УДК 535.3

ПОРОГ САМОФОКУСИРОВКИ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАРАХ РУБИДИЯ

© 2016 г.
В. А. Саутенков[*,**], канд. физ.-мат. наук; **М. Н. Шнейдер**[*,***], доктор физ.-мат. наук; **С. А. Саакян**[*]; **Е. В. Вильшанская**[*,****], студентка; **Д. А. Мурашкин**[*]; **Б. Б. Зеленер**[*,*****], канд. физ.-мат. наук; **Б. В. Зеленер**[*], канд. физ.-мат. наук

[*]Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва
[**]Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва
[***]Princeton University, Princeton, NJ, USA
[****]Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва
[*****]Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

E-mail: v.sautenkov@mail.ru

Исследована самофокусировка лазерного излучения в атомных парах рубидия вблизи резонансного перехода $5S_{1/2}$–$5P_{3/2}$ (780 нм). Измерена пороговая мощность самофокусировки при различных поперечных размерах пучка лазерного излучения на входе кюветы с парами рубидия. При малых диаметрах пучка лазерного излучения наблюдалось увеличение пороговой мощности самофокусировки. Проведено сравнение результатов измерений с данными теоретических исследований.

Ключевые слова: *лазерное излучение, самофокусировка, атомные пары, рубидий.*

Коды OCIS: 190.0190, 260.5950, 300.6210

Поступила в редакцию 29.06.2016

Введение

Исследования эффектов самофокусировки и филаментации пучков электромагнитного излучения в нелинейных средах важны для фундаментальной науки и в различных применениях лазерных систем [1]. Впервые эффект самофокусировки был рассмотрен в статье Аскарьяна 1962 г. [2]. Безусловно, необходимо знать условия ее возникновения в выбранной среде. Порогом возникновения самофокусировки при увеличении мощности электромагнитного излучения считается режим, при котором наведенная линза в среде компенсирует дифракционную расходимость пучка. Простая формула для пороговой мощности излучения P_{cr} [3–6] имеет следующий вид:

$$P_{\text{cr}} = \alpha\left(\frac{\lambda^2}{4\pi n_0 n_2}\right), \qquad (1)$$

где α – безразмерный коэффициент порядка 2, λ – длина волны излучения, n_0 – линейная часть показателя преломления n, n_2 – фактор, зависящий от интенсивности I нелинейной части показателя преломления ($n = n_0 + n_2 I$). Эта формула общепризнана и используется для оценок пороговой мощности в многочисленных экспериментах [1]. Однако условие самофокусировки (1), начиная с работ Аскарьяна [7], до сих пор дискутируется в литературе. Сравнительно недавно в теоретической работе [8] было показано, что пороговая мощность излучения может определяться как параметрами среды, так и параметрами падающего на среду излучения. В настоящей работе предполагалось экспериментально проверить некоторые выводы работы [8], исследуя прохождение лазерного пучка через пары рубидия. К преимуществам резонансных паров металлов по сравнению с прозрачными средами типа атмосферного воздуха относится низкий порог самофокусировки.

Первые сообщения о наблюдении эффекта самофокусировки в парах щелочных металлов появились в 70-х гг. прошлого столетия [9, 10]. Краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований эффекта самофокусировки лазерного излучения в парах металлов опубликован в книге [11]. В ней обсуждаются результаты измерений параметров распространяющегося в среде пучка лазерного излучения при разных температурах паров и различных частотах излучения. Целью данной работы яв-

лялось экспериментальное изучение зависимости пороговой мощности от поперечного размера пучка лазерного излучения.

Экспериментальные результаты

В данном эксперименте изучалась самофокусировка лазерного излучения в парах рубидия вблизи резонансного перехода $5S_{1/2}$–$5P_{3/2}$ (D_2 линия, $\lambda = 780$ нм). Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

В качестве источника перестраиваемого по частоте монохроматического излучения использовался инжекционный лазер с внешним резонатором ИЛВР (ширина спектра менее 1 МГц). Выходное излучение ИЛВР представляло собой практически параллельный пучок с шириной на полувысоте 0,1 см и мощностью 20 мВт. Часть излучения фокусировалась в оптоволокно и направлялась в лямбда-метр *Angstrom* WS-U. После частотной калибровки лямбда-метра точность измерения частоты лазера составляла около 10^{-4} см$^{-1}$ [12]. Основная часть лазерного излучения направлялась на горячую кювету с парами рубидия (естественная смесь изотопов ^{85}Rb и ^{87}Rb). Длина кюветы 10 см. Описание такой высокотемпературной кюветы с окнами из граната приведено в публикации [13]. Концентрация атомов рубидия в кювете с насыщенными парами задается температурой самой холодной части кюветы. В настоящей работе измерения проводились при концентрации атомов рубидия $N = 7\times10^{-3}$ см$^{-3}$. Лазер был отстроен на частоту 1 см$^{-1}$ в высокочастотное крыло D_2 линии рубидия. Лазерное излучение концентрировалось на входном окне кюветы с помощью линз с различными фокусными расстояниями f от 6 до 30 см. Линзы перемещались вдоль оси пучка до совпадения перетяжки сфокусированного пучка излучения с поверхностью раздела окно – пары рубидия. Распределение интенсивности в перетяжке регистрировалось с помощью цифровой фотокамеры. Диаметр перетяжки W_f можно оценить с помощью известного соотношения для гауссовых пучков

$$W_f = \frac{2\lambda f}{\pi W_0}, \qquad (2)$$

где W_0 – диаметр параллельного пучка излучения. Наблюдалось хорошее согласие между оцененными и измеренными поперечными размерами перетяжки. Мощность прошедшего через кювету излучения регистрировалась предварительно откалиброванным фотодиодом с диафрагмой, а профиль пучка регистрировался фотокамерой на нескольких расстояниях от выходного окна кюветы. Мощность падающего на кювету излучения могла варьироваться с помощью полуволной пластинки и поляризационного кубика. С увеличением мощности расходимость пучка в кювете уменьшалась, и при некоторой мощности наблюдалось самоканалирование излучения в кювете (т.е. в кювете наблюдалась тонкая светящаяся “нить”). Эта мощность была принята как пороговая. Распределение интенсивности, зарегистрированное на расстоянии 14 см от выходного окна кюветы при использовании линзы с $f = 15$ см и небольшом превышении порога самофокусировки (примерно на 10%), приведено на рис. 2. Экспериментальный профиль выходного пучка излучения хорошо аппроксимируется функцией Гаусса.

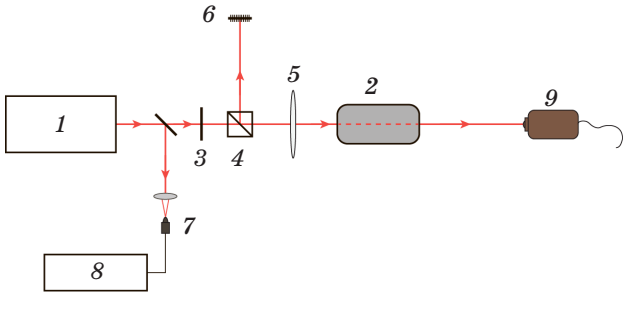

Рис. 1. Схема экспериментальной установки. *1* – ИЛВР, *2* – кювета с парами Rb, *3* – пластинка $\lambda/2$, *4* – поляризационный кубик, *5* – линза, *6* – ограничитель пучка, *7* – оптоволокно, *8* – лямбда-метр *Angstrom* WS-U, *9* – фотокамера.

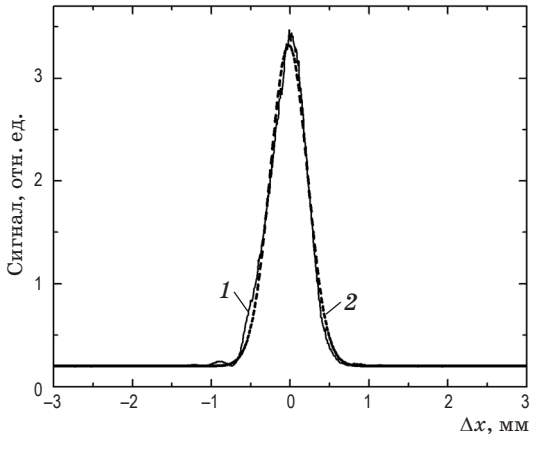

Рис. 2. Распределение интенсивности пучка излучения после самофокусировки в кювете. *1* – эксперимент, *2*– результат аппроксимации функцией Гаусса.

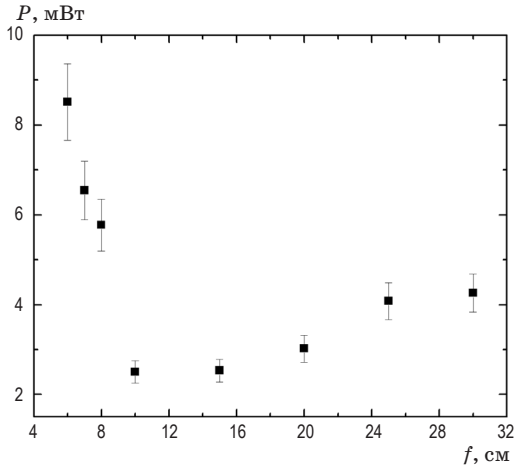

Рис. 3. Порог самофокусировки при использовании собирающих линз с различными фокусными расстояниями.

На следующем рис. 3 представлена экспериментально измеренная зависимость порога самофокусировки от фокусного расстояния направляющих линз.

Согласно соотношению (2), этот график фактически представляет зависимость P_{cr} от диаметра перетяжки W_f. По формуле (1) пороговая мощность самофокусировки не зависит от диаметра пучка на входе в нелинейную среду. Заметим, что эта формула получена в приближении слабых возмущений. Было обнаружено резкое увеличение порога самофокусировки при малых размерах падающего на окно кюветы пучка излучения. Учет разлета оптически насыщенных атомов рубидия из пучка излучения в кювете может приводить только к плавному увеличению порога самофокусировки при уменьшении размеров пучка излучения. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими результатами [7].

Заключение

Использование резонансной среды, а именно паров рубидия, позволило нам провести исследование эффектов самофокусировки при относительно низких мощностях лазерного излучения. В результате выполненных экспериментов установлена неизвестная ранее зависимость пороговой мощности самофокусировки от поперечного размера пучка лазерного излучения. Полученные результаты важны для проверки современных теорий эффектов самофокусировки и филаментации, а также для расчета нелинейных оптических процессов типа четырехволнового смешения. В качестве следующего шага необходимо экспериментально и теоретически оценить фактор $n2$ в атомных парах рубидия для сравнения расчетных пороговых мощностей с экспериментально измеренными величинами.

Авторы благодарны V.V. Semak, Virtual Laser Application Design, LLC , USA и М.А. Губину, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН за полезные обсуждения.

Работа поддержана грантами Президента РФ (№ МК-4092.2014.2, № НШ-6614.2014.2), РФФИ (№ 14-02-00828), Программой фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук “Исследование вещества в экстремальных состояниях” под руководством академика В.Е. Фортова.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чекалин С.В., Кандидов В.П.* От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов // УФН. 2013. Т. 183. № 2. С. 133–152.
2. *Аскарьян Г.А.* Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. № 6. С. 1567–1570.
3. *Chiao R.Y., Garmire E., Townes C.H.* Self-trapping of optical beams // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. № 15. P. 479–482.
4. *Таланов В.И.* О самофокусировке волновых пучков в нелинейных средах // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2. № 5. С. 218–222.
5. *Fibich G., Gaeta A.L.* Critical power for self-focusing in bulk media and in hollow waveguides // Opt. Lett. 2000. V. 25. № 5. P. 335-337.
6. *Zheltikov A.M.* Self-focusing and spatial modes in free space and nonlinear waveguides // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. № 6. P. 063847-1.

7. *Аскарьян Г.А.* Эффект самофокусировки // УФН. 1973. Т. 111. № 10. С. 249–260.

8. *Semak V.V., Shneider M.N.* Effect of power losses on self-focusing of high-intensity laser beam in gases // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. № 18. P. 185502-1.

9. *Grischkowsky D.* Self-focusing of light by potassium vapor // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. № 16. P. 866–869.

10. *Bjorkholm J.E., Ashkin A.A.* CW self-focusing and self-trapping of light in sodium vapor // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 32. № 4. P. 129–132.

11. *Suter D.* The physics of laser-atom interactions. Cambridge.: Cambridge University Press, 1997. V. 19. 366 p.

12. *Саакян С.А., Саутенков В.А., Вильшанская Е.В., Васильев В.В., Зеленер Б.В., Зеленер Б.Б.* Контроль частоты перестраиваемых лазеров с помощью частотно-калиброванного лямбда-метра в эксперименте по приготовлению ридберговских атомов в магнитооптической ловушке // Квант. электрон. 2015. Т. 45. № 9. С. 828–832.

13. *Sautenkov V.A., Varzhapetyan T.S., Li H., Sarkisyan D., Scully M.O.* Selective reflection of a laser beam from a dilute rubidium vapor // J. Russian Laser Research. 2010. V. 31. № 3. P. 270–275.