

ИЗМЕРИТЕЛ НА ЕНЕРГИЯ ЗА IR ИМПУЛСНИ ЛАЗЕРИ

Петър П. Брънзалов

ppb@vtu.bg

ВТУ “Тодор Каблешков”
1574 София, ул. “Гео Милев” 158,
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: измерител на енергията на IR лазери, измерител на енергия с течен поглъtitел

Резюме: В представената работа е разработен калориметричен измерител на енергията на импулсите за IR (Infrared) лазери, създаден на основата на течен поглъtitел и датчик на температурата. Такъв измерител може да измерва енергията на IR лазерни импулси в широк енергетичен и спектрален диапазон, от 125 mJ до 37 J, в диапазона $2\div 20\ \mu\text{m}$ и е разработен на основата на спектралните и термичните характеристики на използвани в IR оптика материали. Определени са точността и интервала от време, за който датчика се термостабилизира.

1. ВЪВЕДЕНИЕ.

1.1. Съвременно състояние на проблема. Измерването на енергията на мощни лазерни импулси в IR (Infrared) спектралния диапазон не е тривиална задача и се основава на няколко основни вида измерители: (i) калориметрични измерители [1, 2]; (ii) болометрични измерители [3]; (iii) пондомоторни измерители [4] и (iv) пироелектрични измерители [4]. Обикновено използваните измерители са твърдотелни, което при по-голяма енергия на измерваните импулси, предизвиква локално изпарение на материала на измерителя и преустановяване на неговата нормална работа.

В IR спектралния диапазон $2\div 20\ \mu\text{m}$ най-използваните лазерни източници са Cr-Tm-YAG лазери ($2,01\ \mu\text{m}$), Cr-Tm-No лазери ($2,12\ \mu\text{m}$), Er-YAG лазери ($2,80\div 2,94\ \mu\text{m}$), CO лазери ($5,0\div 6,3\ \mu\text{m}$), CO₂ лазери ($9,6\div 10,6\ \mu\text{m}$) и други.

1.2. Цел на работата. В настоящата работа е представен калориметричен измерител с течен поглъtitел, при който енергията на погълнатото лазерно излъчване се разпределя в целия обем на течността и така се избягват грешките от локалните радиационни нагрявания на поглъtitеля на калориметъра. При течния поглъtitел не са опасни локалните радиационни нагрявания, поради самовъзстановяването на хомогенността му и така поглъtitеля не може да бъде повреден. Измерителят може да се използва за измерване на енергията на импулсите на IR импулсни лазери и на мощността на IR непрекъснати лазери, ако излъчването на последните се модулира.

2. ТЕОРЕТИЧНИ СЪОБРАЖЕНИЯ.

2.1. Избор на течния погълтител. Бързо термостабилизиране на течния погълтителен елемент на измерителя може да постигне тогава, когато лазерното излъчване се поглъща в сравнително тънък слой на течността. Освен това, един тънък погълтителен слой намалява общата маса на необходимата течност, а това увеличава чувствителността на измерителя. Поглъщането на лазерното излъчване в течности се подчинява на закона на Бугер-Ламберт [5]:

$$(1) \quad I = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z),$$

където: I [W/m^2] – е интензивността на лазерното излъчване, след като е изминало разстояние z в поглъщащата течност; I_0 [W/m^2] – е интензивността на лазерното излъчване падащо на повърхността на поглъщащата течност (когато $z = 0$); z [m] – е разстоянието преминало от лазерното излъчване в течността; α [m^{-1}] – е линейния коефициент на поглъщане на лазерното излъчване от течността.

Ако погълтителният елемент на измерителя съдържа отражателна повърхност зад течността, то лазерното излъчване ще измине двоен пробег в течността и дебелината на течността може да се намали два пъти. Ако приемем, че след двойния пробег в течността, е допустимо само 1 % от лазерното излъчване да остане непогълнато, то това позволява да се определи минималната стойност на коефициента α , при който практически ще се поглъща цялата енергия на лазерното излъчване. При дебелина на поглъщащата течност $0,5 \text{ mm} = 0,05 \text{ cm}$, от закона на Бугер-Ламберт ще имаме:

$$(2) \quad I/I_0 = 0,01 = \exp(-\alpha \cdot z) = \exp(-\alpha \cdot 2L) = \exp(-\alpha \cdot 2 \cdot 0,05),$$

където: $I/I_0 = 0,01$ – определя, че само 1 % от лазерното излъчване няма да се погълне след двойния пробег в течността; L [cm] – е дебелината на течния погълтител ($2L = z$). Горното съотношение определя, че при определената дебелина на течния погълтител ($0,5 \text{ mm}$), минималната стойност на коефициента на поглъщане α , трябва да е $\alpha_{\min} = 46,05 \text{ cm}^{-1}$, за всяка измервана дължина на вълната на лазерното излъчване.

На Fig.1 е показан линейния коефициент на поглъщане α за вода в течно състояние в спектралния диапазон $40 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$.

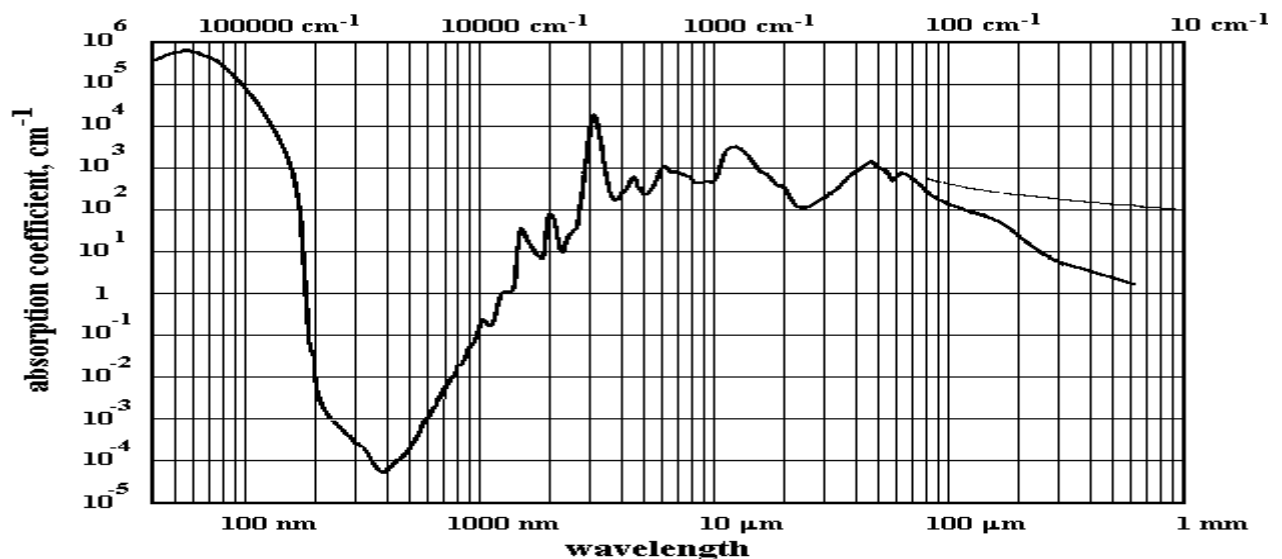


Fig.1. Линеен коефициент на поглъщане на вода в течно състояние в спектралния диапазон $40 \text{ nm} \div 1 \text{ mm}$.

От графиката на Fig.1 може да се определи коефициента на поглъщане във вода,

за лазерното излъчване на най-важните лазерни източници в IR спектралната област. Тези резултати са показани в таблица 1, като е определена и дебелината на слоя вода, в който ще се погълне 99 % от лазерното излъчване.

таблица 1

	лазерен източник	дължина на вълната	коэф. на поглъщане, α	дебелина на слоя вода (99%)
1	Cr-Tm-YAG	2,01 μm	$8,5 \cdot 10^1 \text{ cm}^{-1}$	0,054 cm
2	Cr-Tm-Ho	2,12 μm	$8,8 \cdot 10^1 \text{ cm}^{-1}$	0,053 cm
3	Er-YAG	2,80÷2,94 μm	$7,5 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-1}$	0,006 cm
4	CO-лазер	5,0-6,3 μm	$4,4 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-1}$	0,011 cm
5	CO ₂ -лазер	9,6-10,6 μm	$1,0 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$	0,005 cm

От Fig.1 и от таблица 1 може да се заключи, че течна вода с дебелина на слоя 0,5 mm, е удачен и ефективен погълтител на IR лазерно излъчване в целият диапазон 2-180 μm .

2.2. Избор на пропускащия лазерното излъчване материал. Като оптически прозорец, пропускащ лазерното излъчване до течния погълтител на измерителя, могат да се използват различни оптични материали използвани в IR оптиката, но тяхната цена обикновено е много висока. Изключение се явява полиетиленът, който когато е във вид на тънко фолио (50÷100 μm), има висока прозрачност в IR спектралната област. На Fig.2 е показан спектъра на пропускане на полиетиленово фолио с дебелина 130 μm в спектралната област 2÷20 μm . Видно е, че за всички лазерни източници от таблица 1, коефициента на пропускане е около и над 0,9. При по-малка дебелина на фолиото, този коефициента на пропускане би бил още по-голям. Това прави полиетиленовото фолио удачен и евтин материал за оптичен прозорец на течния погълтител. Нещо повече, поради малката дебелина на полиетиленовото фолио, погълнатата в него енергия се предава бързо на течния погълтител и това го предпазва от термични повреди. От Fig.2 може да се заключи, че поради отражение на част от лазерното излъчване от повърхността на полиетилена (Fig.2, крива B), то в полиетиленовото фолио се поглъща около 1÷3 % от енергията на лазерното излъчване. При енергия на лазерният импулс 37 J и 2 % поглъщане, в полиетиленовото фолио ще се погълнат около 0,74 J енергия, която ще се превърне в топлина. От уравнението:

$$(3) \quad \Delta Q = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T,$$

където: $\Delta Q = 0,74 \text{ J}$ – е количеството топлина отделена в полиетиленовото фолио; $m_p = 0,029 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ – е масата на полиетиленовото фолио (при дебелина 100 μm); $c_p = 1850 \text{ J/(kg.K)}$ – е специфичната топлоемкост на полиетилен висока плътност, може да се определи с колко градуса ще се повиши температурата на полиетиленовото фолио, или:

$$(4) \quad \Delta T = \Delta Q / (m_p \cdot c_p) = 13,8 \text{ K}.$$

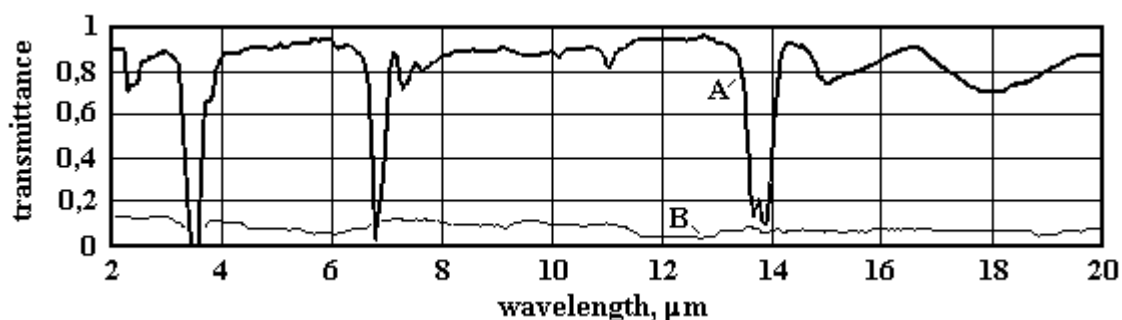


Fig.2. (A) Коефициент на пропускане в инфрачервения диапазон 2÷20 μm на полиетиленово фолио с дебелина около 130 μm ; (B) Коефициент на отражение на полиетиленово фолио в спектралния диапазон 2÷20 μm .

От уравнението на Фурие [5]:

$$(5) \quad \Delta Q = -K_p \cdot (dT/dz) \cdot S \cdot \Delta t,$$

където: $K_p = 0,50 \text{ W/(m.K)}$ – е коефициента на топлопроводност на полиетилена; $S = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ – е апертурата на измерителя; $dT = 13,8 \text{ K}$ – е повишението на температурата на полиетиленовото фолио; $dz = 10^{-4} \text{ m}$ – е дебелината на полиетиленовото фолио, може да се определи времето, за което тази топлина ще се предаде на течния погълтител:

$$(6) \quad \Delta t = \Delta Q / [K_p \cdot (dT/dz) \cdot S] = 0,034 \text{ s}.$$

Така, в рамките на 34 ms, топлината отделена в полиетиленовото фолио, ще се предаде на течния погълтител.

3. ОПИСАНИЕ НА КАЛОРИМЕТЪРА.

3.1. Описание на погълтителния елемент на калориметъра.

Погълтителният елемент (Fig.3) на калориметъра се състои от полимерно тяло, съставено от корпус (1) и капак (2), изработени от тefлон и свързани с 8 броя винтове

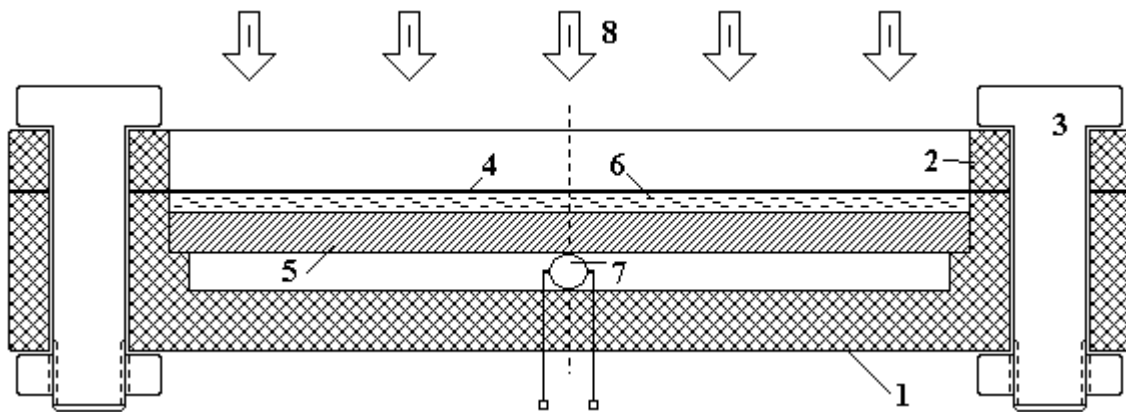


Fig.3. Конструктивно устройство на погълтителния елемент на калориметъра: (1) корпус на погълтителния елемент (тефлон); (2) капак на погълтителния елемент (тефлон); (3) свързващи винтове (M2, 8 бр); (4) полиетиленово фолио с дебелина 100 μm ; (5) меден диск с дебелина 1,0 mm; (6) течен погълтител (дестилирана вода); (7) датчик за измерване на температурата; (8) поток на лазерното излъчване.

M2 (3). Между корпуса (1) и капака (2) е поставено полиетиленово фолио (4) с дебелина 100 μm . В корпуса (2) херметично е монтиран меден диск (5) с дебелина 1,0 mm, като пространството между медния диск (5) и полиетиленовото фолио (4) е 0,5 mm и е запълнено с дестилирана вода (6). В задната част на медния диск (5) е разположен датчик за измерване на температурата (7) (термодвойка). Потокът на измерваното лазерно излъчване (8) се насочва през полиетиленовото фолио (4) към течния погълтител (6) и се поглъща от него. Погълнатата лазерна енергия се превръща в топлина и това се регистрира от датчика на температура (7). Като важна конструктивна особеност трябва да се отбележи това, че медният диск (5) служи не само за отражение на непогълнатото лазерно излъчване (ако има такова), но и за ефективно изравняване на температурата в целият обем на течния погълтител, при неравномерно разпределение на енергията в напречното сечение на лазерния сноп.

3.2. Определяне диапазона на измерваните енергии на лазерните импулси. Важна особеност на така конструирания калориметър е възможността за абсолютно измерване на енергията на лазерните импулси. Енергията на лазерното излъчване се поглъща

основно от три елемента, полиетиленовото фолио (4), медния диск (5) и течния погълтител (6). Горната граница, долната граница и точността на измерваната енергия на лазерните импулси се определят от калориметричното уравнение (3) като се има предвид, че максималната работна температура на полиетилен е 50 °С, а точността на определяне на температурата може да е 0,1 °С или 0,01 °С. Ако калориметъра работи при стайна температура (20 °С), то тогава ще имаме:

$$(7) \quad \Delta Q_{\max} = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T_p^{\max} + m_m \cdot c_m \cdot \Delta T_m^{\max} + m_b \cdot c_b \cdot \Delta T_b^{\max} = \quad (\text{горна граница, } \Delta T = 30 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ = 1,61 + 16,19 + 19,78 = 37,58 \text{ J}$$

$$(8) \quad \Delta Q_{\min} = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T_p^{\min} + m_m \cdot c_m \cdot \Delta T_m^{\min} + m_b \cdot c_b \cdot \Delta T_b^{\min} = \quad (\text{долна граница, } \Delta T = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ = (5,37 + 53,98 + 65,92) \cdot 10^{-3} = 125,27 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

$$(9) \quad \Delta Q_{\min} = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T_p^{\min} + m_m \cdot c_m \cdot \Delta T_m^{\min} + m_b \cdot c_b \cdot \Delta T_b^{\min} = \quad (\text{долна граница, } \Delta T = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ = (5,37 + 53,98 + 65,92) \cdot 10^{-4} = 12,53 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

където: $m_p = 0,029 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ – е масата на полиетиленовото фолио (при дебелина 100 μm); $c_p = 1850 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ – е специфичната топлоемкост на полиетилен; $m_m = 1,402 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ – е масата на медния диск; $c_m = 385 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ – е специфичната топлоемкост на медта; $m_b = 1,575 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$ – е масата на водата; $c_b = 4,1855 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ – е специфичната топлоемкост на водата; $\Delta T_p^{\max} = \Delta T_m^{\max} = \Delta T_b^{\max} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ – е максимално допустимото увеличение на температурата; $\Delta T_p^{\min} = \Delta T_m^{\min} = \Delta T_b^{\min} = 0,1$ (или 0,01) $^\circ\text{C}$ – е минимално регистрируемото увеличение на температурата. Така, диапазона на измеряеми енергии е $125 \text{ mJ} \div 37 \text{ J}$ при точност на измерване на температурата 0,1 $^\circ\text{C}$, и $12,5 \text{ mJ} \div 37 \text{ J}$ при точност на измерване на температурата 0,01 $^\circ\text{C}$. Долната граница на измеряемите енергии представлява и точността на измерителя.

3.3. Време за термостабилизиране на измерителя. Времето за предаване на погълната енергия от полиетилен към водния погълтител е около 34 ms (уравнение (6)). От уравнение (6) може да се определи и времето за предаване на погълната енергия от водния погълтител на медната пластинка:

$$(10) \quad \Delta t = \Delta Q / [K_b \cdot (dT/dz) \cdot S] = 3,27 \text{ s},$$

където: $K_b = 0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ – е коефициента на топлопроводност на водата; $S = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ – е апертурата на измерителя; $dT = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ – е повишението на температурата; $dz = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ – е дебелината на водния слой. Към времето за термостабилизация на измерителя, трябва да се прибави удвоения времеви интервал получен по-горе, понеже топлинния поток след достигането на медната пластина, отново трябва да се преразпредели в течността. В същото време, аналогично може да се определи, че времето за топлопредаване от единия край на медната пластинка до другия и край е 3,10 s, а времето за удвоения пробег ще е 6,20 s. Така максималното време за термостабилизация на измерителя ще бъде:

$$(11) \quad \Delta t_0 = 2 \cdot 3,27 + 2 \cdot 3,10 = 12,7 \text{ s}.$$

Така, най-много след около 12,7 s температурата на измерителя се изравнява и достига максималната си стойност. На практика, при по-равномерно разпределение на енергията в напречното сечение на лазерния сноп, това става след около 3 ÷ 4 s.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В заключение могат да се направят следните важни изводи:

(i) Измерителите на енергия на импулсно лазерно излъчване с течен погълтител притежават съществени предимства спрямо другите видове измерители, като способност за самовъзстановяване на погълтителя, устойчивост на излъчване с висока

импулсна мощност, широк спектрален и енергетичен диапазон на измерваните енергии и др.

(ii) Представеният в тази работа измерител на лазерно излъчване с течен погълтател може да измерва енергията на импулсите на всички най-често използвани лазерни източници в IR спектралния диапазон 2÷20 μm , при енергии от 12,5 mJ (или 125 mJ) до 37 J.

ЛИТЕРАТУРА:

[1]. E. D. West and K. L. Churney, Theory of Isoperibol Calorimetry for Laser Power and Energy Measurements, J. Appl. Phys. 41, 2705-2712 (1970).

[2]. Yu Xuna, Li Qiana, Nie Lianga, Shang Xiaoyana, Liu Baoyuana, Research of the conical cavity high-energy laser energy meter energy loss compensation technique, Ninth International Symposium on Laser Metrology, edited by Chenggen Quan, Anand Asundi, Proc. of SPIE, vol. 7155, 71552R, (2008).

[3]. R. M. Batter, Measuring laser output with rat's nest calorimeter, Electronics, 1963, v.36, No.5, p.18.

[4]. Справочник по лазерной технике, ред. Ю. В. Байбородин, "Техніка", Киев, 1978.

[5]. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Справочник по физике, "Наука", Москва, 1977.