

**Некоторые результаты применения зондовой методики
для исследования лазерной плазмы при интенсивности излучения
на мишени $\sim 10^9$ Вт/см²**

С. Г. Давыдов, А. Н. Долгов, А. С. Каторов, В. О. Ревазов, Р. Х. Якубов

Зафиксировано появление трех групп заряженных частиц при воздействии импульса лазерного излучения оптического диапазона с интенсивностью $\sim 10^9$ Вт/см² на металлическую мишень в среде разреженного газа. Показана возможность использования ленгмюровского зонда для диагностики плазменных процессов с наносекундным временным разрешением.

Ключевые слова: лазерная плазма, зондовая диагностика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-1-39-43

Введение

Обычные искровые разрядники получили широкое распространение в силу своей уникальной способности коммутировать токи большой силы и высокие напряжения, часто встречающиеся в современных исследованиях [1–4]. Лазеры дали новый импульс развитию сильноточных высоковольтных коммутаторов: появились разрядники с лазерным поджигом [5, 6]. В настоящий момент вакуумные разрядники, запускаемые импульсом лазерного излучения, являются перспективным для ряда приложений классом управляемых быстродействующих коммутаторов [7, 8].

Давыдов Сергей Геннадьевич, нач. научно-исследовательской лаборатории.

Долгов Александр Николаевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

Каторов Алексей Сергеевич, инженер 1-й кат.
E-mail: katorovalexey@mail.ru

Ревазов Владислав Олегович, зам. нач. научно-исследовательского отдела.

Якубов Рустам Халимович, нач. научно-конструкторского отделения – нач. отдела, к.т.н.

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизации им. Н. Л. Духова.

Россия, 127055, Москва, ул. Суцёвская, 22.

Статья поступила в редакцию 20 марта 2019 г.

© Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Каторов А. С., Ревазов В. О., Якубов Р. Х., 2021

Методика эксперимента

Исследования лазерной плазмы проводились на экспериментальном стенде, блок-схема которого показана на рис. 1. Средняя интенсивность лазерного излучения, падающего на мишень, составляла $q \approx 10^9$ Вт/см². Длина волны падающего на мишень излучения – $\lambda = 0,53$ мкм. Длительность импульса лазерного излучения по основанию – 30 нс. Плоская мишень, изготовленная из кобальта, и цилиндрический электростатический зонд размещались внутри оптически прозрачной вакуумной камеры, оснащенной двухэлектродной системой электрических вводов и откачиваемой последовательно форвакуумным и магнито-разрядным насосами до остаточного давления $\sim 10^{-4}$ – 10^{-2} мм рт. ст. Лазерное излучение при проведении исследований фокусировалось на мишень на расстоянии от зонда 6 мм. Угол падения лазерного луча на мишень был близок к нулю (нормальное падение на поверхность мишени), а угол между нормалью к поверхности мишени и направлением от пятна фокусировки лазерного луча к зонду составлял 9° . Мишень находилась под постоянным нулевым потенциалом. Знак и величина потенциала зонда могли варьироваться в пределах от -500 В до +500 В. В качестве положительного тока на зонд был принят, как обычно, ток электронов.

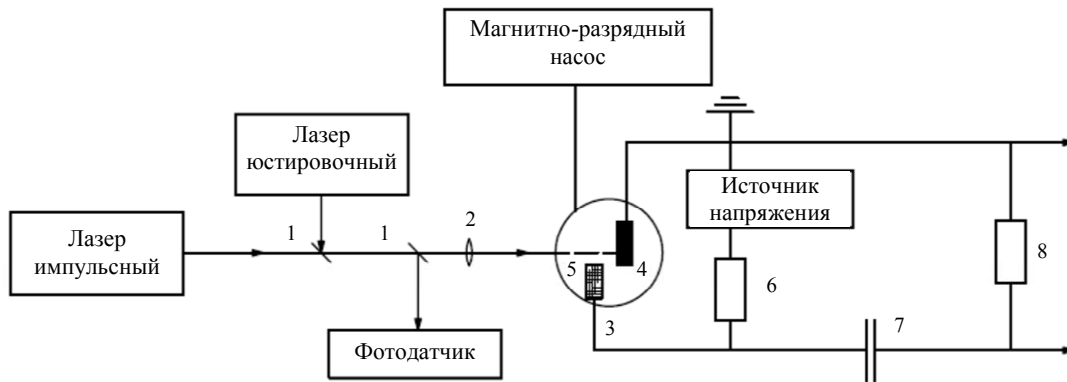


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: 1 – полупрозрачные зеркала; 2 – собирающая линза; 3 – вакуумная камера; 4 – мишень из ковара (29НК); 5 – зонд; 6 – резистор с сопротивлением 20 кОм; 7 – конденсатор с емкостью 2,2 мкФ; 8 – резистор с сопротивлением 47 Ом.

Результаты эксперимента

С целью оценки возможностей достоверной интерпретации ВАХ в условиях описываемых экспериментов было принято решение о проведении на первом этапе регистрации сигналов с зонда с интегрированием по времени. Интегрирование поступающего с зонда сигнала при различных значениях потенциала зонда производилось путем численного интегрирования регистрируемых осциллограмм сигнала.

Вид интегральных ВАХ (их можно назвать по аналогии вольт-кулоновскими характеристиками – ВКХ) в целом соответствует классической теории зонда Ленгмюра в разреженной плазме (рис. 2). Наличие ступеньки в области электронной ветви может означать, что регистрируемая зондом плазма представляет собой поток, который обладает довольно значительной скоростью, по-видимому, существенно превышающей ионно-звуковую скорость [9]. Согласно классической теории зонда отношение электронного и ионного токов насыщения в первом приближении

$$I_{es} / I_{is} = (m_i / m_e)^{1/2}. \quad (1)$$

При восстановлении соответствующих величин на ВКХ по принятой для восстановления токов насыщения методике получено отношение интегральных зарядов $q_{es} / q_{is} = 250\text{--}400$. Для металлов из состава ковара (Fe, Co, Ni) соответствующее отношение имеет величину $(m_i / m_e)^{1/2} \approx 300$. Таким образом налицо вполне удовлетворительное совпадение. Оценка электронной температуры, выполненная по результатам линейной аппроксимации двух участков электронной ветви ВКХ, построенной в полулогарифмическом масштабе, дает двухтемпературное распределение и следующие величины для холодной и горячей компонент $T_{ec} = (4 \pm 2)$ эВ и $T_{eh} = (10 \pm 2)$ эВ. Первый участок соответствует на интегральной ВАХ (ВКХ) промежутку между точками, отвечающими плавающему потенциалу и потенциалу плазмы (пространства), второй – промежутку между аналогичными точками перегиба, но расположенными на графике правее после ступеньки.

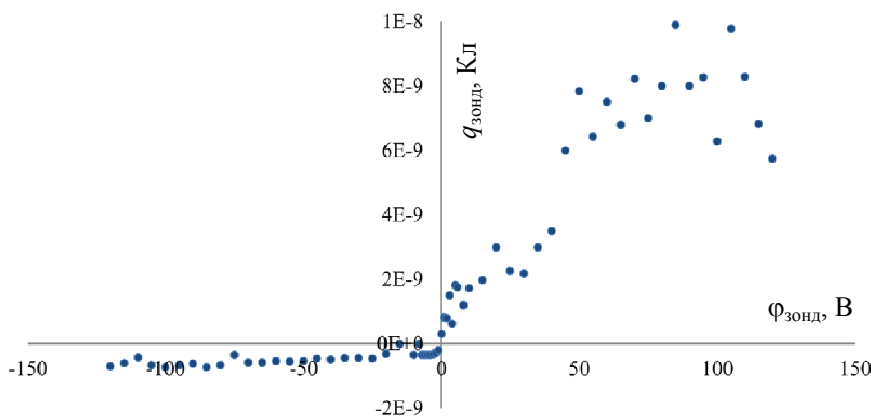


Рис. 2. Вольт-кулоновская характеристика лазерной плазмы.

На осциллограммах сигнала с зонда просматриваются три группы заряженных частиц: 1-я группа возникает практически синхронно с импульсом лазерного излучения; 2-я группа фиксируется примерно через 150 нс (пик сигнала с зонда, т. е. максимум потока частиц на зонд) после старта лазерного излучения; 3-я группа фиксируется примерно через ~ 500 нс (пик сигнала с зонда) после старта лазерного излучения.

Вид ВАХ для 1-й и 2-й групп частиц показывает возможность проведения с их помощью оценки электронной температуры и электронной концентрации, но не дает возможности осуществить оценку концентрации ионов. Кроме того, на ВАХ, соответствующей 2-й группе частиц, отчетливо прослеживается «ступенька» на электронной ветви, что говорит нам о том, что 2-я группа частиц – быстро движущийся корпускулярный поток (рис. 3, 4). На ВАХ, соответствующей 1-й группе частиц, столь отчетливые признаки формирования плазменного потока отсутствуют. Для ВАХ, отвечающих 1-й и переднему фронту 2-й группы частиц, характерно отрицательное значение плавающего потенциала, который в дальнейшем становится равным нулю. Это может говорить, в частности, о том, что в плазме, отвечающей 1-й и переднему фронту 2-й группы частиц преобладает электронная компонента. Зато ВАХ, отвечающая 3-й группе частиц, не позволяет сделать никаких заключений, кроме единственного: в плазме, каковой является, по-видимому, эта группа частиц, происходят сильные колебания, собственное электрическое поле которых превосходит по величине поле, создаваемое в плазме зондом [10, 11].

Для 1-ой группы частиц на пике сигнала с зонда при вакууме в системе ~ 10⁻² мм рт. ст. получены следующие параметры плазмы: $T_e = (6 \pm 2)$ эВ, $n_e \approx 6 \times 10^{10}$ см⁻³. Для 2-й группы частиц: $T_e = (5 \pm 1)$ эВ, $n_e \approx 10^{11}$ см⁻³. Скорости направленного движения частиц во 2-й и 3-й группах, соответствующие максимуму потока и определяемые по времени пролета, составляют примерно 4×10^6 см/с и $1,3 \times 10^6$ см/с, а кинетические энергии ионов в плазменном потоке составляют при этом ~ 500 эВ и ~ 60 эВ, соответственно. Оценка концентрации ионов для указанных групп частиц, исхо-

дящая из величины их направленной скорости и учитывающая, что площадь собирающей поверхности зонда в плазменном потоке представляет собой площадь проекции зонда на плоскость, ортогональную направлению потока, дает величины ~ 3×10¹¹ см⁻³ и ~ 4×10¹² см⁻³.

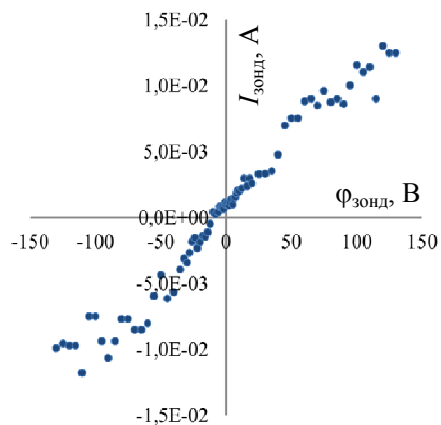


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика лазерной плазмы, регистрируемая зондом через 10 нс после старта воздействия лазерного излучения на мишень.

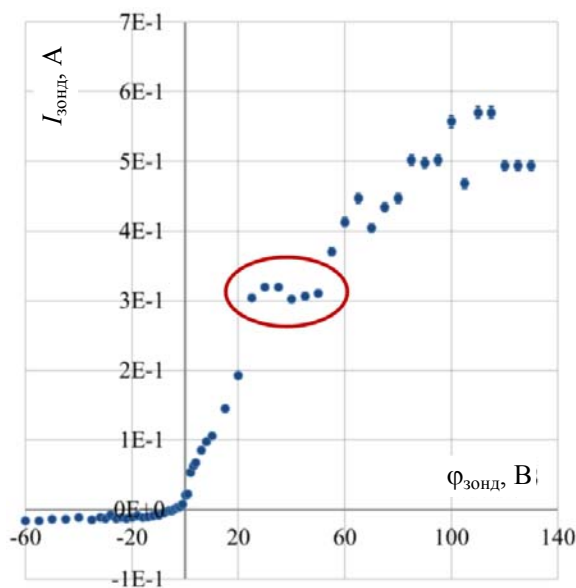


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика лазерной плазмы, регистрируемая зондом через 150 нс после старта воздействия лазерного излучения на мишень. Выделен участок, содержащий ступеньку в области электронной ветви.

Проведем оценку временного разрешения используемой методики измерений. Согласно автору [9] временное разрешение ленгмюровского зонда можно оценить следующим образом

$$\tau \approx 1/\omega_0, \quad (2)$$

$$\omega_0 = \left(e^2 n_e / 4\pi\epsilon_0 m_e \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где ω_0 – круговая частота ленгмюровских колебаний, т. е. временное разрешение определяется временем установления дебаевской экранировки. В наших условиях $\tau \approx 10^{-10}$ – 10^{-9} с. Иной подход предлагает автор [12]: в качестве оценки нижнего предела временного разрешения зонда Ленгмюра следует принимать время прохождения ионами переходного слоя. При температуре ионов порядка 5–10 эВ скорость ионов составит $\sim 5 \times 10^3$ м/с и указанное время прохождения переходного слоя порядка 10^{-9} – 10^{-8} с. Следовательно, результаты, полученные при восстановлении параметров исследуемой плазмы на основе ВАХ, регистрируемых с наносекундным временным разрешением, имеют право на существование.

Изменение напряжения на емкости в цепи зонда, определяющей его потенциал, в процессе поступления заряженных частиц на зонд при создаваемом частицами токе ~ 1 А за время порядка 10^{-8} с составляет величину $\sim 10^{-2}$ В, которой вполне можно пренебречь. Вероятное искажение потенциала зонда, обусловленное индуктивностью в цепи зонда, которую можно оценить величиной $\sim 10^{-8}$ Гн, при изменении тока на зонд порядка 10^{-3} – 10^{-2} А за время $\sim 10^{-9}$ – 10^{-8} с составит порядка 10^{-2} – 10^{-1} В и также вряд ли заметным образом отразится на результатах измерений.

Заключение

Зафиксировано появление трех групп заряженных частиц в окрестностях зонда: 1-я группа возникает практически синхронно с импульсом лазерного излучения, падающего на мишень; 2-я группа фиксируется примерно через 150 нс (пик сигнала с зонда, т. е. максимум потока частиц на зонд) после старта лазерного излучения; 3-я группа фиксируется примерно через ~ 500 нс (пик сигнала с зонда) после старта лазерного излучения.

Зарегистрированные в наших экспериментах ВАХ имеют одну и ту же отличительную черту – аномально большой ионный ток насыщения и большие флуктуации этого тока.

Искажение ВАХ зонда, т. е. отличие их формы от классической, авторы связывают с раскачкой в плазме электростатических колебаний. Форма проинтегрированных по времени характеристик (ВКХ) служит подтверждением мнения авторов по данному поводу. Сравнительный анализ полученных с временным разрешением (ВАХ) и проинтегрированных по времени (ВКХ) характеристик зонда показывает, что в условиях описываемых экспериментов до определенного момента времени, по крайней мере, до появления 3-й группы частиц, электронная ветвь ВАХ не подвергается значительным искажениям и может быть использована для определения параметров появляющейся в окрестностях зонда плазмы.

Разлет лазерной плазмы из области пятна фокусировки лазерного излучения на мишени происходит недостаточно быстро для того, чтобы обеспечить за время в несколько наносекунд создание вокруг зонда плазменной среды. По-видимому, механизм первоначального быстрого образования плазмы, имеющей электронную температуру до ~ 10 эВ, связан с воздействием излучения и потока быстрых электронов (скорость $\geq 2 \times 10^8$ см/с) из области пятна фокусировки на остаточный газ в окрестностях зонда.

Скорости направленного движения частиц во 2-й и 3-й группах, соответствующие максимуму потока и определяемые по времени пролета, составляют примерно 4×10^6 см/с и $1,3 \times 10^6$ см/с, а кинетические энергии ионов в плазменном потоке составляют при этом ~ 500 эВ и ~ 60 эВ, соответственно. Фиксируемая скорость 2-й группы регистрируемых зондом частиц позволяет предположить, что указанный сгусток плазмы – это результат амбиполярной диффузии плазмы в вакуум. В пользу данного предположения свидетельствует обнаруженное преобладание отрицательно заряженных частиц, т. е. электронов, на переднем фронте указанной группы частиц. Наконец, 3-я группа зарегистрированных частиц – это, по-видимому, результат газокинетического разлета плазмы из области вблизи пятна фокусировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов Д. Ф., Иванов В. П., Сидоров В. А., Федоров В. В. // Прикладная физика. 2001. № 4. С. 41.

2. Алферов Д. Ф., Матвеев Н. В., Сидоров В. А., Хабаров Д. А. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 94.
3. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004.
4. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козловская Т. И., Пиеничный А. А., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 605.
5. Pendleton W. K., Guenther A. H. Investigation of a Laser-Triggered Spark Gap // Rev. Sci. Instrum. 1965. Vol. 36. P. 1546.
6. Guenther A. H., McKnight R. H. A Laser-Triggered 50 pps High Voltage Switch with Subnanosecond Jitter // Proceedings of the IEEE (Letters). 1967. Vol. 55. P. 1504.
7. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козловская Т. И., Ревазов О. В., Селезнев В. П., Якубов Р. Х. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 32.
8. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козловская Т. И., Ревазов О. В., Селезнев В. П., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 613.
9. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. – М.: Атомиздат, 1969.
10. Чен Ф. // Электрические зонды. В кн.: Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. – М.: Изд-во Мир, 1967.
11. Nold B., Ribeiro T. T., Ramisch M., Huang Z., Muller H. W., Scott B. D., Stroth U. Influence of temperature fluctuations on plasma turbulence investigations with Langmuir probes // New Journal of Physics. 2012. Vol. 14. P. 063022.
12. Шотт Л. // Электрические зонды. В кн.: Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. – М.: Изд-во Мир, 1971.

PACS: 52.38.-r, 52.38.kd, 52.50.Jm, 52.70.-m, 52.70.Ds

Some results of probe method application for laser plasma investigating with intensity of radiation on the target $\sim 10^9$ W/cm²

S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. S. Katorov, V. O. Revazov, and R. Kh. Yakubov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)
22, Sushevskaya Ul., Moscow, 127055, Russia

Received December 14, 2020

The appearance of third charged particles groups has fixed, when the laser radiation interacted with metal target in rarefied environ gas. The intensity of optical range laser radiation was $\sim 10^9$ W/cm². The opportunity of using Langmuir probe for diagnosing plasma processes with nanosecond resolution has demonstrated.

Keywords: laser-plasma, probe diagnostics.

REFERENCES

1. D. F. Alferov, V. P. Ivanov, V. A. Sidorov, and V. V. Fedorov, Applied Physics, No. 4, 41 (2001).
2. D. F. Alferov, N. V. Matveev, V. A. Sidorov, and D. A. Habarov, PTE, No. 3, 94 (2004).
3. G. A. Mesyac, *Pulse energetics and electronics* (Science, 2004).
4. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, T. I. Kozlovskaya, A. A. Pshenichnyi, and R. Kh. Yakubov, Usp. Prikl. Fiz. **2** (6), 605 (2014).
5. W. K. Pendleton and A. H. Guenther, “Investigation of a Laser-Triggered Spark Gap”, Rev. Sci. Instrum. **36**, 1546 (1965).
6. A. H. Guenther and R. H. McKnight, “A Laser-Triggered 50 pps High Voltage Switch with Subnanosecond Jitter”, Proceedings of the IEEE (Letters) **55**, 1504 (1967).
7. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, T. I. Kozlovskaya, V. O. Revazov, V. P. Seleznev, and R. Kh. Yakubov, Applied Physics, No. 6, 32 (2014).
8. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, T. I. Kozlovskaya, V. O. Revazov, V. P. Seleznev, and R. Kh. Yakubov, Usp. Prikl. Fiz. **2** (6), 613 (2014).
9. O. V. Kozlov, *Electric probe in plasma* (Atomizdat, Moscow, 1969).
10. R. Hadlstone and S. Leonard, *Plasma diagnostic* (Mir, Moscow, 1967).
11. B. Nold, T. T. Ribeiro, M. Ramisch, Z. Huang, H. W. Muller, B. D. Scott, and U. Stroth, “Influence of temperature fluctuations on plasma turbulence investigations with Langmuir probes”, New Journal of Physics **14**, 063022 (2012).
12. V. Lohte-Holtgreven, *Plasma investigating methods* (Mir, Moscow, 1971).