}.$$

Исходя из закона сохранения импульса и пренебрегая силами сопротивления, можно записать, что суммарная кинетическая энергия, сообщенная маятнику, равна потенциальной энергии маятника при его отклонении на максимальный угол  $\theta_{\max}$ :

$$\frac{1}{2} I_\Omega \dot{\theta}(0)^2 = m_p g_0 l_c (1 - \cos \theta_{\max}),$$

или

$$\dot{\theta}(0) = \sqrt{\frac{2m_p g_0 l_c}{I_\Omega} (1 - \cos \theta)}.$$

Таким образом, суммарный импульс

$$I_M = \frac{I_\Omega \dot{\theta}(0)}{r_p} = \frac{1}{r_p} \sqrt{2m_p g_0 l_c I_\Omega (1 - \cos \theta)} = \frac{m_p g_0 l_c T}{2\pi r_p} \sqrt{2(1 - \cos \theta)},$$

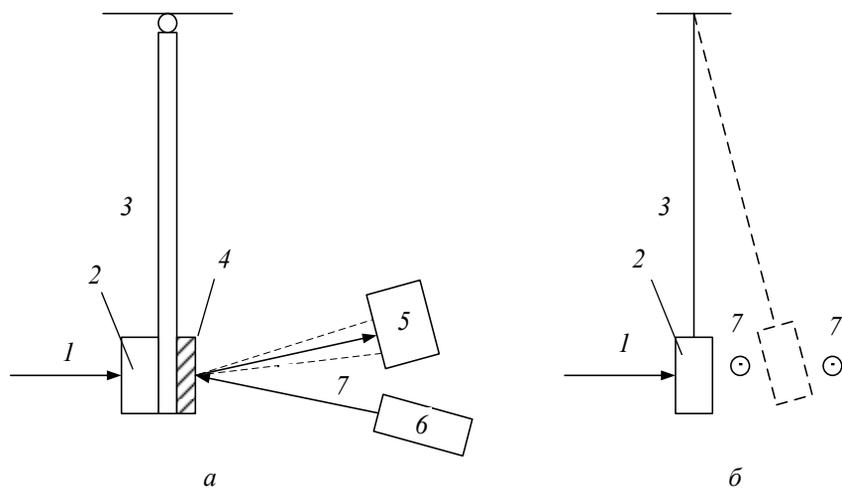
а удельный механический импульс отдачи определяется как

$$C_m = \frac{I_M}{E_L} = \frac{\sqrt{2m_p g_0 l_c I_\Omega (1 - \cos \theta)}}{r_p E_L} = \frac{m_p g_0 l_c T}{2\pi r_p E_L} \sqrt{2(1 - \cos \theta)}.$$

Для регистрации малых угловых отклонений маятника применяется геометрическая схема с отраженным лазерным лучом (рис. 1, а), используются также акселерометры [17] или датчики линейных перемещений [18] (например, вихревых токов [19], емкостные, индукционные, электромеханические [20]). Применение последних в сочетании с плазменными устройствами в [21] признано нежелательным из-за сильного искажения сигнала наведенным электромагнитным полем. В предположении малости колебаний  $D \gg d$  можно принять

$$\frac{d}{D} = \operatorname{tg} 2\theta_{\max} \approx 2\theta_{\max}.$$

Чувствительность современных баллистических маятников  $\Delta I_M \approx \approx 10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с}$  [12], при использовании методов интерферометрии для анализа колебаний баллистического маятника разрешение может быть увеличено до  $\sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ Н} \cdot \text{с}$  [22, 23]. Источником наибольшей ошибки при регистрации импульса является невозможность точного определения потерь на трение, особенно для многошарнирных систем [24].



**Рис. 1.** Схемы регистрации отклонения баллистического (а) и математического (б) маятников:

1 — воздействующее лазерное излучение; 2 — мишень; 3 — маятниковый подвес; 4 — зеркало; 5 — ПЗС-линейка или линейка фотодиодов; 6 — лазер; 7 — зондирующее лазерное излучение

Значительно реже применяются маятники с нежестким подвесом [25], в этом случае с использованием времяпролетной схемы (рис. 1, б) регистрируется непосредственно скорость мишени. С одной стороны, такая схема позволяет определить полный механический импульс, сообщенный мишени при лазерном воздействии, без необходимости учитывать потери на трение и ряд других погрешностей, свойственных баллистическим маятникам, с другой — требуется фокусировать излучение точно на оси системы, в противном случае часть энергии будет затрачена на вращение мишени вокруг подвеса, что внесет искажения и в результаты времяпролетных измерений.

В работе [26] применен маятник с плоской пружиной. Для анализа колебаний использовался двухпроходный интерферометр, чувствительность такой системы оценивалась в  $10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{с}$  при точности регистрации перемещения мишени 15,8 нм. Полученные результаты в сравнении с [2], где использовался торсионный маятник, оказались заниженными в 2 раза, что может быть обусловлено отличиями в характеристиках излучения и условиях лазерного воздействия.

Прямые траекторные измерения полета мишени или макета также могут быть использованы для определения оптико-механических характеристик лазерных систем генерации тяги [27–30]. Такой запуск может рассматриваться как частный случай импульсного маятника, однако получаемые результаты оказываются несколько больше, чем те, что регистрируются в аналогичных условиях с использованием маятника [27]. Вероятно, это объясняется отсутствием избыточных связей (ограничения степеней свободы). Хотя при такой схеме измерения регистрируется непосредственно импульс отдачи, сообщаемый мишени, даже для миллиграммовых тел энергия импульса излучения должна быть несколько десятков или даже сотни джоулей [31, 32].

Торсионный маятник (или крутильные весы), как известно, впервые был применен Ш. Кулоном в 1784 г. для исследования силы отталкивания одноименно заряженных тел. Силы электростатического взаимодействия чаще всего используются для калибровки этих приборов и в настоящее время [20, 33, 34], другие способы, например маятниковые ударники [35], применяются реже. Простейший вариант конструкции — вертикальная нить, на которой подвешен легкий уравновешенный рычаг. Измеряемые силы действуют на концы рычага и поворачивают его в горизонтальной плоскости до тех пор, пока не будут уравновешены силами упругости закрученной нити. По углу поворота рычага  $j$  можно судить о величине крутящего момента  $M_k$  действующих сил:

$$j \approx M_k l / (GI_\Omega),$$

где  $l$  — длина нити;  $G$  — модуль сдвига материала нити;  $I_\Omega$  — суммарный момент инерции рычага и нити. Высокая чувствительность маятника достигается применением достаточно длинной нити с малым модулем сдвига. Используются как унифилярные (одна нить), так и бифилярные (две нити — в случае больших импульсов) маятники [36]. Кроме очень тонких проволок (стальных, серебряных, золотых), используются стеклянные и кварцевые нити [10]; последние ломки, но хороши отсутствием упругого последействия.

Крутильные весы непригодны для измерения больших импульсов отдачи [37–44]. В случае приложения силы в плоскости, отклоняющейся от горизонтальной, индуцируются колебания в вертикальной плоскости, могут также возникать крутильные колебания рычага вокруг своей оси, что снижает точность измерений. Для уменьшения колебаний торсионных маятников используются жидкостные [37] или электромагнитные [45] демпферы. Для регистрации малых колебаний (под действием импульсов  $\sim 10^{-9}$  Н·с) применяют интерференционные схемы [46].

Наряду с преимуществом — простотой реализации, общим недостатком маятниковых систем является то, что с их помощью можно измерять только полный импульс отдачи без временного разрешения и при воздействии сравнительно коротких импульсов излучения, так как при воздействии длинных импульсов мишень уходит из плоскости фокусировки излучения за время лазерного воздействия. В связи с этим результаты импульсно-периодического воздействия (необходимого, например, для субмиллиджоульных лазерных импульсов) могут быть не совсем корректно интерпретированы, если отсутствует синхронизация лазерного воздействия с моментом прохождения мишенью плоскости фокусировки излучения или если частота следования импульсов выше полосы пропускания маятника [47].

Необходимо также уделять большое внимание виброизоляции измерительного стенда. Особенно актуальным это становится при проведении измерений в вакууме (при использовании насосов с подвижными частями). В атмосферных условиях необходимо учитывать и аэродинамические эффекты (конвективные потоки, сквозняки и др.). Кроме того, для осуществления повторного лазерного воздействия необходимо дожидаться затухания колебаний, вызванных предыдущим воздействием, что существенно увеличивает время эксперимента (для устранения этих эффектов используются масляные и магнитные демпферы). Возникают также сложности с переносом пятна фокусировки лазерного излучения на нетронутую область мишени без изменения механических характеристик маятниковой системы. Для решения этой проблемы мишень располагают на линейной или угловой подвижке, а маятник улавливает светозероизирующий поток с облучаемой поверхности [48, 49]. В этом случае, хотя измерение сообщаемого мишени импульса уже не является прямым, результаты очень хорошо согласуются с результатами, полученными при использовании, например, торсионного маятника [50].

Еще одним ограничением традиционных схем воздействия (когда лазерное излучение подводится в горизонтальной плоскости) является то, что при исследовании лазерной абляции жидкостей, если они не образуют тонкой пленки, их поверхность не вертикальна, она искажается под действием силы тяжести. Это приводит к отклонению вектора тяги от горизонтали, т. е. к получению недостоверных результатов, поэтому в данном случае следует использовать горизонтальное «коромысло» с противовесом [51, 52]. С помощью маятников, если не прибегать к специальным изменениям в конструкции [53], можно измерять только проекцию вектора тяги на ось системы. Однако в общем случае его тангенциальная составляющая может быть отлична от нуля, так же как и степень монохроматичности светозероизирующего потока (отношение суммы квадратов проекций векто-

ра скорости на главную ось к сумме квадратов скоростей) может быть существенно меньше единицы.

В настоящее время широко используются пьезоэлектрические датчики силы [5, 54, 55] и давления [56, 57], чувствительным элементом в них является кварцевая пленка. Под действием приложенной силы происходит перераспределение заряда в пьезокристалле, что приводит к возникновению ЭДС. Если электрические контакты присоединены к разным сторонам этой пленки, возникает ток. При прекращении воздействия происходит релаксация кристаллической решетки, что сопровождается затухающими колебаниями пьезоэлектрического сигнала. Особенностью пьезоэлектрических датчиков является то, что они могут регистрировать производную воздействующей силы по времени, этот эффект можно использовать для регистрации малых по амплитуде, но быстро нарастающих сил. Временная разрешающая способность таких датчиков составляет, как правило, несколько микросекунд, однако часто используются усилители сигнала, уменьшающие его на 1-2 порядка. В паспорте прибора собственная частота  $f_{fs}$  (при которой происходит его зашкаливание) указывается для ненагруженного состояния, а для известного случая нагружения определяется как

$$f_{fs} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{fs}}{m_{LM}}},$$

где  $k_{fs}$  — коэффициент упругости чувствительного элемента;  $m_{LM}$  — масса приложенной нагрузки.

Для улучшения временного разрешения разработаны специальные датчики силы, в которых два тонких кварцевых диска располагаются друг над другом в жестком корпусе из коррозионно-стойкой стали. Эластичный медно-бериллиевый штифт создает предварительную нагрузку на диски для выхода отклика на линейный участок и обеспечивает единство конструкции. Сила передается непосредственно на чувствительный элемент через специальную шайбу. В результате сжатия кристаллов генерируется заряд, пропорциональный силе. Регистрируется разность потенциалов между двумя пластинами. Положительная полярность такого сигнала соответствует сжатию, отрицательная — растяжению. Время нарастания пьезоэлектрического сигнала, как правило, специфицировано производителем или может быть оценено как  $\tau_{fs} \approx 0,35/f_{cfs}$  (где  $f_{cfs}$  — частота отсечки) и в основном зависит от толщины пленки пьезоматериала. Таким образом, временное разрешение пьезоэлектрических датчиков может быть меньше  $\Delta\tau \sim 10^{-7}$  с [58], тензоэлектрических —  $\Delta\tau \sim 3 \cdot 10^{-6}$  с [12], доступных на рынке МЭМС —  $\Delta\tau \sim 3 \cdot 10^{-5}$  с.

Большинство промышленно производимых датчиков поставляются калиброванными, однако их характеристики могут изменяться при жестком закреплении мишени, в вакууме и при температурах, отличных от комнатной. Для калибровки датчиков могут использоваться различные эталоны, например, математические маятники и маятниковые ударники [35]. Одним из способов калибровки является взаимодействие с шариками известной массы, бросаемыми с некоторой высоты (соответственно, можно рассчитать их импульс) [12], однако в этом случае следует учитывать отскок калибра (чувствительному элементу передается импульс меньше расчетного) [59]. В [12] выполнена экспериментальная поверка калиброванного по импульсу пьезоэлектрического датчика силы с использованием баллистического маятника. Результаты обоих экспериментов хорошо согласуются между собой. Чувствительность пьезоэлектрических и тензометрических датчиков силы для измерения импульса отдачи  $\Delta I_M \sim 10^{-6} \dots 10^{-5}$  Н·с. Теоретический предел разрешающей способности регистрации импульса отдачи пленочных органических пьезоэлектрических преобразователей и МЭМС-устройств стремится к  $\Delta I_M \sim 10^{-18}$  Н·с [60], однако экспериментальные работы, подтверждающие техническую возможность регистрации столь малых импульсов отдачи ( $I_M < 10^{-14}$  Н·с), отсутствуют.

Чаще всего мишень в экспериментах устанавливается непосредственно на датчик силы, но это не всегда возможно из-за особенностей вещества мишени и системы его подачи в рабочую зону, а также при использовании особо чувствительных датчиков. В этом случае их устанавливают таким образом, чтобы газоплазменный поток взаимодействовал с чувствительным элементом. Однако при воздействии в атмосферных условиях регистрируемый импульс существенно зависит от расстояния между датчиком и зоной лазерного воздействия [54]. Исследован вариант установки датчика силы за баллистическим маятником [61], но в этом случае измеренный импульс оказывается существенно (почти в 2 раза) большим, чем при установке мишени непосредственно на датчик силы и оценке импульса только с помощью маятника. Такая разница объясняется тем, что измеренное значение соответствует сумме импульса отдачи лазерной абляции и импульса маятника при отталкивании от чувствительного элемента датчика силы. Авторами работы [61] предполагается также, что различие показаний при установке на маятнике и вне его обусловлено некорректной работой датчика силы при ускорениях, сообщаемых системе, однако совпадение результатов измерений с использованием маятника и установленного на нем датчика силы позволяет предположить, что последний работает в этом случае корректно.

Оригинальный метод оптодинамической регистрации импульса отдачи предложен и исследован в [62, 63]. Он заключается в оптической регистрации (интерферометр Майкельсона с фотодиодной реги-

страцией) и анализе ультразвуковых колебаний, возникающих на торце металлического стержня при лазерной абляции. Временное разрешение такого метода составило  $\sim 10$  мкс, а чувствительность  $\sim 0,4$  мкН·с. К преимуществам этого метода относится отсутствие необходимости в калибровке, так как параметры колебательной системы определяются акустическими свойствами материала стержня и его геометрическими размерами.

Перечисленные методы имеют общий недостаток — невозможность дифференцированного анализа вклада тех или иных явлений (разлет ионизованных паров мишени [64], формирование и распространение ударной волны в буферном газе [2], медленный разлет продуктов фазового взрыва в объеме твердотельной мишени [65], детонация рабочего вещества [66] или смеси [67]) в формирование импульса отдачи, который может существенно изменяться в зависимости от регулировочных параметров и условий лазерного воздействия. Например, для устранения влияния лазерно-индуцированных ударных волн в буферном газе в [2] использовалась мишень с радиальным размером, сопоставимым с пятном фокусировки излучения, так как при воздействии ультракоротких импульсов лазерного излучения удельный механический импульс отдачи от ударной волны намного больше, чем от абляционного газоплазменного потока.

Фоторегистрационные методы [54, 55, 65, 68, 69] применяются, как правило, только для измерения скорости разлета светоэрозионного потока, причем в большинстве случаев с помощью этих методов, как и при использовании зондовых методов, определяются скорость ионизационного фронта, фронта волны поглощения и др., хотя средне-массовая скорость потока оказывается намного меньше (в качестве весовой функции распределения по скоростям может использоваться линейный коэффициент поглощения или концентрация электронов в локальном объеме). Методами фото-, шлирен- и тенерегистрации можно также определить угловое распределение частиц по скоростям [65] и степень монохроматичности светоэрозионного потока.

Результаты таких косвенных измерений могут существенно различаться у разных авторов при аналогичных условиях эксперимента. Значительно повысить чувствительность и информативность фоторегистрационных методов позволяют комбинированные схемы. Например, при одновременном получении интерферограмм поверхности облучаемой мишени и светоэрозионного потока [3, 70] импульс отдачи может регистрироваться с разрешением  $\Delta I_M \sim 10^{-12} \dots 10^{-11}$  Н·с, при этом определяются также массовый расход вещества мишени, распределение частиц по скоростям и средне-массовая скорость светоэрозионного потока.

Прямые измерения импульса отдачи могут быть проведены для тонкопленочных мишеней с использованием интерферометрической

схемы VISAR [26, 71, 72], с помощью которой регистрируются светоиндуцированные колебания поверхности мишени. Отличительными особенностями этой схемы являются широкий диапазон регистрируемых величин одиночных импульсов  $I_M \sim 10^{-9} \dots 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с}$ , практически не требующий перестройки системы, и высокое временное разрешение  $\Delta\tau \sim 10^{-8} \text{ с}$ . К недостаткам же относится сложность точного определения доли энергии, рассеиваемой в процессе колебаний, особенно при многократном воздействии на мишень, изменяющем ее механические свойства. При воздействии в атмосферных условиях значительный вклад в формирование импульса отдачи дают ударные волны, возникающие вследствие разлета абляционного газоплазменного потока. Оценки показывают, что удельный механический импульс отдачи в случае плоской мишени может достигать  $I_M \sim (4 \dots 6) \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с}$ , что значительно больше, чем аналогичный показатель для абляционных потоков в чистом виде. Фоторегистрационные методы, в отличие от всех остальных, позволяют оценить характеристики ударных волн (скорость, давление на фронте, энергию источника, импульс отдачи) с позиции теории сильного взрыва [73].

Для определения механического импульса отдачи скоростные измерения должны быть дополнены измерениями массового расхода вещества мишени, что с учетом чувствительности аналитических весов ( $\Delta m \sim 10^{-4} \text{ г}$ , в отдельных случаях  $\Delta m \sim 10^{-7} \text{ г}$ ) требует осреднения массового расхода по результатам нескольких (часто более 100) воздействий. Массовый расход вещества аблирующей мишени может быть также определен по данным механической [74] или оптической [75] профилометрии, электронной микроскопии [76] области воздействия с разрешением  $\Delta m \sim 10^{-8} \text{ г}$  и гравиметрии [77]. Чаще всего для измерения массового расхода используются *ex situ* методы, что весьма неудобно для исследования процессов в глубоком вакууме, так как требуется длительное время на откачку экспериментальной камеры после ее разгерметизации. Чтобы избежать таких неудобств, необходимо использовать либо гравиметрические кварцевые датчики, требующие сложной абсолютной калибровки и имеющие ограничение как по максимальному накопленному массовому расходу, так и по массе мишени, либо интерференционные методы [70] (для диффузно-отражающих, шероховатых поверхностей — спеклинтерферометрию [78]).

Для анализа доли рассеянной в объеме мишени энергии используются как контактные методы (калориметрия [79]), так и бесконтактные (радиометрия [80], пирометрия [81]), а для оценки доли поглощенной энергии — спектрофотометрия.

Результаты сравнительного анализа рабочего диапазона, чувствительности, временного разрешения и инструментальной сложности

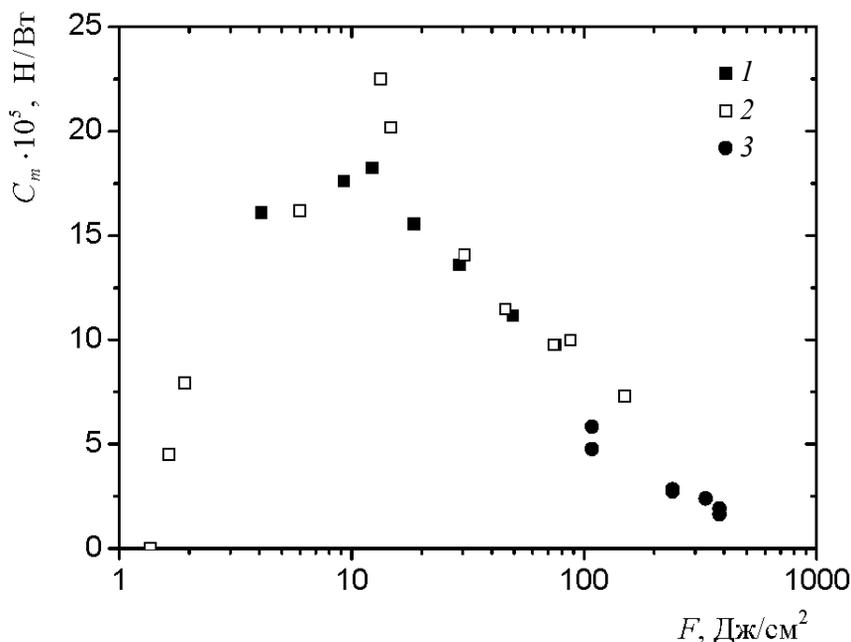
методов регистрации механического импульса отдачи при лазерном воздействии на твердотельные мишени представлены в таблице.

**Оценка величины рабочего диапазона  $I$ , чувствительности  $\Delta I$ , временного разрешения  $\Delta t$  и инструментальной сложности  $C$  (1 → 3 — простой → сложный)**

Метод	$I, \text{Н} \cdot \text{с}$	$\Delta I, \text{Н} \cdot \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$C$	Литература
Баллистический маятник	Более $10^{-5}$	$10^{-6} \dots 10^{-5}$ ( $3 \cdot 10^{-9}$ )	$10^{-2} \dots 10^{-1}$	1	[1, 12, 25] ([22, 23])
Торсионный маятник	$10^{-6} \dots 10^{-3}$	$10^{-6}$  ( $10^{-9}$ )	$10^{-2} \dots 10^{-1}$	1–2	[2, 10, 37–44] ([46])
Тензоэлектрический датчик	Более $10^{-5}$	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	1	[4, 12]
Пьезоэлектрический датчик	Более $10^{-5}$	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	$10^{-7} \dots 10^{-6}$	1–2	[5, 54–58]
Оптодинамический метод	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	2	[62, 63]
Комбинированная интерферометрия	$10^{-11} \dots 10^{-4}$	$10^{-12} \dots 10^{-10}$	$10^{-13} \dots 10^{-10}$	3	[3, 70]
VISAR	$10^{-9} \dots 10^{-3}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$	2	[26, 71, 72]
Косвенные измерения (скорость + массовый расход)	Более $10^{-5}$	$10^{-8} \dots 10^{-5}$	$10^{-7}$	1–2	[65, 74–76]

**Опыт применения методов регистрации импульса отдачи.**

Как указано в [13], отсутствие однозначности в описании условий проведения экспериментов и режимов лазерного воздействия сильно затрудняет сравнение данных, полученных разными авторами. Результаты верификации различных методов регистрации импульса отдачи крайне редко встречаются в научной периодике, однако такую работу нередко проделывают при написании диссертаций. Так, в [12] импульс отдачи при воздействии  $\text{CO}_2$ -лазера на полимерные мишени ( $I_M$  до  $8 \cdot 10^{-4} \text{Н} \cdot \text{с}$ ) измерялся с помощью баллистического маятника, пьезоэлектрических датчиков силы, калиброванных с помощью металлических и полимерных сфер, сбрасываемых с различной высоты (рис. 2), и фоторегистрации динамики разлета газоплазменного потока в комбинации с *ex situ* измерением массового расхода абляции. Результаты этих измерений хорошо согласуются между собой.



**Рис. 2.** Результаты оценки удельного механического импульса отдачи при воздействии  $\text{CO}_2$ -лазера на  $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ -мишени:

1 — баллистический маятник [12]; 2 — пьезоэлектрический датчик силы [12];  
3 — флажковый маятник [50]

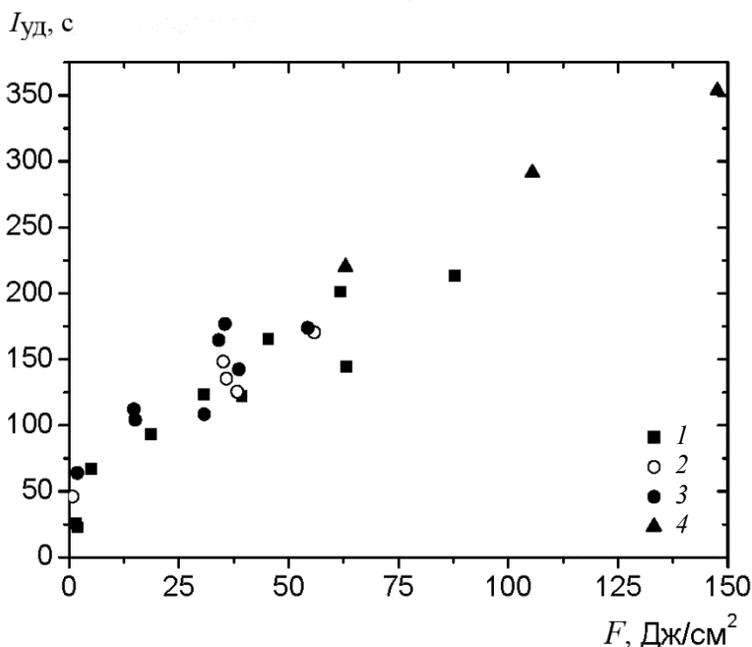
В [69] выполнено сравнение результатов оценки удельного импульса (скорости разлета газоплазменного потока), полученных с использованием датчика силы, фоторегистрации и времяпролетных зондовых измерений: результаты, полученные с использованием первых двух методов ( $I_{\text{уд}} \sim 2000$  с), хорошо согласуются между собой, в то время как результаты времяпролетных измерений оказываются завышенными в 3–6 раз (разница тем больше, чем меньше атомная масса исследованных металлов). Объясняется это тем, что зонды располагались вблизи мишени. Таким образом, регистрация параметров происходила только на начальном этапе разлета газоплазменного потока в атмосферных условиях, когда скорость составляющих его частиц еще велика. Вероятно, это также связано с тем, что при времяпролетных измерениях регистрируется лишь скорость разлета заряженных частиц, массовая доля которых в газоплазменном потоке может быть невелика. Кроме того, она может дополнительно уменьшаться за счет рекомбинации, число актов которой за время пролета частицы от зоны воздействия до зонда, исчисляемое единицами и десятками микросекунд, может быть большим.

Для регистрации импульса отдачи на поверхности твердотельной мишени в различных экспериментах использованы тензометрический датчик (LVS-A, Kyowa —  $\Delta F \sim 25$  мкН,  $\Delta t \sim 10^{-4}$  с); пьезоэлек-

трический PVDF-пленочный датчик (PZ-01, Images SI —  $\Delta F \sim 1$  мкН,  $\Delta t \sim 10^{-7}$  с); баллистический ( $m_p \sim 46$  г,  $l_c \sim 65$  мм,  $r_c \sim 109$  мм,  $T \sim 0,716$  с,  $I_\Omega \sim 3,8 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>) и торсионный ( $G \sim 70$  МПа,  $I_\Omega \sim 3,83 \cdot 10^{-5}$  кг·м<sup>2</sup>) маятники (характеристики обоих маятников оптимизированы таким образом, чтобы в диапазоне импульсов  $I_M \sim 10^{-5} \dots 10^{-4}$  Н·с они отклонялись на  $\sim 0,3 \dots 3,0$  мрад), метод комбинированной интерферометрии [82], ловушка-калориметр [83], фоторегистрация скоростных характеристик потока в сочетании со взвешиванием аблирующей мишени. Калибровка пьезоэлектрического датчика проводилась по результатам взаимодействия с фторопластовыми кубиками ( $2 \times 2 \times 2$  мм) в вакууме ( $p \sim 10^{-1}$  Па), падающими с высоты от 30 до 300 мм, что соответствует импульсу  $I_M \sim 10^{-5} \dots 10^{-4}$  Н·с. Отклонение маятника регистрировалось с помощью килогерцевой линейной скоростной ПЗС-камеры (VS-LD-751, НПК «Видеоскан») по перемещению отраженного лазерного луча аналогично [61] (см. рис. 1). Результаты измерений, выполненных с использованием этих методов при аналогичных экспериментальных условиях, с учетом погрешности измерений и нестабильности результатов светоэрозионного воздействия хорошо согласуются между собой.

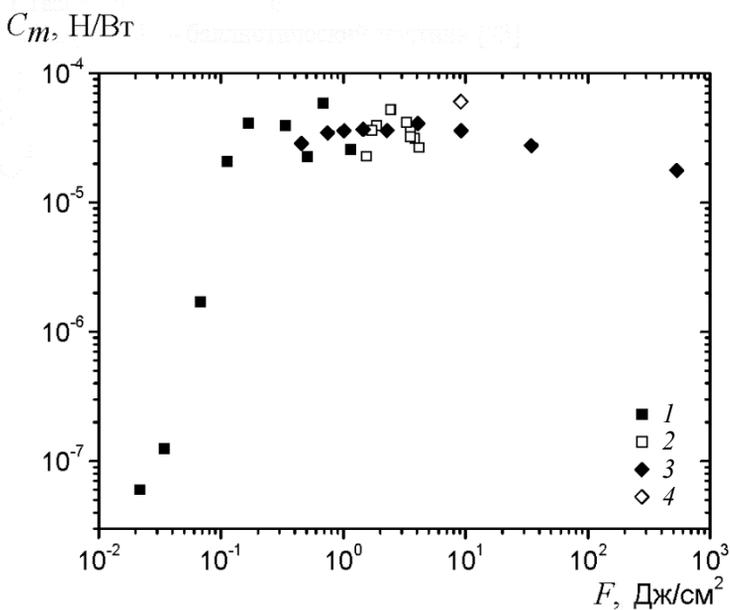
**Анализ экспериментальных результатов.** В [12] выполнен сравнительный анализ результатов оценки удельного импульса с использованием датчика силы и фоторегистрации абляционного газоплазменного потока и лазерно-индуцированной ударной волны. Как видно из представленных на рис. 3 данных, полученных нами и авторами работы [84] (с использованием баллистического маятника), результаты хорошо согласуются между собой.

В сходных экспериментальных условиях при фемтосекундном лазерном воздействии на молибден в вакууме данные работы [85] ( $\lambda \sim 800$  нм,  $I_0 \sim 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> —  $I_{уд} \sim 245$  с), полученные с использованием времяпролетного датчика, и наши данные ( $\lambda \sim 800$  нм,  $I_0 \sim 9,9 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> —  $I_{уд} \sim 255$  с), полученные методом комплексной интерферометрии, также хорошо согласуются. Для оценки удельного механического импульса отдачи при воздействии фемтосекундных импульсов лазерного излучения на медные и молибденовые мишени в [10, 85] использован торсионный маятник. В хорошем соответствии с данными этих работ находятся наши результаты, полученные методом комбинированной интерферометрии при близких плотностях энергии излучения (рис. 4). Результаты измерения удельного механического импульса отдачи при воздействии наносекундных импульсов видимого лазерного излучения на медные мишени, выполненные в [11] с использованием импульсного маятника, а в [86] — с использованием математического маятника, также хорошо согласуются между собой.



**Рис. 3.** Результаты определения удельного импульса при воздействии  $\text{CO}_2$ -лазера на  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -мишени:

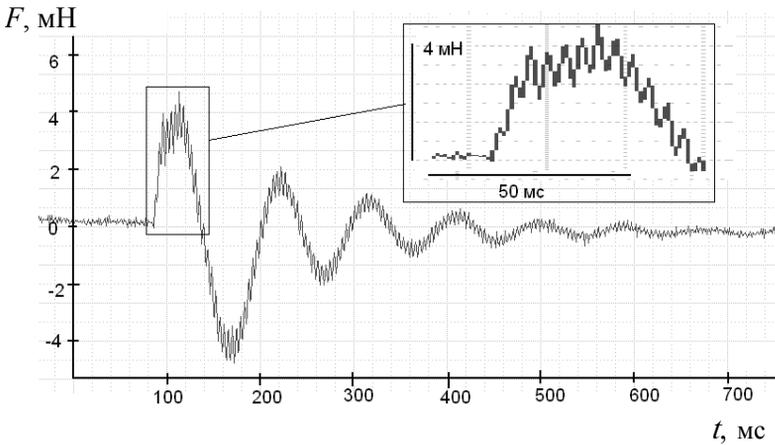
1 — датчик силы [12]; 2 — разлет газоплазменного потока [12];  
 3 — распространение ударной волны [12]; 4 — баллистический маятник [84]



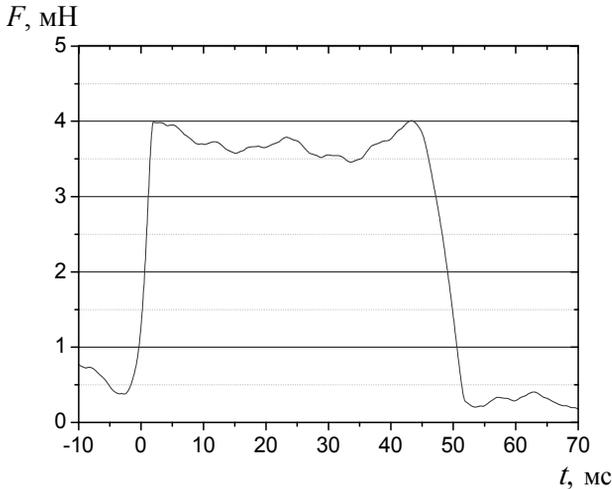
**Рис. 4.** Удельный механический импульс отдачи при фемтосекундном воздействии на молибденовые (1, 2) и медные (3, 4) мишени:

1, 3 — торсионный маятник [10, 85]; 2, 4 — комбинированная интерферометрия

Сравнительный анализ результатов прямого измерения тяги с использованием тензоэлектрического и тонкопленочного пьезоэлектрического датчика силы показал следующее: хотя регистрируемые пиковые значения силы при воздействии на фторопласт практически совпадают ( $\lambda \sim 808$  нм,  $I_0 \sim 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> —  $F \sim 4$  мН), менее инертный тонкопленочный датчик обладает существенно лучшим (на два порядка) временным разрешением, что уже при воздействии импульсов излучения длительностью  $\tau \sim 5 \cdot 10^{-2}$  с приводит к заметной разнице расчетного интеграла силы тяги по времени (импульса отдачи) (рис. 5). Кроме того, чувствительному элементу тензоэлектрического датчика требуется около 1 с для успокоения, в то время как фронты сигнала пьезоэлектрического датчика составляют  $\sim 10^{-4}$  с.



*a*



*б*

**Рис. 5.** Регистрация механического импульса с использованием тензоэлектрического (*a*) и пьезоэлектрического (*б*) датчиков при воздействии (808 нм, 50 мс) на  $(C_2F_4)_n$ -мишень

**Заключение.** В последнее время исследования эффективности генерации импульса отдачи при лазерной абляции часто выполняются при широком международном сотрудничестве [8]. Это требует решения ряда задач стандартизации при измерении как параметров воздействующего излучения, так и оптико-механических характеристик результата светозероизионного воздействия. Недавно появились работы [13, 87], предлагающие унифицированные методики измерения для ряда параметров лазерного воздействия (таких, как длительность импульса, площадь пятна фокусировки, а следовательно, и плотность энергии и мощности излучения), однако для измерения оптико-механических характеристик (удельного механического импульса отдачи, удельного импульса, эффективности преобразования энергии лазерного излучения в кинетическую энергию абляционного потока) такие работы отсутствуют.

Хотя физически обоснованные результаты, находящиеся в хорошем соответствии друг с другом, дают все перечисленные методики, результат сравнительного анализа данных, получаемых различными группами исследователей, будет наиболее достоверным в том случае, если используются унифицированные методики измерений, выбранные для соответствующих диапазонов импульсов отдачи, исходя из их максимальной простоты и надежности. Особенное значение это приобретает при регистрации сверхмалых нано- и пиконьютоновых импульсов отдачи. При однократном воздействии их невозможно зарегистрировать большинством методов, а при многократном ( $n \sim 10^3$  и более) воздействии происходит накопление погрешностей и отсутствует возможность исследования флуктуаций величины импульса отдачи.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 16.518.11.7016, 16.120.11.328-МК, 16.740.11.0686) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 13-08-01391, 12-08-12047).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pakhomov A.V., Gregory D.A., Thompson M.S. Specific impulse and other characteristics of elementary propellants for ablative laser propulsion. *AIAA Journal*, 2002, vol. 40, no. 5, pp. 947–952.
- [2] Phipps C., Luke J., Funk D., Moore D., Glowina J., Lippert T. Laser impulse coupling at 130 fs. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, no. 13, pp. 4838–4844.
- [3] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Методика экспериментального определения удельного механического импульса отдачи при фемтосекундной лазерной абляции конденсированных сред в вакууме. *Приборы и техника эксперимента*, 2010, № 4, с. 140–144.

- [4] Andreev S., Firsov K., Kazantsev S., Kononov I., Samokhin A. Explosive boiling of water induced by the pulsed HF-laser radiation. *Laser Physics*, 2007, vol. 17, no. 6. pp. 834–841.
- [5] Gao M.A.P., Rodrigues N.A.S., Riva R., Schwab C. PVDF sensor in laser ablation experiments. *Review of Scientific Instruments*, 2004, vol. 75, no. 12, pp. 5213–5215.
- [6] Kanesue T., Tamura J., Okamura M. Ag ion generation irradiated by Nd:YAG laser onto solid target for use of direct plasma injection scheme. *Proceedings of 12th international conference on ion sources (ICIS 2007)*. Jeju (Korea), AIP, 2008, p. 02B311-3.
- [7] Аскаръян Г.А., Манзон Б.М. Исследование импульса отдачи и светореактивного ускорения при воздействии лазерного излучения различной длительности. Применение бегущей фокусировки при ускорении. *Физика плазмы*, 1981, т. 7, № 2, с. 255–266.
- [8] Phipps C., Birkan M., Bohn W., Eckel H.-A., Horisawa H., Lippert T., Michaelis M.M., Rezunkov Y., Sasoh A., Schall W., Scharring S., Sinko J. Review: Laser-Ablation Propulsion. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, vol. 26, no. 4, pp. 609–637.
- [9] Luther-Davies B. An introduction to the physics of laser fusion. *Laser Physics*. Springer, Berlin-Heidelberg, 1983, pp. 226–237.
- [10] Zhang N., Wang W., Zhu X., Liu J., Xu K., Huang P., Zhao J., Li R., Wang M. Investigation of ultrashort pulse laser ablation of solid targets by measuring the ablation-generated momentum using a torsion pendulum. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 9, pp. 8870–8878.
- [11] D'Souza B.C. *Development of impulse measurement techniques for the investigation of transient forces due to laser-induced ablation*. Dis. ... Ph.D. 2007, 124 p.
- [12] Sinko J. *Vaporization and shock wave dynamics for impulse generation in laser propulsion*. Dis. ... Ph.D. Hunstsville, 2008, 249 p.
- [13] Scharring S., Sinko J., Sasoh A., Eckel H.-A., Röser H.-P. Experimental Determination of the Impulse Coupling Coefficient — Standardization Issues. *International Journal of Aerospace Innovations*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 33–43.
- [14] Phipps C.R., Turner T.P., Harrison R.F., York G.W., Osborne W.Z., Anderson G.K., Corlis X.F., Haynes L.C., Steele H.S., Spicochi K.C., King T.R. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO<sub>2</sub> single-pulse lasers. *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 64, no. 3, pp. 1083–1096.
- [15] Vorobyev A.Y., Guo C. Residual thermal effects in laser ablation of metals. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, vol. 59, pp. 418-423.
- [16] Mori K. Characteristics of laser ablation of pre-heated polymer materials. *27th Plasma Processing Technical Committee (SPP-27)*. Yokohama, 2010, pp. B2–02.
- [17] Hosoya N., Kajiwaru I., Hosokawa T. Vibration testing based on impulse response excited by pulsed-laser ablation: Measurement of frequency response function with detection-free input. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, vol. 331, no. 6, pp. 1355–1365.
- [18] Rocca S., Menon C., Nicolini D. FEPP micro-thrust balance characterization and testing. *Measurement Science and Technology*, 2006, vol. 17, no. 4, p. 711.
- [19] Horisawa H., Sumida S., Funaki I. Low-Power Laser-Metal Interaction for Space Propulsion Applications. *AIP Conference Proceedings*, 2010, vol. 1278, no. 1, pp. 184–190.

- [20] Jamison A.J., Ketsdever A.D., Muntz E.P. Accurate Measurement of Nano-Newton Thrust for Micropropulsion System Characterization. *27th International Electric Propulsion Conference*. Pasadena, 2001, p. IEPC-01-236.
- [21] Pottinger S.J., Lamprou D., Knoll A.K., Lappas V.J. Impact of plasma noise on a direct thrust measurement system. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, no. 3, p. 033504.
- [22] Kremeyer K. Ultrashort pulse lasers applied to propulsion/control in space- and atmospheric-flight. *High-Power Laser Ablation VII*. Taos, NM, USA, SPIE, 2008, p. 700506–17.
- [23] Cubbin E.A., Ziemer J.K., Choueiri E.Y., Jahn R.G. Pulsed thrust measurements using laser interferometry. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 6, pp. 2339–2346.
- [24] Polzin K.A., Markusic T.E., Stanojev B.J., DeHoyos A., Spaun B. Thrust stand for electric propulsion performance evaluation. *Review of Scientific Instruments*, 2006, vol. 77, no. 10, p. 105108-9.
- [25] Choi S., Han T.-h., Gojani A., Yoh J. Thrust enhancement via gel-type liquid confinement of laser ablation of solid metal propellant. *Applied Physics A*, 2010, vol. 98, no. 1, pp. 147–151.
- [26] Kremeyer K., Lapeyre J., Hamann S. Compact And Robust Laser Impulse Measurement Device, With Ultrashort Pulse Laser Ablation Results. *Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Kailua-Kona (Hawaii), AIP, 2008, pp. 147–158.
- [27] Eckel H.-A., Schall W., Walther S. *Lightcraft Impulse Measurements under Vacuum*. DLR, 2003, 72 p.
- [28] Michaelis M.M., Moorgawa A., Forbes A., Klopper W., McKenzie E., Boutchiana D., Bencherif H. Laser propulsion experiments in South Africa. *High-Power Laser Ablation IV*. Taos, NM, USA, SPIE, 2002, pp. 691–699.
- [29] Watanabe K., Takahashi T., Sasoh A. Useful In-space Impulse Generation Powered by Laser Energy. *Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Sendai (Japan), AIP, 2004, pp. 115–121.
- [30] Myrabo L.N. Brief History of the Lightcraft Technology Demonstrator (LTD) Project. *First International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Huntsville, Alabama (USA), AIP, 2003, pp. 49–60.
- [31] Watanabe K., Sasoh A. Impulse Generation Using 300-J Class Laser with Confinement Geometries in Air. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2005, vol. 48, no. 159, pp. 49–52.
- [32] Shi L., Zhao S.-H., Chu X.-C., Ma L.-H., Wu J.-L., Li X.-L., Li Y.-J. Effect of a simple double-confined structure on nanosecond pulse ablative laser propulsion. *Europhysics Letters*, 2009, vol. 85, no. 5, p. 55001.
- [33] Gamero-Castaño M., Hruby V., Martínez-Sánchez M. A Torsional Balance that Resolves Sub-micro-Newton Forces. *27th International Electric Propulsion Conference*. Pasadena, 2001, p. IEPC-01-235.
- [34] Selden N.P., Ketsdever A.D. Comparison of force balance calibration techniques for the nano-Newton range. *Review of Scientific Instruments*, 2003, vol. 74, no. 12, pp. 5249–5254.
- [35] Pancotti A.P., Gilpin M., Hilario M.S. Comparison of electrostatic fins with piezoelectric impact hammer techniques to extend impulse calibration range of a torsional thrust stand. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, no. 3, p. 035109.

- [36] Sumida S., Horisawa H., Funaki I. Experimental Investigation of  $\mu\text{N}$ -class Laser Ablation Thruster. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, 2009, vol. 7, no. 26, pp. Pb\_159-Pb\_162.
- [37] Phipps C.R., Luke J.R., Helgeson W.D. A 25nN Low-Noise Thrust Stand for Microthrusters. *International Electric Propulsion Conference*. Princeton, NJ October 30 — November 4, 2005.
- [38] D'Souza B.C., Ketsdever A.D., Muntz E.P. Investigation of Transient Forces Produced by Gases Expelled from Rapidly Heated Surfaces. *24th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*. Monopoli (Bari), Italy, 10–16 July 2004.
- [39] Gamero-Castano M. A torsional balance for the characterization of microNewton thrusters. *Review of Scientific Instruments*, 2003, vol. 74, no. 10, pp. 4509–4514.
- [40] Horisawa H., Kawakami M., Kimura I. Laser-assisted pulsed plasma thruster for space propulsion applications. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2005, vol. 81, no. 2, pp. 303–310.
- [41] Ketsdever A.D., D'Souza B.C., Lee R.H. Thrust Stand Micromass Balance for the Direct Measurement of Specific Impulse. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, vol. 24, no. 6, pp. 1386–1391.
- [42] Ketsdever A.D., Lee R.H., Lilly T.C. Performance testing of a microfabricated propulsion system for nanosatellite applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, p. 2254.
- [43] Rinaldi C., Boggio N.G., Rodriguez D., Lamagna A., Boselli A., Manzano F., Codnia J., Azcarate M.L. Dependence of  $C_m$  on the composition of Solid Binary Propellants in Ablative Laser Propulsion. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, no. 6, pp. 2019–2023.
- [44] Canuto E., Rolino A. Nanobalance: An automated interferometric balance for micro-thrust measurement. *ISA Transactions*, 2004, vol. 43, no. 2, pp. 169–187.
- [45] Koizumi H., Komurasaki K., Arakawa Y. Development of thrust stand for low impulse measurement from microthrusters. *Review of Scientific Instruments*, 2004, vol. 75, no. 10, pp. 3185–3190.
- [46] Phipps C.R. *Precise rotational motion sensor*. Photonic Associates, USA, 2008, 7 p.
- [47] Merkwowitz S.M., Maghami P.G., Sharma A., Willis W.D., Zakrzewski C.M. A  $\mu\text{N}$  thrust-stand for LISA. *Classical and Quantum Gravity*, 2002, vol. 19, no. 7, pp. 1745.
- [48] Grubišić A.N., Gabriel S.B. Development of an indirect counterbalanced pendulum optical-lever thrust balance for micro- to millinewton thrust measurement. *Measurement Science and Technology*, 2010, vol. 21, no. 10, p. 105101.
- [49] West M.D., Charles C., Boswell R.W. A high sensitivity momentum flux measuring instrument for plasma thruster exhausts and diffusive plasmas. *Review of Scientific Instruments*, 2009, vol. 80, no. 5, p. 053509-9.
- [50] Phipps C.R. *Micro Laser Plasma Thrusters for Small Satellites*. PHO0003. Santa Fe, Photonic Associates, 2002, 75 p.
- [51] D' Souza B.C., Ketsdever A.D. Investigation of time-dependent forces on a nano-Newton-second impulse balance. *Review of Scientific Instruments*, 2005, vol. 76, no. 1, p. 015105–10.

- [52] Moeller T., Polzin K.A. Thrust stand for vertically oriented electric propulsion performance evaluation. *Review of Scientific Instruments*, 2010, vol. 81, no. 11, p. 115108-7.
- [53] Nagao N., Yokota S., Komurasaki K., Arakawa Y. Development of a two-dimensional dual pendulum thrust stand for Hall thrusters. *Review of Scientific Instruments*, 2007, vol. 78, no. 11, p. 115108-4.
- [54] Sinko J., Mukundarajan V., Porter S., Kodgis L., Kemp C., Lassiter J., Lin J., Pakhomov A.V. Time-resolved force and ICCD imaging study of TEA CO<sub>2</sub> laser ablation of ice and water. *High-Power Laser Ablation VI*. Taos, NM, USA, SPIE, 2006, p. 626131-12.
- [55] Sinko J. *Time resolved force and imaging study on the laser ablation of liquids*. Dis. ... M. Sc. Huntsville, 2005, 88 p.
- [56] Борисенок В.А., Симаков В.Г., Куропаткин В.Г., Брагунец В.А., Волгин В.А., Ромаев В.Н., Тукмаков В.В., Кручинин В.А., Лебедева А.А., Гончарова Д.Р., Жерноклетов М.В. ПВДФ-датчик динамического давления. Приборы и техника эксперимента, 2008, № 4, с. 113–121.
- [57] Любченко Ф.Н., Феденев А.В., Босак Н.А., Чумаков А.Н., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Новая концепция лазерно-плазменного микродвигателя. *Космонавтика и ракетостроение*, 2009, № 3, с. 62–74.
- [58] Holmes B. Pressure measurements in laser-supported plasmas with piezoresistance gages. *Experimental Mechanics*, 1985, vol. 25, no. 1, pp. 32–42.
- [59] Sterling E., Lin J., Sinko J., Kodgis L., Porter S., Pakhomov A.V., Larson C.W., Mead J.F.B. Laser-Driven Mini-Thrusters. *Fourth International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Nara (Japan), AIP, 2006, pp. 247–258.
- [60] López D., Decca R.S., Fischbach E., Krause D.E. MEMS-Based Force Sensor: Design and Applications. *Bell Labs Technical Journal*, 2005, vol. 10, no. 3, pp. 61–80.
- [61] Sterling E., Lin J., Sinko J., Kodgis L., Porter S., Pakhomov A.V., Larson C.W., Mead J.F.B. Laser driven mini-thrusters. *4th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, AIP, 2005, pp. 247–258.
- [62] Požar T., Petkovšek R., Možina J. Formation of linear momentum in a rod during a laser pulse–matter interaction. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2008, vol. 92, no. 4, pp. 891–895.
- [63] Požar T., Možina J. Optodynamic description of a linear momentum transfer from a laser induced ultrasonic wave to a rod. *Applied Physics A*, 2008, vol. 91, no. 2, pp. 315–318.
- [64] Furutani H., Fukumura H., Masuhara H., Kambara S., Kitaguchi T., Tsukada H., Ozawa T. Laser-Induced Decomposition and Ablation Dynamics Studied by Nanosecond Interferometry. 2. A Reactive Nitrocellulose Film. *J. Phys. Chem. B*, 1998, vol. 102, no. 18, pp. 3395–3401.
- [65] Lin J., Thompson M.S., Pakhomov A.V. Ablative laser propulsion: determination of specific impulse from plasma imaging. *High-Power Laser Ablation V*. Taos, NM, USA, SPIE, 2004, pp. 465–476.
- [66] Fujiwara T., Miyasaka T. Laser-Supported Detonation Concept as a Space Thruster. *Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Sendai (Japan), AIP, 2004, pp. 80–91.
- [67] Ushio M., Komurasaki K., Kawamura K., Arakawa Y. Effect of laser supported detonation wave confinement on termination conditions. *Shock Waves*, 2008, vol. 18, no. 1, pp. 35–39.

- [68] Sinko J.E., Pakhomov A.V. From Shadowgraph to Monochromatic Schlieren: Time-Resolved Imaging of Dim Laser-Induced Phenomena in the Presence of Saturating Plasma Emission. *Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Kailua-Kona (Hawaii), AIP, 2008, pp. 121–130.
- [69] Lin J. *Time-resolved imaging for the dynamic study of ablative laser propulsion*. Dis. ... Ph. D. Huntsville, 2004, 140 p.
- [70] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Экспериментально-диагностический модуль для сверхскоростной комбинированной интерферометрии процессов взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с конденсированными средами в вакууме. *Приборы и техника эксперимента*, 2010, № 3, с. 104–110.
- [71] Mori K., Anju K., Sasoh A., Zaretsky E. Acceleration history in laser-ablative impulse measured using velocity interferometer (VISAR). *High-Power Laser Ablation VI*. Taos, NM, USA, SPIE, 2006, p. 626125-8.
- [72] Sasoh A., Mori K., Anju K., Suzuki K., Shimono M., Sawada K. Diagnostics and Impulse Performance of Laser-Ablative Propulsion. *Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Kailua-Kona (Hawaii), AIP, 2008, pp. 232–241.
- [73] Taylor G. The formation of a blast wave by a very intense explosion. I. Theoretical discussion. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1950, vol. 201, no. 1065, pp. 159–174.
- [74] Semerok A.F., Chaleard C., Detalle V., Kocon S., Lacour J.-L., Mauchien P., Meynadier P., Nouvellon C., Palianov P., Perdrix M., Petite G., Salle B. Laser ablation efficiency of pure metals with femtosecond, picosecond, and nanosecond pulses. *High-Power Laser Ablation*. Santa Fe, NM, USA, SPIE, 1998, pp. 1049–1055.
- [75] Liu H.C., Mao X.L., Yoo J.H., Russo R.E. Early phase laser induced plasma diagnostics and mass removal during single-pulse laser ablation of silicon. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1999, vol. 54, no. 11, pp. 1607–1624.
- [76] Fishburn J.M., Withford M.J., Coutts D.W., Piper J.A. Study of the fluence dependent interplay between laser induced material removal mechanisms in metals: Vaporization, melt displacement and melt ejection. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, no. 14, pp. 5182–5188.
- [77] Dumont T., Bischofberger R., Lippert T., Wokaun A. Gravimetric and profilometric measurements of the ablation rates of photosensitive polymers at different wavelengths. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 247, no. 1–4, pp. 115–122.
- [78] Jacquot P. Speckle Interferometry: A Review of the Principal Methods in Use for Experimental Mechanics Applications. *Strain*, 2008, vol. 44, no. 1, pp. 57–69.
- [79] Vorobyev A.Y., Guo C. Direct observation of enhanced residual thermal energy coupling to solids in femtosecond laser ablation. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, no. 1, pp. 011916-3.
- [80] Martan J., Herve O., Lang V. Two-detector measurement system of pulse photothermal radiometry for the investigation of the thermal properties of thin films. *Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 102, no. 6, p. 064903-6.
- [81] Bayle F., Doubenskaia M. Selective laser melting process monitoring with high speed infra-red camera and pyrometer. *Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies*, SPIE, 2008, p. 698505-8.

- [82] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Экспериментальное исследование опто-механических характеристик фемто-секундной лазерной абляции полимеров в атмосферных и вакуумных условиях. *Письма в Журнал технической физики*, 2010, т. 36, № 13, с. 8–15.
- [83] Протасов Ю.Ю. Лазерно-плазменный инжектор. *Приборы и техника эксперимента*, 2003, № 2, с. 60–64.
- [84] Schall W.O., Eckel H.-A., Tegel J., Waiblinger F., Walther S. Properties of Laser Ablation Products of Delrin with CO<sub>2</sub> Laser. DLR, 2004, 79 p. + (CD-ROM).
- [85] Phipps C.R., Luke J.R., Funk D.J., Moore D.S., Glowina J., Lippert T. Measurements of laser impulse coupling at 130 fs. *High-Power Laser Ablation V*. Taos, NM, USA, SPIE, 2004, pp. 1201–1209.
- [86] Zheng Z.Y., Zhang J., Lu X., Hao Z.Q., Yuan X.H., Wang Z.H., Wei Z.Y. Characteristic investigation of ablative laser propulsion driven by nanosecond laser pulses. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2006, vol. 83, no. 2, pp. 329–332.
- [87] Sinko J.E., Scharring S., Eckel H.-A., Röser H.-P., Sasoh A. Measurement Issues in Pulsed Laser Propulsion. *6th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*. Scottsdale, Arizona, November 1–5, 2009. AIP, 2010, pp. 125–136.

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Захаров В.И., Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю. О верификации методов определения импульса отдачи в микронаноньютоновом диапазоне при лазерной абляции твердотельных мишеней. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1035.html>

**Захаров Владимир Игоревич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г.

**Локтионов Егор Юрьевич** — канд. техн. наук, заведующий лабораторией учебно-научного центра «Фотонная энергетика», специалист в области экспериментальных исследований радиационно-плазмодинамических и оптоуплофизических процессов взаимодействия мощного излучения с веществом всех агрегатных состояний с использованием новейших методов диагностики. Автор более 50 работ в данной области e-mail: [stce@bmstu.ru](mailto:stce@bmstu.ru)

**Протасов Юрий Степанович** — д-р физ.-мат. наук, проф., заместитель научного руководителя Объединенного учебно-научного центра фотонной энергетике и фотонных технологий. Специалист в области физики и техники низкотемпературной плазмы, радиационной газоплазмодинамики и физической электроники. Автор более 400 научных работ, более 10 книг и 300 изобретений. e-mail: [stce@bmstu.ru](mailto:stce@bmstu.ru)

**Протасов Юрий Юрьевич** — д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана, специалист в области фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований радиационно-плазмодинамических и оптоуплофизических процессов взаимодействия мощного излучения с веществом всех агрегатных состояний. Автор более 100 работ в данной области. e-mail: [stce@bmstu.ru](mailto:stce@bmstu.ru)