

УДК 621.327

Прямое измерение энергии однократного лазерного импульса килоджоульного уровня методом терморасширения поглощающей среды

В. И. Баринов

Приведены результаты теоретического анализа и экспериментального исследования процедуры прямого измерения энергии однократного лазерного импульса килоджоульного уровня методом учета объемного теплового расширения водной среды, поглощающей лазерное излучение.

PACS: 06.30-k

Ключевые слова: лазерный импульс, энергия, тепловое расширение, вода, измерение.

Введение

Для измерения энергетических параметров лазерного излучения используются разнообразные методы, основанные на различных физических и химических эффектах взаимодействия лазерного излучения с веществом, причем последнее может находиться в любом агрегатном состоянии [1, 2]. Однако наиболее широкое распространение получили методы, основанные на преобразовании энергии лазерного излучения в тепловую энергию (*тепловой метод*) и в энергию электрического тока (*фотоэлектрический и термоэлектрический методы*). Реже применяется *пандемоторный метод*, основанный на преобразовании энергии лазерного излучения в механическую энергию.

Определенную специфику имеют так называемые прямые методы измерения энергии однократных или редко повторяющихся одиночных лазерных импульсов килоджоульного или мегаджоульного уровня. Прямой (или абсолютный) метод измерения подразумевает в данном случае, что значение энергии импульса (в том числе из серии редких импульсов) излучения лазера лежит внутри энергетического диапазона измерителя энергии. Как правило, благодаря относительной легкости калибровки и широкому рабочему спектральному диапазону здесь наиболее целесообразно применять тепловой метод измерения, в котором приращение тепловой энергии некоего приемного (первичного) измерительного преобразователя, считающееся равным поглощенной лазерной энергии, впоследствии измеряется тем или иным способом.

Заметим, что все подобные тепловые преобразователи, в принципе, являются калориметрами. Для измерения тепловой энергии, выделившейся в таком калориметре, можно использовать:

термоэлектрический эффект Зеебека (возникновение термоЭДС между нагретым и холодным спаями двух разнородных металлов или полупроводников);

явление изменения сопротивления металлов и полупроводников при изменении температуры (боллометрический эффект);

фазовые переходы "твердое тело—жидкость" (лед—вода);

эффект линейного или объемного расширения поглощающих веществ при нагревании.

Отечественной промышленностью серийно выпускаются приборы калориметрического типа (например, ИМО-2, ИКТ-1Н, ОСИЭ и др.) для прямого измерения энергии лазерного излучения, в том числе в режиме однократных импульсов. Однако их энергетический диапазон сверху обычно ограничивается величиной порядка 10—100 Дж. Это подразумевает, что измерение энергии импульса гораздо более высокого уровня должно проводиться с использованием ослабителя или ответвителя лазерного излучения, что при определенных условиях может привести к существенным погрешностям относительных измерений по сравнению с прямыми (абсолютными) измерениями.

Таким образом, задача прямого измерения энергии однократного лазерного импульса (ОЛИ) при больших уровнях энергии (порядка 1 кДж и выше) приобретает самостоятельное значение. К ней может привести и тривиальное отсутствие в лаборатории соответствующей серийной измерительной техники для проведения хотя бы относительных измерений характеристик высокоэнергетических лазерных импульсов.

Цель данной работы — разработка рационального метода теплового измерения энергии ОЛИ килоджоульного уровня.

Баринов Владимир Иванович, доцент.
Университет "Дубна", филиал "Угреша".
Россия, 140090, г. Дзержинский Московской обл.,
ул. Ак. Жукова, 24.
Тел. 8 (495) 551-17-00. E-mail: barinov@uni-u.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2010 г.

Анализ теплового метода измерения энергии ОЛИ на основе объемного расширения поглощающей среды

В существующих серийных тепловых измерителях лазерной энергии калориметрическая система содержит внутреннее калориметрическое тело (приемный элемент), в котором протекает процесс выделения (или поглощения) тепла. Через его внешнюю поверхность или добавочную оболочку происходит теплообмен калориметрического тела путем теплопроводности с измерительным термоэлектрическим элементом (термопара, болометр и т. п.). Другими словами, непосредственно измеряемой физической величиной является приращение температуры калориметрического тела.

В рассматриваемых калориметрах наибольшее распространение получили твердотельные приемные измерительные преобразователи. Такие преобразователи часто изготавливают в виде медных полостей сравнительно небольшого объема в форме полого конуса, сферы с отверстием, полого цилиндра, а также комбинаций этих элементов. За счет использования эффекта многократных отражений излучения внутри полости удается увеличить коэффициент поглощения приемного преобразователя и одновременно расширить рабочий диапазон длин волн. Однако в случае высоких значений энергии лазерного импульса здесь могут реализовываться большие интенсивности лазерного излучения (плотности потока мощности), которые, в свою очередь, могут привести к повреждениям всего прибора. Это, собственно, и ограничивает обычно диапазон измеряемых энергий сверху. Кроме того, заметное увеличение температуры оболочки калориметрического тела увеличивает роль конвекции и теплового излучения, что ведет к дополнительным погрешностям при измерениях.

Приведенные рассуждения, а также желание максимально упростить процесс организации измерительных отсчетов заставляют отказаться от термоэлектрических измерительных устройств на пути разработки и создания абсолютного измерителя ОЛИ килоджоульного уровня. С этой целью была предпринята попытка рассмотрения возможностей использования для индикации и измерения поглощенной лазерной энергии эффекта объемного теплового расширения (терморасширения) калориметрического тела, но уже в жидкой фазе. Последнее обстоятельство связано с относительной простотой измерения приращения объема в жидкой среде.

Заметим, что данный метод пока не получил заметного распространения в лабораторной практике несмотря на свою очевидность.

В дальнейшем весь анализ будет конкретизироваться под длину волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм,

хотя методологически он пригоден и для лазерного излучения с другими длинами волн.

Поскольку жидкая среда, с одной стороны, должна исключить протекание при нагреве от лазерного воздействия каких-либо химических или фазовых превращений, а с другой — обеспечить достаточно протяженный участок поглощения для $\lambda = 1,06$ мкм, чтобы избежать значительных локальных изменений температуры, то в качестве калориметрического тела целесообразно выбрать обыкновенную воду.

Из вышесказанного ясно, что объем воды в условиях практических измерений не должен быть слишком малым с точки зрения поглощения и нагрева. Действительно, показатель поглощения в воде для $\lambda = 1,06$ мкм равен $k = 0,15$ см⁻¹, а ее удельная теплоемкость $c = 4,23 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) хотя и довольно высокая, но необходимо обеспечить малость локального изменения температуры при поглощении, так как коэффициент объемного рас-

ширения воды $\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT}$ очень заметно зависит от температуры. Это обстоятельство при несоблюдении условия малости локального изменения температуры чрезвычайно затруднит адекватную интерпретацию экспериментальных результатов в предлагаемом методе. В подтверждение серьезности указанных оговорок для этого метода измерения в нижерасположенной таблице представлены данные по температурному изменению β в широкой области температур [3, 4].

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta, 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta, 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 5 | 0,15 | 50 | 4,6 |
| 10 | 0,9 | 60 | 5,2 |
| 20 | 2,1 | 70 | 5,8 |
| 30 | 3,0 | 80 | 6,4 |
| 40 | 3,9 | 90 | 7,0 |

Конструктивно калориметрическое тело, т. е. объем воды целесообразно заключить в тонкостенную стеклянную оболочку (контейнер), так как показатель поглощения стекла k и его коэффициент объемного расширения β значительно (в несколько раз) меньше, чем для воды [3—5]. Другими словами, влиянием стеклянного контейнера на результаты измерения можно пренебречь.

Предварительные оценки показывают, что приемлемым объемом воды (с точки зрения вышеуказанных условий) для измерения энергии лазерного импульса килоджоульного уровня является объем $V \sim 1$ дм³, т. е. 1 л. При этом ожидаемое увеличение объема ΔV составляет порядка 10 мм³. Такое незначительное приращение объема воды, полностью заполняющей измерительный стеклянный контейнер, можно зафиксировать, например, с помощью узкой стеклянной трубки с внутренним

диаметром в несколько миллиметров, причем эта трубка должна находиться в верхней части контейнера (рис. 1).

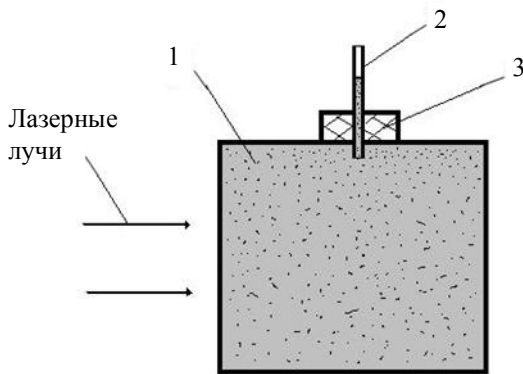


Рис. 1. Схема прямого измерения энергии лазерного импульса: 1 — вода в стеклянном контейнере; 2 — стеклянная трубка с внутренним диаметром 3 мм; 3 — резиновая пробка

Считая теперь, что все вышеперечисленные условия выполнены, можно провести анализ работы обсуждаемого метода измерения энергии ОЛИ. В самом начале запишем очевидное равенство в предположении практически полного поглощения лазерного излучения в контейнере с водой:

$$Q = \int_V q(\vec{r}) dV,$$

где Q — полная поглощенная энергия лазерного импульса;

$q(\vec{r})$ — локальная плотность поглощенной лазерной энергии и одновременно плотность добавленной тепловой энергии в среде.

Учитывая эту добавленную тепловую энергию, можно получить локальное увеличение температуры $\Delta T(\vec{r})$ в среде на основании равенства, отражающего локальное сохранение энергии в объеме dV :

$$q(\vec{r}) dV = c\rho \Delta T(\vec{r}) dV,$$

где c — удельная теплоемкость воды;

ρ — плотность воды, зависимость которой от температуры можно пренебречь при предполагаемой малости ΔT .

Следовательно, имеем соотношение

$$\Delta T = \frac{q}{c\rho}.$$

Если, как уже предположено выше, локальное увеличение температуры невелико (отсутствует, в частности, какая-либо фокусировка излучения на всей длине поглощения излучения в среде), то можно считать β в наших условиях постоянной величиной. Поскольку увеличение локальной температуры приводит к локальному возрастанию на

величину $\delta V(\vec{r})$, локально соответствующего исходного бесконечно малого объема dV , то этот факт математически можно выразить в виде следующего равенства:

$$\delta V(\vec{r}) = \beta \cdot \Delta T \cdot dV = \beta \cdot \frac{q}{c\rho} \cdot dV.$$

Полное приращение объема среды ΔV (в результате поглощения энергии лазерного излучения Q и ее преобразования в тепловую энергию) записываем в виде следующего выражения

$$\Delta V = \int_V \delta V(\vec{r}) = \int_V \beta \frac{q}{c\rho} dV = \frac{\beta}{c\rho} \int_V q(\vec{r}) dV = \frac{\beta}{c\rho} Q.$$

Таким образом, получаем связь между поглощенной энергией Q и полным изменением (приращением) объема среды в виде соотношения

$$Q = \frac{c\rho}{\beta} \cdot \Delta V.$$

Имея в виду, что в предлагаемом методе измеряемой величиной является увеличение высоты столбика воды в узкой стеклянной трубке Δh в верхней части контейнера, получаем окончательное выражение для расчета энергии лазерного импульса в джоулях:

$$Q = \frac{c\rho}{\beta} \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \cdot \Delta h.$$

Строго говоря, полученный результат надо для уменьшения систематической ошибки увеличить, примерно, на 5 %, чтобы учесть частичное отражение от передней стенки контейнера в соответствии с известными формулами Френеля [6] (конкретно, 4,5 % от границы "воздух—стекло" и 0,5 % от границы "стекло—вода", если принять для стекла показатель преломления $n = 1,54$, а для воды $n = 1,33$).

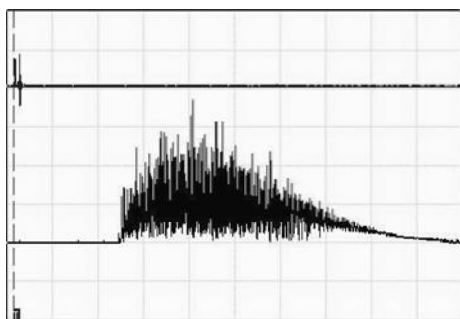
Полученный результат показывает, что при соблюдении вышеуказанных условий высота подъема воды в стеклянной трубке Δh , пропорциональная поглощенной лазерной энергии, не зависит от объема, формы и массы воды в стеклянном контейнере, а также от характера мгновенного распределения плотности поглощенной энергии в объеме воды. Все это, а также простота измерения являются очевидными достоинствами обсуждаемого метода прямого измерения энергии ОЛИ килоджоульного уровня. К сказанному можно добавить быстродействие метода, так как терморасширение воды происходит со звуковой скоростью. Другими словами, здесь результат устанавливается за время $t \sim 10^{-3}$ с, тогда как в существующих

калориметрических измерителях (с термоэлектрическим способом измерения изменений температуры) время установления показаний составляет обычно не менее нескольких секунд. Очевидно также, что нет реальных ограничений на длительность импульса лазерного излучения.

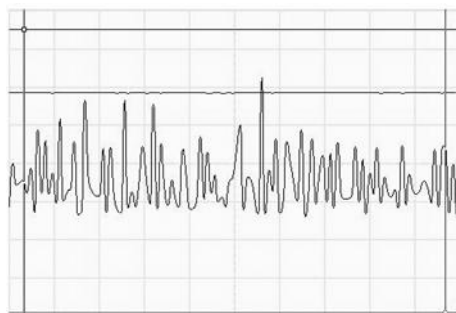
Конечно, данный метод прямого измерения энергии ОЛИ применим только к импульсам с высоким уровнем энергии (килоджоульного и, возможно, мегаджоульного). Он не заменяет существующие методы, в том числе реализованные в виде серийных приборов, пригодных для измерения энергии ОЛИ, а дополняет их в своей энергетической нише.

Эксперимент

Обсужденный прямой метод измерения энергии ОЛИ был проверен на лазерной установке с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм (стекло с неодимом), работающей в режиме свободной генерации. На рис. 2, *a*, *б* представлена осциллограмма лазерного импульса, полученная с помощью *pin*-фотодиода ФД-342 и цифрового осциллографа. Видно, что общая длительность лазерного импульса составляет $\tau = 10^{-3}$ с, а само излучение носит "пиковый" характер, типичный для режима свободной генерации данного типа лазера [1].



a



б

Рис. 2. Осциллограмма лазерного импульса (нижний луч) — "пиковый" режим:
a — развертка по горизонтали 200 мкс/дел.; *б* — развертка по горизонтали 5 мкс/дел. Верхний луч на осциллограммах — импульсы запуска лазерной установки. Чувствительность по вертикали 1 В/дел.

Внутренний диаметр стеклянной трубки составлял $d = 3$ мм, размеры стеклянного контейнера — $10 \times 10 \times 10$ см (см. рис. 1). Задняя стенка (по ходу луча) контейнера обклеивалась металлической фольгой. Лазерный луч не фокусировался и имел диаметр приблизительно 40 мм.

Измерения проводили при температуре воздуха и воды $t = 24$ °С, что соответствует значению коэффициента объемного расширения $\beta = 2,4 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹ в соответствии с вышеприведенной таблицей по температурному изменению этого коэффициента; отсчет высоты столба воды в трубке — по нижнему краю мениска.

После экспериментального определения изменения высоты подъема воды Δh в стеклянной трубке в верхней части контейнера проведен расчет энергии ОЛИ по скорректированной формуле (учитывающей отражение от передней стенки контейнера):

$$Q = 1,05 \cdot \frac{c\rho}{\beta} \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \cdot \Delta h.$$

Отдельные результаты измерений и расчетов можно представить в следующем виде:

высота $\Delta h = 6,5$ мм соответствует энергии ОЛИ $Q = 6,0 \cdot 10^2$ Дж = 0,60 кДж;

высота $\Delta h = 10$ мм соответствует энергии ОЛИ $Q = 9,2 \cdot 10^2$ Дж = 0,92 кДж.

Систематическая ошибка для различных измерений оценивалась величиной 15—20 %. Данные результаты прямых измерений энергии ОЛИ были сопоставлены с результатами относительных измерений, проведенных с помощью серийного прибора ИМО-2. Результаты прямых измерений были в среднем на 20 % выше относительных. Это различие выходит за пределы систематической погрешности ИМО-2 (~10 %), что указывает, в частности, на преимущество прямых измерений по сравнению с относительными.

Заключение

Результаты анализа предлагаемого метода прямого измерения энергии ОЛИ килоджоульного уровня на основе терморасширения поглощающей среды показывают на примере излучения с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, что при соблюдении определенных необременительных условий высота подъема воды в стеклянной трубке Δh в верхней части стеклянного контейнера, пропорциональная поглощенной лазерной энергии Q , не зависит от объема, формы и массы воды в стеклянном контейнере, а также от характера мгновенного распределения плотности поглощенной энергии в объеме воды. Все это, а также простота измерения

являются очевидными достоинствами обсуждаемого метода прямого измерения энергии ОЛИ килоджоульного уровня. К сказанному можно добавить быстродействие метода, так как терморасширение воды происходит со звуковой скоростью. Другими словами, здесь результат устанавливается за время $t \sim 10^{-3}$ с, тогда как в существующих калориметрических измерителях (с термоэлектрическим способом измерения изменений температуры) время установления показаний составляет обычно не менее нескольких секунд. Очевидно также, что нет реальных ограничений на длительность импульса лазерного излучения.

Проведенные эксперименты подтверждают работоспособность предложенного метода.

Данный метод прямого измерения энергии ОЛИ на основе терморасширения поглощающей среды (воды) применим только к импульсам с достаточно высоким уровнем энергии (килоджоуль-

ного и, возможно, мегаджоульного). Он не заменяет существующие методы, в том числе реализованные в виде серийных приборов, пригодных для измерения энергии ОЛИ, а дополняет их в своей энергетической нише.

Л и т е р а т у р а

1. О'Ши Д., Колен Р., Родс У. Лазерная техника. — М.: Атомиздат, 1980.
2. ГОСТ 25212—82. Методы измерения энергии импульсов излучения лазеров. 1983.
3. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. — М.: Наука, 1982.
4. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. — М.: Мир, 1985.
5. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах. Справочник. — М.: Машиностроение, 1980.
6. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика. — М.: Наука, 1980.

Direct measurement of the single laser pulse energy of a kilojoule level by the absorbing medium thermal expansion method

V. I. Barinov

Dubna University, Ugresha Branch, 24 Academician Zhukov str., Dzerzhinsky,
Moscow region, 140090, Russia
E-mail: barinov@uni-u.ru

Results of theoretical analysis and experimental research of the procedure for direct measurement of the single laser pulse energy are given. The method is based on thermal expansion of an absorbing medium and intended for the kilojoule level energy of the laser pulse.

PACS: 06.30-k

Keywords: laser pulse, energy, thermal expansion, water, measurement.

Bibliography — 6 references.

Received July 16, 2010