

ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ “КАНАЛ-2” ДЛЯ МИШЕНЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ

Н. В. Изотов, В. Н. Пузырёв, А. Т. Саакян, А. Н. Стародуб, О. Ф. Якушев

В статье приводятся результаты экспериментов по измерению гидродинамической эффективности лазерной плазмы для мишеней из алюминия и меди. Исследования были проведены на лазерной установке “Канал-2” с применением метода баллистического маятника. Давление в камере взаимодействия составляло 10^{-4} мм рт. ст., длина маятника – 145 мм, масса маятника с мишенью – 7.2 г. При длительности импульса по полувысоте 2.5 нс плотность мощности на поверхности мишени составляла $\sim 10^{13}$ Вт/см². В случае мишени из алюминия коэффициент гидродинамической эффективности повышался с 1.5% до 4.5% при увеличении энергии лазерного импульса с 5 Дж до 10 Дж, тогда как для медной мишени его величина оставалась на уровне 5%.

Ключевые слова: лазерная плазма, гидродинамическая эффективность, баллистический маятник, медь, алюминий.

Введение. Комплексные исследования гидродинамических явлений, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, имеют большую важность, поскольку основным параметром, определяющим стадию абляции, является гидродинамическая эффективность или отношение энергии испарённой части мишени к полной энергии воздействующего лазерного излучения. Эта эффективность определяет давление и энергетический баланс в термоядерной системе вплоть до стадии горения и максимальное количество термоядерного топлива, которое может быть сжато до высокой плотности при заданной энергии лазера [1, 2]. Если не ограничиваться вопросами термоядерного синтеза, то в целом понятно, что чем выше гидродинамическая

эффективность лазерно-плазменного взаимодействия, тем больше затраченной энергии лазерного импульса перешло в энергию лазерной плазмы.

Прямые экспериментальные исследования гидродинамической эффективности лазерно-плазменного взаимодействия позволяют иметь количественные значения гидродинамической эффективности, не требуя проведения сложных теоретических расчётов, которые зачастую учитывают не все факторы. Для экспериментального измерения гидродинамической эффективности разными авторами применялись различные методы в зависимости от условий эксперимента и возможности реализации [3–10]. Наиболее удобным из этих методов, который можно реализовать на установке “Канал-2” без затрагивания других диагностик является метод, основанный на принципе баллистического маятника [3]. Именно этот метод был опробован в серии экспериментов, условия которых и результаты приводятся в данной статье.

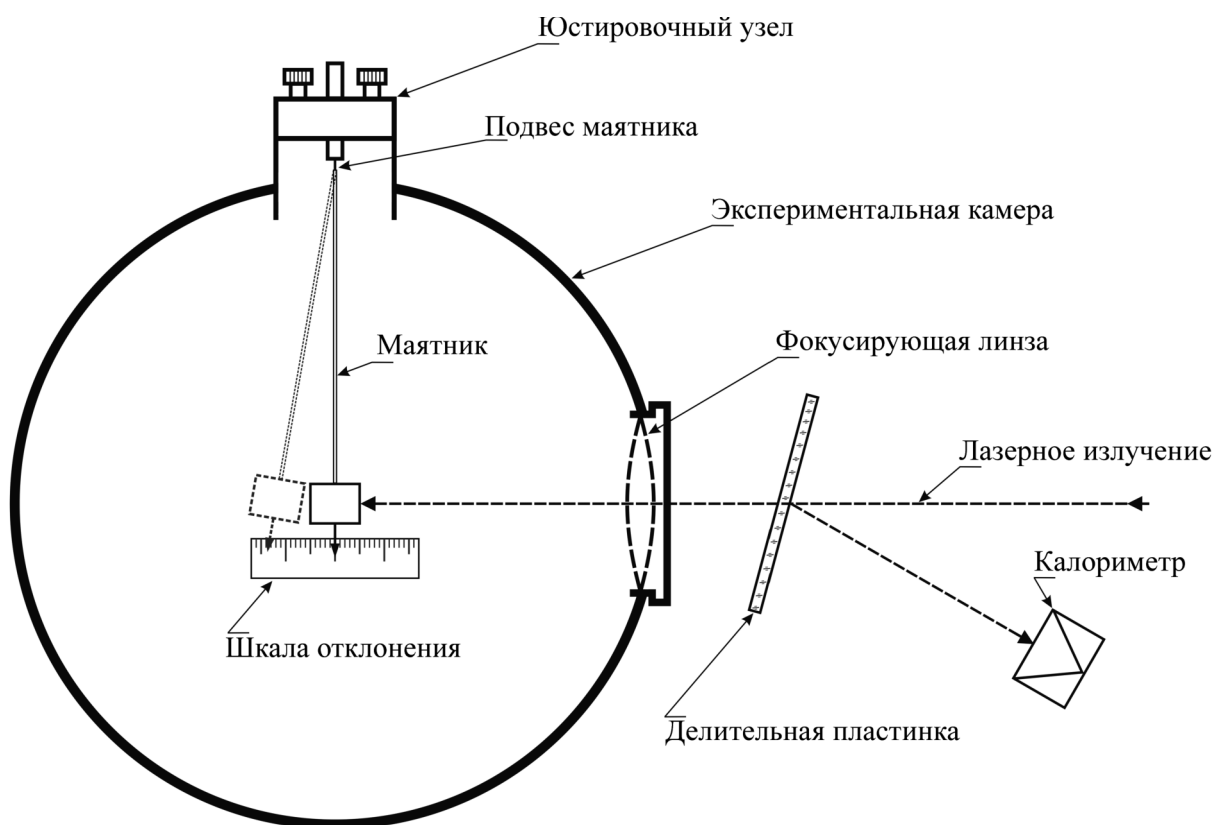


Рис. 1: Принципиальная схема метода с баллистическим маятником по измерению гидродинамической эффективности лазерно-плазменного взаимодействия.

Условия экспериментов. Принципиальная схема метода с баллистическим маятником по измерению гидродинамической эффективности лазерно-плазменного взаимодействия приведена на рис. 1. К юстировочному устройству, находящемуся в верхней части камеры взаимодействия, подвешивался маятник, состоящий из тонкого стержня малой массы (по сравнению с массой маятника) и держателя мишени, закреплённого на конце стержня. К торцевым сторонам держателя крепились плоские сплошные мишени из меди и алюминия. В нижней части держателя был закреплён указатель отклонения маятника. Приведённая длина маятника составляла 145 мм, масса с мишенью ≈ 7.2 г. Регистрация отклонения маятника под воздействием лазерного излучения на мишень проводилась с помощью видеокамеры с частотой съёмки 240 кадров/с, а величина отклонения определялась по измерительной линейке, расположенной в камере взаимодействия за указателем отклонения маятника (со стороны видеокамеры).

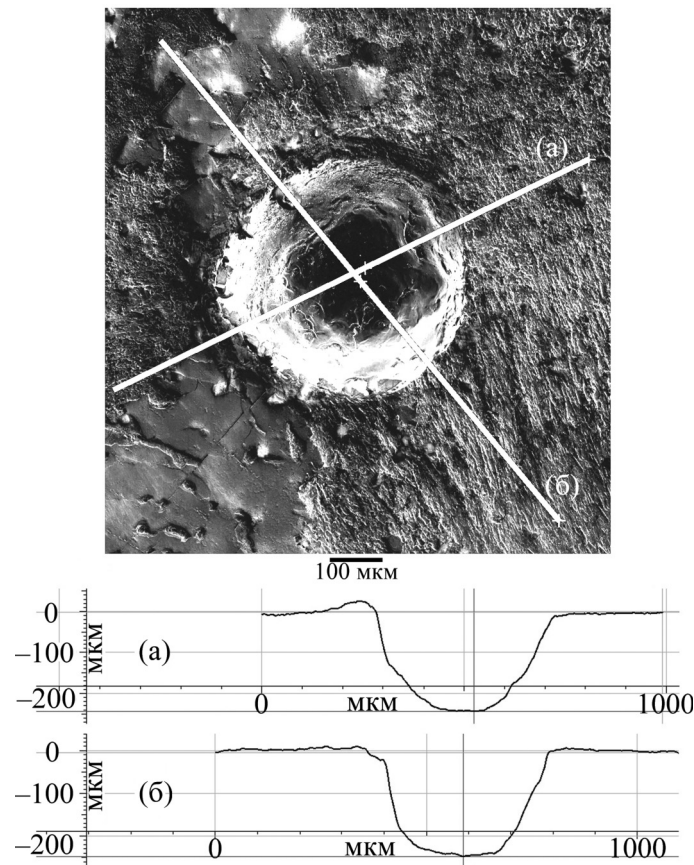


Рис. 2: Фотография кратера на алюминиевой пластине, а также его прописи в отмеченных (а) и (б) направлениях.

Основные параметры лазерного излучения в проведённых экспериментах были следующими: длина волны – 1.06 мкм, длительность импульса по полувысоте – 2.5 нс, расходимость излучения – 1.4 мрад, ширина спектра – 26 Å, энергия в одном импульсе – 5–10 Дж [11]. При диаметре пятна фокусировки ≈ 170 мкм плотность мощности лазерного излучения на мишени составляла $\sim 10^{13}$ Вт/см². В качестве мишеней использовались сплошные пластины из алюминия и меди, а давление в камере взаимодействия составляло 10^{-4} мм рт. ст.

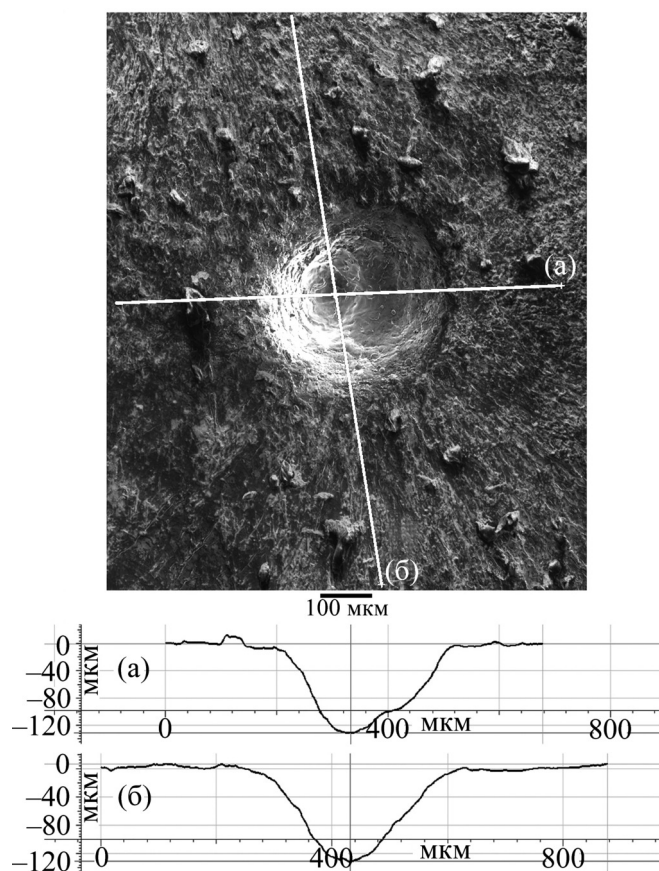


Рис. 3: Фотография кратера на медной пластине, а также его прописи в отмеченных (а) и (б) направлениях.

В результате взаимодействия лазерного излучения с веществом мишени на ней образовывался кратер, по объёму которого вычислялась масса испарённого вещества. На рис. 2 и 3 приведены фотографии кратеров и их прописи в двух направлениях для мишеней из алюминия и меди, соответственно. Морфологические исследования были проведены на растровом микроскопе “Helios” [12]. Исходя из данных маятника и величи-

ны его отклонения, согласно закону сохранения энергии высчитывалась кинетическая энергия испарённой части вещества. Отношение кинетической энергии испарённого вещества к энергии воздействующего лазерного излучения определяло гидродинамическую эффективность лазерно-плазменного взаимодействия. Энергия лазерного излучения измерялась калориметрическим способом.

Гидродинамическая эффективность для мишени из меди при разных значениях энергии воздействующего излучения составила примерно 5%. Для мишени из алюминия при значениях энергии лазерного импульса 5 Дж гидродинамическая эффективность составила примерно 1.5% и повышалась до уровня 4.5% при значениях энергии лазерного излучения 10 Дж. Таким образом, получается, что при данных значениях энергии лазерного импульса для более плотного вещества мишени (меди) гидродинамическая эффективность оказывается больше, чем для менее плотного (алюминия). Точность измерений составляла 15–20%, и зависела от ряда факторов, связанных как с методическими, так и с инструментальными погрешностями. Однако подбор оптимальных физических габаритов и веса маятника позволят значительно сократить методическую погрешность, которая даёт наибольший вклад.

Заключение. Проведены эксперименты по измерению гидродинамической эффективности лазерной плазмы для мишеней из алюминия и меди. В экспериментах использовался метод, основанный на баллистическом маятнике. В случае мишени из алюминия коэффициент гидродинамической эффективности повышался с 1.5% до 4.5% при увеличении энергии лазерного импульса с 5 Дж до 10 Дж, тогда как для медной мишени его величина оставалась на уровне 5%. В целом метод с использованием баллистического маятника оказался удобным, однако точность измерений составляла 15–20% в силу неоптимальных габаритов и веса маятника. Небольшая работа по оптимизации физических параметров маятника позволит значительно снизить погрешность измерений.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16–02–00293).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] О. Б. Ананьин, Ю. В. Афанасьев, Ю. А. Быковский, О. Н. Крохин, *Лазерная плазма. Физика и применения* (М., МИФИ, 2003).

- [2] Ю. В. Афанасьев, Н. Г. Басов, О. Н. Крохин и др., *Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой. Итоги науки и техники. Радиотехника, том 17* (М., ВИНТИ, 1978).
- [3] D. W. Gregg and S.J. Thomas, *J. Appl. Phys.* **37**(7), 2787 (1966).
- [4] B. H. Ripin, R. Decoste, S. P. Obenschain, et al., *The Physics of Fluids* **23**, 1012 (1980); doi: 10.1063/1.863084.
- [5] M. H. Key, W. T. Toner, T. J. Goldsack, et al., *The Physics of Fluids* **26**, 2011 (1983); doi: 10.1063/1.864348.
- [6] H. Nishimura, H. Azechi, K. Yamada, et al., *Phys. Rev. A* **23**(4), 2011 (1981).
- [7] C. Garban-Labaune, E. Fabre, C. Max, et al., *The Physics of Fluids* **28**, 2580 (1985); doi: 10.1063/1.865266.
- [8] D. Batani, H. Stabile, A. Ravasio, et al., *Phys. Rev. E* **68**, 067403 (2003).
- [9] B. Meyer and G. Thiell, *The Physics of Fluids* **27**, 302 (1984); doi: 10.1063/1.864483.
- [10] P. D. Gupta and S.R. Kumbhare, *J. of App. Phys.* **55**, 120 (1984); doi: 10.1063/1.332875.
- [11] S. I. Fedotov, L. P. Feoktistov, M. V. Osipov, et al., *J. Russian Laser Research* **25**, 79 (2004).
- [12] Helios Nanolab DualBeam. Fei. (2013). <http://www.fei.com/products/dualbeams/helios-nanolab.aspx>.

По материалам VII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 13 июня 2018 г.