

А.В. Градобоев, А.И. Федоров

Электропроводность лазерной плазмы

Томский политехнический университет,
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 7.10.2001 г.

Представлены результаты исследования проводящих свойств лазерной плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности керамики 22ХС импульсным лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм и длительностью 10^{-7} с, при наложении внешних электрических полей, которые направлены перпендикулярно падению лазерного излучения.

Проводящие свойства плазмы можно характеризовать током плазмы. В зависимости от плотности лазерного излучения обнаружено существование характерных областей: область отсутствия лазерной плазмы с проводящими свойствами; область существования проводящей плазмы, ток которой изменяется пропорционально плотности мощности излучения и квадрату напряженности внешнего электрического поля; область существования плазмы, ток которой не зависит от плотности мощности излучения и изменяется прямо пропорционально напряженности электрического поля.

К настоящему времени известно достаточно большое количество работ по исследованию различных характеристик плазмы, возбуждаемой лазерным излучением вблизи поверхности твердых тел [1–7]. При этом следует отметить, что основное количество работ посвящено исследованию рентгеновских [4], оптических [5, 6] и теплофизических [7] свойств такой плазмы. Существенно меньшее количество работ посвящено исследованию свойств лазерной плазмы в электрических полях [8, 9].

При воздействии лазерного излучения на поверхность твердого тела наблюдается формирование плазмы из ионов окружающей среды и(или) ионов вещества мишени, испаряемого из зоны воздействия излучения. Сформированный таким образом плазменный факел через некоторое время начинает распадаться за счет диффузии компонентов плазмы в окружающую среду и(или) их абсорбции на поверхности мишени. Наложение внешних электрических полей на область существования плазменного факела приводит к концентрации компонентов плазмы на соответствующих электродах в зависимости от знака электрического заряда этих компонентов и позволяет контролировать процессы разрушения факела.

Практическое использование описанных выше процессов разложения плазменного факела, контролируемых внешними электрическими полями, позволит повысить эффективность и качество обработки различных мишеней, снизить вероятность обратного осаждения испаренного материала мишени, а также осуществить сбор продуктов испарения локальной области обрабатываемого материала на электродах. Использование сменных электродов, расположенных в зоне действия плазменного факела, позволит собирать и отправлять на переработку продукты испарения обрабатываемого материала. Отмеченные выше

особенности и определяют актуальность исследования электрических свойств лазерной плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности твердых тел.

В работе [9] представлены результаты исследования электропроводности лазерной плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности керамики импульсным лазерным излучением (ИЛИ) с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 10^{-3} с и плотностью мощности W_p в диапазоне от $3 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^6$ Вт/см².

На основании исследований, выполненных в [9], выявлены характерные области существования лазерной плазмы с проводящими свойствами. Пороговая плотность мощности ИЛИ, при которой возникает плазма с проводящими свойствами, составляет $7 \cdot 10^4$ Вт/см². При W_p в диапазоне от $7 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^5$ Вт/см² возбуждается плазма, ток которой изменяется прямо пропорционально плотности мощности и прямо пропорционально квадрату напряженности электрического поля E^2 . При $W_p > 1 \cdot 10^5$ Вт/см² возбуждается ток, который изменяется прямо пропорционально W_p и прямо пропорционально E вплоть до $W_p = 1 \cdot 10^6$ Вт/см².

Целью данной работы является исследование электропроводности лазерной плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности керамики ИЛИ с временными характеристиками, отличающимися от представленных в [9].

В качестве объекта исследования нами использовалась лазерная плазма, возбуждаемая вблизи поверхности керамики 22ХС ИЛИ с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 10^{-7} с и плотностью мощности в диапазоне от $1 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^9$ Вт/см². Используемые плотности мощности ИЛИ практически не приводили к разрушению керамических образцов и металлических электродов. Следовательно, можно считать, что в результате воздействия ИЛИ формируется плазма в основном за счет ионизации компонентов

окружающей атмосферы. Плотность мощности ИЛИ зависела от фокусировки лазерного пучка и от режима работы лазера. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и комнатной температуре, а в качестве окружающей среды выступал атмосферный воздух.

На рис. 1 представлена блок-схема установки, которая использовалась при проведении исследований.

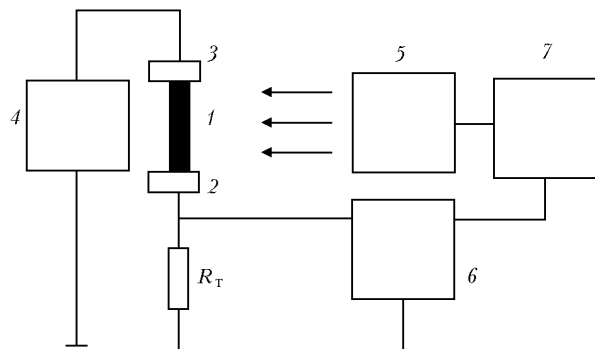


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования электропроводности лазерной плазмы во внешнем электрическом поле

Образец 1, изготавливаемый из керамики 22ХС, устанавливался между электродами внешнего электрического поля 2 и 3, на которые подавалось напряжение от источника питания 4. Изменением напряжения питания и геометрических размеров образца 1 можно изменять напряженность электрического поля, прикладываемого к области действия плазменного факела, в достаточно широких пределах. ИЛИ от источника 5 падало на поверхность исследуемого образца перпендикулярно направлению напряженности электрического поля. Ток плазмы регистрировался запоминающим осциллографом 6 как падение напряжения на прецизионном токовом сопротивлении R_T . Синхронизация работы источника ИЛИ и запоминающего осциллографа осуществлялась с помощью блока синхронизации 7. Следует особо отметить, что во всех экспериментах площадь пучка лазерного излучения существенно превышала площадь исследуемого образца вместе с металлическими электродами.

Электропроводность лазерной плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности керамического образца, характеризовали током плазмы. Величина тока плазмы определялась амплитудным значением тока, протекающего через плазму при данной напряженности электрического поля и данной плотности мощности ИЛИ. Временные характеристики релаксации тока плазмы только частично рассматриваются в данной статье и являются предметом отдельного рассмотрения.

На рис. 2 представлены зависимости амплитуды тока плазмы от плотности мощности ИЛИ для различных значений напряженности электрического поля, прикладываемого к плазме. Как видно из полученных зависимостей, можно выделить три характерные области существования лазерной плазмы с проводящими свойствами. Прежде всего, область $W_p < 8 \cdot 10^7$ Вт/см², в которой плазма с проводящими свойствами не возникает. Далее, можно выделить область $8 \cdot 10^7 < W_p <$

$< 5,1 \cdot 10^8$ Вт/см², в которой ток плазмы зависит от напряженности электрического поля и плотности мощности ИЛИ, и область $W_p > 5,1 \cdot 10^8$ Вт/см², в которой ток плазмы зависит от напряженности, но не зависит от плотности мощности.

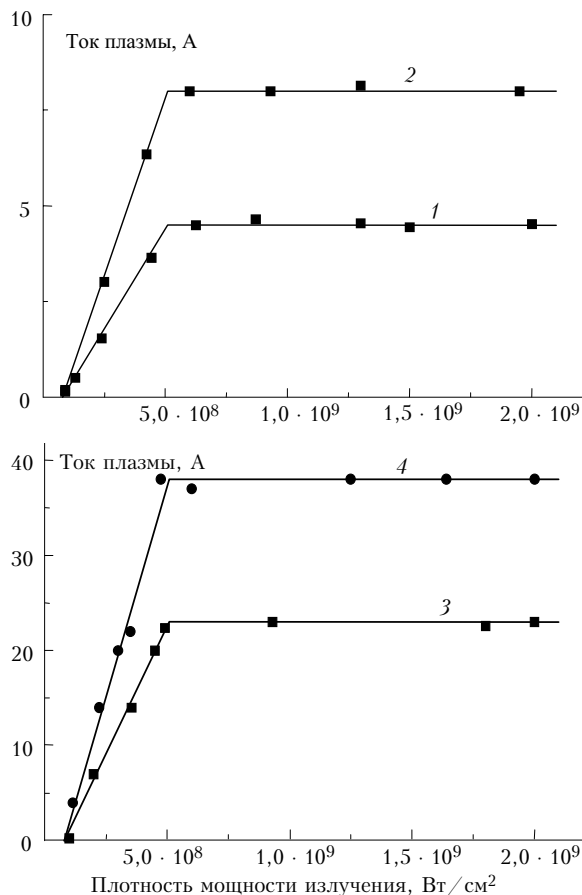


Рис. 2. Зависимости амплитуды тока плазмы от плотности мощности ИЛИ для различных значений напряженности электрического поля: 1 – 26,3, 2 – 52,6, 3 – 158, 4 – 263 В/см

Определенный интерес вызывает исследование зависимости тока плазмы от напряженности электрического поля. На рис. 3 представлены такие зависимости

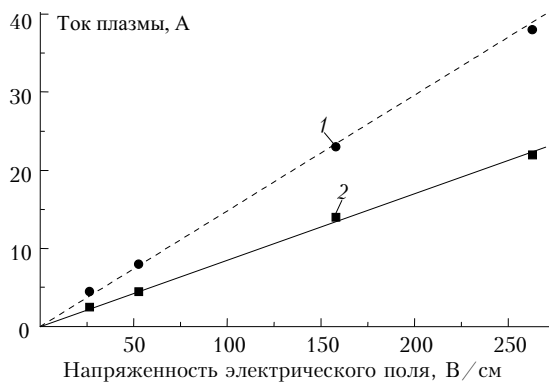


Рис. 3. Зависимость амплитуды тока плазмы от напряженности электрического поля: 1 – $W_p = 1,5 \cdot 10^9$; 2 – $3 \cdot 10^8$ Вт/см²

для различных значений плотности мощности ИЛИ. Как видно из полученных результатов, во всем

исследуемом диапазоне плотностей мощности ИЛИ ток плазмы изменяется прямо пропорционально напряженности электрического поля. Таким образом, лазерную плазму можно представить в виде омического сопротивления, включенного между металлическими электродами параллельно керамическому образцу.

Экспериментальные результаты, представленные в данной статье, и результаты [9] суммированы в таблице для удобства проведения анализа.

Характерные особенности лазерной плазмы

Область	Характеристика тока плазмы	Плотность мощности ИЛИ, Вт/см ²	
		$\tau = 10^{-7}$ с	$\tau = 10^{-3}$ с [9]
I	Плазма с проводящими свойствами не возникает	$< 8 \cdot 10^7$	$< 7 \cdot 10^4$
II	Ток плазмы прямо пропорционален W_p и E^2	Не выявлена	$7 \cdot 10^4 < W_p < 1 \cdot 10^5$
III	Ток плазмы прямо пропорционален W_p и E	$8 \cdot 10^7 < W_p < 5,1 \cdot 10^8$	$> 1 \cdot 10^5$ вплоть до $1 \cdot 10^6$ характер не меняется
IV	Ток плазмы не зависит от W_p и прямо пропорционален E	$> 5,1 \cdot 10^8$	Не выявлена

Рассмотрим более подробно результаты исследования лазерной плазмы при различных длительностях τ ИЛИ. При длительности ИЛИ 10^{-7} с не выявлена область II и, возможно, потому, что эта область расположена вблизи порога образования плазмы с проводящими свойствами и занимает достаточно узкий диапазон плотностей мощности ИЛИ (как для случая длительности ИЛИ 10^{-3} с). Это в некоторой степени подтверждается следующими результатами. Анализ временных характеристик тока плазмы вблизи порога ее образования при различных длительностях ИЛИ показал их идентичность по внешнему виду. Вблизи порога образования плазмы форма импульса тока имеет следующий вид. Прежде всего, наблюдается время задержки формирования тока плазмы, величина которого зависит от длительности импульса ИЛИ и составляет $(2-2,5) \cdot 10^{-6}$ с для длительности ИЛИ 10^{-7} с, а для длительности ИЛИ 10^{-3} с – $(0,5-1) \cdot 10^{-3}$ с. Затем наблюдается появление тока плазмы, поведение которого можно охарактеризовать следующим образом: рост тока плазмы одной полярности, достижение максимума, спад тока до нуля, появление тока плазмы другой полярности, достижение максимума и спад тока до нуля. Наличие тока плазмы различной полярности свидетельствует о том, что за его протекание могут быть ответственны частицы плазмы, имеющие различный по знаку заряд.

Переход в область III (при длительности ИЛИ 10^{-3} с или повышении плотности мощности несколько выше порога для длительности ИЛИ 10^{-7} с) приводит к появлению однополярного тока плазмы, при этом нет первой компоненты тока, которая наблюдается вблизи порога. Идентичное поведение тока плазмы в области II при различных длительностях ИЛИ свидетельствует об идентичности физических процессов формирования проводящей плазмы.

Результаты, представленные, в таблице также показывают, что для ИЛИ длительностью 10^{-3} с не выявлена

область IV. Это, возможно, обусловлено тем, что используемый в работе [9] диапазон плотности мощности недостаточен для достижения данной области. Другой причиной могут быть различные электрофизические свойства плазмы при разной длительности.

Итак, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы. В результате воздействия мощного ИЛИ вблизи поверхности мишени формируется лазерная плазма с проводящими свойствами.

Порог образования такой плазмы зависит от длительности воздействующего импульса. Наложение внешнего электрического поля на область действия плазмы приводит к появлению тока плазмы, но при этом существует время задержки появления тока плазмы по отношению к началу действия импульса излучения, которое можно назвать временем формирования проводящей плазмы. Плазму можно характеризовать электрическим сопротивлением, которое подключается параллельно объекту воздействия ИЛИ.

Вблизи порога образования проводящей плазмы ее ток изменяется прямо пропорционально квадрату напряженности электрического поля, приложенного к области существования плазмы, и плотности мощности ИЛИ (область II, см. таблицу). Данная область характеризуется достаточно узким диапазоном значений плотности мощности ИЛИ и поэтому может быть названа переходной областью. В этой переходной области существования проводящей плазмы наблюдается специфическая форма импульсов тока плазмы, которая свидетельствует об участии в протекании тока частиц плазмы с различным по знаку электрическим зарядом.

Повышение плотности мощности ИЛИ приводит к формированию плазмы, ток которой изменяется прямо пропорционально плотности мощности ИЛИ и напряженности электрического поля (область III). Форма импульсов тока, обнаруживаемая в этой области, свидетельствует об участии в протекании тока частиц плазмы с идентичным электрическим зарядом. Возможно, что исчезновение ранее наблюдаемой компоненты тока плазмы является мнимым. Это может быть следствием того, что длительность импульса тока плазмы одной полярности по сравнению с длительностью импульса тока плазмы другой полярности с ростом плотности мощности ИЛИ и/или напряженности электрического поля существенно отличается.

Дальнейшее повышение плотности мощности ИЛИ приводит к насыщению тока плазмы (область IV),

что может свидетельствовать о формировании плазменного факела с полной ионизацией его компонентов. Можно предположить, что в этом случае повышение плотности мощности ИЛИ приводит только к росту генерации ответного оптического, рентгеновского и/или теплового излучения [4–7], а также к поглощению ИЛИ плазменным факелом [10].

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлены специфические области существования проводящей лазерной плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности керамики ИЛИ различной длительности. Каждая область характеризуется специфической зависимостью как амплитуды тока плазмы, так и временных характеристик тока плазмы от плотности мощности ИЛИ и напряженности электрического поля, прикладываемого к области действия плазменного факела.

В дальнейшем необходимо продолжить исследования временных характеристик тока плазмы при различных длительностях воздействующего ИЛИ, различной напряженности электрического поля и разных оптических характеристиках используемого излучения.

1. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 470 с.
2. Султанов М.А. Об эмиссии заряженных частиц с поверхности твердого тела под действием лазерного излу-

чения и эффект заземления // Докл. АН ТаджССР. 1989. Т. 32. № 4. С. 247–250.

3. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Экспериментальное исследование образования и разлета плазмы при облучении металлов УФ-лазером // Физ. плазмы. 1988. Т.14. № 6. С. 761–764.
4. Kania D.R. Intense X-ray radiation of plasma excited by long pulses of laser radiation // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. № 5. P. 1935–1939.
5. Autric M., Vigliano P., Astic D., Bournet P., Dufresne D. Visible spectroscopy of laser produce plasma // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1988. V. 1020. P. 103–112.
6. Подвязников В.А., Тюрин Е.Л., Чевокин В.К. Электронно-оптическая диагностика ионного излучения лазерной плазмы / Препр. АН СССР. Ин-т общ. физ. 1988. № 110. 30 с.
7. Анучин М.Г., Воленко В.В. Ограничение электронной теплопроводности лазерной плазмы // Квант. электрон. 1989. Т. 16. № 2. С. 311–316.
8. Волков В.П., Скиба П.А., Сечко А.Г. Лазерно-стимулированная десорбция заряженных частиц в слабых электрических полях // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-мат. н. 1992. № 2. С. 65–71.
9. Градобоев А.В. Исследование электропроводности плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности керамики // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 11. С. 13–18.
10. Крапошин В.С. Термическая обработка стали и сплавов с применением лазерного луча и прочих прогрессивных видов нагрева // Итоги науки и техники. Сер. Металловедение и термическая обработка. М., 1987. Т. 21. С. 144–206.

A.V. Gradoboev, A.I. Fedorov. Electrical conductivity of laser plasma.

The paper presents results of investigation of laser plasma conducting characteristics excitable close to the 22ХС ceramic surface by the pulse laser radiation of 1.06 μm wavelength and pulse duration of 10^7 s, at superimposing of external electric fields perpendicular to the laser radiation incidence.

The conducting plasma characteristics can be defined by the plasma current. Depending on the laser radiation density, the existence of typical regions was detected, namely, the region of absence of laser plasma with conducting physical properties; the region of existence of conducting plasma, whose current varies in proportion to the radiation power density and the squared external electric field intensity; the region of existence of conducting plasma, whose current varies in proportion to the radiation power density and the external electric field intensity, and the region of existence of plasma, whose current is independent of the radiation power density and varies in direct proportion to the electric field intensity.