

УДК 53.08

Верификация методов определения импульса отдачи в микро- и наноньютоновом диапазоне при лазерной абляции твердотельных мишеней

Е.Ю. Локтионов, Ю.С. Протасов, Ю.Ю. Протасов

Выполнен сравнительный анализ методов экспериментальной регистрации оптико-механических характеристик, в т.ч. малых и сверхмалых импульсов отдачи ($I_M \sim 10^{-12} - 10^{-3}$ Н·с) при взаимодействии мощного лазерного излучения ($I_0 \sim 10^5 - 10^{15}$ Вт/см²) 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.

PACS: 07.05.Fb, 07.07.Df, 07.10-h, 79.20.Eb

Ключевые слова: импульс отдачи, тяга, удельный импульс, удельный механический импульс отдачи, методы регистрации.

Введение

Для регистрации оптико-механических характеристик при лазерной абляции используется ряд методов, измеряющих непосредственно механический импульс (баллистические [1] и торсионные [2] маятники, метод комбинированной интерферометрии [3]), силу (тензoeлектрические [4] и МЭМС-датчики силы и момента) и давление (пьезoeлектрические датчики [5]) отдачи на поверхности аблирующей мишени, возникающие в результате генерации светоэрозийного парогазо-плазменного 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 которой 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. Так, 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), но о методах регистрации результатов воздействия (импульс отдачи, массовый расход абляции) упоминается лишь вскользь. Широкий диапазон энерго-мощностных и импульсно-периодических режимов лазерного воздействия ($I_0 \sim 10^5 - 10^{15}$ Вт/см²) не позволяет однозначно остановиться на каком-либо одном методе.

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

Целью данной работы является сравнительный анализ известных методов экспериментальной регистрации оптико-механических характеристик

Локтионов Егор Юрьевич, зав. лабораторией.

Протасов Юрий Степанович, профессор.

Протасов Юрий Юрьевич, профессор.

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5.

Тел. +7 499 263 6299. E-mail: stepe@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2013 г.

© Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю., 2013

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, баллистическими 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_Ω :

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

где m_p – масса маятника, l_c – расстояние от оси вращения до центра масс, T – период колебаний, g_0 – ускорение свободного падения. Как правило, импульс (под действием силы $F(t)$) сообщается в точке маятника, не совпадающей с его центром масс, а отстоящей на некоторое расстояние r_p , что приводит к возникновению момента τ_p , а, следовательно, и углового ускорения. В конечном итоге, маятник отклоняется на некоторый угол θ :

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

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, суммарная кинетическая энергия, сообщенная маятнику, должна быть равна потенциальной энергии маятника при его отклонении на максимальный угол θ_{\max} :

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

или:

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

Таким образом, суммарный импульс равен:

$$\begin{aligned} I_M &= \frac{I_\Omega \dot{\theta}(0)}{r_p} = \frac{1}{r_p} \sqrt{2m_p g_0 l_c I_\Omega (1 - \cos \theta_{\max})} = \\ &= \frac{m_p g_0 l_c T}{2\pi r_p} \sqrt{2(1 - \cos \theta_{\max})} \end{aligned}$$

Удельный механический импульс отдачи определяется как:

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{I_M}{E_L} = \frac{\sqrt{2m_p g_0 l_c I_\Omega (1 - \cos \theta_{\max})}}{r_p E_L} = \\ &= \frac{m_p g_0 l_c T}{2\pi r_p E_L} \sqrt{2(1 - \cos \theta_{\max})} \end{aligned}$$

Для регистрации малых угловых отклонений маятника (соответствующих малым линейным перемещениям d) применяется геометрическая схема с отраженным лазерным лучом, показанная на рис. 1, а. Используются также акселерометры [17] или датчики линейных перемещений [18] (например, вихревых токов [19], емкостные, индукционные, электромеханические (LVDT) [20]). Применение последних в сочетании с плазменными устройствами в [21] признано нежелательным из-за сильного искажения сигнала наведенным электромагнитным полем.

В предположении о малости колебаний (т.е. $l_c \gg d$) возможно принять приближение:

$$\frac{d}{l_c} = \operatorname{tg}(2\theta_{\max}) \approx 2\theta_{\max}.$$

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

Значительно реже используются 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 непосредственно определить полный механический импульс, сообщенный мишени при лазерном воздействии, без необходимости учитывать потери на трение и внесения ряда других погрешностей, свойственных баллистическим маятникам; а с другой стороны, необходима фокусировка излучения точно на оси системы, ибо, в противном случае, часть энергии будет затрачена на враще-

ние мишени вокруг подвеса, что внесет искажения и в результаты времяпролетных измерений.

В работе [26] применен маятник с плоской пружиной. Для анализа колебаний этой системы использовался двухпроходный интерферометр, причем чувствительность такой системы оценивалась в 10^{-8} Н·с при точности регистрации перемещения мишени 15,8 нм. Полученные результаты, в сравнении с [2], где использовался торсионный маятник, оказались заниженными в два 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 регистрируемых с использованием маятника в аналогичных условиях, вероятно, из-за отсутствия избыточных связей (ограничения степеней свободы) [27]. Хотя при такой схеме измерения регистрируется непосредственно импульс отдачи, сообщаемый мишени, однако такой метод применим только для достаточно высокоэнергетичных лазерных импульсов. Так, даже для миллиграммовых тел энергия импульса излучения должна быть несколько десятков или даже сотен джоулей [31, 32].

Торсионный маятник (или крутильные весы) как известно, впервые использован Ш. Кулоном в 1784 г. для исследования силы отталкивания одноименно заряженных тел. Интересно, что силы электростатического взаимодействия чаще всего используются для калибровки этих приборов и в настоящее время [20, 33, 34] (реже – другие

способы, например, маятниковые ударники [35]). 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 окажутся уравновешены силами упругости закрученной нити. По углу поворота рычага j можно судить о величине крутящего момента M_k действующих сил:

$$j \approx M_k l / G I_\Omega,$$

где l – длина нити, G – модуль сдвига материала нити, I_Ω – суммарный момент инерции рычага и нити. Высокая чувствительность маятника достигается применением достаточно длинной нити с малым значением модуля сдвига. Используются как унифилярные (одна нить), так и бифилярные (2 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 не пригодны для измерения больших импульсов отдачи [37–44]. При приложении 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 применяются 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 (а именно, простота реализации) общим недостатком маятниковых систем является то, что с их помощью можно измерять только полный импульс отдачи без временного разрешения, причем при воздействии сравнительно коротких импульсов излучения, т. к. при воздействии длинных мишень уходит из плоскости фокусировки излучения в течение времени 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 частота следования импульсов выше полосы пропускания маятника [47]. Необходимо также уделять большое внимание виброизоляции измерительного стенда. Это особенно актуально при проведении измерений в вакууме (при использовании насосов с подвижными частями). В атмос-

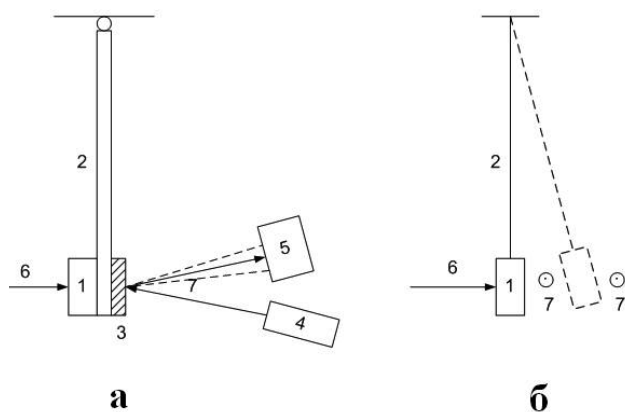


Рис. 1. Схемы регистрации отклонения баллистического (а) и математического (б) маятника (1 – мишень, 2 – маятниковый подвес, 3 – зеркало, 4 – лазер, 5 – ПЗС-линейка или линейка фотодиодов, 6 – воздействующее лазерное излучение, 7 – зондирующее лазерное излучение)

ферных условиях необходимо учитывать и аэродинамические эффекты (конвективные потоки, сквозняки и т.д.). Кроме того, для осуществления повторного лазерного воздействия необходимо дождаться затухания колебаний, вызванных предыдущим, что существенно увеличивает время эксперимента (как уже говорилось, 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 светозероизонный поток с облучаемой поверхности [48, 49]. Хотя в этом случае измерение сообщаемого мишени импульса, строго говоря, уже не является прямым, однако результаты находятся в очень хорошем соответствии с результатами измерений, выполненных, например, с использованием 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 искажается под действием силы тяжести (т.е. она не вертикальна), что приводит отклонению вектора тяги от горизонтали и, как следствие, к получению недостоверных результатов. Поэтому в данном случае следует использовать горизонтальное «коромысло» с противовесом [51, 52]. С помощью маятников, если не применять специальных изменений в конструкции [53], можно проводить измерения только проекции вектора тяги на ось системы. Однако, в общем случае, его тангенциальная составляющая может быть отлична от нуля, так же как и степень монохроматичности светозероизонного потока (т.е. отношение суммы квадратов проекций вектора скорости на главную ось к сумме квадратов скоростей) может быть существенно меньше 1.

В настоящее время широко используются *пьезоэлектрические датчики силы* [5, 54, 55] и давления [56, 57]. Здесь чувствительным элементом является кварцевая пленка. При приложении 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 дат-

чиков является то, что они могут регистрировать производную воздействующей силы по времени. Этот эффект может быть использован для регистрации малых по амплитуде, но быстро нарастающих сил. Временная разрешающая способность таких датчиков составляет, как правило, несколько микросекунд. Однако, поскольку часто используются усилители сигнала, то это уменьшает разрешение на 1–2 порядка. В паспорте прибора собственная частота (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 f_{fs} – собственная частота, 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 нержавеющей 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, а в результате сжатия кристаллов генерируется заряд, пропорциональный силе. В конечном итоге, 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, а также в вакууме или при температурах, отличных от комнатной. Для калибровки датчиков могут использоваться различные эталоны, например, математические маятники и маятниковые ударники [35]. Одним из способов, описанным и опробованным в [12], является взаимодействие с шариками известной массы, бросаемыми с некоторой высоты (соответственно, заранее можно рассчитать их импульс). 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. При этом полученные результаты находились в хорошем соответствии. Чувствительность пьезоэлектрических и тензометрических датчиков силы для измерения импульса отдачи составляет величину порядка $\Delta I_M = 10^{-6} - 10^{-5}$ 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 в экспериментах мишень устанавливается непосредственно на датчик силы, но это не всегда возможно как из-за особенностей вещества мишени и системы его подачи в рабочую зону, так и в случае использования особо чувствительных датчиков. В подобных случаях их устанавливают таким образом, чтобы газо-плазменный 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 оцененный с помощью только маятника. Такая разница объясняется тем, что измеренное значение соответствует сумме импульса отдачи лазерной абляции и импульса маятника при отгаливании от чувствительного элемента датчика силы. Авторами этой работы 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 регистрацией) и анализе ультразвуковых колебаний, возникающих на торце металлического стержня при лазерной абляции. Временное разрешение такого метода составило ~ 10 мкс,

а чувствительность $\sim 0,4$ мкН·с. Преимуществом этого метода является отсутствие необходимости в калибровке, т.к. параметры колебательной системы определяются акустическими свойствами материала стержня и его геометрическими размерами.

Общим недостатком вышеперечисленных методов является невозможность дифференцированного анализа вклада тех или иных явлений (разлет ионизированных паров мишени [64], формирование и распространение ударной волны в буферном газе [2], медленный разлет продуктов фазового взрыва в объеме твердотельной мишени [65], детонации рабочего вещества [66] или смеси [67]) в формирование импульса отдачи, который может существенно изменяться в зависимости от регулировочных параметров и условий лазерного воздействия. Так, например, для устранения влияния лазерно-индуцированных ударных волн в буферном газе в [2] использовалась мишень с радиальным размером, сопоставимым с пятном фокусировки излучения, т.к. при воздействии ультракоротких импульсов лазерного излучения удельный механический импульс отдачи от ударной волны существенно больше, чем от абляционного газовой-плазменного потока.

Фоторегистрационные методы [54, 55, 65, 68, 69] применяются, как правило, только для измерения скорости разлета светоэрозионного потока. Причем в большинстве случаев, как и при использовании зондовых методов, определяют скорость ионизационного фронта, фронта волны поглощения и др., хотя среднемаховая скорость потока оказывается существенно меньше (в качестве весовой функции распределения по скоростям может использоваться линейный коэффициент поглощения или концентрация электронов в локальном объеме). Различными фото (в т.ч. PIV), теневыми (абсорбционными), шликерными методами можно также определить угловое распределение частиц по скоростям [65] и степень монохроматичности светоэрозионного потока.

Результаты таких косвенных измерений могут существенно отличаться 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 $\Delta I_M = 10^{-12} - 10^{-11}$ Н·с. При этом определяются также массовый расход вещества мишени, распределение частиц по скоростям и среднемаховая скорость светоэрозионного по-

тока. Прямые измерения импульса отдачи могут быть проведены для тонкопленочных мишеней с использованием интерферометрической схемы VISAR [26, 71, 72], с помощью которой регистрируются свето-индуцированные колебания поверхности мишени. Отличительными особенностями этой схемы являются широкий диапазон регистрируемых величин одиночных импульсов $I_M = 10^{-9} - 10^{-3}$ Н·с, практически не требующий перестройки системы, а также высокое временное разрешение $\Delta t = \sim 10^{-8}$ 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 газо-плазменного потока. Оценки показывают, что удельный механический импульс отдачи в случае плоской мишени может достигать $I_M = (4-6) \cdot 10^{-3}$ Н·с, что существенно 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, энергия 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 ($\Delta m = \sim 10^{-4}$ г, в отдельных случаях $\Delta m = \sim 10^{-7}$ 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 $\Delta m = \sim 10^{-8}$ г и гравиметрии [77]. Чаще всего для измерения массового расхода используются *ex situ* методы,

что весьма неудобно для исследования процессов в глубоком вакууме, т.к. требуется существенное время на откачку экспериментальной камеры после ее разгерметизации. Чтобы избежать таких неудобств, необходимо использовать гравиметрические кварцевые датчики, требующие сложной абсолютной калибровки и имеющие существенное ограничение по максимальному накопленному массовому расходу, как и по массе мишени, или интерференционные методы [70] (для диффузно-отражающих, шероховатых поверхностей – спекл-интерферометрию [78]).

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

Опыт применения методов регистрации импульса отдачи

Как указано в [13], отсутствие однозначности в описании условий проведения экспериментов и режимов лазерного воздействия сильно затрудняет сравнение результатов, полученных разными авторами. Результаты верификации различных методов регистрации импульса отдачи крайне редко встречаются в научной периодике, однако такая работа нередко прodelывается при выполнении диссертаций. Так, в [12] импульс отдачи при воздействии CO_2 -лазера на полимерные мишени (I_M до 8×10^{-4} Н·с) измерялся с помощью баллистического маятника, пьезоэлектрических датчиков силы, калиброванных при помощи металлических и полимерных сфер, сбрасываемых с различной высоты, и фоторегистрации динами-

Таблица

Оценка величины рабочего диапазона I , чувствительности ΔI , временного разрешения Δt и инструментальной сложности C (1→3 — простой→сложный)

Метод	I , Н·с	ΔI , Н·с	Δt , с	C	Ссылка
Баллистический маятник	$>10^{-5}$	$10^{-6} - 10^{-5}$ ($3 \cdot 10^{-9}$)	$10^{-2} - 10^{-1}$	1	[1, 12, 25] ([22, 23]) [2, 10, 37–44]
Торсионный маятник	$10^{-6} - 10^{-3}$	10^{-9}	$10^{-2} - 10^{-1}$	1–2	([46])
Тензоэлектрический датчик	$>10^{-5}$	$10^{-6} - 10^{-5}$	$10^{-6} - 10^{-5}$	1	[4, 12]
Пьезоэлектрический датчик	$>10^{-5}$	$10^{-6} - 10^{-5}$	$10^{-7} - 10^{-6}$	1–2	[5, 54–56, 58]
Оптодинамический метод	10^{-5}	10^{-7}	$10^{-6} - 10^{-5}$	2	[62, 63]
Комбинированная интерферометрия	$10^{-11} - 10^{-4}$	$10^{-12} - 10^{-10}$	$10^{-13} - 10^{-10}$	3	[3, 70]
VISAR	$10^{-9} - 10^{-3}$	10^{-9}	10^{-8}	2	[26, 71, 72]
Косвенные измерения (скорость+массовый расход)	$>10^{-5}$	$10^{-8} - 10^{-5}$	10^{-7}	1–2	[65, 74–76]

ки разлета газо-плазменного потока в комбинации с *ex situ* измерением массового расхода абляции. При этом результаты этих измерений находятся в хорошем соответствии (Рис. 2).

В [69] выполнено сравнение результатов оценки удельного импульса (скорости разлета газо-плазменного потока), полученных с использованием датчика силы, фоторегистрации и времяпролетных зондовых измерений. Показано, что результаты, полученные с использованием первых двух методов ($I_{уд} \sim 2000$ с), находятся в хорошем соответствии, 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, т.е. регистрация параметров происходила только на начальном этапе разлета газо-плазменного 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 газо-плазменном 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 – десятками микросекунд, может быть существенным.

Комплексный эксперимент

Для регистрации импульса отдачи на поверхности твердотельной мишени в экспериментах нами использованы тензометрический датчик (LVS-A, Kyowa — $\Delta F = \sim 25$ мкН, $\Delta \tau = \sim 10^{-4}$ с); пьезоэлектрический PVDF-пленочный датчик (PZ-01, Images SI — $\Delta F = \sim 1$ мкН, $\Delta \tau = \sim 10^{-7}$ с); баллистический ($m_p = \sim 46$ г, $l_c \sim 65$ мм, $r_c \sim 109$ мм,

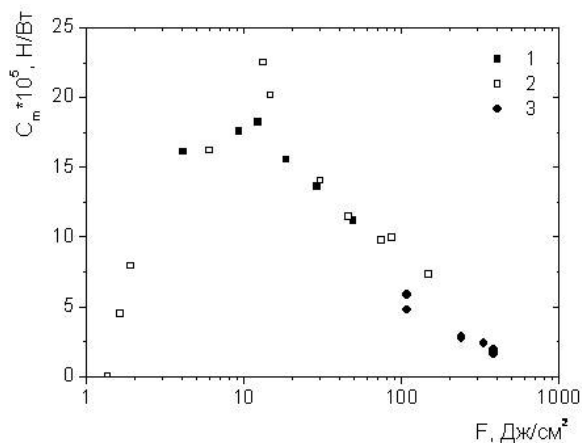


Рис. 2. Результаты оценки удельного механического импульса отдачи при воздействии CO_2 -лазера на $(C_2F_6)_n$ -мишени: 1 — баллистический маятник [12], 2 — пьезоэлектрический датчик силы [12], 3 — флажковый маятник [50]

$T = \sim 0,716$ с, $I_{\Omega} = \sim 3,8 \cdot 10^{-4}$ кг·м²) и торсионный ($G = \sim 70$ МПа, $I_{\Omega} = \sim 3,83 \cdot 10^{-5}$ кг·м²) маятники (характеристики обоих маятников оптимизированы таким образом, чтобы в диапазоне импульсов $I_M = 10^{-5} - 10^{-4}$ Н·с они отклонялись на 0,3–3 мрад), метод комбинированной интерферометрии [82], ловушка-калориметр [83], фоторегистрация скоростных характеристик потока в сочетании со взвешиванием аблирующей мишени. Калибровка пьезоэлектрического датчика производилась 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 $I_M = 10^{-5} - 10^{-4}$ Н·с. При работе с маятниками отклонение регистрировалось с помощью килогерцовой линейной скоростной ПЗС-камеры (VS-LD-751, НПК «Видеоскан») по перемещению отраженного лазерного луча, как и в работе [61] (схема Рис. 1).

Результаты измерений, выполненных с использованием указанных методов при аналогичных экспериментальных условиях, а также с учетом погрешности измерений и нестабильности результатов светозероэрозийного воздействия находятся в хорошем согласии.

Анализ экспериментальных результатов

В [12] выполнен сравнительный анализ результатов оценки удельного импульса с использованием датчика силы и фоторегистрации абляционного газо-плазменного потока и лазерно-индуцированной ударной волны. Как видно из представленных на Рис. 3 данных, полученных нами и в работе [84] (с использованием баллистического маятника), результаты находятся в хорошем соответствии.

В сходных экспериментальных условиях при фемтосекундном лазерном воздействии на молибден в вакууме данные работы [85] ($\lambda = 800$ нм,

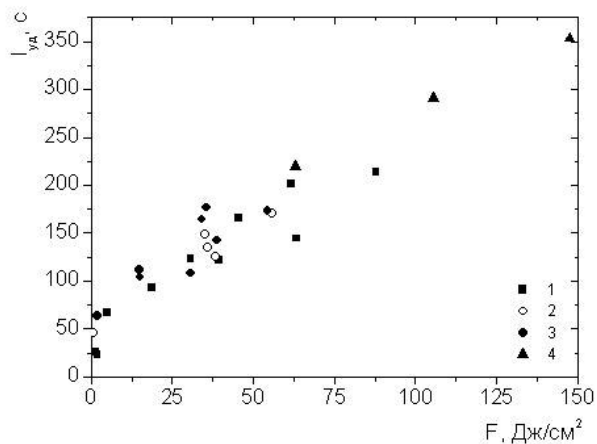


Рис. 3. Результаты определения удельного импульса при воздействии CO_2 -лазера на $(CH_2O)_n$ -мишени: 1 — датчик силы [12], 2 — разлет газо-плазменного потока [12]; 3 — распространение ударной волны [12]; 4 — баллистический маятник [84]

$I_0 = \sim 10^{13}$ Вт/см², $I_{уд} = \sim 245$ с), полученные с использованием времяпролетного датчика, и наши ($\lambda = 800$ нм, $I_0 = \sim 9,9 \cdot 10^{13}$ Вт/см², $I_{уд} = \sim 255$ с), полученные методом комплексной интерферометрии, находятся в хорошем соответствии. 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 [86] 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 и в [87] — математического маятников, также находятся в хорошем соответствии.

Сравнительный анализ результатов прямого измерения тяги с использованием тензoeлектрического и тонкопленочного пьезoeлектрического датчика силы показал, что хотя регистрируемые пиковые значения силы при воздействии на фторопласт практически совпадают ($\lambda = \sim 808$ нм, $I_0 = \sim 10^5$ Вт/см², $F = \sim 4$ мН), менее инертный тонкопленочный датчик обладает существенно лучшим (на 2 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 тензoeлектрического датчика требуется около 1 с для успокоения, в то время как фронты сигнала пьезoeлектрического датчика составляют $\tau \sim 10^{-4}$ с.

Заключение

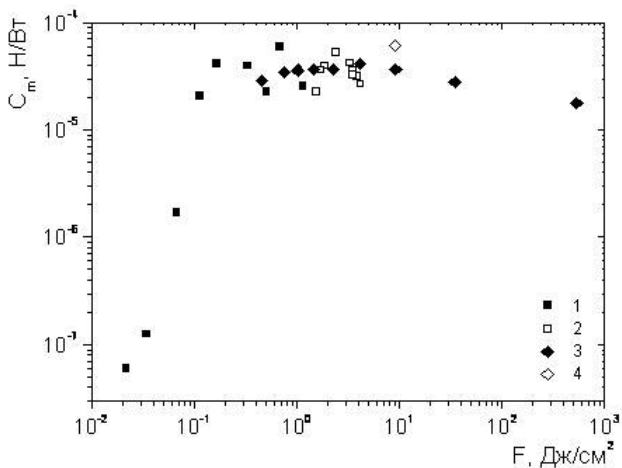


Рис. 4. Удельный механический импульс отдачи при фемтосекундном воздействии на молибденовые (1, 2) и медные (3, 4) мишени: 1, 3 — торсионный маятник [10, 85], 2, 4 — комбинированная интерферометрия

В последнее время работы по исследованию эффективности генерации импульса отдачи при лазерной абляции часто выполняются в широком международном сотрудничестве [8], что требует решения ряда задач стандартизации при выполнении измерений как параметров воздействующего излучения, так и оптико-механических характеристик результата светоэрозионного воздействия. Недавно появились работы [13, 88], предлагающие унифицированные методики измерения для ряда параметров лазерного воздействия: длительности импульса, площади пятна фокусировки, а следовательно, и плотности 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 выше методики, результат сравнительного анализа получаемых различными группами исследователей данных 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, зарегистрировать которые при однократном воздей-

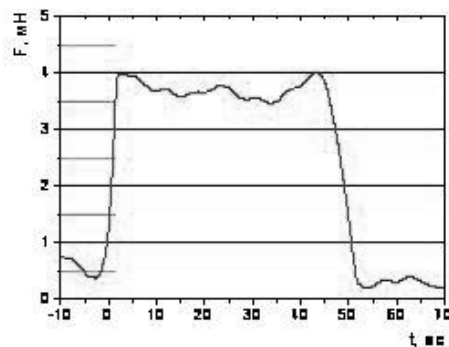
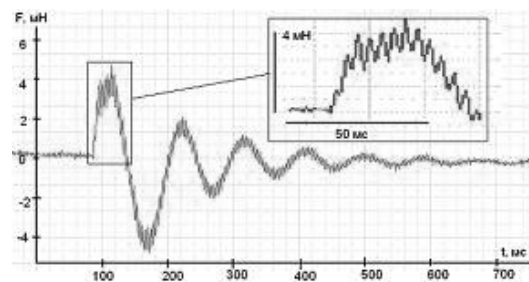


Рис. 5. Регистрация механического импульса с использованием тензо- (а) и пьезoeлектрического (б) датчиков при лазерном воздействии ($\lambda = 800$ нм, $\tau = 50$ мс) на $(C_2F_4)_n$ -мишень

ствии большинством методов невозможно, 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 № 14.518.11.7009, 16.120.11.328-МК, 16.740.11.0686) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00848).

Литература

1. Pakhotov A.V., Gregory D.A., Thompson M.S. // AIAA Journal. 2002. V. 40. No. 5. P. 947
2. Phipps C., Luke J., Funk D., et al. // Applied Surface Science. 2006. V. 252. No. 13. P. 4838
3. Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., et al. // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 140
4. Andreev S., Firsov K., Kazantsev S., et al. // Laser Physics. 2007. V. 17. No. 6. P. 834
5. Giao M.A.P., Rodrigues N.A.S., Riva R., et al. // Review of Scientific Instruments. 2004. V. 75. No. 12. P. 5213
6. Kanesue T., Tamura J., Okamura M. // Proc. AIP. 2008. V. 79. P. 02B311-3.
7. Аскарьян Г.А., Манзон Б.М. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 2. С. 255
8. Phipps C., Birkan M., Bohn W., et al. // Journal of Propulsion and Power. 2010. V. 26. No. 4. P. 609
9. Luther-Davies B., An introduction to the physics of laser fusion / Laser Physics, J. Harvey and D. Walls, Editors.: Springer Berlin / Heidelberg, 1983.
10. Zhang N., Wang W., Zhu X., et al. // Opt. Express. 2011. V. 19. No. 9. P. 8870
11. D'Souza B.C. Development of impulse measurement techniques for the investigation of transient forces due to laser-induced ablation. ... Ph.D. University of Southern California, 2007.
12. Sinko J. Vaporization and shock wave dynamics for impulse generation in laser propulsion. ... Ph.D. Huntsville: University of Alabama, 2008.
13. Scharring S., Sinko J., Sasoh A., et al. // International Journal of Aerospace Innovations. 2011. V. 3. No. 1. P. 33
14. Phipps C.R., Turner T.P., Harrison R.F., et al. // Journal of Applied Physics. 1988. V. 64. No. 3. P. 1083
15. Vorobyev A.Y., Guo C. // Journal of Physics: Conference Series. 2007. V. 59. No. P. 418
16. Mori K., Characteristics of laser ablation of pre-heated polymer materials, in 27th Plasma Processing Technical Committee (SPP-27). 2010: Yokohama.
17. Hosoya N., Kajiwara I., Hosokawa T. // Journal of Sound and Vibration. 2012. V. 331. No. 6. P. 1355
18. Rocca S., et al. // Measurement Science and Technology. 2006. V. 17. No. 4. P. 711.
19. Horisawa H., Sumida S., Funaki I. // AIP Conference Proceedings. 2010. V. 1278. No. 1. P. 184.
20. Jamison A.J., Ketsdever A.D., Muntz E.P., Accurate Measurement of Nano-Newton Thrust for Micropropulsion System Characterization, in 27th International Electric Propulsion Conference. 2001: Pasadena.
21. Pottinger S.J., Lamprou D., Knoll A.K., et al. // Review of Scientific Instruments. 2012. V. 83. No. 3. P. 033504.
22. Kremeyer K. // Proc. SPIE. 2008. V. 7005. P. 700506-17.
23. Cubbin E.A., Ziemer J.K., Choueiri E.Y., et al. // Review of Scientific Instruments. 1997. V. 68. No. 6. P. 2339
24. Polzin K.A., Markusic T.E., Stanojev B.J., et al. // Review of Scientific Instruments. 2006. V. 77. No. 10. P. 105108-9.
25. Choi S., Han T.—h., Gojani A., et al. // Applied Physics A. 2010. V. 98. No. 1. P. 147
26. Kremeyer K., Lapeyre J., Hamann S. // Proc. AIP. 2008. V. 997. P. 147
27. Eckel H.—A., Schall W., Walther S., Lightcraft Impulse Measurements under Vacuum. 2003.
28. Michaelis M.M., Moorgawa A., Forbes A., et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4760. P. 691
29. Watanabe K., Takahashi T., Sasoh A. // Proc. AIP. 2004. V. 702. P. 115
30. Myrabo L.N. // Proc. AIP. 2003. V. 664. P. 49
31. Watanabe K., Sasoh A. // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2005. V. 48. No. 159. P. 49
32. Shi L., Zhao S.—H., Chu X.—C., et al. // Europhysics Letters. 2009. V. 85. No. 5. P. 55001.
33. Gamero-Castaño M., Hruby V., Martínez-Sánchez M., A Torsional Balance that Resolves Sub-micro-Newton Forces, in 27th International Electric Propulsion Conference. 2001: Pasadena.
34. Selden N.P., Ketsdever A.D. // Review of Scientific Instruments. 2003. V. 74. No. 12. P. 5249
35. Pancotti A.P., Gilpin M., Hilario M.S. // Review of Scientific Instruments. 2012. V. 83. No. 3. P. 035109.
36. Sumida S., Horisawa H., Funaki I. // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan. 2009. V. 7. No.26. P. Pb_159
37. Phipps C.R., Luke J.R., Helgeson W.D., A 25nN Low-Noise Thrust Stand for Microthrusters, in International Electric Propulsion Conference. 2005: 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, in 24th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. 2004: Monopoli (Bari), Italy, 10-16 July 2004.
39. Gamero-Castano M. // Review of Scientific Instruments. 2003. V. 74. No. 10. P. 4509
40. Horisawa H., Kawakami M., Kimura I. // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2005. V. 81. No. 2. P. 303
41. Ketsdever A.D., D'Souza B.C., Lee R.H. // Journal of Propulsion and Power. 2008. V. 24. No. 6. P. 1386
42. Ketsdever A.D., Lee R.H., Lilly T.C. // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2005. V. 15. No. P. 2254.
43. Rinaldi C., Boggio N.G., Rodriguez D., et al. // Applied Surface Science. 2011. V. 257. No. 6. P. 2019

44. *Canuto E., Rolino A.* // ISA Transactions. 2004. V. 43. No. 2. P. 169
45. *Koizumi H., Komurasaki K., Arakawa Y.* // Review of Scientific Instruments. 2004. V. 75. No. 10. P. 3185
46. *Phipps C.R.* 2008. Patent US 2008/0062433.
47. *Merkowitz S.M., Maghami P.G., Sharma A., et al.* // Classical and Quantum Gravity. 2002. V. 19. No. 7. P. 1745.
48. *Grubišić A.N., Gabriel S.B.* // Measurement Science and Technology. 2010. V. 21. No. 10. P. 105101.
49. *West M.D., Charles C., Boswell R.W.* // Review of Scientific Instruments. 2009. V. 80. No. 5. P. 053509–9.
50. *Phipps C.R.* Micro Laser Plasma Thrusters for Small Satellites. 2002, Photonic Associates: Santa Fe.
51. *D'Souza B.C., Ketsdever A.D.* // Review of Scientific Instruments. 2005. V. 76. No. 1. P. 015105.
52. *Moeller T., Polzin K.A.* // Review of Scientific Instruments. 2010. V. 81. No. 11. P. 115108–7.
53. *Nagao N., Yokota S., Komurasaki K., et al.* // Review of Scientific Instruments. 2007. V. 78. No. 11. P. 115108–4.
54. *Sinko J., Mukundarajan V., Porter S., et al.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6261. P. 626131–12.
55. *Sinko J.* Time resolved force and imaging study on the laser ablation of liquids. M. Sc. Huntsville: University of Alabama in Huntsville, 2005. 88 P.
56. *Борисенок В.А., Симаков В.Г., Куропаткин В.Г., et al.* // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 4. С. 113
57. *Любченко Ф.Н., Феденев А.В., Босак Н.А., et al.* // Космонавтика и ракетостроение. 2009. № 3. С. 62
58. *Holmes B.* // Experimental Mechanics. 1985. V. 25. No. 1. P. 32
59. *Sterling E., Lin J., Sinko J., et al.* // Proc. AIP. 2006. V. 830. P. 247
60. *López D., Decca R.S., Fischbach E., et al.* // Bell Labs Technical Journal. 2005. V. 10. No. 3. P. 61
61. *Sterling E., Lin J., Sinko J., et al.* // Proc. AIP. 2005. V. 830. P. 247
62. *Požar T., Petkovšek R., Možina J.* // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2008. V. 92. No. 4. P. 891
63. *Požar T., Možina J.* // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2008. V. 91. No. 2. P. 315
64. *Furutani H., Fukumura H., Masuhara H., et al.* // J. Phys. Chem. B. 1998. V. 102. No. 18. P. 3395
65. *Lin J., Thompson M.S., Pakhomov A.V.* // Proc. SPIE. 2004. V. 5448. P. 465
66. *Fujiwara T., Miyasaka T.* // Proc. AIP. 2004. V. 702. P. 80
67. *Ushio M., Komurasaki K., Kawamura K., et al.* // Shock Waves. 2008. V. 18. No. 1. P. 35
68. *Sinko J.E., Pakhomov A.V.* // Proc. AIP. 2008. V. 997. P. 121
69. *Lin J.* Time-resolved imaging for the dynamic study of ablative laser propulsion. Ph. D. Huntsville: University of Alabama in Huntsville, 2004.
70. *Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., et al.* // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. С. 104
71. *Mori K., Anju K., Sasoh A., et al.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6261. P. 626125–8.
72. *Sasoh A., Mori K., Anju K., et al.* // Proc. AIP. 2008. V. 997. P. 232
73. *Taylor G.* // Proc. R. Soc. Lond. A. 1950. V. 201. No. 1065. P. 159
74. *Semerok A.F., Chaleard C., Detalle V., et al.* // Proc. SPIE. 1998. V. 3343. P. 1049
75. *Liu H.C., Mao X.L., Yoo J.H., et al.* // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 1999. V. 54. No. 11. P. 1607
76. *Fishburn J.M., Withford M.J., Coutts D.W., et al.* // Applied Surface Science. 2006. V. 252. No. 14. P. 5182
77. *Dumont T., Bischofberger R., Lippert T., et al.* // Applied Surface Science. 2005. V. 247. No. 1–4. P. 115
78. *Jacquot P.* // Strain. 2008. V. 44. No. 1. P. 57
79. *Vorobyev A.Y., Guo C.* // Applied Physics Letters. 2005. V. 86. No. 1. P. 011916–3.
80. *Martan J., Herve O., Lang V.* // Journal of Applied Physics. 2007. V. 102. No. 6. P. 064903–6.
81. *Bayle F., Doubenskaia M.* // Proc. SPIE. 2008. V. 6985. P. 698505–8.
82. *Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., et al.* // Письма в Журнал технической физики. 2010. Т. 36. № 13. С. 8
83. *Протасов Ю.Ю.* // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 2. С. 60.
84. *Schall W.O., Eckel H.— A., Tegel J., et al., Properties of Laser Ablation Products of Delrin with CO2 Laser (CD-ROM).* 2004.
85. *Phipps C.R., Luke J.R., Funk D.J., et al.* // Proc. SPIE. 2004. V. 5448. P. 1201
86. *Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д., et al.* // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 1. С. 53–62.
87. *Zheng Z.Y., Zhang J., Lu X., et al.* // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2006. V. 83. No. 2. P. 329
88. *Sinko J.E., Scharring S., Eckel H.— A., et al.* // Proc. AIP. 2010. V. 1230. P. 125

Verification of methods for evaluation of micro- and nanonewton recoil momentum at solid targets laser ablation

E. Yu. Loktionov, Yu. S. Protasov, and Yu. Yu. Protasov

Bauman Moscow State Technical University
52-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: stcpe@bmstu.ru

The comparative analysis for opto-mechanical characteristics experimental registration methods has been performed. The evaluation of methods is done for small and ultra small recoil momenta ($I_M = 10^{-12}$ – 10^{-3} N·s) at powerful laser radiation ($I_0 \sim 10^5$ – 10^{15} W/cm²) interaction with solid targets. Diagnostic techniques application areas, sensitivity, spatial and temporal resolution, instrumental realization complexity, and obtained results correspondence are discussed.

PACS: 07.05.Fb, 07.07.Df, 07.10.— h, 79.20.Eb

Keywords: recoil momentum, thrust, specific impulse, momentum coupling coefficient, registration methods

Bibliography — 88 references

Received February 26, 2013