

УДК 535.212+533.9.082.5+537.529+536.248.2+536.42+536.44+537.531:535.2

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-1-44-59

ПОРОГ ПРОБОЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОЛЬГАХ МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ (ЧАСТЬ 1)

*Калашников Е.В.¹, Бугаев А.А.², Кантор М.Ю.³, Куприенко Д.В.³,
Чикиряка А.В.³*

¹Московский государственный областной университет

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, Российская Федерация

²Центр прикладных исследований, Олд Доминьон Университет, 12050, Джефферсон
Авеню, Ньюпорт-Ньюс, штат Вирджиния, VA 23606, США

³Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Российская Федерация

Аннотация. Экспериментально изучается энергетический порог пробоя сквозных отверстий в металлических фольгах разной толщины мощным лазерным излучением. Выявляются свойства вещества фольг, характерные для фазовых переходов второго рода «жидкий металл-газ». Контролирующим параметром порога пробоя является выходное (пороговое) отверстие с теневой стороны мишени, возникающее при минимальной энергии импульса излучения, необходимой лишь только для возникновения выходного отверстия для данной толщины фольги и энергия импульса лазерного излучения.

Ключевые слова: мощное лазерное излучение, лазерный пробой, пороговый пробой, фазовый переход второго рода «жидкий металл-газ», теплопроводность, металлические фольги.

THRESHOLD BREAKDOWN OF THROUGH HOLES IN METAL FOILS BY HIGH-POWERFUL LASER RADIATION (PART 1)

E. Kalashnikov¹, A. Bugayev², M. Kantor³, D. Kouprienko³, A. Chikiryaka³

¹Moscow State Regional University

ul. Radio 10A, 105005 Moscow, Russia

²Applied Research Center, Old Dominion University, VA 23606 USA

³loffe Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Politekhnicheskaya 26, 19402 St Petersburg, Russia

Abstract. The energy of a threshold breakdown of through holes in metal foils of different thicknesses by high-power laser radiation is investigated experimentally. Properties of the foil materials, which are typical of 'liquid metal–gas' phase transitions of the second kind, are determined. A controlling parameter of the threshold breakdown is a through (threshold) hole on the shady side of the target, which appears at a minimum pulse energy needed only for the emergence of an outlet for a given foil thickness, and the laser pulse energy.

Key words: high-power laser radiation, laser induced breakdown, threshold breakdown, 'liquid metal–gas' phase transition of second kind, thermal conductivity, metal foils.

Введение

Воздействие мощного лазерного излучения на металлические (диэлектрические и полупроводниковые) мишени приводит к образованию кратеров, сквозных отверстий и удалению вещества из мишени – к абляции [1–14]. Особую роль при этом играют состояния вещества, в которые оно последовательно переходит: «твёрдое тело, жидкость, газ, плазма».

Чтобы контролировать такие возможные состояния, необходимо знать количество энергии, поглощённой веществом. Как правило, это последнее представляет самую большую проблему в задачах взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, поскольку для этого необходимо знать коэффициент поглощения (который, в свою очередь, зависит от температуры и, соответственно, от состояния вещества) и саму температуру.

Практически, измерять и контролировать в процессе эксперимента температуру состояний вещества не удаётся. В лучшем случае решается тепловая задача, в которой по заданному количеству подводимой энергии определяют распределение температуры в поверхности и по нормали к ней [10–13; 15] и сопоставляют с экспериментальными результатами. При малых интенсивностях, когда возмущение электронной подсистемы мало, такой подход позволяет проанализировать и более сложные задачи [16; 17]. Кроме того, плохо определены (или вовсе отсутствуют) экспериментальные характеристики вещества при воздействии на него лазерного излучения, показывающие, в частности, что вещество находится при критической температуре. Тем не менее, в некоторых случаях удаётся выявить

характеристики вещества, указывающие на близость к критической температуре [14], и даже фиксировать границы спинодали в переходе «жидкость-газ» [3].

Цель работы – найти характеристики вещества, взаимодействующего с мощным лазерным излучением, которые бы указывали на наличие фазового перехода второго рода «жидкий металл–газ».

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию порога пробоя сквозных отверстий в металлических фольгах под воздействием одиночного импульса с минимальной энергией такой, чтобы её хватило только на возникновение сквозного отверстия в фольге заданной толщины. Такая постановка задачи определила требования к излучающему устройству – длительности импульса и мощности излучения.

1.Схема эксперимента

Источником излучения служил рубиновый лазер с длиной волны $\lambda = 694$ нм в режиме свободной генерации. Длительность импульса фиксировалась: $\tau = 1$ мс. Луч лазера фокусировали короткофокусной линзой (с фокусным расстоянием $F = 20$ мм) на поверхность металлической мишени в пятно диаметром $f = 50$ мкм. Плотность потока лазерного излучения в экспериментах варьировалась в пределах $10^6 \div 10^8$ Вт/см², что, как известно [9–13], лежит в пределах прозрачности испаряемого вещества. Для регистрации сквозного пробоя, вслед за мишенью ставили детектор в камере Обскура. Детектор работал в режиме синхронизации с лазером. При сквозном пробое фольг регистрировали время задержки импульса. Мощность излучения фиксировали и регистрировали другим фотодетектором. Вариация же этой мощности (для сохранения неизменной временной структуры импульса) осуществлялась градуированными светофильтрами. Пробой изучали в атмосфере воздуха при нормальном давлении и комнатной температуре.

Образцы в виде металлических фольг разной толщины помещались в обойму. Обойма размещалась на трехкоординатном оптическом столике. Тем самым, в течение одного эксперимента удавалось просмотреть пробиваемость фольг разной толщины практически в одних и тех же условиях.

Металлические фольги готовили из меди чистотой 99,999 вес % основного компонента, из нержавеющей стали, никеля и алюминия. Для очистки

поверхности приготовленные фольги обезжиривались и отжигались в вакууме при 200°C . Возникшие отверстия изучали под оптическим и электронным микроскопами. Для рассмотрения формы, структуры сквозного отверстия и нахождения массы, поглотившей энергию излучения, готовили продольные (вдоль оси отверстия) шлифы.

2. Результаты

Результаты экспериментов приведены на рис. 1–6. Полученные сквозные отверстия, существенно различаются как по форме, так и по соотношению входных и выходных отверстий (рис. 1). При малых толщинах фольг сквозное отверстие имеет чашеобразную форму, большим диаметром обращённую к падающему излучению (рис. 1а). При увеличении толщины фольги форма сквозного отверстия (рис. 1б) меняется и приобретает форму вытянутого усечённого конуса, образующей которого можно считать гиперболу.

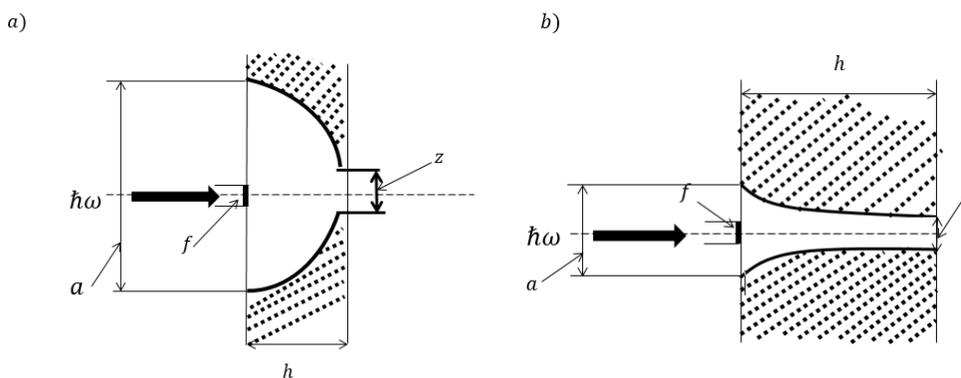


Рис.1. Форма сквозных пороговых отверстий (вдоль оси отверстия) для тонких (а) и толстых (б) фольг; a и z – диаметр входного и выходного отверстий, соответственно, h – толщина мишени, f – фокусное пятно.

В тонких и толстых фольгах характер пробоя существенно различен. В тонких фольгах энергия излучения при её пороговых значениях тратится на образование большой поверхности входного отверстия, существенно превышающего размер фокусного пятна. В толстых фольгах размер входного отверстия не очень превышает размер фокусного пятна. Такое же отличие и в

выходных отверстиях в тонких и толстых фольгах. Рис. 2 демонстрирует значения диаметра z , измеренного (с теневой стороны) на выходе конического отверстия.

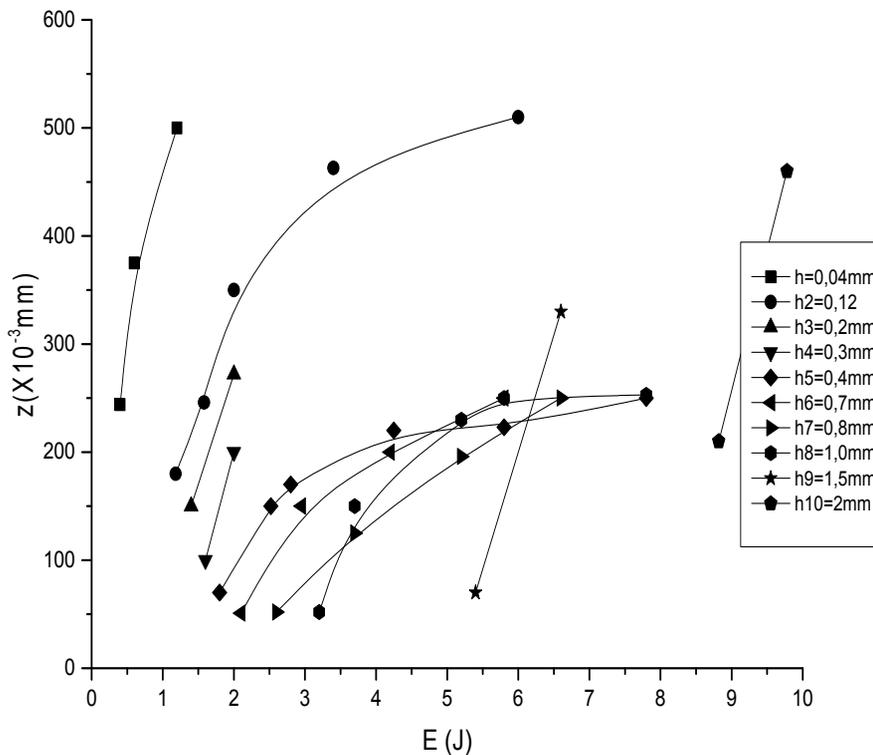


Рис. 2. Диаметр выходного отверстия в зависимости от энергии падающего излучения для разных толщин h фольг.

Зависимость $z = z(E)$ на рис. 2 аналогична по форме зависимости входного диаметра от энергии падающего излучения для несквозных отверстий [2; 9–13]. Но главная особенность зависимостей, представленных на рис. 2, в том, что они ограничиваются снизу минимальными выходными отверстиями, отвечающими пороговым значениям энергии – минимальной энергии, необходимой, чтобы только пробить фольгу заданной толщины (рис. 2 и рис. 3).

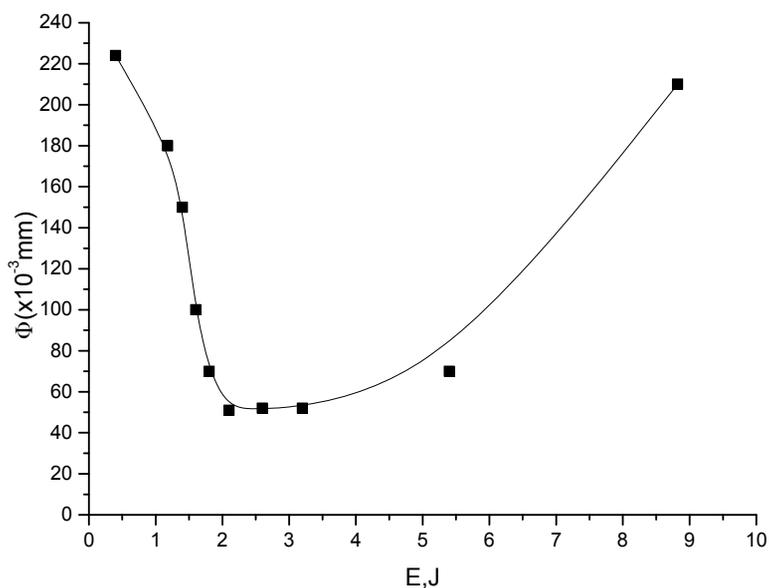


Рис. 3. Зависимость порогового диаметра выходного отверстия Φ от пороговой энергии E_p для меди.

Уменьшение энергии в импульсе лазерного излучения для каждой толщины фольги приводит к тому, что, наконец, сквозное отверстие не пробивается (рис. 2), хотя кратер и глубокая лунка образуются. Диаметр выходного отверстия z , при минимально возможной энергии, ниже которой пробой не происходит, является пороговым диаметром $\Phi = z(E_p)$, соответствующим пороговой энергии пробоя \mathcal{E}_p . Огибающая пороговых диаметров $z(E = E_p) = \Phi(E_p) = \Phi$ против энергий пороговых значений приведена на рис. 3. На рис. 4 приведена зависимость порогового диаметра от толщины фольги, $\Phi = \Phi(h)$ для меди и нержавеющей стали, имеющих разные теплопроводности. В зависимостях $\Phi = \Phi(\mathcal{E}_p)$ и $\Phi = \Phi(h)$ обнаруживаются две области с противоположными тенденциями и одна промежуточная область между ними.

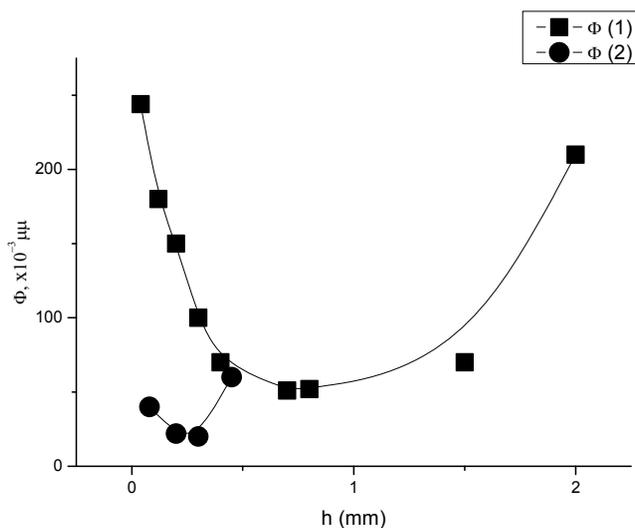


Рис. 4. Диаметр порогового отверстия в зависимости от толщины фольги: для меди ($\Phi(1)$) и для нержавеющей стали ($\Phi(2)$).

Учёт времени задержки импульса позволил измерить скорость прохождения импульса через тело фольги или, что одно и то же, скорости продвижения некоторого образования в виде сэндвича «газ–жидкость–твёрдое тело» через толщу фольги (рис. 5).

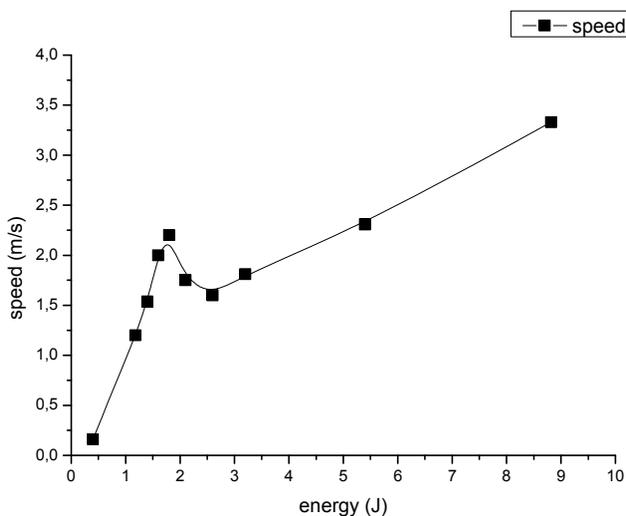


Рис.5. Скорость перемещения фронта «газ–жидкость–твёрдое тело» в зависимости от пороговой энергии пробоя.

Скорость продвижения такого сэндвича «газ – жидкость – твёрдое тело» в зависимости от энергии лазерного импульса при толщинах фольг (0,2–0,8 мм) претерпевает излом.

Наконец, перестраивая отношение пороговой энергии к массе отверстия, поглотившей её при пороговом диаметре $\left(\frac{E_p}{m}\right)$ в отношении к падающей энергии излучения E , получаем зависимость, приведённую на рис. 6.

Если бы можно было выразить адекватно E через температуру T , то отношение $\left(\frac{E_p}{m}\right)$ к E аналогично теплоёмкости C_p . Поведение C_p в зависимости от температуры при фазовом переходе второго рода имеет пикообразный (λ -образный) характер [18]. Так что вид $\left(\frac{E_p}{m}\right)$ в зависимости от падающей энергии излучения вполне может служить показателем фазового перехода второго рода в системе «жидкий металл – газ».

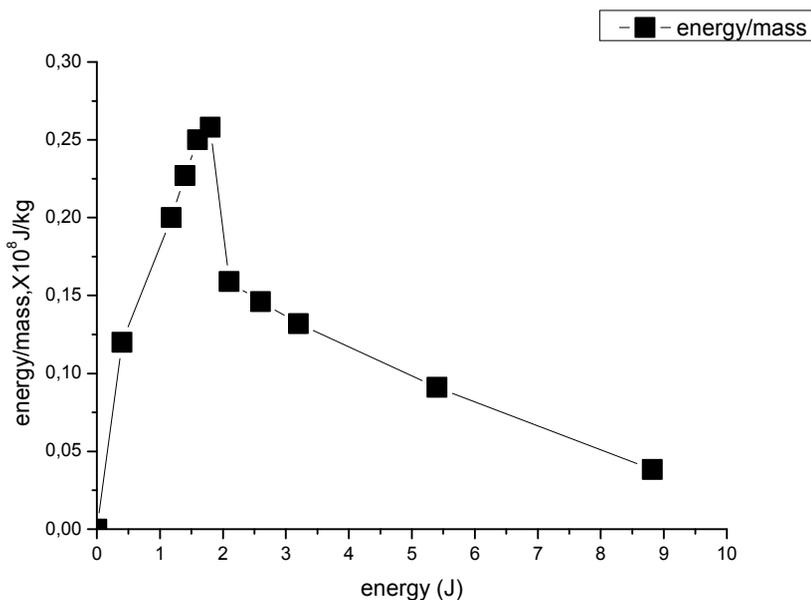


Рис. 6. Отношение пороговой энергии, поглощённой массой порогового отверстия к падающей на мишень энергии излучения.

Приведённые на рис. 2–6 экспериментальные зависимости свидетельствуют об особом характере процессов, протекающих при пороговом пробое фольг, ранее не отмечавшемся в литературе.

3. Обсуждение

Формирование отверстия. Область потоков излучения $10^8 \div 10^{10}$ Вт/см² обеспечивает, как известно, режим развитого испарения. Режим теплопроводности при этом, хотя и исключён, но определяет ту минимальную толщину слоя $l \sim (\chi\tau)^{1/2}$, который успеваеет превратиться в жидкость и прогреться за время действия импульса $\tau \sim 10^{-3}$ с до высокой температуры испарения T (здесь χ – температуропроводность). Но при острой фокусировке луча [10; 12; 13], радиус облучаемой площадки: $r_0 \leq l$. Тепловые потери становятся существенными и, в конечном счёте, определяют условия формирования сквозного отверстия. При этом оказывается, что $l \sim h$ и условия полубесконечной мишени ($h \geq 3 (\chi\tau)^{1/2}$), [12; 13] не выполняются. В таком случае, пользуясь традиционным анализом задач теплопроводности, можно провести лишь качественный анализ рассеяния падающей энергии.

Возникающий перепад температуры ΔT между освещённой и теневой сторонами мишени и между центром освещённого пятна и его периферией вызывает перемещение фронта удаления вещества «вдоль» градиента температуры. При этом тепловые потери через площадку, нормальную к падающему лучу (через фронт) на протяжении высоты h фольги, равны:

$$P_h = \lambda \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \Delta T / h, \quad (1)$$

а потери тепла через поверхность образующегося усечённого конуса, приближённо – цилиндра, равны:

$$P_r = \lambda \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \Delta T / r \quad (2)$$

Отношение этих составляющих приводит к соотношению, связывающему радиус отверстия с его высотой:

$$R = P_h / P_r = r^2 / 2h^2. \quad (3)$$

Откуда следует, что:

- 1) если $R \ll 1$, то вся энергия уходит на образование цилиндрической поверхности высотой h , т.е. идёт на образование отверстия.
- 2) если $R \gg 1$, то вся энергия импульса рассеивается в поверхности, заметая большую площадь поверхности. Эти результаты вполне согласуются с результатами эксперимента (рис. 1а; 1б.)

Вблизи порога пробоя, когда в конце лазерного импульса образуется отверстие, его радиус можно оценить через соотношение:

$$r^2 = \lambda \cdot \tau / \rho \cdot c, \quad (4)$$

где λ – теплопроводность, ρ – плотность, c – теплоёмкость для испытуемых металлов брали из [19]. Тогда

$$R = \lambda \cdot \tau / 2\rho \cdot c \cdot h^2, \quad (5)$$

а граница между выше упомянутыми крайними случаями, $R = 1$, определяет оптимальную толщину фольги:

$$h = (\lambda \cdot \tau / 2\rho \cdot c)^{1/2}. \quad (6)$$

В результате для меди толщина фольги оказывается равной $h_{Cu} = 0,25\sqrt{\tau}$ мм и для нержавеющей стали толщина фольги $h_{нс} = 0,09\sqrt{\tau}$ мм. Это хорошо подтверждается экспериментом (рис. 4). Отношение толщин $h_{Cu}/h_{нс} \approx 3$ и наблюдается такое же отношение толщин тех же металлов с минимальным сквозным пороговым отверстием (рис. 4). Можно было бы сказать, что всё ограничивается различными механизмами теплоотвода и потерями тепла. Такая ситуация предполагает, что процессы движения некоторого образования «газ–жидкость–твёрдое тело» в виде сэндвича, несмотря на всю сложность процессов, происходящих в толще фольги при различных величинах энергии, полностью контролируется теплопроводностью.

Зависимости $\Phi = \Phi(h)$ для исследованных металлов (и для других, упомянутых в [14],) сходны. Это предполагает, что и процессы, протекающие при пороговом пробое фольг на разных металлах, сходны. При рассматриваемых энергиях излучения исходное состояние вещества предопределяет развитие процесса. Например, медь и сталь разнятся по своей теплопроводности приблизительно на порядок [19]. Это сразу же сказывается на более резком проявлении характера пробиваемости нержавеющей стали (рис. 5). Итак, процесс пробоя порогового отверстия контролируется теплопроводностью твёрдого тела. Сам этот процесс состоит из превращений твёрдого тела в жидкость и газообразное состояние. Однако из этих соотношений (когда формирование порогового отверстия контролируется теплопроводностью) причины появления минимумов на зависимостях «диаметр порогового отверстия–пороговая энергия пробоя» $\Phi = \Phi(\mathcal{E}_p)$ и $\Phi = \Phi(h)$, рис. 2 и рис. 3, излома на зависимости «фронта» перемещения через тело фольги и пика на зависимости $\left(\frac{E_p}{m}\right)$ от энергии излучения E никак не следуют.

Пороговое отверстие. Контроль всего процесса теплопроводностью твёрдого тела предполагает, что на твёрдом теле во всё время процесса происходит образование жидкого металла, превращающегося, в свою очередь, в газообразное состояние. Таким образом, через толщу фольги движется своеобразный сэндвич, состоящий из «насыщенного пара металла–жидкого металла–твёрдого тела». Нагрев, фазовые превращения и продвижение такого сэндвича лимитируется двумя наиболее медленными процессами. Первый из них обязан электрон-фононному взаимодействию, и характеризуется временем изменения решёточной температуры $\tau_1 \sim 10^{-10}$ с [20; 21]. Второй «медленный» процесс связан с возникновением уплотнения или разрежения путём присоединения к возникающему уплотнению (или выходу из возникшего уплотнения) атомов. Этот процесс (возникновение нового состояния – новой фазы вещества) характеризуется временем порядка $\tau_2 = \frac{a}{v} \sim 10^{-14}$ с, где a – межатомное расстояние, v – скорость звука. Это означает, что возникающая жидкость будет достигать своего равновесного состояния при определённой температуре быстрее, чем остывать из-за электрон-фононного взаимодействия. Таким образом, можно было бы предполагать, что для каждой величины пороговой энергии лазерного поля и определённой толщины фольги будет устанавливаться определённая равновесная температура, при которой и будет формироваться пороговое отверстие.

Это предполагает, что каждое пороговое отверстие отвечает некоторой равновесной температуре T , при которой могут происходить те или иные фазовые превращения, то есть:

$$z = z(T). \quad (7)$$

Скорость перемещения фронта «газ–жидкость–твёрдое тело». Излом в зависимости $V = V(E)$ на рис. 5, по-видимому, говорит о том, что по достижении значений энергий, при которых появляется пик в зависимости $\left(\frac{E_p}{m}\right)$ (рис. 6), возникает критическое состояние, соответствующее переходу «жидкий металл–газ». Жидкий металл достигает температуры, равной или близкой к критической температуре. Так что фронт «жидкость–газ» начинает двигаться в противоположную сторону. Жидкость, быстро расширяясь, теряет границу раздела «жидкость–газ» и достигает критического состояния.

Таким образом, можно предположить, что весь набор характеристик порогового пробоя сквозных отверстий при минимально возможной энергии в импульсе в значительной степени вызваны процессами, протекающими при критических и близких к ним параметрах состояния вещества. Однако эти характеристики нуждаются в привязке к температурной шкале. Это делается в следующей части этой работы.

4. Заключение

В эксперименте по изучению энергий порогового пробоя металлических фольг обнаружались новые характеристики, связывающие величину энергии воздействия лазерного излучения с реакцией металла на это воздействие:

- 1) характеристика $\Phi = \Phi(E_p)$ возникновения минимального (порогового) размера выходного отверстия Φ в зависимости от минимальной-пороговой энергии излучения E_p , при данной толщине фольги. Эта характеристика имеет чётко выраженный минимум.
- 2) характеристика $\Phi = \Phi(E_p)$ по своей форме остаётся неизменной для веществ с разной величиной теплопроводности – от плохо проводящих материалов до металлов с хорошей теплопроводностью.
- 3) отношение $(\frac{E_p}{m})/E$, аналогичное C_p , проявляет пикообразное поведение при значениях энергии, соответствующих минимуму характеристики $\Phi = \Phi(E_p)$. Это соответствует фазовому переходу второго рода «жидкий металл–газ».
- 4) в условиях порогового пробоя сквозных отверстий полностью контролируется энергия, поглощённая объёмом вещества, соответствующего пороговому отверстию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hamazaki J., Morita R., Chujo K., Koyashi Y., Tanda S., Omatsu T. Optical-vortex laser ablation // OPTICS EXPRESS. 2010. Vol. 18. no. 3. pp. 2144–2151.
2. Autrique D., Chen Z., Alexiades V., Bogaerts A., Rethfeld B. Multiphase Model for Pulsed ns-Laser Ablation of Copper in an ambient Gas // AIP Conference Proceedings. New Mexico, USA. 2012. Vol. 1464. pp. 648–660.
3. Autrique D., Clair G., L'Hermite D., Alexiades V., Bogaerts A., Rethfeld B. The role of mass removal mechanisms in the onset ns-laser induced plasma formation // Journ. Appl. Physics. 2013. Vol. 114. pp. 023301-1-023301-10.

4. Benavides O., de la Cruz May L., Flores Gil A. Effects of Plasma Formation on Reflection of Laser Light in Ablation of Metals in Air // *PIERS Proceedings*. Stockholm, Sweden. 2013. Vol. 12–15. pp. 1468–1472.
5. Bulgakova N., Bulgakov A. Pulsed laser ablation of solids: transition from vaporization to phase explosion // *Appl. Phys. A*. 2001. Vol. 73. pp. 199–208.
6. Meijer J. Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 149. pp. 2–17.
7. Kumar N., Dash S., Tyagi A., Raj B. Thermal dynamics-based mechanism for intense laser-induced material surface vaporation // *Prama–J. Phys.* 2008. Vol. 71. pp. 529–543.
8. Bugayev M., Gupta C., El-Bandrawy M. Dynamics of laser hole drilling with nanosecond periodically pulsed laser // *Optics and Lasers Engineering*. 2006. Vol. 44. pp. 797–802.
9. Kato T., Yamaguchi T. *Laser Machining* // *NEC Research Development*. 1968. no 12. p. 57.
10. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
11. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Воздействие лазерного излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
12. Gladush G., Smurov I. *Physics of laser materials Processing (Theory and experiments)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. 534 p.
13. Вейко В.П., Либенсон М.Н. *Лазерная обработка*. Л.: Лениздат, 1973. 191 с.
14. Бугаев А.А., Калашников Е.В., Кантор М.Ю., Станкевич А.Л. Лазерное испарение металлов при критической температуре // *Физика твёрдого тела*. 1992. Т. 34. № 3. С. 801–804.
15. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // *Успехи физических наук*. 2002. Т. 172. № 3. С. 301–333.
16. Амброк А.Г., Калашников Е.В., Кукушкин С.А. Влияние избирательного нагрева на кинетику поздней стадии фазового перехода первого рода // *Журнал технической физики*. 2001. Т. 71. № 3. С. 41–45.
17. Ambrok A., Kalashnikov E., Kukushkin S. Kinetics of late stage of first-order phase transitions under irradiation // *Journ. Applied Physics*. 2002. Vol. 91. no. 8. pp. 4961–4965.
18. Стенли Г. *Фазовые переходы и критические явления*. М.: Мир, 1973. 419 с.
19. Кикоин И.К. *Таблицы физических величин*. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
20. Самохин А.А., Успенский А.Б. Испарение вещества под воздействием лазерного излучения // *Физика и химия обработки материалов*. 1981. № 3. С. 3–11.
21. Самохин А.А. Действие лазерного излучения на поглощающие конденсированные среды. М.: Наука. Труды ИОФАН. 1988. Т. 13. С. 3.

REFERENCES

1. Hamazaki J., Morita R., Chujo K., Koyashi Y., Tanda S., Omatsu T. Optical-vortex laser ablation // *OPTICS EXPRESS*. 2010. Vol. 18. no. 3. pp. 2144–2151.

2. Autrique D., Chen Z., Alexiades V., Bogaerts A., Rethefeld B. Multiphase Model for Pulsed ns-Laser Ablation of Copper in an ambient Gas // AIP Conference Proceedings. New Mexico, USA. 2012. Vol. 1464. pp. 648–660.
3. Autrique D., Clair G., L’Hermite D., Alexiades V., Bogaerts A., Rethefeld B. The role of mass removal mechanisms in the onset ns-laser induced plasma formation // Journ. Appl. Physics. 2013. Vol. 114. pp. 023301-1-023301-10.
4. Benavides O., de la Cruz May L., Flores Gil A. Effects of Plasma Formation on Reflection of Laser Light in Ablation of Metals in Air // PIERS Proceedings. Stockholm, Sweden. 2013. Vol. 12–15. pp. 1468–1472.
5. Bulgakova N., Bulgakov A. Pulsed laser ablation of solids: transition from vaporization to phase explosion // Appl. Phys. A. 2001. Vol. 73. pp. 199–208.
6. Meijer J. Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 149. pp. 2–17.
7. Kumar N., Dash S., Tyagi A., Raj B. Thermal dynamics-based mechanism for intense laser-induced material surface vaporation // Prama–J. Phys. 2008. Vol. 71. pp. 529–543.
8. Bugayev M., Gupta C., El-Bandrawy M. Dynamics of laser hole drilling with nanosecond periodically pulsed laser // Optics and Lasers Engineering. 2006. Vol. 44. pp. 797–802.
9. Kato T., Yamaguchi T. Laser Machining // NEC Research Development. 1968. no. 12. p. 57.
10. Redi Dzh. Deistvie moshchnogo lazernogo izlucheniya [The action of powerful laser radiation]. M., Mir, 1974. 468 p.
11. Anisimov S.I., Imas YA.A., Romanov G.S., Khodyko YU.V. Vozdeistvie lazernogo izlucheniya bol'shoi moshchnosti na metally [The effect of laser radiation on metals]. M., Nauka, 1970. 272 p.
12. Gladush G., Smurov I. Physics of laser materials Processing (Theory and experiments). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. 534 p.
13. Veiko V.P., Libenson M.N. Lazernaya obrabotka [Laser treatment]. L., Lenizdat, 1973. 191 p.
14. Bugaev A.A., Kalashnikov E.V., Kantor M.YU., Stankevich A.L. Lazernoe isparenje metallov pri kriticheskoi temperature [Laser evaporation of metals at a critical temperature] // Fizika tverdogo tela. Vol. 34. 1992. no. 3. pp. 801–804.
15. Anisimov S.I., Luk’yanchuk B.S. Izbrannye zadachi teorii lazernoi ablyatsii [Selected problems of laser ablation theory] // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2002. Vol. 172. no. 3. pp. 301–333.
16. Ambrok A.G., Kalashnikov E.V., Kukushkin S.A. Vliyanie izbiratel’nogo nagreva na kinetiku pozdnei tadia fazovogo perekhoda pervogo roda [The influence of selective heating on the kinetics of the late stage of phase transition of the first kind] // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2001. Vol. 71. no. 3. pp. 41–45.

17. Ambrok A., Kalashnikov E., Kukushkin S. Kinetics of late stage of first-order phase transitions under irradiation // Journ. Applied Physics. 2002. Vol. 91. no. 8. pp. 4961–4965.
18. Stanley H.E. Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena (New York: Oxford Univ. Press, 1971).
19. Kikoin I.K. Tablitsy fizicheskikh velichin [Tables of physical quantities]. M., Atomizdat, 1976. 1008 p.
20. Samokhin A.A., Uspenskii A.B. Isparenie veshchestva pod vozdeistviem lazernogo izlucheniya [The evaporation of the substance under the influence of laser radiation] // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 1981. no. 3. pp. 3–11.
21. Samokhin A.A. Deistvie lazernogo izlucheniya na pogloshchayushchie kondensirovannye sredy [The action of laser radiation on absorbing condensed media]. Vol. 13. M., Nauka, Trudy IOFAN, 1988. p. 3.

ИНФОМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Калашников Евгений Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики и методики преподавания информатики, Московский государственный областной университет;
e-mail: ekevkalashnikov1@gmail.com

Бугаев Алексей Алексеевич – доктор, физико-математических наук, академик РАН, профессор Центра прикладных исследований, Олд Доминьон Университет;
e-mail: bugayev@jlab.org

Кантор Михаил Юльевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики высокотемпературной плазмы Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук;
e-mail: m.kantor@mail.ioffe.ru

Куприенко Денис Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики высокотемпературной плазмы Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук;
e-mail: denis.kouprienko@mail.ioffe.ru

Чикиряка Андрей Викторович – младший научный сотрудник лаборатории совершенных кристаллов Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук;
e-mail: chikiryaka@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kalashnikov Evgenii Vladimirovich – doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Chair of Computational Mathematics and Methodology of Teaching Informatics at the Moscow State Regional University;

e-mail: ekevkalashnikov1@gmail.com

Bugayev Aleksei Alekseevich – doctor of physical and mathematical sciences, academician of the Russian Academy of Sciences, professor of the Applied Research Center at Old Dominion University;

e-mail: bugayev@jlab.org

Kantor Mikhail Yul'evich – candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher of the Laboratory of High-Temperature Plasma Physics at the Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences;

e-mail: m.kantor@mail.ioffe.ru

Kuprienko Denis Vasil'evich – candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher of the Laboratory of High-Temperature Plasma Physics at the Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences;

e-mail: denis.kouprienko@mail.ioffe.ru

Chikiryaka Andrei Viktorovich – junior researcher of the Laboratory of Perfect Crystals at the Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences;

e-mail: chikiryaka@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Калашников Е.В., Бугаев А.А., Кантор М.Ю., Куприенко Д.В., Чикиряка А.В. Порог пробоя сквозных отверстий в металлических фольгах мощным лазерным излучением // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2016. № 1. С. 44–59.

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-1-44-59.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

E. Kalashnikov, A. Bugayev, M. Kantor, D. Kouprienko, A. Chikiryaka Threshold breakdown of through holes in metal foils by high-powerful laser radiation (part 1) // Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Physics and Mathematics. 2016. no. 1. pp. 44–59.

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-1-44-59.