

## Влияние продольного магнитного поля на разлет эрозионной лазерной плазмы в вакууме и генерацию плазмой собственных магнитных полей

© А.Н. Чумаков, П.В. Чекан

Институт физики им. Б.И. Степанова АН Беларуси,  
220072 Минск, Беларусь  
e-mail: chekan@imaph.bas-net.by

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2017 г.)

Экспериментально исследована динамика эрозионной лазерной плазмы в вакууме и генерация магнитного поля движущейся плазмой, в том числе при наложении внешнего постоянного магнитного поля, ориентированного вдоль направления движения плазмы. При индукции внешнего магнитного поля  $\sim 0.35$  Т обнаружено ограничение радиального разлета плазмы и уменьшение электризации мишени при плазмообразовании, а также увеличение индукции генерируемого плазмой магнитного поля в 10–15 раз. Установлены зависимости индукции магнитного поля лазерной плазмы от плотности мощности лазерного излучения в указанных выше режимах.

DOI: 10.21883/JTF.2018.02.45419.2285

### Введение

Формирование и распространение плазменных струй в магнитном поле — важный аспект теоретических и прикладных исследований лазерной плазмы. Теоретические расчеты [1,2] и экспериментальные исследования [3] показывают, что продольное магнитное поле существенно ограничивает радиальный разлет эрозионной лазерно-плазменной струи, а при индукции внешнего магнитного поля более 2 Т расширение плазмы в радиальном направлении практически прекращается, и она движется прямолинейно. При этом плазменный сгусток дольше сохраняет свою плотность и однородность, что приводит к увеличению влияния переноса энергии внутри плазмы на ее динамику. В таких условиях максимальная температура плазмы несколько уменьшается, а распределение температуры в плазме становится более однородным.

Внешнее магнитное поле может использоваться для управления динамическими параметрами лазерной плазмы, поэтому находит практическое применение в таких областях науки и техники, как лабораторная астрофизика [4], импульсное лазерное осаждение [5], эмиссионная лазерная спектроскопия [6], лазерное сверление [7] и других, где оно применяется для сжатия плазменного факела и управления его разлетом. В плазменных реактивных двигателях продольное магнитное поле может применяться в качестве магнитного сопла для сжатия и ускорения реактивной плазменной струи [8–11].

Движущаяся лазерная плазма генерирует и собственные магнитные поля, которые зависят от плотности мощности лазерного излучения на облучаемой поверхности и материала мишени, размеров пятна облучения, давления окружающего газа, а также от режима лазерного воздействия [12]. Сопоставимость влияния на формирование лазерно-плазменных струй как внешнего

магнитного поля, так и спонтанных магнитных полей, генерируемых движущейся эрозионной лазерной плазмой, требует специального исследования, что важно для оптимизации лазерных микродвигателей. Поэтому целью настоящей работы было исследование особенностей разлета эрозионной лазерной плазмы и генерации спонтанных магнитных полей движущейся плазмой в условиях пониженного давления воздуха в зависимости от плотности мощности воздействующего на мишень лазерного излучения и наличия продольного магнитного поля.

### Экспериментальная установка и методы измерений

Исследования лазерной плазмы проводились на экспериментальной установке, созданной на основе Nd:YAG-лазера LS-2135M, который генерировал излучение второй гармоники с длиной волны 532 нм. Воздействие на мишень осуществлялось одиночным лазерным импульсом длительностью 10 нс и энергией излучения до 84 мДж. Мишень, представляющая собой медный цилиндр, покрытый слоем индия, размещалась в вакуумной камере, откачанной до  $\sim 10^{-3}$  мм рт.ст. Лазерное излучение вводилось в камеру через боковое окно и фокусировалось линзой в пятно диаметром 0.5 мм, что позволяло достигать плотность мощности лазерного излучения на мишени до  $5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Для создания магнитного поля использовалась связка из трех постоянных магнитов, одевавшихся поверх мишени так, чтобы направление магнитных линий в области лазерного воздействия на поверхность мишени совпадало с направлением движения плазменного сгустка. Напряженность магнитного поля на торце связки магнитов достигала 0.35 Т.

Регистрация скорости движения плазмы осуществлялась времяпролетным методом с помощью электрического зонда, представляющего собой плоскую медную пластину с отверстием для прохождения лазерного излучения и установленного на расстоянии 7 мм от поверхности мишени. Одновременно сигналом другого зонда регистрировалось изменение электрического потенциала на мишени.

Индукция магнитного поля, генерируемого движущейся лазерной плазмой, определялась с помощью магнитного зонда индукционного типа, катушка которого была установлена в плоскости пятна облучения на расстоянии 5 мм от его центра и ориентирована перпендикулярно оси движения плазмы. Зонды такого типа регистрируют только переменное магнитное поле и нечувствительны к постоянному полю, что позволяет исключить влияние постоянных магнитов на результаты измерения. Сигнал зонда, пропорциональный магнитному потоку через поверхность катушки, регистрировался цифровым осциллографом DPO 3034 и использовался для определения амплитудного значения индукции магнитного поля путем численного интегрирования.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Общий вид полученной при лазерном облучении мишени импульсной плазменной струи показан на рис. 1. На фотографиях представлено интегральное свечение одиночного сгустка лазерной плазмы, зарегистрированное с помощью видеокамеры на основе ПЗС-матрицы в видимом диапазоне. На рисунке видно, что плазменный факел в продольном магнитном поле (рис. 1, *b*) приобретает более вытянутую в направлении распространения форму по сравнению с факелом в отсутствие магнитного поля (рис. 1, *a*).

Изменения электрического потенциала на мишени и потенциала, наводимого плазмой на электрический зонд, регистрировались цифровым осциллографом DPO 3034. Результаты измерений приведены на рис. 2.

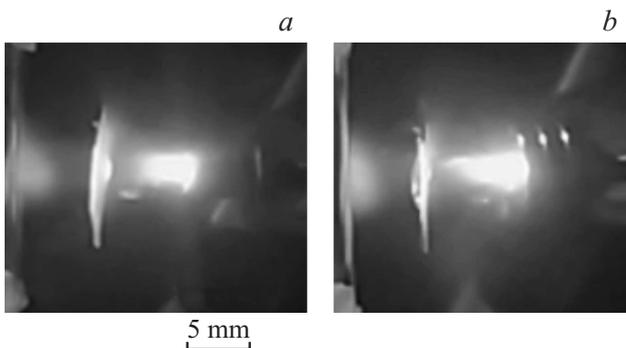


Рис. 1. Общий вид плазменного факела без магнитного поля (*a*) и с магнитным полем (*b*).

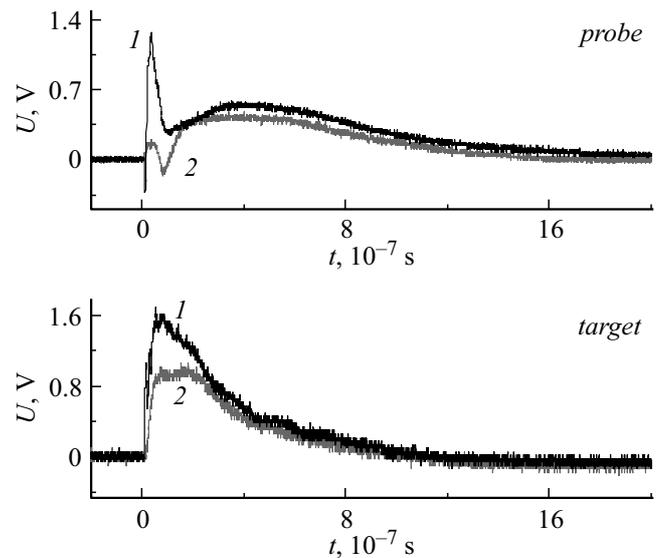


Рис. 2. Осциллограммы сигналов электрического зонда и электрического потенциала на мишени. 1 — без магнитного поля, 2 — с магнитным полем.

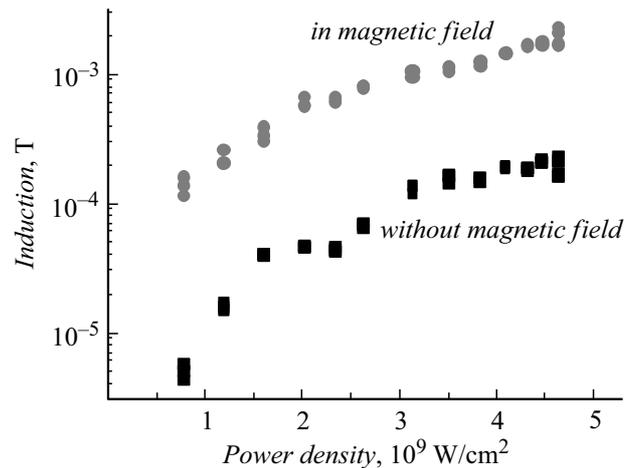


Рис. 3. Влияние внешнего магнитного поля на индукцию генерируемого лазерной плазмой импульсного магнитного поля.

В эрозионной лазерной плазме обычно выделяют неравновесную ионную компоненту, ускоряющуюся за счет взаимодействия с эмиссионными электронами, и равновесную, ответственную за тепловое расширение лазерной плазмы. На рис. 2, *a* видно, что наличие магнитного поля незначительно влияет на скорость движения обеих компонент, однако снижает электрический заряд, передаваемый плазмой электрическому зонду. Для первого положительного пика (рис. 2, *a*), соответствующего неравновесной ионной компоненте лазерной плазмы, при наложении внешнего магнитного поля характерно резкое снижение скачка потенциала в 4–5 раз, при этом наблюдается и незначительное снижение сигнала равновесной компоненты. Это можно объяснить увеличением плотности плазменного факела

в магнитном поле и ограничением его радиального разлета, что приводит к снижению числа частиц, взаимодействующих с электрическим зондом. Осциллограмма изменения электрического потенциала, передаваемого мишени при плазмообразовании в продольном магнитном поле (рис. 2, *b*), также показывает уменьшение максимального значения примерно на 30%, что может быть вызвано ростом переноса энергии в плазме.

Индукция магнитного поля лазерной плазмы измерялась в диапазоне энергии излучения лазера 10–70 мДж, что соответствует изменению плотности мощности лазерного излучения на мишени от  $0.8 \cdot 10^9$  до  $4.6 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Полученные результаты приведены на рис. 3. Из графика видно, что внешнее продольное магнитное поле увеличивает плотность плазменного факела, ограничивая его радиальный разлет, что приводит к росту индукции генерируемой плазмой магнитного поля в 10–15 раз.

## Заключение

Полученные экспериментальные результаты показывают, что внешнее магнитное поле оказывает существенное влияние на движение эрозионной лазерной плазмы уже при значении магнитной индукции  $\sim 0.35$  Т. Это проявляется как в изменении формы плазменного факела, обусловленном ограничением радиального разлета плазмы, так и во влиянии приповерхностного плазмообразования на электризацию мишени, а также в увеличении индукции генерируемой движущейся плазмой магнитного поля более чем на порядок, что может быть связано с повышением плотности плазменного сгустка и увеличением плотности потока энергии плазмы. В то же время прямого влияния магнитного поля на аксиальную скорость плазменной струи в таких условиях выявлено не было.

Полученные экспериментальные результаты могут найти применение для решения задач оптимизации режимов работы лазерно-плазменных микродвигателей космического назначения.

Работа выполнена в рамках задания 2.4.02 государственной программы „Конвергенция-2020“ Республики Беларусь.

## Список литературы

- [1] Устюгов Д.О., Устюгов С.Д. // Математическое моделирование. 2009. Т. 21. Вып. 11. С. 33–46.
- [2] Amitava R., Akira E., Tomas M. // IEEE T. Plasma Sci., 2016. Vol. 44. N 4. P. 574–581.
- [3] Pisarczyk T., Bryunetkin B.A., Faenov A.Ya., Farynski A., Fiedorowicz H., Koshevoy M.O., Miklaszewski R., Mroczkowski M., Osipov M.V., Parys P., Skobelev I.Yu., Szczurek M. // Phys. Scripta. 1994. Vol. 50. P. 72–81.
- [4] Remington B.A., Drake R.P., Ryutov O.O. // Rev. Mod. Phys. 2006. Vol. 78. N 3. P. 755–808.
- [5] Tajima T., Dawson J.M. // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. N 4. P. 267–270.
- [6] Shen X.K., Lu Y.F., Gebre T., Ling H., Han Y.X. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. N 5. P. 053303.
- [7] Ye C., Cheng G.J., Tao S., Wu B. // J. Manuf. Sci. E. 2013. Vol. 135. N 6. P. 061020.
- [8] York T.M., Jacoby B.A., Mikellides P. // J. Propul. Power. 1992. Vol. 8. P. 1023–1030.
- [9] Inutake M., Ando A., Hattori K., Tobari H., Yagai T. // J. Plasma Fus. Res. 2002. Vol. 78. N 12. P. 1352–1360.
- [10] Merino M., Ahedo E. // Phys. Plasmas. 2010. Vol. 17. P. 073501.
- [11] Merino M., Ahedo E. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 040512.
- [12] Чумаков А.Н., Чекал П.В. // Квант. электрон. 2015. Т. 45. № 3. С. 224–227.