

Система регистрации оптических и рентгеновских спектров и объектов излучения, генерируемого в плазменных каналах оптического пробоя в бесселевых пучках

Ю. А. Железнов, В. Ю. Хомич

Разработана четырехканальная схема эксперимента по регистрации оптических и рентгеновских спектров и изображений излучения, генерируемого в плазменных каналах оптического пробоя в бесселевых пучках, получаемых при фокусировке электромагнитного излучения коноидными системами фокусировки типа аксикон.

Ключевые слова: бесселевы пучки, аксикон, рентгеновское и оптическое излучение, регистрация спектров и изображений, плазменный канал.

Ссылка: Железнов Ю. А., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 23.

Reference: Yu. A. Zheleznov and V. Yu. Khomich, Applied Physics, No. 6, 23 (2020) [in Russian].

Введение

Протяженные трубчатые лазерные искры, или плазменные каналы, образуются при оптическом пробое газа или жидкости в трубчатом бесселевом пучке света, у которого радиальное распределение амплитуды поля описывается функцией Бесселя высокого порядка, а продольное распределение практически не меняется вдоль всей длины распространения [1–3].

Для создания трубчатых протяженных лазерных искр греющее лазерное излучение фокусируется оригинальным устройством – формирователем трубчатого бесселевого пучка, называемым «аксикон».

Замена сферической оптики коноидными системами фокусировки типа аксикона позволяет преодолеть влияние дифракционной расходимости на степень концентрации электро-

магнитного излучения и получить пучки с радиальным распределением поля в виде Функции Бесселя, J_n , бесселевы пучки. Их особенностью является сохранение диаметра порядка дифракционного размера и соответственно, высокой концентрации излучения на принципиально неограниченной длине [4]. Высокая интенсивность излучения и коническая поверхность волнового фронта обеспечивают оптический пробой в пучке в режиме бегущего фокуса [3] и формирование плазменных каналов протяженностью в сотни длин Рэлея [5]. Каналы создавались в газах, жидкостях и твердотельных пленках. Для лазерного излучения $\lambda = 1$ мкм их диаметр достигал 3–5 мкм, длина – 1,5 м.

Уникальные свойства плазменных каналов бесселевых пучков открывают возможность их применений для новых технологий. Одно из них связано с генерацией активной среды плазменного лазера в диапазоне вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена [6]. Эту технологию отличает от других ряд важных преимуществ. Боковой подвод энергии к объему активной среды способствует ее однородности на большом протяжении канала. Большая длина канала и создание инверсной населенности в режиме бегущего фокуса обеспечивают большое суммарное усиление коротковолнового излучения при пониженных требованиях к коэффициенту усиления.

Железнов Юрий Анатольевич, врио директора, к.т.н.
Хомич Владислав Юрьевич, научный руководитель, д.ф.-м.н., академик РАН.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук (ИЭЭ РАН).
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.
E-mail: director@ieeras.ru

Статья поступила в редакцию 09 ноября 2020 г.

© Железнов Ю. А., Хомич В. Ю., 2020

Профиль электронной плотности в канале превращает его в световод для коротковолнового излучения, увеличивая добротность системы. Высокая эффективность преобразования греющего излучения в коротковолновое, обусловленная точным совмещением конфигураций объемов энергоклада и оптически активной среды, позволяет резко снизить требования к энергетике греющего излучения и сократить размеры рентгеновского лазера до настольного варианта [7].

В связи с этим большое значение имеет исследование свойств таких плазменных каналов с использованием различных методов и техники, в частности исследование оптических и рентгеновских спектров излучения, генерируемого в этих каналах [8–11]. Исследование оптических спектров позволяет определить параметры плазмы, например, концентрацию и температуру электронов, кратность заряда ионов наполняющего камеру газа. Исследование рентгеновских спектров также позволит, в частности, определить наличие или отсутствие лазерной генерации.

Четырехканальная схема регистрации

Для исследования физических процессов, происходящих в плазменных каналах беселевых пучков, создаваемых с помощью фокусировки аксионом лазерного излучения, генерируемого высокомоушным импульсным лазером, нами предложена четырехканальная схема регистрации спектров и изображений оптического и рентгеновского излучения.

Схема имеет два канала регистрации в оптическом диапазоне от 180 до 1100 нм. Первый канал предназначен для регистрации спектра в данном оптическом диапазоне. Этот канал представляет собой спектрометрическую систему, состоящую из спектрографа и спектроскопической ПЗС-камеры, сигнал от которой поступает и обрабатывается на компьютере. Второй, независимый от первого, канал предназначен для регистрации изображений плазменного канала, образующегося при оптическом пробое в трубчатом беселевом пучке света. Этот второй канал представляет собой отображающую ПЗС-камеру сигнал от которой поступает и обрабатывается на компьютере. Вместо ПЗС-камер возможно ис-

пользовать фотоприемные приборы на основе КМОП-структур, которые могут обладать преимуществами по сравнению с ПЗС-камерами при определенных диапазонах значений параметров плазмы.

Аналогичные два канала регистрации предлагаются нами и в рентгеновском диапазоне от 0,1 до 100 нм. Эти два канала расположены в плоскости перпендикулярной плоскости расположения оптических каналов.

Описанный выше предложенный нами принцип построения системы регистрации спектров и изображений излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах имеет целый ряд преимуществ по сравнению с известными схемами экспериментов по изучению плазменных каналов.

Во-первых, предложенная схема дает возможность исследовать плазменные каналы в очень широком спектральном диапазоне.

Во-вторых, данная схема дает возможность одновременной регистрации спектров, генерируемых из различных участков создаваемых плазменных каналов.

В-третьих, что наиболее важно, предложенная нами схема позволяет при компьютерной синхронизации и обработке сигналов получать полную совмещенную пространственно-временную картину генерации из плазменного канала.

В свою очередь знание пространственно-временных характеристик генерации плазменного канала позволит произвести оценку и рассчитать основные параметры плазмы: амплитуду разрядного тока, концентрацию электронов, температуру канала разряда, характерные времена пульсации и другие параметры.

Схема эксперимента по регистрации оптических спектров и изображений излучения

Разработанная схема эксперимента по регистрации оптических спектров и изображений излучения в диапазоне длин волн 180–1100 нм, генерируемого в плазменных каналах оптического пробоя в беселевых пучках, представлена на рис. 1. Лазер на Nd:стекле генерирует одиночные импульсы на длине волны 1,06 мкм, длительность импульса около

5 нсек, энергия импульса около 7 Дж. Через входное окно излучение попадает в камеру, заполненную аргоном или неоном под давлением близким к атмосферному, внутри которой расположен аксикон.

Излучение входит в аксикон через основание и затем преломляется на его боковой поверхности, в результате чего формируется пучок излучения с радиальным распределением поля в виде функции Бесселя.

В области существования такого пучка происходит оптический пробой и, как следствие, генерация электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. В эксперименте исследуется оптическое излучение, выходящее из камеры перпендикулярно оси плазменного канала. Излучение, выходящее из первого окна, подается на спектрограф, содержащий диспергирующий элемент (дифракционную решетку). Решетка разлагает падающее излучение в спектр, который затем

регистрируется ПЗС-камерой, усиливается, оцифровывается и записывается на жесткий диск компьютера.

Излучение, выходящее из второго окна, попадает на объектив, который формирует изображение лазерной искры на второй ПЗС-камере. Это изображение, так же, как и спектр, регистрируется ПЗС-камерой, усиливается, оцифровывается и записывается на жесткий диск компьютера.

Так как излучение лазера является импульсным, и лазерная искра существует в течение короткого промежутка времени, необходимо чтобы ПЗС-камеры были готовы к регистрации в момент начала лазерного пробоя. Это обеспечивается за счет запускающего электрического импульса, генерируемого лазером. Данный импульс приводит ПЗС-камеры в режим готовности к регистрации. Весь эксперимент осуществляется под управлением компьютера.

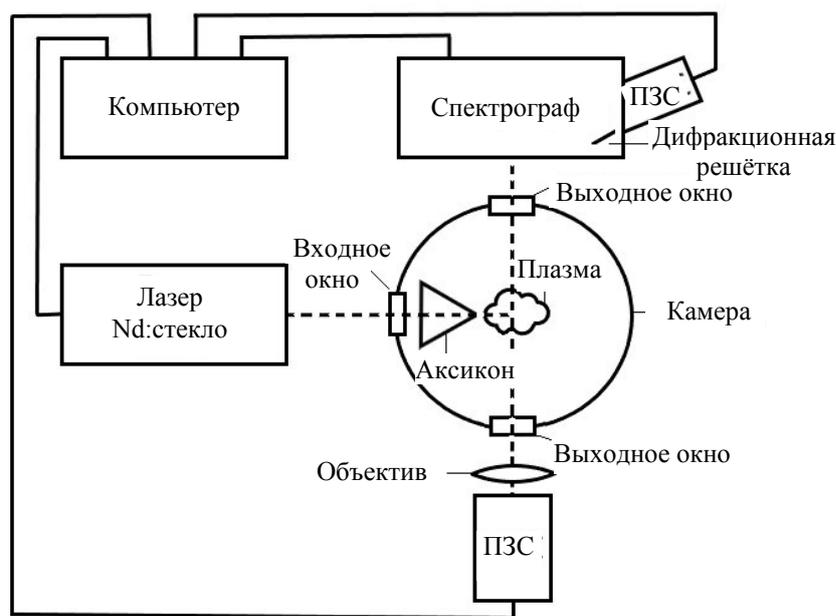


Рис. 1. Схема эксперимента по регистрации оптических спектров и изображений излучения.

Схема эксперимента по регистрации рентгеновских спектров излучения

Схема эксперимента по регистрации рентгеновского спектра излучения, генерируемого в плазменных каналах оптического пробоя в беселевых пучках, представлена на рис. 2.

Рентгеновское излучение, генерируемое в плазменном канале, как вдоль оси греющего излучения, так и перпендикулярно этой оси, проходит через щели и под скользящим углом

падает на сферические дифракционные решетки расположенные внутри камеры. На решетках это излучение разлагается в спектр и регистрируется двумя рентгеновскими ПЗС, закрепленными на стенке камеры, усиливается, оцифровывается и записывается на жесткий диск компьютера. При этом щель, решетка и регистрирующий элемент должны располагаться на одной сфере, так называемой сфере Роуланда. В данном эксперименте радиус сферы имеет величину около 1 м.

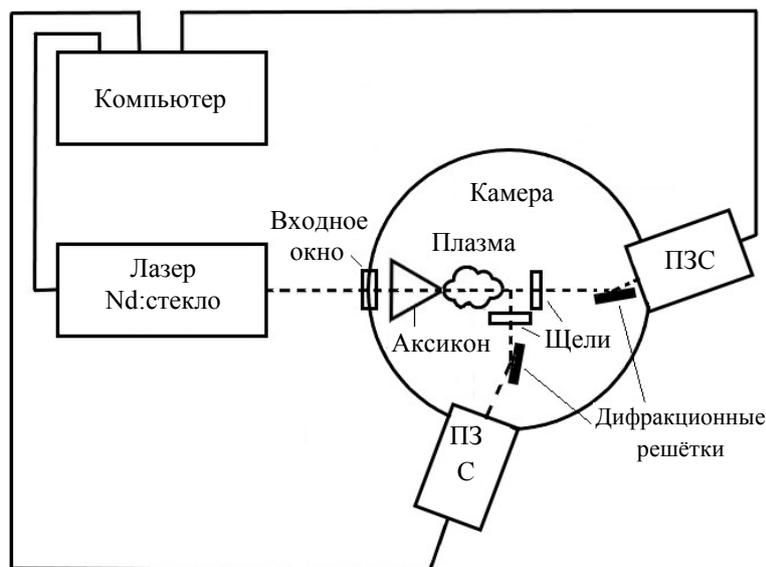


Рис. 2. Схема эксперимента по регистрации рентгеновских спектров излучения.

Предлагаемая нами для осуществления поставленных задач система спектрографа состоит из базового блока, автоматизированной турели с четырьмя дифракционными решетками, узла автоматизированной входной щели, контроллера узла автоматической входной щели, адаптера для ПЗС-камеры, моторизованного выходного зеркала, разветвленного оптоволоконна, адаптера для разветвленного оптоволоконна, и узла согласования светосилы спектрографа и оптоволоконна.

В предложенной нами схеме эксперимента важную роль играют основные параметры отдельных элементов этой схемы, а также параметры фокусирующей системы аксикона. В данной краткой статье мы не будем останавливаться подробно на выборе основных технических характеристик, предложенных нами ПЗС-камер (формат фотоприемного сенсора, квантовая эффективность, размер пикселя, величина темнового тока и другие). Также мы не будем подробно останавливаться и на технических характеристиках предложенных спектрографов (параметры щелей, дифракционных решеток, оптическая схема и т. д.).

Заключение

Таким образом, в настоящей работе разработана четырехканальная схема эксперимента по регистрации оптических и рентгеновских спектров и изображений излучения, генерируемого в плазменных каналах оптического пробоя в бесселевых пучках, получае-

мых при фокусировке электромагнитного излучения коноидными системами фокусировки типа аксикон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятницкий Л. Н. Волновые бесселевы пучки. – М.: Наука, 2012.
2. Пятницкий Л. Н. // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 2. С. 165.
3. Андреев Н. Е., Бычков С. С., Котляр В. В., Марголин Л. Я., Пятницкий Л. Н., Серафимович П. Г. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 2. С. 130.
4. Бычков С. С., Горлов С. В., Марголин Л. Я., Тальвирский А. Д., Шпатаковская Г. В. // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 3. С. 229.
5. Бычков С. С., Горлов С. В., Макаров А. В., Марголин Л. Я., Пятницкий Л. Н., Тальвирский А. Д. // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 23. С. 243.
6. Vyckov S. S., Marin M. Yu., Pyatnitsky L. N. X-ray laser medium on the base of long optical discharge. III Intern. Colloquium on X-ray lasers. Schliersee, Germany, 1992, Inv. paper 18, Conf. Ser. I25: Section 9, p. 439.
7. Бычков С. С., Майорова Л. М., Марголин Л. Я., Пятницкий Л. Н., Тальвирский А. Д. Установка для исследования возможности создания активной среды рентгеновского лазера при оптическом пробое в бесселевом пучке / Материалы конференции по физике низкотемпературной плазмы (Петрозаводск, 1995). Т. 3. С. 452.
8. Железнов Ю. А., Хомич В. Ю. // Письма в Журнал технической физики. 2006. Т. 32. № 3. С. 90.
9. Железнов Ю. А., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 60.
10. Zheleznov Yu. A., Khomich V. Yu. // Plasma Physics Reports. 2013. V. 39. № 13. P. 1136.
11. Железнов Ю. А. Разработка и создание автоматизированных спектрофотометрических систем для исследования низкотемпературной плазмы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ИЭЭ РАН. Санкт-Петербург, 2011.

System for registration of optical and X-ray spectra and images of radiation generated in optical breakdown plasma channels in Bessel beams

Yu. A. Zheleznov and V. Yu. Khomich

Institute for Electrophysics and Electric Power, Russia Academy of Sciences
18 Dvortsovaya embankment, Sankt-Petersburg, 191186, Russia

Received November 09, 2020

Four-channel scheme of experiment on registration of optical and X-ray spectra and images of radiation generated in optical breakdown plasma channels in Bessel beams formed when focusing electromagnetic radiation with axicon type conoid focusing systems.

Keywords: bessel beams, axicon, X-ray and optical radiation, spectra and images registration, plasma channel.

REFERENCES

1. L. N. Pyatnitskiy, *Wave Bessel beams* (Nauka, Moscow, 2012).
2. L. N. Pyatnitskiy, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **180** (2), 165 (2010).
3. N. E. Andreev, S. S. Bychkov, V. V. Kotlyar, L. Ya. Margolin, L. N. Pyatnitskiy, and P. G. Serafinovitch, *Quantum Electronics* **23** (2), 130 (1996).
4. S. S. Bychkov, S. V. Gorlov, L. Ya. Margolin, A. D. Talvirskiy, and G. V. Shpatakovskaya, *Quantum Electronics* **26** (3), 229 (1999).
5. S. S. Bychkov, S. V. Gorlov, A. V. Makarov, L. Ya. Margolin, L. N. Pyatnitskiy, and A. D. Talvirskiy, *Quantum Electronics* **26** (23), 243 (1999).
6. S. S. Bychkov, M. Yu. Marin, and L. N. Pyatnitskiy, *X-ray laser medium on the base of long optical discharge. III International Colloquium on X-ray lasers* (Schliersee, Germany, 1992) Inv. paper 18, Conf. Ser. I25: Section 9, p. 439.
7. S. S. Bychkov, L. M. Mayorova, L. Ya. Margolin, L. N. Pyatnitskiy, and A. D. Talvirskiy, Installation for study of feasibility of forming X-ray laser active medium under optical discharge in Bessel beam. *Proceedings of conference on low temperature plasma physics* (Petrozavodsk, 1995), V. 3. P. 452.
8. Yu. A. Zheleznov and V. Yu. Khomich, *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki* **32** (3), 90 (2006).
9. Yu. A. Zheleznov and V. Yu. Khomich, *Applied Physics*, No. 3, 60 (2011) [in Russian].
10. Yu. A. Zheleznov and V. Yu. Khomich, *Plasma Physics Reports* **39** (13), 1136 (2013).
11. Yu. A. Zheleznov, Development and creation of automated spectrophotometer systems for low temperature plasma research. Candidate dissertation in technical sciences. IEE RAS. Sankt-Petersburg (2011).