

ГОДИШНИК НА СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Том 111

ANNUAL OF SOFIA UNIVERSITY “ST. KLIMENT OHRIDSKI”

FACULTY OF PHYSICS

Volume 111

СИНЯТА СВЕТЛИНА В ЛАЗЕРНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ – ВЪЗМОЖНОСТИ И ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА

НАСКО ГОРУНСКИ, МАЯ ЖЕКОВА

Лаборатория по лазерна техника, Физически факултет

*Наско Горунски, Мая Жекова. СИНЯТА СВЕТЛИНА В ЛАЗЕРНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ –
ВЪЗМОЖНОСТИ И ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА*

Направено е сравнение на въздействието на синята и инфрачервената светлина върху различни материали. Теоретично са получени температурата на повърхността и нейното изменение в дълбочината на материал, облъчен с лазер. Нагриването в зоната на въздействие е измерено с помощта на инфрачервена камера.

*Nasko Gorunski, Maya Zhekova. BLUE LIGHT IN LASER TECHNOLOGY –
POSSIBILITIES AND CHALLENGES*

The blue and infrared light influences on different materials are compared. The temperature on the surface and its change in depth of material are numerically calculated. Measurements of heating of the materials are made with infrared camera.

Keywords: semiconductor lasers, laser diodes, laser technology, industrial applications on

PACS numbers: 42.55.Px , 42.62.Cf

За контакти: Наско Горунски, ЛЛТ, Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“, ул. Галичица 33А, София 1164, телефон: +359 2 8161 751, E-mail: naskog@phys.uni-sofia.bg

1. УВОД

В основата на всички съвременни лазерни технологии е взаимодействието на светлината с различните вещества. Механизмите са добре известни – поглъщане, отражение и преминаване. Ефективността на взаимодействие зависи както от източника на светлина (лазер), така и от оптичните параметри на средата. В зависимост от оптичните си свойства материалите се делят на прозрачни, полупрозрачни и непрозрачни. Металите, към които се прилагат най-често лазерните технологии, са непрозрачни за видимата светлина, а вълната се поглъща в много тънък повърхностен слой.

В общия случай разпространението на електромагнитна вълна може да се опише теоретично чрез уравненията на Максвел [1]. Оптичните константи могат да се получат от комплексния израз за диелектричната проницаемост. От инженерна гледна точка за пресмятането на тези константи е добре да се избягва използването на сложната електронна теория. Има нужда от приблизителни формули, които да свържат оптичните параметри с добре известни параметри на материала, например електричната проводимост. Поглъщането на светлината при облъчване с лазер на различни вещества е изследвано в [2–5]. Резултатите показват, че металите поглъщат много по-добре вълна с дължина 500 nm, отколкото тази с дължина 1064 nm, и особено с дължина 10^4 nm. По-доброто поглъщане би довело до по-бързо нарастване на температурата в метала, което от своя страна би позволило по-ефективна обработка.

Доскоро единствените кохерентни източници в синята част на спектъра бяха газови лазери – аргонови, криптонови и ексимерни, макар че последните по-скоро генерират ултравиолетова светлина. Експлоатацията на всички тези източници е скъпа. Алтернатива на тези лазери относно дължината на вълната са полупроводниковите лазери, базирани на GaN, които генерират светлина с дължина на вълната около 445 nm. Технологичните трудности около производството им се преодоляват и те стават все по-достъпни и надеждни.

В нашето изследване беше използван полупроводников лазер, генериращ на 445 nm, който е съставна част от гравиреща система.

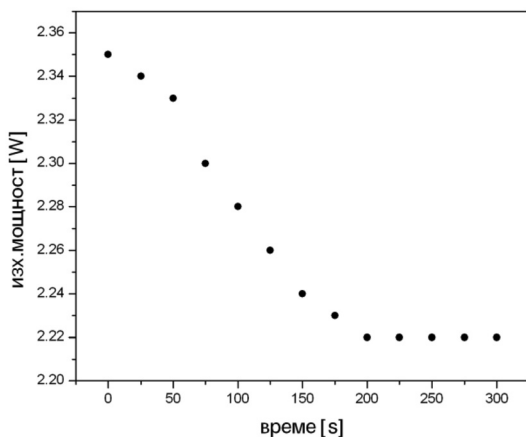
2. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОПТИЧНОТО ЛЪЧЕНИЕ

Изследваните характеристики на синия лазер, имащи отношение към възможните технологични приложения са:

1. Дължина на вълната на генерация – 445 nm.

2. Изходна мощност – стабилността на тази характеристика във времето е от съществено значение за лазерните технологии. Промяната или случайните флукутации биха намалили ефективността на въздействие на светлината върху съответния материал. При измерването на мощността на използвания

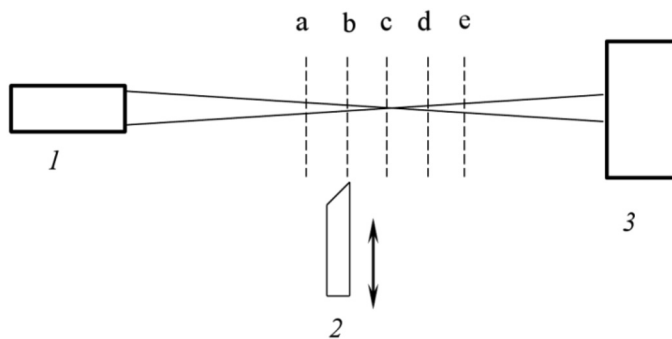
лазер беше установено, че тази, която фигурира в техническите данни като максимална, след включването на лазера пада и след известно време се стабилизира (фиг. 1).



Фиг. 1. Изменение на изходната мощност във времето

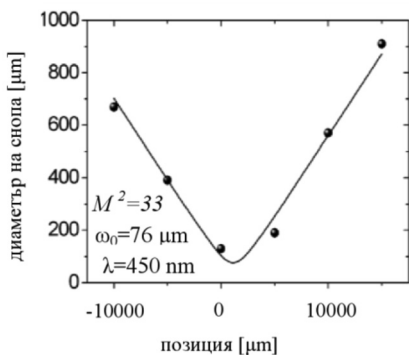
Ефектът най-вероятно се дължи на липсата на добро охлаждане. Характеристиките на полупроводниковите лазери се поддържат постоянни чрез охлаждане с пелтие-елементи, които ефективно отнемат топлината от структурата. В случая диодът се охлажда въздушно и изминава известно време, преди температурата му да се стабилизира.

3. M^2 -фактор. Определяне на оптичното качество на снопа, т. нар. M^2 -фактор, има отношение към възможността за фокусиране на лазерния сноп в петно с най-малки размери. Доброто фокусиране повишава качеството на среза при лазерно рязане, дава възможност за фина обработка на облъчвания материал, намалява термичното натоварване на материала около зоната на облъчване. Един от методите за определяне на този параметър включва използването на събирателна леща, с чиято помощ лазерната светлина се фокусира. Определя се размерът на снопа в множество равнини преди и след шийката на снопа. Под размер (диаметър) се разбира разстоянието между точките, в които мощността (в случая) е 90 и 10% от максималната мощност. Данните позволяват да се направи хиперболичен фит и от параметрите на хиперболата се получава M^2 -факторът. В случая фокусното разстояние е 8 cm, а измервания са направени в 5 равнини. Схемата на опитната постановка е показана на фиг. 2.

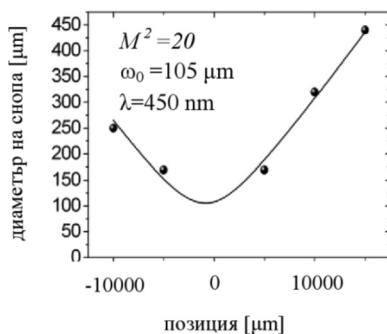


Фиг. 2. Схема на експерименталната установка за измерване на M^2 -фактора на изследвания лазер: 1 – син лазер, 2 – острие, 3 – измерител на мощност; a, b, c, d, e – равнини, в които е измерен размерът на лазерния сноп

Лазерният сноп, излизащ от полупроводниковия лазер, има правоъгълно сечение, което означава, че този фактор ще е различен по двете оси. Резултатите са показани на следващите две фигури (фиг. 3, 4).



Фиг. 3. Резултати от измерванията по бързата ос и апроксимацията им с хипербола



Фиг. 4. Резултати от измерванията по бавната ос и апроксимацията им с хипербола

Стойностите на този фактор не са малки, но въпреки това се вижда, че около фокуса размерите на снопа са $\sim 100 \mu\text{m}$. Предимството на късата вълна е, че при фокусиране диаметърът на снопа във фокуса ще бъде около 2 пъти по-малък в сравнение с този на инфрачервената светлина, фокусирана с леща със същото фокусно разстояние.

3. ЧИСЛЕНО ПРЕСМЯТАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА И НЕЙНОТО ИЗМЕНЕНИЕ В ДЪЛБОЧИНА ЗА РАЗЛИЧНИ МЕТАЛИ

При облъчване на твърдо тяло със светлина част от нея се поглъща и се превръща в топлина. Тази топлина може да се разглежда като вторичен топлинен източник, който определя както разпределението на температурното поле в материала, така и динамиката на изменението на температурата. Решаването на задачата за нагриването изисква познаване както на оптичните и топлинните свойства на телата, така и на пространственото и времевото разпределение на интензитета на лазерното лъчение. В общия случай задачата няма аналитично, а само числено решение. Разпределението на температурата в тялото $T = T(x, y, z, t)$ се дава с уравнението

$$\nabla^2 T - \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{A(x, y, z, t)}{K}$$

където $A(x, y, z, t)$ е количество топлина, отделена в единица обем за единица време; k – коефициент на температуропроводност [m^2/s]; K – коефициент на топлопроводност [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$].

Металите са широко използвани в различни области на човешкия живот, свойствата им са добре проучени и в литературата лесно могат да се намерят данни за оптичните им константи. Ето защо числените пресмятания са направени само за метали и се базират на резултатите, получени в [6, 7].

От особен интерес е изменението на температурата в точката на облъчване. Това изменение беше пресметнато за едни и същи материали под въздействието на две различни дължини на вълната – 445 nm и 1064 nm. Това са дължините на вълните на синия полупроводников лазер и съответно на Nd:YAG лазер, един от най-често използваните технологични инфрачервени лазери.

Данните, които се използват при численото решаване са:

- мощност на лазера – 0.8 W;
- диаметър на снопа във фокуса (за опростяване на задачата приемаме, че петното във фокуса има кръгла форма) – 100 μm ;
- време на облъчване – лазерът работи в непрекъснат режим и времето, за което се облъчва материалът, попадащ във фокалното петно, се определя от скоростта, с която се движи лазера. Времето се определя, като диаметърът на снопа се раздели на скоростта на движение. Скоростта може да се променя в границите от 0.0167 до 1.67 cm/s. Времената, които отговарят на скорости на движение 0.0167 cm/s, 0.833 cm/s и 1.67 cm/s, са дадени в табл. 1.

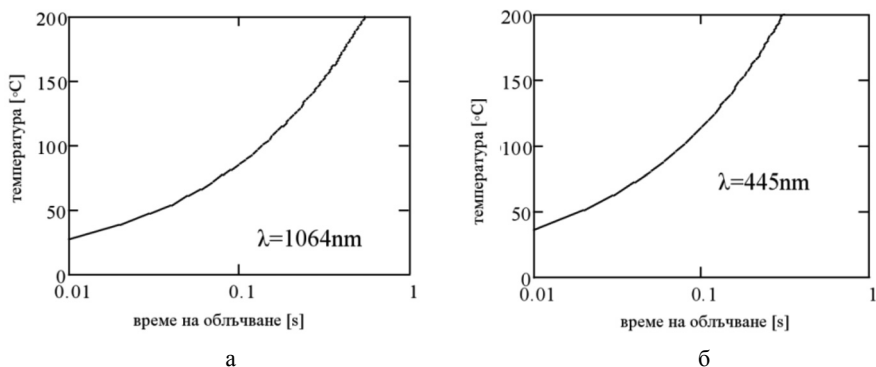
Таблица 1. Времена на облъчване при различни скорости на движение на лазерния източник

Скорост [cm/s]	Време [s]
0.0167	0.6
0.833	0.012
1.67	0.006

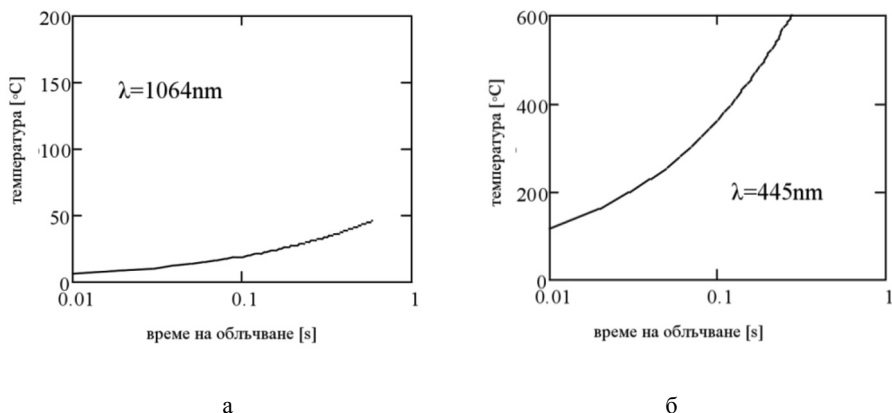
Връзката между температурата и времето на облъчване има вида

$$T = \frac{2P_a}{r_0^2 K} \sqrt{\frac{kt}{\pi^3}}$$

P_a е погълнатата мощност от веществото; $P_a = (1 - R)P$, където P е изходната мощност на лазера, а R е коефициентът на отражение на веществото за съответната дължина на вълната. При тези допускания и ограничения беше проследено изменението на температурата в точката на облъчване за два метала: алуминий и мед, при облъчване със синя (445 nm) и инфрачервена светлина (1064 nm). Данните за съответните константи са взети от литературата. Резултатите за алуминий за показани на фиг. 5а, б, а за медта – на фиг. 6а, б.



Фиг. 5. Изменение на температурата в зоната на облъчване за алуминий при:
а) $\lambda = 1064 \text{ nm}$, б) $\lambda = 445 \text{ nm}$



Фиг. 6. Изменение на температурата в зоната на облъчване за мед при:
а) $\lambda = 1064 \text{ nm}$, б) $\lambda = 445 \text{ nm}$

Двата метала показват значително по-добро поглъщане на синята светлина, което води до по-висока температура при едно и също време на облъчване. Може да се очаква, че обработката на метали със светлина от синята част на спектъра ще е по-ефективна от тази с инфрачервена светлина.

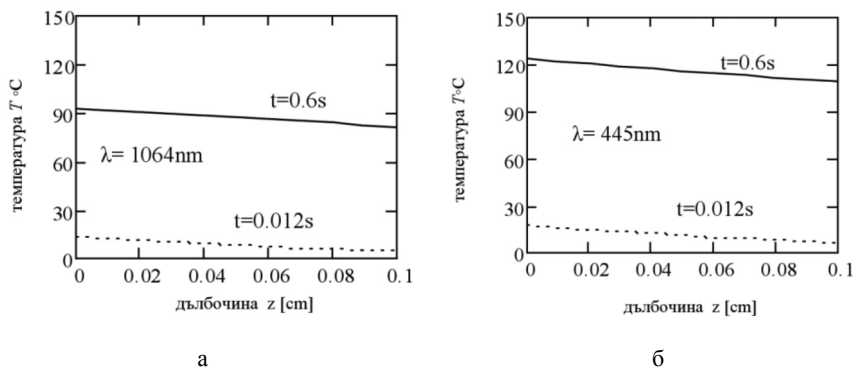
От съществено значение за практиката е и изменението на температурата в дълбочина на обработвания детайл. В този случай отново се използва уравнението за топлопроводност със съответните допускания и опростяващи предположения. В случай на повърхнинен източник, полубезкрайна среда и равномерно разпределение на интензитета в равнината на падане температурата T на определена дълбочина z се намира чрез интегриране по времето чрез формулата:

$$T(z, t) = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{k}{\pi}} \int_0^t \frac{Ia}{\sqrt{\tau}} \exp\left(\frac{-z^2}{4k\tau}\right) d\tau.$$

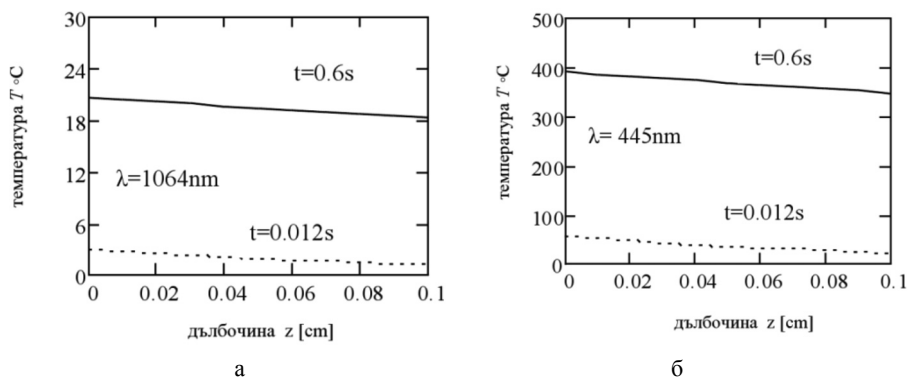
Интегрирането по времето е направено за две времена, които отговарят на скорости на движение 0.0167 cm/s и 0.833 cm/s . Приехме, че разпределението на интензитета във времето е правоъгълно, т.е. падащият интензитет е концентриран в точката, над която се намира лазера, а след като той се премести, светлина в тази точка няма. Пресмятанията отново са направени за две дължини на вълните, дебелина на материала $z = 0.1 \text{ cm}$ и два метала – алуминий и мед.

Получените резултати (алуминий – фиг. 7а,б; мед – фиг. 8а,б) отново показват, че синята светлина се поглъща по-ефективно от инфрачервената. Разликата е особено голяма при медта, която има много голям коефициент на отразяване за вълната с дължина 1064 nm . Практиката доказва този факт – лазерното рязане на медни детайли изисква сериозна мощност от инфрачервените лазери. Това е наложително, за да се нагрее материалът и да намалее неговият

коэффициент на отражение. Този ефект е характерен за металите – намаляване на отражението с повишаване на температурата.



Фиг. 7. Изменение на температурата в дълбочина за алуминий при облъчване с: а) $\lambda = 1064 \text{ nm}$, б) $\lambda = 445 \text{ nm}$



Фиг. 8. Изменение на температурата в дълбочина за мед при облъчване с: а) $\lambda = 1064 \text{ nm}$, б) $\lambda = 445 \text{ nm}$

Числени преметания на температурата на повърхността и в дълбочина за неметалните материали, в случая – дърво и гума, не са направени поради недостатъчните данни в литературата. Данни за коефициентите на топло-проводност и температуропроводност могат да бъдат открити, но липсват всякакви такива за коефициентите на отражение за използваните дължини на вълните. Допълнително затруднение е фактът, че и двата материала са твърде разнообразни и с различни физични свойства.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

При експеримента бяха използвани два лазера – син полупроводников и диодно наpomпван Nd:YVO₄. Синият полупроводников лазер е модел EL01-2.5W на фирмата EleksMaker, а инфрачервеният е лабораторен прототип. Целта е да се оцени и сравни въздействието на двете дължини на вълната върху различни материали – метали и неметали. Максималната мощност на синия лазер е 2.45 W, а на другия лазер – около 1 W. Измерванията бяха проведени при една и съща изходна мощност – 0.8 W. Мощността на синия лазер беше редуцирана чрез отражателни и абсорбционни филтри. Двамата лазера работят в непрекъснат режим. Бяха облъчени алуминиева и медна пластина, гума и дърво. Времената на облъчване са 5 s и 10 s. Температурата в зоната на облъчване е регистрирана чрез инфрачервена камера FLIR i3 с параметри :

- чувствителност към топлина – < 0.15 °C;
- работен спектрален диапазон – $(7.5 \div 13)$ μm ;
- обхват на измервана температура: от -20 °C до $+ 270$ °C;
- точност: ± 2 °C.

Регистрираните максимални температури са дадени в табл. 2.

Таблица 2. Измерени температури в зоната на въздействие

Материал	445 nm		1064 nm	
	5 s	10 s	5 s	10 s
Al	21.5 °C	21.9 °C	25.9 °C	27.4 °C
Cu	стайна °C	22.6 °C	25.6 °C	25.9 °C
Дърво	270 °C	238 °C	36.7 °C	53.3 °C
Гума	150 °C	138 °C	77.9 °C	133 °C

Температурата в стаята с инфрачервения лазер беше 25 °C, а в тази със синия – 20 °C. Данните показват, че под действието на синята светлина, температурата на неметалите достига много по-големи стойности, отколкото при инфрачервената. Поглъщането е много по-силно при 445 nm. Вижда се, че с увеличаване времето на облъчване максималната температура в зоната на въздействие при неметалите намалява. Предполагаме, че това се дължи на овъгления горен слой, който започва да отразява част от лъчението и пречи на нарастване на температурата. В потвърждение на това е фактът, че при максимална мощност синият лазер успява да среже лист хартия (за принтер), но не може да реже по-дебели листа. Проблемът може би ще се отстрани, ако срезът се обдухва с газ, който да премахва овъгления слой.

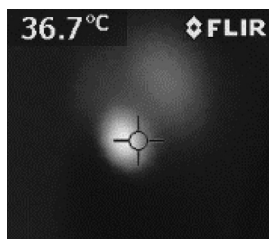
При металите се наблюдава разминаване между теоретично пресметнатата температура в точката на въздействие и тази, измерена с термокамерата при експеримента. Причините според нас са следните:

– Разлика между действителния размер на снопа във фокуса и приетия от нас въз основа на хиперболичния фит размер (фиг. 3, 4). С цел опростяване на пресмятанията приехме, че петното е кръгло с диаметър 100 μm . В действителност то си остава с правоъгълно сечение, площта е голяма и плътността на енергията намалява, съответно и достигнатата температура също намалява.

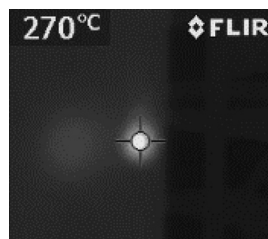
– Времената, за които се облъчва материалът (действителни) при обработката му, са посочени в табл. 1. Те са по-малки от 1 s и за експериментаторът е невъзможно за това време да включи и изключи лазера и да отчете температурата. Необходимо е допълнително оборудване, което не е налично към момента. Затова времената на облъчване са избрани 5 s и 10 s. При тях ефект оказва и топлопроводността на металите, която за алуминий и мед не е малка, а това води до разсейване на топлината и температурата пада.

Експерименталните данни не показват съществена разлика и за двата метала и не може да се каже коя дължина се поглъща по-добре. Ефектът би се проявил при достатъчно голяма мощност на синия лазер – 100 W. Тази стойност е приблизителна – инфрачервените лазери с подобна мощност режат метали. Повишаването на мощността на лазерните източници, генериращи в синята част на спектъра, би позволило да се използва предимството на синята светлина (по-силно поглъщане) при обработката на металите, които са най-чест обект на лазерните технологии. Направени са стъпки в тази посока [8].

На фиг. 9 ($\lambda=1064\text{ nm}$) и фиг.10 ($\lambda=445\text{ nm}$) са показани резултатите от измерване на температурата с инфрачервената камера за едно и също време за дърво.



Фиг. 9. Температура при облъчване с инфрачервена светлина



Фиг. 10. Температура при облъчване със синя светлина

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретичните и експерименталните резултати показват ясно предимствата на синята пред инфрачервената светлина. При сегашните нива на изходна мощност и режим на работа (непрекъснат) сините лазери биха имали приложения в лазерните технологии, които не са свързани с пробиване и рязане, и то на неметали. Повишаването на изходната мощност и реализирането на импулсен режим биха разширили областта на тяхното приложение.

Благодарности. Настоящото изследване е осъществено с финансиране от ФНИ на Софийския университет и със съдействието на катедра „Квантова електроника“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Born and E. Wolf. Principles of Optics. Oxford, 1986.
- [2] Y. Kawahito, N. Matsumoto, Y. Abe, S. Katayama. *Weld. Int.*, 2013, **27**, 129.
- [3] Q. Nguyen, C.Y. Yang. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2016, **102**, 1222.
- [4] D. Bergström. The absorption of laser light by rough metal surfaces, Ph.D. Thesis (Luleå University of Technology, 2008).
- [5] F. Dausinger, J. Shen. *ISIJ International*, 1993, **33**, 9, 925.
- [6] Carslaw H.S, Jeager J.C. Conduction of Heat in Solids. London, 1959.
- [7] Duley, W.W. Laser Processing and Analysis of Materials. Plenum Press, New York, 1983.
- [8] H. Wang, Y. Kawahito, R. Yoshida, Y. Nakashima, K. Shiokawa. *Opt. Lett.*, 2017, **42**, 12, 2251.