



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель декана

ФГУ им. М.В.Ломоносова

Профессор А.А.Федянин

2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова"

Диссертация "Новые методы усиления и генерации электромагнитного излучения в плазменных каналах, созданных в газах мощными ультракороткими лазерными импульсами и электронными пучками" выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова. В период подготовки диссертации соискатель Богацкая Анна Викторовна являлась аспиранткой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", физический факультет. В 2015 году закончила физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова по специальности "физика". Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", физический факультет. Научный руководитель Попов Александр Михайлович, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", физический факультет, должность профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Богацкой А.В. посвящена теоретическому исследованию процессов формирования и эволюции сильно неравновесных плазменных каналов, созданных в различных газах излучением фемтосекундных лазерных импульсов ультрафиолетового диапазона частот, а также изучению возможности использования таких каналов для усиления и генерации излучения электромагнитного излучения различных частотных диапазонов, а также транспортировки в таких каналах излучения терагерцового (субтерагерцового) диапазона частот в режиме плазменного волновода.

Актуальность и новизна проведенных исследований обусловлена востребованностью источников излучения различных частотных диапазонов для изучения широкого круга физико-химических процессов а также возможностью управления такими процессами.

Использование терагерцового (субтерагерцового) излучения чрезвычайно перспективно в таких науках, как метеорология, медицина, биология, материаловедение, системы безопасности для целей мониторинга молекулярного состава окружающей среды и концентрации тяжелых органических молекул, обнаружения взрывчатых веществ, неразрушающего контроля изделий. Что касается более высокочастотной области спектра, то излучение таких диапазонов частот позволяет осуществлять контроль и управление процессами, происходящими в атомах и молекулах в газовых и конденсированных средах, и на их поверхности, в масштабах времен порядка атомных.

Оценка выполненной соискателем работы

Предлагаемые в данной работе принципиально новые способы создания инверсной населенности сред, представляют общефизический интерес и в дальнейшем могут привести к созданию нового типа усилителей и лазерных источников излучения, основанных на альтернативных схемах накачки среды и последующей генерации или усилении излучения. Обнаружение новых свойств плазмы, характеризующейся сильной неравновесностью энергетического спектра электронов, помимо различных практических применений, представляет интерес с фундаментальной точки зрения.

Основные новые результаты диссертационной работы:

1. Показано, что явление интерференционной стабилизации ридберговских атомов в поле высокоинтенсивного лазерного импульса ведет к возникновению инверсии между различными возбужденными состояниями, а также между группой возбужденных и основным состоянием атома, что может быть использовано для усиления и генерации электромагнитного излучения различных частотных диапазонов.
2. Предложено использовать плазму, созданную в результате многофотонной ионизации мощным фемтосекундным лазерным импульсом, как среду с инверсной населенностью энергетического спектра в континууме и, как следствие, способную усиливать низкочастотное излучение терагерцового и субтерагерцового диапазона в газах, характеризующихся минимумом Рамзауэра, или интервалом энергий с возрастающим транспортным сечением рассеяния.
3. Предсказан эффект существования плазмы как оптически более плотной среды по сравнению с неионизованным газом на временах релаксации сильно неравновесной ФРЭЭ, содержащей интервалы энергий с инверсной населенностью спектра, в газах имеющих минимум Рамзауэра, или интервал энергий с возрастающим транспортным сечением рассеяния. Такой канал может рассматриваться в качестве плазменного волновода для транспортировки и усиления излучения субтерагерцового диапазона частот.
4. На основе численного решения уравнения Больцмана и волнового уравнения для распространения излучения в плазме исследован процесс распространения терагерцового (субтерагерцового) импульса в плазме, созданной мощным фемтосекундным лазерным импульсом, в режиме плазменного волновода.

5. Предсказан эффект усиления радиочастотного излучения в плазме смеси инертного и электроотрицательного газов, поддерживаемой высокоэнергетичным пучком электронов.

Содержание диссертации полностью отражено в 32 публикациях, в том числе в 17 статьях в международных, в том числе высокорейтинговых, и российских научных журналах, а также в 15 тезисах докладов на международных конференциях.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. Богацкая А.В., Попов А.М. О возможности усиления электромагнитного излучения субтерагерцового диапазона частот в плазменном канале, созданным ультракоротким высокоинтенсивным лазерным импульсом. *Письма в ЖЭТФ*, **97**, № 7, 453 - 457 (2013)
2. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М. Плазменный канал, создаваемый импульсом фемтосекундного лазера, как среда для усиления электромагнитного излучения субтерагерцового диапазона частот, *Квантовая электроника*, **43**, № 12, 1110-1117 (2013)
3. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Propagation and Amplification of a Short Subterahertz Pulse in a Plasma Channel in Air Created by Intense Laser Radiation In Proceedings of 2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, pages 199-204 (2014) DOI: 10.5220/0004723501990204
4. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Popov A.M. Amplification of the microwave radiation in plasma channel created by the ultrashort high-intensity laser pulse in noble gases. *J. Russian Laser Res.*, **35**, №5, 437-446 (2014)
5. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. On the possibility of a short subterahertz pulse amplification in a plasma channel created in air by intense laser radiation *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 185202 (8pp) (2014)
6. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М. Численное моделирование процесса усиления в плазменном канале, созданном в газе при его многофотонной ионизации фемтосекундным лазерным импульсом, *Квантовая электроника*, **44**, №12, 1091-1098 (2014)
7. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Volkova E.A., and Popov A.M. Guiding and amplification of microwave radiation in a plasma channel created in gas by intense UV laser pulse, *Laser and Particle Beams*, v. **33**, № 1, с. 17-25 (2015)
8. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M., Nonequilibrium plasma channel in gaseous media formed by powerful UV laser as a waveguide for transportation and amplification of short microwave pulses *Laser Phys. Lett.*, **12**, № 3, с.035301 (2015)
9. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Interference stabilization and UV lasing in a plasma channel formed in gas by intense RF field *Laser Phys. Lett.*, **12**, 045303 (2015)
10. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Specific Electrodynamics Features of a Plasma Channel Created in Gas by Powerful Femtosecond UV Laser Pulse Application to the Problem of Guiding and Amplification of Microwave Radiation In Proceedings of 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, pages 149-156 (2015)

11. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Smetanin I.V., Volkova E.A. Propagation and amplification of short radio-frequency pulses in a plasma channel created in gaseous media by the intense laser radiation *Journal of Physics: Conference Series*, v. **594**, с. 012017-1-6 (2015)
12. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Amplification and lasing in a plasma channel formed in gases by an intense femtosecond laser pulse in the regime of interference stabilization // *Laser Physics.*, V. **26**, no. 1., P. 015301 (2016).
13. Bogatskaya A.V., Popov A.M. E-beam sustained plasma as a medium for amplification of electromagnetic radiation in subterahertz frequency band *Journal of Physics D - Applied Physics.*, **49**, 025203 (2016)
14. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М., Сметанин И.В. Распространение и усиление микроволнового излучения в плазменном канале, создаваемом в газах мощным фемтосекундным УФ лазерным импульсом *Физика плазмы*, Т. **42**, № 2, С.10-29 (2016)
15. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Electron beam sustained plasma as a medium for amplification of electromagnetic radiation in subterahertz frequency band Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. — ISBN: 978-989-758-174-8. P. 281-288 (2016)
16. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Interference stabilization and possibility of amplification and lasing in plasma channel formed in gas by intense femtosecond laser field Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. — ISBN: 978-989-758-174-8. P. 289–296 (2016).
17. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. Propagation of a short subterahertz pulse in a plasma channel in air created by intense UV femtosecond laser pulse *Photoptics 2014: Proceedings of the 2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology.* — Vol. 177 of *Springer Proceedings Phys.* p.145-157 — Springer International Publishing Switzerland, Springer (2016)

Тезисы материалов конференций:

1. Богацкая А.В. О возможности усиления электромагнитного излучения в плазменном канале, созданным высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным импульсом XX международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», секция физика, с.26-28 Москва, (2013)
2. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. The amplification of electromagnetic radiation in the subterahertz frequency range in plasma channel created by high-intensity femtosecond laser pulse 4th Int. conf. on Attosecond Physics (АТТО'2013), p.41, Париж, Франция, (2013)
3. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. Amplification of electromagnetic radiation in subterahertz frequency band in plasma channel created by high-intensity ultrashort laser pulse *Frontiers of Nonlinear Physics (FNP-13)*, с.107-108, Нижний Новгород, Россия, (2013)
4. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Smetanin I.V., Volkova E.A. Propagation and Amplification of the Short Radio-Frequency Pulses in a Plasma Channel Created in Gaseous Media by the Intense Laser Radiation XXIII Laser Physics Workshop, София, Болгария, (2014) report 2.3.4

5. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Analytical modeling of evolution of a plasma channel created in rare gases by femtosecond UV laser pulse 33rd European Conference on Laser Interaction with Matter, Париж, Франция, 31.08-5.09, p.114 (2014)
6. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and amplification of a microwave radiation in a plasma channel created in gas in intense UV laser pulse 33rd - European Conference on Laser Interaction with Matter, Париж, Франция, 31.08-5.09, p. 153 (2014)
7. Богацкая А.В. Распространение и усиление микроволнового излучения в плазменном канале, созданном в газовых средах мощным ультракоротким лазерным импульсом XV Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики", Москва, ФИАН, 16-20 ноября 2014, стр.21
8. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Analytical modeling of evolution of a plasma channel created in rare gases by femtosecond UV laser pulse XIII Int. Conf. on Multiphoton Processes (ICOMP), Шанхай, Китай, 7-10.12.08, p. 70 (2014)
9. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and amplification of a radio-frequency radiation in a plasma channel created in gas by intense femtosecond laser pulse. XIII Int. Conf. on Multiphoton Processes (ICOMP), Shanghai, China, 7-10.12.08, p.54 (2014)
10. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and Amplification of Subterahertz Radiation in a Plasma Channel Formed in Gases by the Intense Ultrashort UV Laser Pulse XXIV Laser Physics Workshop, Шанхай, Китай, 20-25.08.2015, report S2.8.1
11. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Interference Stabilization, Middle IR and UV Lasing in a Plasma Channel Formed in Gas by Femtosecond Laser Field XXIV Laser Physics Workshop, Шанхай, Китай, 20-25.08.2015, report S2.8.2
12. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. Specific Electrodynamic Features of a Plasma Channel Created in Gas by Powerful Femtosecond UV Laser Pulse Application to the Problem of Guiding and Amplification of Microwave Radiation 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Tecnology (PHOTOPTICS-2015), Берлин, Германия, 11-14 марта 2015
13. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and amplification of radio-frequency radiation in a plasma channel created in gases by the intense femtosecond UV laser pulse XI Super Intense Laser Atomic Physics (SILAP) , Бордо, Франция, 7-10 сентября 2015, p.108
14. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Interference stabilization, middle IR and UV lasing in a plasma channel formed in gas by high intensity laser field XI Super Intense Laser Atomic Physics (SILAP), Бордо, Франция, 7-10 сентября 2015, p.91
15. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М. О возможности генерации излучения в диапазоне частот от среднего ИК до вакуумного ультрафиолета в плазменных каналах, созданных в газах мощным фемтосекундным лазерным импульсом // VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, Россия, с.23, 15-20 ноября 2015

Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что они были получены в рамках фундаментальных физических теорий, методом прямого численного интегрирования уравнения Шредингера для атома в сильном лазерном поле, и

кинетического уравнения Больцмана совместно с волновым уравнением для динамики плазменного образования, созданного мощным ультракоротким лазерным импульсом, а также совпадением численных результатов с полученными автором и известными аналитическими решениями. Это позволяет считать все полученные результаты полностью обоснованными и достоверными.

Личный вклад

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим на этапах постановки задач, разработки физических моделей исследуемых явлений, построении аналитических решений исследуемых уравнений, а также при разработке ряда алгоритмов численного решения исследуемых уравнений, осмыслении полученных результатов, в том числе полученных в расчетах на суперкомпьютерном комплексе МГУ. Все изложенные в диссертационной работе теоретические результаты получены лично автором.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы Богацкой А.В. докладывались автором и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ, ОКРФ ФИАН, семинаре по физике многофотонных процессов ИОФАН (рук. проф. М.В.Федоров), Макс-Борн-Института (Берлин, Германия) и Университета Йены (Германия). Основные положения и результаты были представлены лично соискателем на 15 международных конференциях и симпозиумах, а именно:

- 1) XX Международная научная конференция аспирантов и студентов, Ломоносов-2013
- 2) 4th Int. conf. on Attosecond Physics (ATTO'2013), Paris, France 8-12.07.2013
- 3) 2rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS-2014), Лиссабон, Португалия, 7-9.01.2014
- 4) XXIII Laser Physics Workshop, Sofia, Bulgaria 14-18.07.2014
- 5) 33rd European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM), Paris, France, 31.08-05.09.2014
- 6) XV Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики", Москва, ФИАН, 16-20 ноября 2014
- 7) XIII Int. Conf. on Multiphoton Processes (ICOMP), Shanghai, China, 7-10.12.08, (2014)
- 8) 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS-2015), Берлин, Германия, 12-14.03.2015
- 9) Workshop "Novel Light Sources from Laser-Plasma Interaction", Dresden, Germany 20-24.04.2015
- 10) XXIV Laser Physics Workshop, Шанхай, Китай, 20-25.08.2015
- 11) XI Super Intense Laser Atomic Physics (SILAP), Bordeaux, Франция, 7-10 сентября 2015
- 12) VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, Россия, 15-20 ноября 2015
- 13) International Workshop on "ATOMIC PHYSICS" Dresden, Germany 23-27.11.2015
- 14) 4rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS-016), Рим, Италия, 27.02-01.03.2016
- 15) EMN Meeting on Terahertz, San-Sebastian, Spain, 14-18.05.2016

Практическая значимость. Полученные результаты представляют большой научный интерес с фундаментальной точки зрения, обнаруживая качественно новые характеристики сильнонеравновесной плазмы, созданной в процессе фотоионизации мощным фемтосекундным лазерным импульсом. Ценность научной работы связана с перспективами получения генерации излучения в плазме в различных частотных диапазонах начиная от среднего и дальнего ИК и заканчивая ВУФ, а также усиления субтерагерцовых и терагерцовых сигналов. Большой практический интерес вызывает также возможность получения генерации когерентного излучения из лазерной плазмы в режиме интерференционной стабилизации в широком диапазоне частот.

Диссертация "Новые методы усиления и генерации электромагнитного излучения в плазменных каналах, созданных в газах мощными ультракороткими лазерными импульсами и электронными пучками" Богацкой Анны Викторовны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы.

Заключение принято на заседании кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Присутствовало на заседании 12 чел. Результаты голосования: "за" - 12 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел. протокол №4-16 от "21" апреля 2016 г.

Заведующий кафедрой атомной физики,
физики плазмы и микроэлектроники,
профессор



А.Т.Рахимов

Ученый секретарь кафедры атомной физики,
физики плазмы и микроэлектроники,
доцент



Е.А.Крылова

Заключение рассмотрено и утверждено на заседании Ученого совета НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына и Отделения ядерной физики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Протокол № 6 от "19" мая 2016 г.

Председатель Ученого Совета НИИЯФ и ОЯФ
физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова,
профессор



М.И.Панасюк

Ученый секретарь НИИЯФ и ОЯФ
физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова,
профессор



С.И.Страхова