

## Динамика поверхности жидкого металла при воздействии импульсов ХеСl-лазера

Ф.Н. Любченко<sup>1</sup>, А.Н. Панченко<sup>2</sup>, В.Ф. Тарасенко<sup>2</sup>,  
А.Е. Тельминов<sup>2</sup>, А.В. Феденев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «ЦНИИМаиш»

141070, г. Королев Московской обл., ул. Пионерская, 4

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 14.05.2008 г.

Исследованы процессы, происходящие на поверхности жидких металлов при воздействии ХеСl-лазером с энергией излучения 50 мДж. Определены скорости восстановления поверхности расплавов галлия, сплавов Вуда и галлия с индием. Минимальное время релаксации поверхности (около 4 мс) получено при использовании жидкого галлия и его сплава с индием. Предложено качественное описание процессов, происходящих на поверхности жидких металлов в предположении формирования на поверхности расплава капиллярных волн. На основе данного описания сделаны выводы о выборе жидких металлов с минимальным временем релаксации поверхности.

*Ключевые слова:* воздействие, ХеСl-лазер, жидкие металлы.

### Введение

В настоящее время для коррекции орбит микроспутников интенсивно ведется разработка лазерно-плазменных двигателей (ЛПД) на основе испарения материала лазерным излучением [1]. К настоящему времени созданы первые прототипы ЛПД [2, 3]. В качестве испаряемого вещества использовались мишени в виде вращающегося металлического диска или движущейся ленты с испаряемым веществом. Ресурс работы таких ЛПД достаточно низок из-за быстрого разрушения мишени. Для повышения ресурса и надежности ЛПД представляется перспективным использование мишеней из легкоплавких жидких металлов (ЖМ). В этом случае после лазерного импульса слой жидкости восстанавливается за счет сил поверхностного натяжения. При этом время восстановления поверхности ЖМ является важным параметром, определяющим максимальную частоту работы ЛПД.

Отметим, что динамика поверхности ЖМ при лазерном воздействии исследована недостаточно. Имеется только одна работа, в которой время восстановления поверхности жидких олова и висмута после воздействия АгF-лазера составляло 0,3–1 с [4].

В данной статье рассматриваются процессы на поверхности различных жидких металлов при облучении ХеСl-лазером.

### 1. Экспериментальная аппаратура и методы измерений

Капли из ЖМ располагались на поверхности никелевой пластины в камере при давлении 0,01–500 торр. В экспериментах использовались галлий (температура плавления  $t_{пл} = 29,8$  °С, плотность  $\rho = 5,904$  г/см<sup>3</sup>), сплав галлий–индий ( $t_{пл} = 16$  °С,  $\rho = 6,235$  г/см<sup>3</sup>) и сплав Вуда ( $t_{пл} = 65,5$  °С,  $\rho = 9,72$  г/см<sup>3</sup>). Температура при проведении экспериментов поддерживалась постоянной. Излучение ХеСl-лазера с энергией в импульсе 50 мДж при помощи линзы и поворотного зеркала фокусировалось на поверхность мишени. Область абляции в фокусе линзы состояла из двух соприкасающихся квадратов с размерами сторон  $d = 0,4 \times 0,4$  мм, плотность мощности излучения  $\sim 1$  ГВт/см<sup>2</sup>. Состояние поверхности мишени определялось методом скоростного фотографирования с использованием скоростной ССD-камеры марки SensisCam, установленной над мишенью. Поверхность мишени фотографировалась через 100 мкс с экспозицией 0,5–1 мкс.

Измерялась также динамика свечения лазерной плазмы на поверхности ЖМ в различных спектральных диапазонах при помощи вакуумного фотодиода ФЭК–22 СПУ, расположенного сбоку мишени. Электрические сигналы записывались цифровым осциллографом TDS-3034.

### 2. Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 1 приведены характерные осциллограммы лазерного импульса и свечения плазмы на

\* Федор Николаевич Любченко (FedorNL@korolev-net.ru); Алексей Николаевич Панченко (alexei@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Алексей Евгеньевич Тельминов; Андрей Валентинович Феденев (avf-62@lenta.ru).

поверхности жидкого и твердого металла. В момент начала воздействия в течение нескольких наносекунд наблюдался интенсивный пик лазерного излучения, отраженного от поверхности металла.

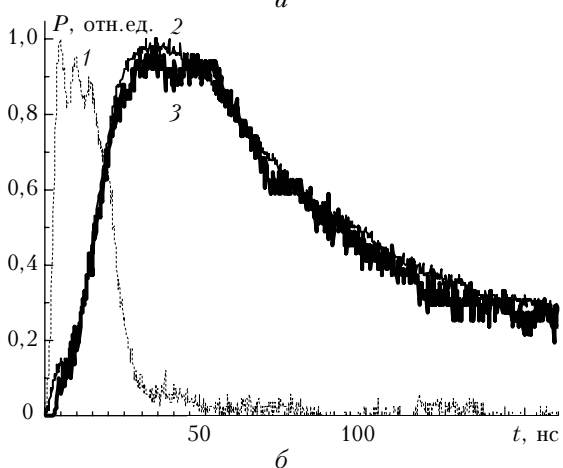
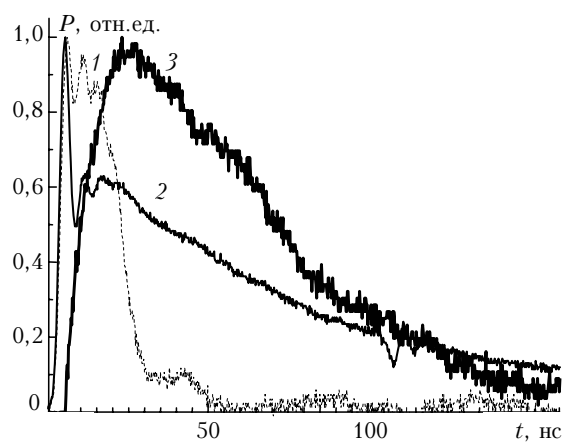


Рис. 1. Осциллограммы лазерного импульса (1) и импульсов свечения плазмы на поверхности твердого (а) и жидкого (б) сплава Вуда в диапазоне длин волн 200–600 нм (2) и 340–600 нм (3) в атмосфере неона при давлении 370 торр

Отраженный сигнал резко падал после начала свечения эрозионного факела. При облучении расплавленной поверхности интенсивность отраженного сигнала заметно снижалась. Кроме того, при воздействии на ЖМ время запаздывания начала свечения лазерной плазмы уменьшалось на 2–3 нс. Это говорит о снижении порогов абляции и плазмообразования на поверхности ЖМ.

Ускорение развития оптического пробоя на поверхности расплава можно связать как с падением отраженной энергии лазерного импульса, так и с уменьшением затрат энергии на разогрев поверхности металла до температуры плавления и отвод тепла в глубь мишени. В [5, 6] отмечалось, что основное влияние на порог абляции ЖМ оказывает именно уменьшение тепловых потерь, поскольку отражение излучения от поверхности металла при его расплавлении не менялось. Однако появляющееся у поверхности мишени облако паров металла может сильно поглощать падающее и отраженное лазерное излучение [7]. При абляции ЖМ данное облако сформируется быстрее, что, по-видимому, приводит к падению отражения от поверхности мишени.

Изменения на поверхности жидкого галлия в наших экспериментах подобно [4, 8] начинались через 2–3 мкс после воздействия. Затем в течение 600 мкс наблюдается рост кратера, по форме близкого к полусфере. На гребне кратера видны небольшие выступы, которые не успевают превратиться в капли. Ко времени 600 мс максимальный размер кратера составляет примерно 2 мм в диаметре. Затем жидкость с краев кратера начинает стекать вниз, образуя в центре выпуклость. Эта выпуклость постепенно растет и в течение 2–2,5 мс заполняет весь кратер. Затем по поверхности капли несколько раз пробегают затухающие волны небольшой амплитуды. Поверхность полностью восстанавливается за время ~4 мс (рис. 2).

При использовании сплава галлий–индий время затухания колебаний на поверхности капли возрастало примерно на 0,5 мс. Также время релаксации

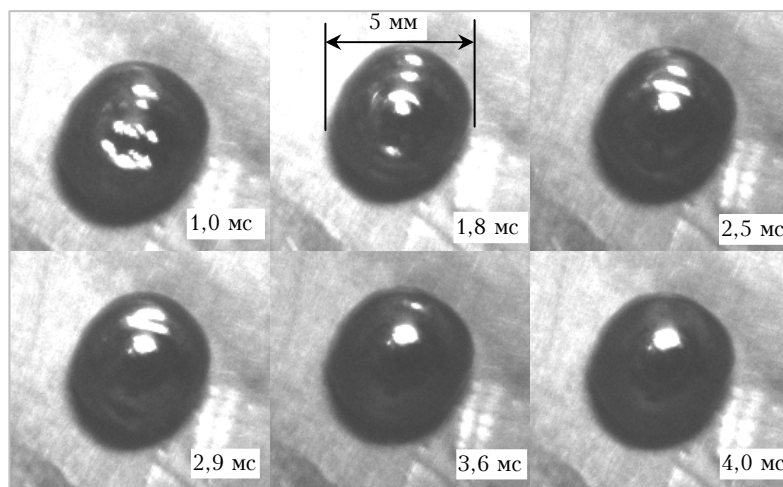


Рис. 2. Динамика восстановления поверхности капли жидкого галлия. Время экспозиции каждого кадра 1 мкс, кадры сняты через 1; 1,8; 2,5; 2,9; 3,6 и 4 мс после воздействия. (Луч падает нормально к рисунку. Область абляции в центре капли)

возрастало при увеличении температуры расплава. Для сплава Вуда процесс релаксации поверхности жидкости занимал ~10 мс.

Процессы, происходящие после воздействия лазерного импульса на поверхность ЖМ, можно качественно описать в предположении формирования поверхностных капиллярных волн. Скорость движения капиллярной волны  $V_k$  равна [9]:

$$V_k = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} \operatorname{th}\left(\frac{2\pi H}{\lambda}\right)},$$

где  $\lambda$  – характерный размер возмущения на поверхности ЖМ, возникшего под действием лазерного импульса;  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\operatorname{th}(2\pi H/\lambda)$  – гиперболический тангенс;  $H$  – глубина жидкости.

Видно, что время релаксации поверхности определяется поверхностным натяжением и плотностью используемого жидкого металла. При использовании галлия ( $\sigma = 0,705$  Н/м) характерный размер кратера  $\lambda \approx 2,5$  мм (см. рис. 2) и скорость движения капиллярной волны  $V = 0,5$  м/с. Соответственно время релаксации поверхности будет около 5 мс, что достаточно хорошо совпадает с данными эксперимента. Плотность сплава Вуда в 1,5 раза больше, чем у чистого галлия, а его поверхностное натяжение ниже в два раза [10]. Поэтому скорость движения капиллярной волны по поверхности сплава Вуда упадет в 1,74 раза, а время релаксации поверхности вырастет. В эксперименте время восстановления поверхности сплава Вуда было примерно в два раза больше, чем у галлия.

Характерный размер кратера на поверхности достаточно сильно зависит от вязкости жидкости [8]. Поэтому для минимизации размера кратера нужно использовать жидкие металлы с высокой вязкостью. Поскольку с ростом температуры вязкость быстро падает, то температуру жидкого металла следует поддерживать вблизи точки плавления.

На основании приведенных рассуждений можно сформировать требования к отбору ЖМ для использования в ЛПД. ЖМ должен иметь высокую вязкость и максимальное значение параметра  $\sigma/\rho$ . На основе данных критериев одним из лучших материалов будет литий.

*F.N. Lubchenko, A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, A.E. Tel'minov, A.V. Fedenev. Dynamics of surface of liquid metal under the action of XeCl-laser pulses.*

Processes on surface of liquid metals under the action of XeCl-laser with pulsed energy of 50 mJ are studied. Relaxation time of the surface of melted Gallium and Wood and Gallium–Indium alloys is determined. Minimal relaxation time (about 4 ms) was found to be for Ga and Ga–In alloy. Qualitative description of the processes based on the assumption of capillary wave formation on the melted metal surface was suggested. Suggestions on the sampling of liquid metal with minimal surface relaxation time was made based on the description.

## Заключение

Исследованы процессы, происходящие на поверхности жидких металлов при воздействии XeCl-лазером с энергией излучения 50 мДж. Определены скорости восстановления поверхности ряда жидких металлов. Минимальное время релаксации поверхности (около 4 мс) получено при использовании жидкого галлия и его сплава с индием.

Предложено качественное описание процессов, происходящих на поверхности ЖМ в предположении формирования на поверхности расплава капиллярных волн. На основе данного описания сделаны выводы о выборе ЖМ с минимальным временем релаксации поверхности.

1. *Laser Ablation and its Applications* / Ed. by C. Phipps // Springer Series in Optical Sciences. Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. V. 129. 586 p.
2. *Phipps C., Luke J., Lipperta T.* Laser ablation of organic coatings as a basis for micropropulsion // *Thin Solid Films*. 2004. V. 453–454. P. 573–583.
3. *Urech L., Hauer M., Lippert T., Phipps C.R., Schmid E., Wokaum A.* Designed polymers for laser-based microthrusters-correlated trust with material, plasma and shockwave properties // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5448. P. 52–64.
4. *Toth Z., Hopp B., Smausz T., Kantor Z., Ignacz F., Szorenyi T., Bor Z.* Excimer laser ablation of molten metals as followed by ultrafast photography // *Appl. Surface. Sci.* 1999. V. 138–139. P. 130–134.
5. *Götz T., Stuke M.* Short-pulse UV laser ablation of solid and liquid metals: indium // *Appl. Phys. A*. 1997. V. 64. N 6. P. 539–543.
6. *Zergioti I., Stuke M.* Short pulse UV laser ablation of solid and liquid gallium // *Appl. Phys. A*. 1998. V. 67. N 4. P. 391–395.
7. *Schittenhelm H., Callies G., Berger P., Hügel H.* Investigations of extinction coefficients during excimer laser ablation and their interpretation in terms of Rayleigh scattering // *J. Phys. D*. 1996. V. 29. N 6. P. 1564–1575.
8. *Hopp B., Smausz T., Wittmann T., Ignacz F.* Comparative time-resolved study of solid-state and liquid ablation of polyethylene-glycol 1000: temperature, viscosity and surface tension dependence // *Appl. Phys. A*. 2000. V. 71. N 3. P. 315–318.
9. *Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А.* Колебания и волны: Лекции. М.: Изд. Физ. факультета МГУ, 2001. 144 с.
10. *Физические величины: Справочник* / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.