

04:09

Поглощение энергии лазерного излучения фемтосекундной лазерной искрой в воздухе

© А.А. Ильин, С.С. Голик

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного
отделения РАН, Владивосток
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
E-mail: kupashir@gmail.com

Поступило в Редакцию 13 июня 2013 г.

Исследована зависимость доли поглощенной энергии фемтосекундного лазерного излучения при фокусировке в воздухе. Показано, что поглощенная искрой энергия нелинейно возрастает с ростом энергии лазерного импульса. Пороговая мощность для формирования искры равна 5.2 GW.

Плазма воздуха, образованная в результате оптического пробоя мощным лазерным импульсом, давно является объектом пристального исследования [1,2]. При этом оптический пробой воздуха используется в многочисленных приложениях: в лазерной искровой спектроскопии [3], при исследовании режимов движения плазмы [4], в исследованиях воспламенения смесей воздуха и горючих газов [5] и др. Одной из важных характеристик плазмы в вышеуказанных приложениях является поглощение энергии лазерного излучения. Значение данной величины зависит от энергии, длительности лазерного импульса, длины волны лазерного излучения, давления и др. [3,6,7]. Большая часть исследований по данной теме проведена для импульсов микро- и наносекундной длительности. Для фемтосекундной плазмы такие исследования практически не проводились, в настоящее время известно несколько работ,

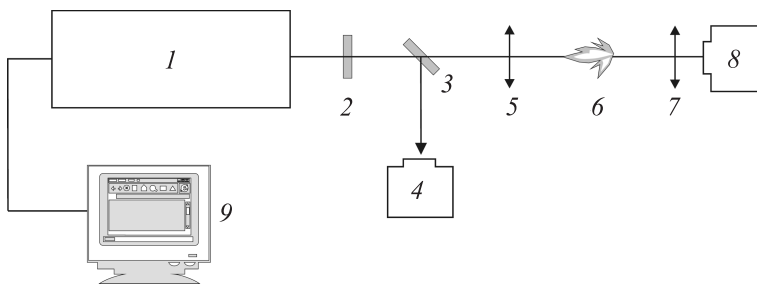


Рис. 1. 1 — Ti:Sa лазерный комплекс; 2 — ослабляющий светофильтр; 3 — делитель пучка; 5, 7 — линзы; 4, 8 — измерители мощности/энергии; 6 — искра; 9 — компьютер.

посвященных поглощению лазерного излучения фемтосекундной плазмой воздуха [8,9]. Например, в работе [8] показано, что при фокусировке критическая мощность для создания лазерной искры $P_{crit} \sim 3 \text{ GW}$, при увеличении мощности лазерного излучения $P > P_{crit}$ в области фокусировки наблюдается множественная филаментация с плотностью электронов $\sim 10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, а доля поглощенной энергии лазерного излучения нелинейно возрастает с ростом энергии лазерного импульса и достигает величины 30%. В то же время в плазме протяженных филаментов (излучение не фокусируется) поглощение излучения нелинейно изменяется с расстоянием и достигает величины 7% [9].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований поглощения плазмой воздуха фемтосекундного лазерного излучения. Схема эксперимента представлена на рис. 1. В эксперименте использовалось лазерное излучение Ti:Sa лазерного комплекса (Spectra-Physics) со следующими параметрами: длина волны $\lambda = 800 \text{ nm}$, ширина спектра излучения по полувысоте 35 nm, длительность импульса после фокусирующей линзы (3) 48 fs, энергия в импульсе 1.1 mJ, частота посылки импульсов 1 kHz, диаметр луча на выходе 7 mm. Излучение лазера (1) попадало на ослабляющий светофильтр (2) NDC-100-2M (Thorlabs) с изменяющейся оптической плотностью и далее на делитель пучка (3) и линзу (5) с фокусным расстоянием 5 cm. Измеритель мощности/энергии (4) (детектор XLP12-1S-H2 и монитор Solo 2 Gentec) служил для измерения энергии. Лазерное излучение, прошедшее через лазерную искру (6), собиралось линзой (7) с фокусным расстоянием 5 cm и направлялось на измеритель мощности/энергии лазерного излу-

чения (8) (детектор XLP12-1S-H2 и монитор Solo 2 Gentec). Управление лазерным комплексом осуществлялось компьютером (9). Длительность лазерного импульса измерялась автокоррелятором PSCOUT PL-SP-LF (SpectraPhysics). Энергия E_{abs} , поглощенная лазерной искрой, рассчитывалась из соотношения $E_{abs} = E_{inc} - E_{trans}$, где значения падающей E_{inc} и прошедшей E_{trans} энергий определялись с помощью измерителей мощности/энергии (4) и (8) соответственно.

Зависимость поглощенной энергии лазерного излучения представлена на рис. 2, *a*. Как видно, зависимость носит нелинейный характер $E_{abs} \propto E_{inc}^K$, где $K = 1.57 \pm 0.16$, отметим, что данная зависимость совпадает с данными работы [8], в которой показатель степени $K = 1.56$. Таким образом, согласно данным работы [8], величина поглощенной энергии пропорциональна числу филаментов, длине области филаментации и диаметру филамента. Критическая энергия, при которой в области фокусировки наблюдается лазерная искра, $E_{crit} = 0.25$ мДж, что при длительности импульса 48 фс соответствует критической мощности $P_{crit} = 5.2$ ГВт. Полученное значение хорошо соотносится с величиной 5.1 ГВт, соответствующей самофокусировке лазерного излучения в воздухе [10].

На рис. 2, *b* показана зависимость поглощения $A = E_{abs}/E_{inc}$ от энергии импульса. Поглощение нелинейно возрастает по закону $A \propto E_{inc}^K$, где $K = 0.6 \pm 0.16$. Известно [11], что для данных экспериментальных условий коэффициент нелинейного поглощения определяется процессами фотоионизации и образования свободных электронов. В работе [12] исследовалась зависимость концентрации электронов в плазме от фокусного расстояния линзы f и мощности фемтосекундного лазерного излучения. При $P \gg P_{crit}$ резкий рост концентрации электронов сменяется на плавный. Если для $f = 10$ см максимальная плотность электронов $\sim 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³, то для несфокусированного излучения плотность электронов $\sim 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Таким образом, плавное нарастание поглощения, скорее всего, обусловлено насыщением роста концентрации электронов при увеличении мощности лазерного излучения.

Если для наносекундных импульсов ИК диапазона лазерная плазма наблюдается при значениях поглощения $A > 20\%$ [4,7], то для фемтосекундных импульсов это значение значительно ниже $A > 8\%$ (рис. 2, *b*). Отметим, что при фокусировке фемтосекундного излучения величина поглощения возрастает, так, в данной работе для $E_{inc} = 1.1$ мДж $A = 19\%$,

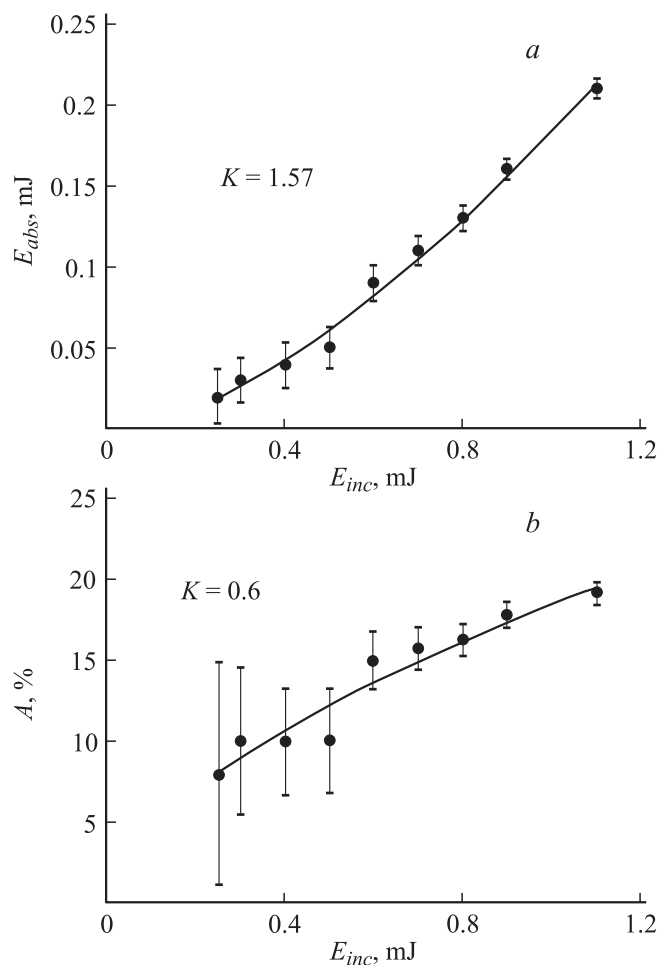


Рис. 2. Зависимость поглощенной энергии E_{abs} (а) и поглощения искры A (б) от энергии лазерного излучения E_{inc} .

в [8] для $E_{inc} = 6.4$ мДж $A = 31\%$, а в работе [9], в которой излучение не фокусировалось, для $E_{inc} = 8.1$ мДж $A = 7\%$. Рост величины поглощения при фокусировке лазерного излучения связан с ростом концентрации электронов [11], что в свою очередь ведет к увеличению поглощения A .

Таким образом, при фокусировке лазерного излучения увеличивается величина поглощения, для энергий лазерного излучения, используемых в фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии, $E_{inc} \gtrsim 1.1 \text{ mJ}$ [13] поглощение $A > 20\%$, данное значение ниже поглощения, наблюдаемого в лазерной искровой спектроскопии с использованием наносекундных лазерных импульсов, где, как правило, $A \sim 90\%$ [14]. Фокусировка лазерного излучения и соответствующий рост электронной плотности могут быть использованы в фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии для увеличения интенсивности спектральных линий и уменьшения предела обнаружения элементов [15].

Работа выполнена при поддержке программы „Научный фонд“ ДВФУ (проект 12-02-13007-м-15/13), Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.А18.21.1286) и РФФИ (№ 12-02-31714-мол_а).

Список литературы

- [1] Bindhu C.V., Harilal S.S., Tillack M.S., Najmabadi F., Gaeris A.C. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 7402.
- [2] Ильин А.А., Букин О.А., Буланов А.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 6. С. 20.
- [3] El-Rabii H., Victorov S.B., Yalin A.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 075203.
- [4] Ilyin A.A., Nagorny I.G., Bukin O.A. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 171501.
- [5] Phuoc X.T. // Opt. Laser Eng. 2006. V. 44. P. 351.
- [6] Phuoc T.X., White C.M. // Opt. Commun. 2000. V. 181. P. 353.
- [7] Chen Y.-L., Lweis J.W.L., Parigger C. // J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer. 2000. V. 67. P. 91.
- [8] Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Селезнев Л.В., Синицын Д.В. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. С. 467.
- [9] Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P. // Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 304.
- [10] Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 9. С. 745.
- [11] Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 749.
- [12] Theberge F., Liu W., Simard P.Tr., Becker A., Chin S.L. // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. N 3. P. 036406.

- [13] Голик С.С., Букин О.А., Ильин А.А., Соколова Е.Б., Колесников А.В., Бабий М.Ю., Кульчин Ю.Н., Гальченко А.А. // Журн. прикл. спектр. 2012. Т. 79. С. 485.
- [14] Ильин А.А., Букин О.А., Буланов А.В., Нагорный И.Г., Голик С.С., Бауло Е.Н.// Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 705.
- [15] Голик С.С., Ильин А.А., Колесников А.В., Бабий М.Ю., Кульчин Ю.Н., Букин О.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 15. С. 72.