

## **Фемтосекундная лазерная микроплазма многokrратно ионизованных газов**

В. В. Букин, С. В. Гарнов  
*отдел колебаний ИОФ РАН*

А. А. Малютин  
*отдел взаимодействия когерентного излучения с веществом ИОФ РАН*

В. В. Стрелков  
*теоретический отдел ИОФ РАН*

Исследование лазерной плазмы, возникающей в газах при их ионизации высокоинтенсивными фемтосекундными импульсами, является одним из принципиально важных направлений в физике взаимодействия лазерного излучения с веществом. Данная проблема актуальна как с точки зрения фундаментальной науки – получения новых экспериментальных данных о свойствах и механизмах формирования крайне неравновесной, пространственно неоднородной плазмы высокой плотности, так и в связи с многочисленными прикладными задачами – разработкой методов генерации предельно коротких, аттосекундных световых импульсов, созданием лазерных источников коротковолнового излучения, совершенствованием прецизионных лазерных технологий.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований динамики формирования и развития лазерной плазмы, возникающей в микрообъемах газов (воздух, азот, аргон, гелий; при давлении  $1 \div 10$  атм.) при их многократной (*вплоть до ядер*) ионизации высокоинтенсивными ( $I = 10^{14} \div 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>), остросфокусированными (в область диаметром до 1.5 мкм) фемтосекундными импульсами излучения титан-сапфирового лазера длительностью  $35 \div 150$  фс.

Для проведения исследований разработан метод прецизионной ( $\lambda/2\pi > 10^3$ ) сверхскоростной (<100 фс) интерферометрической диагностики пространственно-временной динамики лазерной плазмы микронных размеров.

Впервые с микронным пространственным разрешением проведены измерения "мгновенного" пространственного распределения профиля показателя преломления и электронной концентрации фемтосекундной лазерной микроплазмы докритической плотности в газах *во время действия* возбуждающего *фемтосекундного* лазерного импульса.

Впервые экспериментально зарегистрирован процесс постиионизации фемтосекундной лазерной плазмы – нарастания ее электронной плотности *после* окончания действия возбуждающего лазерного импульса. Предложена теоретическая модель, описывающая процессы *постиионизации* плазмы горячими фотоэлектронами способными приобретать значительную (до сотен эВ) энергию в поле фемтосекундного лазерного импульса. Результаты расчетов динамики электронной плотности находятся в полном согласии с экспериментальными данными.

Впервые методом прецизионной микроинтерферометрии измерено радиальное распределение электронной плотности в плазменном канале, возникающим при филаментации фемтосекундного лазерного импульса.

Предложен и экспериментально реализован новый электронно-оптической метод сверхскоростной спектрально-временной регистрации плазмы и нелинейно-оптической трансформации лазерного излучения, позволивший впервые с пикосекундным временным разрешением исследовать динамику формирования и развития спектрального континуума и спектральных линий фемтосекундной лазерной плазмы газов и впервые зарегистрировать процесс генерации второй (*четной*) гармоники фемтосекундных лазерных импульсов в плазме докритической плотности.

Результаты работы представлены в пяти основных публикациях и в шестнадцати приглашенных докладах на международных конференциях.

#### **Список литературы.**

##### **Статьи:**

1. В.В. Букин, Н.С. Воробьев, С.В. Гарнов, В.И. Конов, В.И. Лозовой, А.А. Малютин, М.Я. Щелев, И.С. Яцковский, "*Динамика формирования и развития фемтосекундной лазерной микроплазмы в газах*", Квант. электроника, т. 36, № 7, с. 638–645, 2006.
2. В.В. Букин, С.В. Гарнов, А.А. Малютин, В.В. Стрелков, "*Фемтосекундная лазерная микроплазма оптического пробоя газов: динамика процессов ионизации и постиионизации*", Квантовая Электроника, т.37, № 10, с.961-966, 2007.
3. Sergey V. Garnov, Vladimir V. Bukin, Vasily V. Strelkov, and Alexander A. Malyutin, "*Femtosecond laser breakdown of gases and transparent solid states: ultrafast space-time and spectrum-time resolved diagnostics of multicharged microplasma*", in Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2008, edited by Gregory J. Exarhos et.al., Proc. SPIE, Vol. 7132, 71320P, 2008.
4. V.V. Bukin, S.V. Garnov, V.V. Strelkov, T.V. Shirokikh, D. K. Sychev, "*Spatio-temporal dynamics of electron density in femtosecond laser microplasma of gases*", Laser Physics, Vol. 19, No.6, pp. 1300-1302, 25 June, 2009.
5. S.V. Garnov, V.V. Bukin, A. A. Malyutin, V.V. Strelkov, "*Ultrafast Space-time and Spectrum-time Resolved Diagnostics of Multicharged Femtosecond Laser Microplasma*", 2nd International Symposium " Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science,

### Приглашенные доклады:

1. С.В. Гарнов, В.В. Букин, А.А. Малютин, В.В. Стрелков, "Методы пространственно-временной и спектрально-временной диагностики фемтосекундной лазерной плазмы", Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, **Приглашенный доклад**, РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, 15-17 мая, 2007.
2. S.V. Garnov, V.V. Bukin, A.A. Malyutin, V.V. Strelkov, "High precision ultrafast optical diagnostics of pico-femtosecond laser microplasma", International conference "Fundamentals of Laser Assisted Micro-Nanotechnologies", **Invited talk**, Book of abstracts, p.7, St. Petersburg-Pushkin, Russia, June 25-28, 2007.
3. S.V. Garnov, V.V. Bukin, A.A. Malyutin, V.V. Strelkov, "Femtosecond laser microplasma: experimental methods of space-time-resolved diagnostics", International Conference "Advanced Laser Technologies 2007", ALT'07, **Invited talk**, Book of abstracts, p.107, Levi, Finland, September 3-7, 2007.
4. С.В. Гарнов, В.В. Букин, А.А. Малютин, В.В. Стрелков, "Фемтосекундная лазерная микроплазма многократно ионизованных газов", Пятый Международный научный семинар "Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах", **Приглашенный доклад**, Москва, Россия, 29 января – 2 февраля, 2008.
5. С.В. Гарнов, "Экспериментальные методы в физике фемтосекундной лазерной плазмы", XIV Научная школа "Нелинейные волны -2008", Всероссийская конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики", **Приглашенный доклад**, Аннотации лекций, стр. 16, г. Нижний Новгород, Россия, 1-7 марта, 2008.
6. С.В. Гарнов, В.В. Букин, А.А. Малютин, В.В. Стрелков, "Фемтосекундная лазерная микроплазма: методы пространственно-временной и спектрально-временной диагностики", 10-е Харитоновские тематические научные чтения: "Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии", **Приглашенный доклад**, РФЯЦ- ВНИИЭФ, г. Саров, Россия, 11 - 14 марта 2008г.
7. С.В. Гарнов, "Фемтосекундная лазерная плазма многократно ионизованных газов", Научная сессия Отделения Физических Наук РАН, **Приглашенный доклад**, г. Москва, Россия, 21 апреля 2008г.
8. S.V.Garnov, V.V.Bukin, V.V.Strelkov, "Multicharge femtosecond microplasma: Ultrafast dynamics of formation and evolution", 6th workshop Complex systems of charged particles and their interaction with electromagnetic radiation, **Invited talk**, Moscow, Russia, April 9-10, 2008.
9. С.В. Гарнов, "Генерация мощного терагерцового излучения пико-фемтосекундными лазерными импульсами", 2-ая Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям, **Приглашенный доклад**, г. Саров, Россия, 22-25 апреля 2008г.
10. S.V. Garnov, "Ultrafast spectroscopy and interferometry of multicharged picosecond and femtosecond laser microplasma", Chinese-Russian joint Seminar "High energy density physics research", **Invited talk**, Mianyang, China, May 14, 2008.
11. S.V. Garnov, V.V. Bukin, "Ultrafast space-time and spectrum-time resolved diagnostics of multicharged femtosecond laser microplasma", 2nd International Symposium on Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Industry and Medicine, **Invited talk**, Kansai Photon Science Institute, JAEA, Kizugawa, Kyoto, Japan, January 19 to 23, 2009.
12. V.V. Bukin, S.V. Garnov, T. V. Shirokih, V.V. Strelkov, "Femtosecond laser microplasma: an influence of the initial gas pressure on ionization dynamics", 7-TH WORKSHOP |Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation, **Invited talk**,
13. S.V. Garnov, V.V. Bukin, A.I. Ritus, A.A. Sirotkin, T.V. Shirokikh, A.G. Stepanov, "High-intensity THz sources: fundamentals and applications", Russian-French-German Laser Symposium 2009, **Invited talk**, Nizhny Novgorod, Russia, 17-22 May, 2009.
14. S.V. Garnov, V.V. Bukin, A.I. Ritus, A.A. Sirotkin, T.V. Shirokikh, A.G. Stepanov, "Ultrashort high-intensity terahertz pulses: methods of generation and characterization", Sixth International Seminar "Mathematical models and modeling in laser-plasma processes", **Plenary presentation**, Budva, Montenegro May 31 -June 6, 2009.
15. S.V. Garnov, V.V. Bukin, A.I. Ritus, A.A. Sirotkin, T.V. Shirokih, A.G. Stepanov, "High-intensity terahertz pulses: methods of generation and prospective applications", International Symposium

Topical Problems of Biophotonics - 2009, **Keynote presentation**, Nizhny Novgorod-Samara- Nizhny Novgorod, Russia, 19-24 July, 2009

16. С.В. Гарнов, В.В. Букин, А.И. Ритус, И.А. Щербаков, А.Г. Степанов,  
"Высокоинтенсивные ТГц источники излучения: фундаментальные аспекты и применения",  
Международный форум по нанотехнологиям, **Приглашенный доклад**, Москва, Россия, 6-8  
октября, 2009.