

09

Образование плазменных каналов в дистиллированной воде под действием фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК диапазона

© П.А. Данилов¹, Д.А. Помазкин¹, И.Д. Матяев², П.Я. Илюшин^{1,3}, Р.А. Хмельницкий¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева,
119991 Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

e-mail: danilovpa@lebedev.ru

Поступила в редакцию 11.12.2023 г.

В окончательной редакции 09.01.2024 г.

Принята к публикации 16.01.2024 г.

Проведены экспериментальные исследования параметров плазменных каналов, образованных в дистиллированной воде под воздействием мощных импульсов лазерного излучения с длиной волны 1050, 1105, 1200, 1300, 1500, 1700 нм длительностью соответственно 130, 310, 100, 150, 110 и 80 фс. В результате исследования был экспериментально определен нелинейный показатель преломления воды и подтверждена квадратичная зависимость критической мощности самофокусировки от длины волны накачки. Значения критической мощности самофокусировки для рассматриваемых в работе длин волн лежат в диапазоне 3.8–17.8 MW.

Ключевые слова: плазменный канал, критическая мощность самофокусировки, филаментация в воде, ультракороткие лазерные импульсы инфракрасного диапазона, нелинейная оптика, дистиллированная вода.

DOI: 10.61011/OS.2024.01.57552.10-24

Введение

Физическое явление самофокусировки мощных лазерных импульсов в различных конденсированных средах сопровождается рядом нелинейных процессов, таких как формирование протяженных плазменных каналов [1,2], коническая эмиссия [3], генерация суперконтинуума [4]. При распространении лазерного импульса через среду происходит нелинейный поляризационный отклик материала. Значение показателя преломления в области наибольшей интенсивности лазерного излучения становится более существенным, что приводит к фокусировке пучка и проявлению эффекта самофокусировки [5]. Лазерные источники с ультракороткой длительностью импульсов и острой фокусировкой позволяют достигать экстремальных интенсивностей (10^{12} – 10^{13} TW/cm² и выше) излучения, формируя плазменный канал (филамент) в области малой фокусной перетяжки. Следы этого явления визуально регистрируются по светящейся области фотоионизированного вещества [6]. В недавних работах [7,8] был обнаружен новый нелинейно-оптический эффект, связанный с многократным снижением энергии ультракоротких (пикосекундных) лазерных импульсов при достижении оптического пробоя в дистиллированной воде в поле обратного вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и накачки. Суммирование нелинейного вклада показателя

преломления и самофокусировка обеспечили повышение интенсивности в фокальной плоскости линзы более чем на порядок при неизменной энергии лазерных импульсов.

Исследования филаментации в различных средах показывают, что формирование плазменного канала наблюдается только при достижении определенного критического значения мощности лазерного излучения, которое зависит от длины волны накачки [9]. Начало области филаментации определяется при условии баланса процессов самофокусировки и дифракции, возникающей в том числе из-за дефокусирующего действия плазмы, образующейся в фокальной плоскости. Часто для описания как критической мощности, так и положения нелинейного фокуса при процессах самофокусировки и формировании плазменных каналов используется теория Марбургера [10]. В случае острой фокусировки лазерного излучения размер филамента может составлять до нескольких микрометров, что вызывает интерес исследователей с точки зрения прецизионной лазерной обработки поверхностей [11,12].

Многие процессы технологической обработки материалов, включая генерацию твердых наночастиц в растворах для биомедицинских применений, связаны с использованием дистиллированной воды. Это оказывает прямое влияние на эффективность процесса, особенно при использовании мощного лазерного излучения [13].

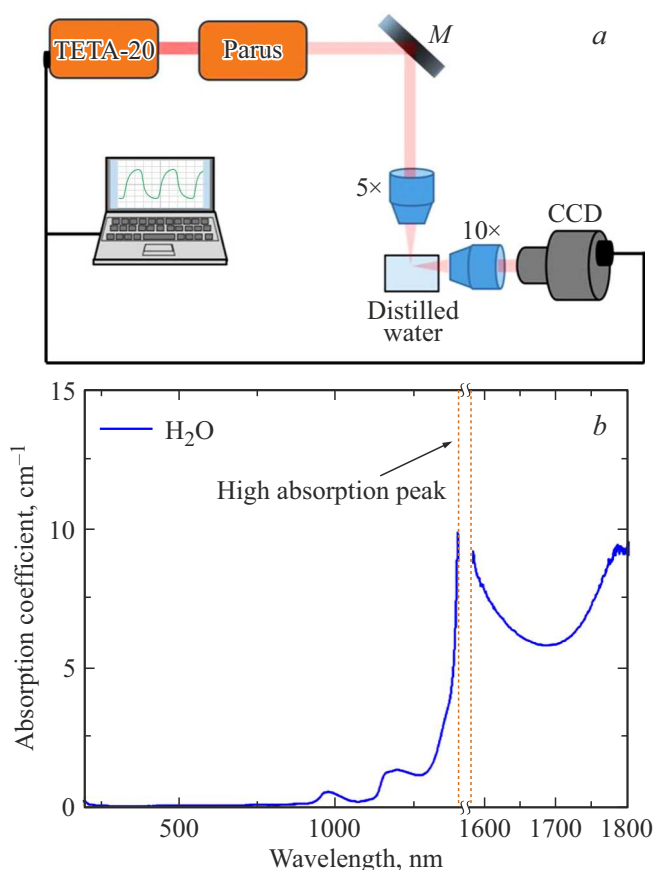


Рис. 1. Экспериментальная установка (а) и спектр поглощения воды в среднем ИК диапазоне (б). Разрыв в области 1400–1580 нм связан с полосой сильного поглощения воды.

С этой точки зрения становится очевидной необходимость изучения условий управления параметрами плазменных каналов. Исследования филаментации в случае дистиллированной воды проводились разрозненно на различных длинах волн, в основном на 800 нм [14], и практически не касались инфракрасной (ИК) области выше 1064 нм. Существующие работы по прямому измерению нелинейного показателя преломления воды на длинах волн до 1400 нм методом Z-сканирования [15] показывают большой разброс значений [16,17]. Поэтому для уточнения существующих моделей описания процессов филаментации в диэлектриках в целом и воды, в частности, необходимо получение достоверной информации о нелинейных свойствах среды при распространении в ней мощных лазерных импульсов в других диапазонах длин волн, особенно в ближнем и среднем ИК диапазонах.

В работе исследуются основные параметры плазменных каналов, образованных мощными лазерными импульсами в ИК диапазоне с длинами волн 1053, 1100, 1200, 1300, 1500, 1700 нм и длительностями 130, 310, 100, 150, 110 и 80 фс соответственно в дистиллированной воде. Были выполнены оценки нелинейного показателя преломления воды и подтверждена квадратичная за-

висимость критической мощности самофокусировки от длины волны накачки в ИК диапазоне.

Экспериментальная часть

Система параметрической генерации (Parus, Авеста-Проект) с твердотельным иттербиевым лазером накачки (TETA-20, Авеста-Проект), максимальной энергией в импульсе $E = 500 \mu\text{J}$, длительностью импульсов 250 фс, частотой следования 10 кГц и качеством пучка $M^2 < 1.25$ применялась для формирования плазменных каналов в кварцевой кювете с толщиной стенки 1.25 мм, наполненной дистиллированной водой. Фокусировка осуществлялась объективом с числовой апертурой $NA = 0.1$ (ЛОМО) в пятно радиусом 2.8–4.3 μm в зависимости от длины волны накачки, что соответствовало максимальным пиковым интенсивностям до 70–170 TW/cm^2 с учетом выходной мощности холостой длины волны параметрического генератора.

Формирование плазменных каналов происходило лазерными импульсами варьируемой энергии с длинами волн 1050, 1105, 1200, 1300, 1500 и 1700 нм в кювете с дистиллированной водой на глубине 0.4–0.7 мм при вертикальном падении излучения (рис. 1, а). Поглощение воды в указанном диапазоне длин волн составляет $\alpha = 1\text{--}10 \text{ cm}^{-1}$ с сильными полосами поглощения в диапазоне 1400–1600 нм и выше 1800 нм согласно [18] и спектрам, полученных при измерении пропускания воды в кварцевой кювете длиной 10 мм при помощи ИК фурье-спектрометра Vertex 70v (Bruker). Наблюдение размеров плазменных каналов производилось перпендикулярно направлению распространения излучения при помощи объектива с числовой апертурой $NA = 0.2$ (ЛОМО) и ПЗС-камеры, оснащенной окуляром с 10-кратным увеличением (размер пикселя изображения в схеме наблюдения $\sim 0.8 \mu\text{m}$). Длительность импульсов на выходе параметрического генератора регистрировалась автокоррелятором ASF-30 (Авеста-Проект) и для всех используемых в работе длин волн накачки составляла 80 – 310 фс (рис. 1, б).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны изображения плазменных каналов для длин волн 1100, 1300, 1500 и 1700 нм, представленные в качестве наиболее наглядных примеров. Яркие светящиеся треки длиной 100–200 μm появляются при средних мощностях 10–25 мВт и по мере роста мощности увеличиваются в размерах до 500–800 μm . Данные изображения использовались для определения критической мощности самофокусировки в воде с использованием методики, описанной в работе [19]. Этот метод предусматривает определение различия между линейной и нелинейной длинами плазменного канала, где для определения положения линейного (геометрического) фокуса выбирается центр трека, полученного

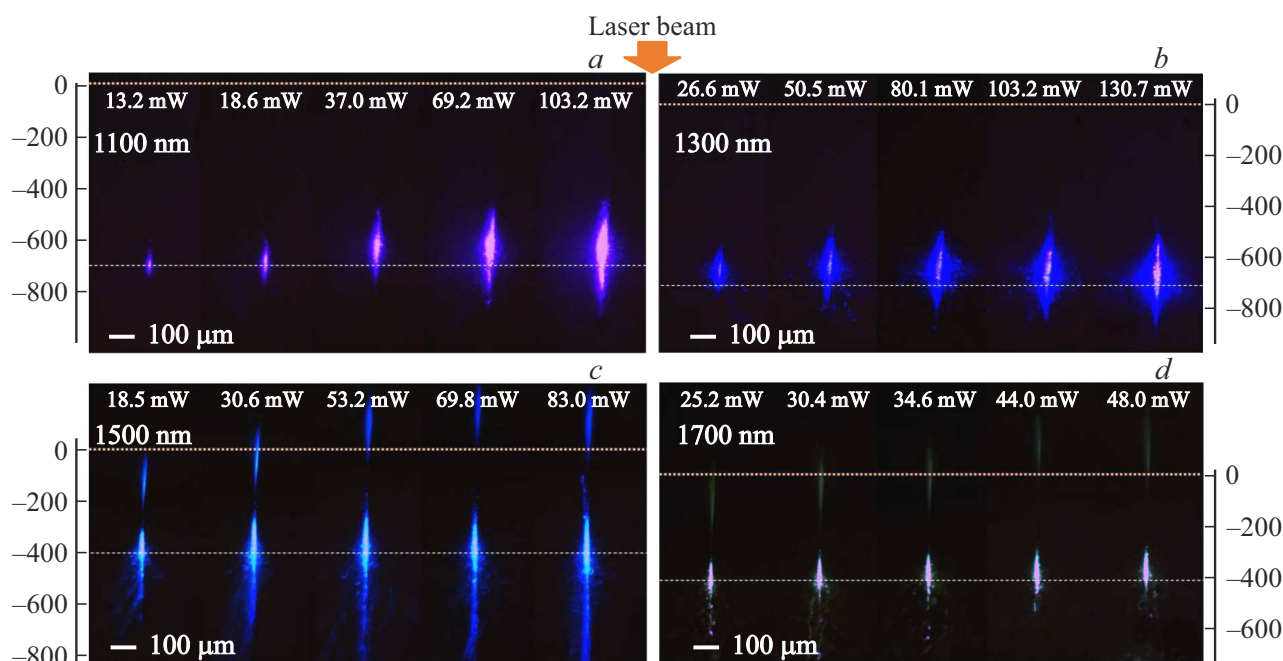


Рис. 2. Изображения плазменных каналов в дистиллированной воде для длин волн 1100 нм (а), 1300 нм (b), 1500 нм (c) и 1700 нм (d) и различных средних мощностей лазерного излучения накачки, которые указаны на рисунке. Оранжевые линии соответствуют поверхности воды в кювете, белая штриховая линия указывает положение фокальной плоскости. Справа и слева рисунков указаны шкалы глубины в μm .

Экспериментальные значения нелинейного показателя преломления воды для различных длин волн накачки

Длина волны накачки, nm	Длительность импульса, fs	P_{cr} , MW	n_2 , $10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$
1053	134	8 ± 3	1.5 ± 0.6
1105	314	4 ± 1	4 ± 1
1200	102	4 ± 1	4 ± 1
1300	150	8.4 ± 2.5	2.3 ± 0.7
1500	112	9 ± 5	2.9 ± 1.5
1700	82	18 ± 9	1.8 ± 0.9

при минимальной энергии лазерного импульса накачки. Отметим, что светящиеся области в верхней части рис. 2, c, d, вероятнее всего, являются рассеянием лазерного излучения вблизи поверхностного слоя воды и не выступают в роли второго плазменного канала.

В результате получаем зависимость длины линейной и нелинейной частей плазменного канала от средней мощности накачки, пересечение которых определяет значение критической мощности самофокусировки (рис. 3, a, b для длины волны 1300 нм в качестве примера). Применение такого подхода для других длин волн накачки с учетом потерь на фокусирующей оптике и

поглощения воды (коэффициент поглощения составляет $0.3\text{--}5.9 \text{cm}^{-1}$ для использованных длин волн [18]) дает значения $P_{\text{cr}} = 3.8\text{--}17.8 \text{MW}$. Насыщение длины плазменного канала (рис. 3, b) может быть обусловлено влиянием плазменной дефокусировки и возможной диссипацией энергии в пользу генерации стоковой ВКР компоненты в воде [7], однако детальных исследований этого эффекта в нашей работе не проводилось.

Все полученные экспериментальные значения для критической мощности самофокусировки в зависимости от длины волны накачки представлены на рис. 3, c. За исключением случаев 1053 и 1300 нм экспериментальные точки отлично аппроксимируются квадратичной по длине волны функцией, которая представлена красной штриховой линией на графике.

Для пучков гауссова профиля выражение критической мощности самофокусировки от длины волны принимает вид [1]

$$P_{\text{cr}} = \frac{3.77\lambda_0^2}{8\pi n_2 n_0}, \quad (1)$$

из которого нетрудно вывести значение для n_2 . Экспериментальная зависимость нелинейного показателя преломления для дистиллированной воды и длин волн 1050, 1105, 1200, 1300, 1500 и 1700 нм приведена на рис. 4, где дополнительно отмечены точки с соответствующими погрешностями, полученные в результате прямых измерений нелинейных характеристик методом Z-сканирования в работах [15,16]. Полученные значения занесены в таблицу.

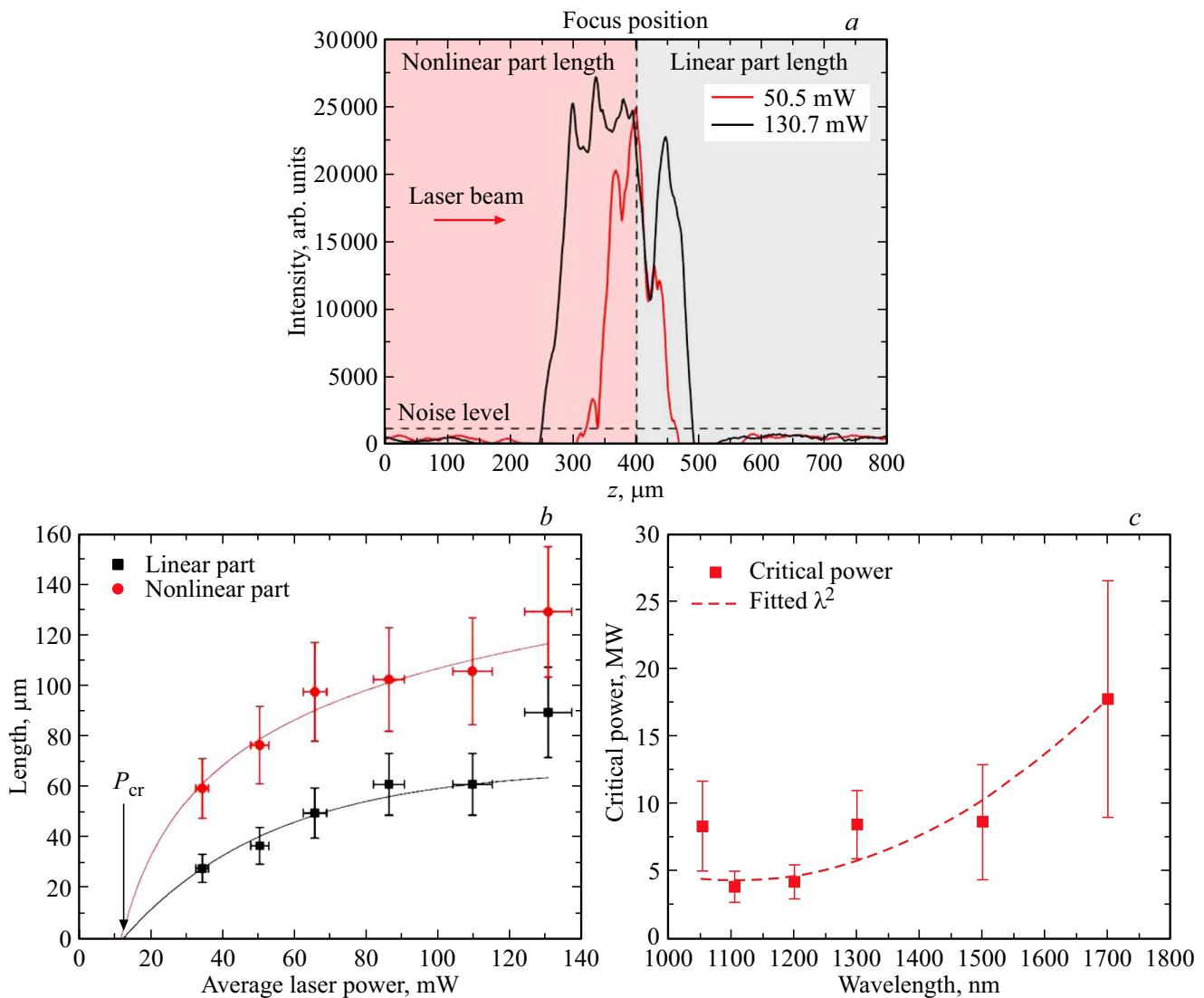


Рис. 3. (a) Пример определения „линейной“ и „нелинейной“ длины плазменного канала для длины волны 1300 nm и средней мощности 50.5 и 130.7 mW по профилям интенсивности свечения канала вдоль оси z ; (b) значения величин „линейной“ и „нелинейной“ длины плазменного канала для накачки 1300 nm; (c) зависимость критической мощности самофокусировки P_{cr} от длины волны накачки (красные точки) и ее аппроксимация квадратичной по длине волны функцией (красная штриховая линия).

В диапазоне длин волн от 1053 до 1200 nm наши результаты (рис. 4) согласуются со значениями, полученными ранее [16]. Однако возникают различия в случае накачки в области с высоким поглощением воды (1300–1700 nm) из-за косвенного измерения n_2 в нашей работе и более острой фокусировки, а следовательно, высокой интенсивности в нашем эксперименте. Кроме того, возникают трудности при коррекции реальной мощности лазерных импульсов в области фокусировки и образования плазменного канала, что требует дополнительных исследований, моделирования нелинейного отклика среды в широком диапазоне длин волн с учетом вклада двухфотонного поглощения и явления стрикции, что уже выходит за рамки представленной работы.

Заключение

В настоящей работе экспериментально определены критические мощности самофокусировки и нелинейный показатель преломления воды для длин волн ИК диапазона (1050, 1105, 1200, 1300, 1500 и 1700 nm). Критическая мощность самофокусировки пропорциональна квадрату длины волны в исследуемом диапазоне. Следует отметить, что нелинейный показатель преломления n_2 дистиллированной воды при мощностях выше критической практически не изменяется по мере увеличения длины волны возбуждающих фемтосекундных лазерных импульсов в диапазоне 1300–1500 nm.

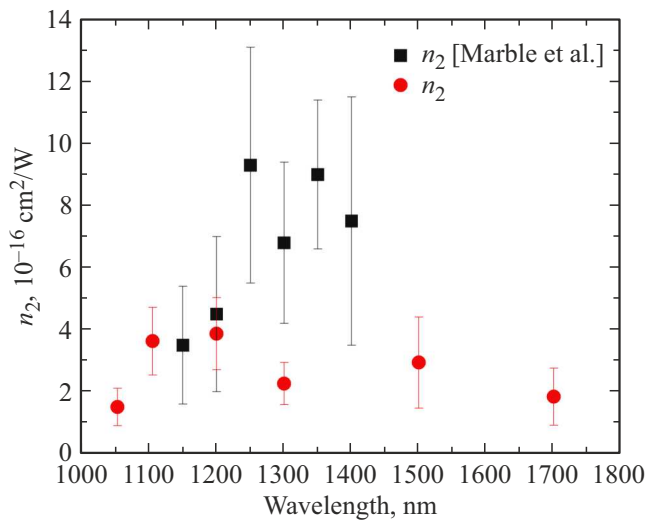


Рис. 4. Значения нелинейного показателя преломления воды (красные точки), полученные по формуле (1). Сравнение данных с результатами работ [16,17] (черные точки).

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00453), <https://rscf.ru/en/project/23-22-00453/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Liu, O.G. Kosareva, I.S. Golubtsov, A. Iwasaki, A. Becker, V.P. Kandidov, S.L. Chin. *Appl. Phys. B*, **76**, 215 (2003). DOI: 10.1007/s00340-002-1087-1
- [2] A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, G. Mourou. *Opt. Lett.*, **20**, 73 (1995). DOI: 10.1364/OL.20.000073
- [3] A. Couairon, A. Mysyrowicz. *Phys. Rep.*, **441** (2–4), 47 (2007). DOI: 10.1016/j.physrep.2006.12.005
- [4] J. Kasparian, R. Sauerbrey, D. Mondelain, S. Niedermeier, J. Yu, J.-P. Wolf, Y.-B. Andre, M. Franco, B. Prade, S. Tzortzakis, A. Mysyrowicz, M. Rodriguez, H. Wille, L. Wöste. *Opt. Lett.*, **25** (18), 1397 (2000). DOI: 10.1364/OL.25.001397
- [5] С.В. Чекалин, В.П. Кандидов. *УФН*, **183** (2), 133 (2013). DOI: 10.3367/UFN.0183.201302b.0133 [S.V. Chekalin, V.P. Kandidov. *Phys. Usp.*, **56** (2), 123 (2013). DOI: 10.3367/UFNe.0183.201302b.0133].
- [6] С.М. Першин, А.И. Водчиц, И.А. Ходасевич, В.А. Орлович, А.Д. Кудрявцева, Н.В. Чернега. *Квант. электрон.*, **52** (3), 283 (2022). [S.M. Pershin, A.I. Vodchits, I.A. Khodasevich, V.A. Orlovich, A.D. Kudryavtseva, N.V. Tcherniega. *Quantum Electron.*, **52** (3), 283 (2022). DOI: 10.1070/QEL18005].
- [7] Р.А. Чижов, М.Ю. Гришин, С.М. Першин, В.Н. Леднев, В.В. Букин. *Opt. Lett.*, **46** (11), 2686 (2021). DOI: 10.1364/OL.426104
- [8] S.I. Kudryashov, A.O. Levchenko, P.A. Danilov, N.A. Smirnov, A.A. Ionin. *Opt. Lett.*, **45** (7), 2026 (2020). DOI: 10.1364/OL.389348
- [9] G. Fibich, A.L. Gaeta. *Opt. Lett.*, **25** (5), 335 (2000). DOI: 10.1364/OL.25.000335
- [10] J.H. Marburger. *Prog. Quantum Electron.*, **4**, 35 (1975). DOI: 10.1016/0079-6727(75)90003-8
- [11] N.A. Smirnov, S.I. Kudryashov, A.A. Ionin. *JETP*, **135** (1), 44 (2022). DOI: 10.1134/S1063776122070068
- [12] N.A. Smirnov, S.I. Kudryashov, A.A. Rudenko, A.A. Nastulyavichus, A.A. Ionin. *Laser Phys. Lett.*, **19** (2), 026001 (2022). DOI: 10.1088/1612-202X/ac46ab
- [13] D.V. Apeksimov, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova. *Atmospheric Ocean. Opt.*, **29**, 135 (2016). DOI: 10.1134/S1024856016020020
- [14] Y. Zhang, Y. Xia, Y. Liang, A. Chen, S. Li, M. Jin. *Sensors*, **23** (22), 9163 (2023). DOI: 10.3390/s23229163
- [15] M. Sheik-Bahae, A.A. Said, T.H. Wei, D.J. Hagan, E.W. Van Stryland. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (4), 760 (1990). DOI: 10.1109/3.53394
- [16] C.B. Marble, J.E. Clary, G.D. Noojin, S.P.O'Connor, D.T. Nodurft, A.W. Wharmby, B.A. Rockwell, M.O. Scully, V.V. Yakovlev. *Opt. Lett.*, **43** (17), 4196 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.004196
- [17] V. Shcheslavskiy, G. Petrov, V.V. Yakovlev. *Appl. Phys. Lett.*, **82** (22), 3982 (2003). DOI: 10.1063/1.1579866
- [18] R. Goldstein, S.S. Penner. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **4** (3), 441 (1964). DOI: 10.1016/0022-4073(64)90005-6
- [19] Y.S. Gulina, J. Zhu, G.K. Krasin, E.V. Kuzmin, S.I. Kudryashov. *Photonics*, **10** (10), 1177 (2023). DOI: 10.3390/photonics10101177