

ГЕНЕРАЦИЯ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1032 нм В ВОЗДУХЕ

В.О. Гладышев¹

gladyshev@bmstu.ru

П.П. Николаев¹

ppn@bmstu.ru

А.В. Скрабатун^{1,2}

skrabatunav@bmstu.ru

Е.А. Шарандин¹

shar@bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ФИАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В открытых публикациях представлены результаты исследований по генерации третьей гармоники в воздухе от фемтосекундного лазерного излучения. Большинство исследований проведено с использованием титан-сапфирового лазера с центральной длиной волны излучения 800 нм. В настоящей работе впервые представлены результаты исследований генерации третьей гармоники в воздухе от лазерного излучения с длиной волны 1032 нм. Источником лазерного излучения выступал иттербиевый фемтосекундный лазер, который формировал импульсы длительностью примерно 250 фс с частотой следования 1 кГц. Средняя выходная мощность лазера достигала 1750 мВт. Максимальная пиковая интенсивность возбуждающего лазерного излучения составляла до 10 ТВт/см². При фокусировке лазерного излучения происходила его филаментация, которая сопровождалась генерацией излучения третьей гармоники на длине волны 344 нм. Исследованы спектральные, энергетические и пространственные характеристики генерируемого излучения третьей гармоники. Энергетические измерения проводились вплоть до пороговых мощностей излучения накачки, при которых начинали возникать конкурирующие нелинейные процессы в оптических элементах схемы экспериментальной установки. Максимальная средняя мощность излучения третьей гармоники составила 1,52 мВт при эффективно-

Ключевые слова

Третья гармоника, фемтосекундное излучение, филаментация, ультрафиолетовое излучение

сти преобразования в третью гармонику около 0,085 %. Профиль пучка в дальней зоне имел симметричный гауссов профиль с расходимостью излучения 0,11 мрад, что соответствует дифракционному качеству пучка ($M^2 \approx 1$)

Поступила 04.08.2021

Принята 31.08.2021

© Автор(ы), 2021

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 19-12-00242)

Введение. С начала века большое развитие получила такая область нелинейной оптики, как фемтосекундная лазерная филаментация в прозрачных средах [1]. Вследствие высокой интенсивности излучения, превышающей 10 ТВт/см^2 , лазерная филаментация сопровождается многочисленными нелинейными физическими процессами, среди которых фазовая самомодуляция, вынужденное комбинационное рассеяние и генерация высших нечетных гармоник. Среди них преобладает процесс генерации третьей гармоники (ТГ). Получена генерация ТГ в различных средах, но наиболее популярной средой для исследований является воздух [2–15]. Важной особенностью при такой генерации ТГ от ближнего инфракрасного излучения является то, что фемтосекундное излучение может быть сгенерировано в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Эффективность генерации ТГ в воздухе достигает 0,2 % [3, 5, 8].

Большинство публикаций посвящено исследованию и оптимизации генерации ТГ от фемтосекундного излучения титан-сапфирового лазера с центральной длиной волны 800 нм. В некоторых публикациях рассмотрены генерации ТГ от излучения на других длинах волн, например от параметрического генератора чирпированных импульсов с центральной длиной волны 1,54 мкм [8].

Цель настоящей работы — проанализировать результаты исследования генерации ТГ от фемтосекундного лазерного излучения с центральной длиной волны 1032 нм в воздухе, а именно результаты исследования спектральных, энергетических и пространственных характеристик генерируемого излучения ТГ.

Методика эксперимента. Для возбуждения нелинейных оптических процессов в воздухе в качестве источника излучения использован иттербиевый фемтосекундный лазер с центральной длиной волны излучения 1032 нм. Лазерная система построена на принципе усиления чирпированных лазерных импульсов, генерируемых иттербиевым волоконным лазером. Лазер формировал импульсы длительностью около 250 фс с частотой следования 1 кГц. Средняя выходная мощность лазера варьировалась в пределах 150...1750 мВт.

Схема экспериментальной установки для проведения спектральных, энергетических и пространственных измерений излучения ТГ в зависимости от интенсивности излучения накачки приведена на рис. 1. Излучение фемтосекундного лазера 1 фокусировалось линзой 2 с фокусным расстоянием 85 мм в воздухе. Максимальная пиковая интенсивность возбуждающего лазерного излучения в фокусе линзы составляла до 10 ТВт/см². В перетяжке пучка, наряду с другими нелинейными процессами, происходила генерация излучения ТГ с длиной волны 344 нм. Излучение, проходя через коллимирующую линзу 3, направлялось на систему светофильтров 4, которая ослабляла излучение накачки и отфильтровывала излучение ТГ. Далее с использованием светоделительной пластины 5 излучение подавалось на средства измерения устройства: профилометр лазерного пучка (или измеритель энергии) 6 и спектрометр 7, подключенный к компьютеру 8. Профилометр лазерного пучка с пространственным разрешением примерно 4,5 мкм использован для регистрации поперечного распределения пучка излучения как в ближней, так и в дальней зонах. Для регистрации профиля пучка в дальней зоне перед профилометром установлена дополнительная фокусирующая линза. Перед измерителем энергии размещена призма для пространственного разведения спектральных компонентов излучения накачки и ТГ. Спектрометр обеспечивал регистрацию спектра в широком диапазоне (190...1100 нм) с разрешением около 0,3 нм.

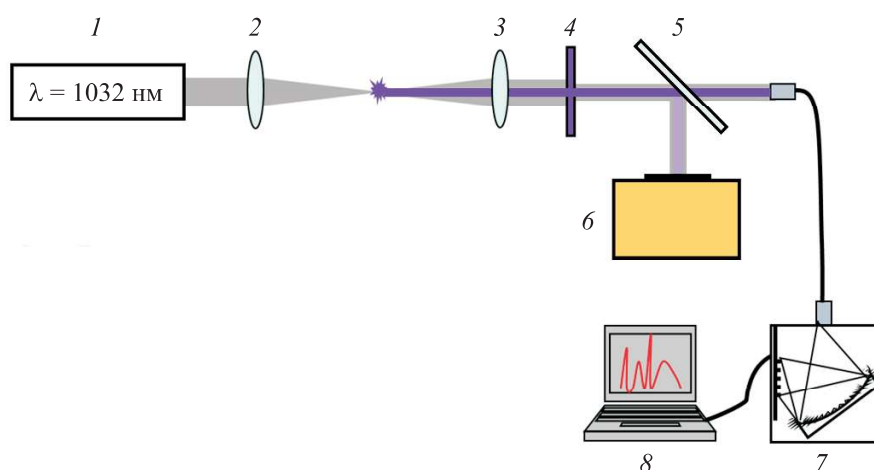


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для проведения спектральных, энергетических и пространственных измерений излучения ТГ

Результаты. Измерение спектральных характеристик излучения выполнено при средней мощности излучения накачки примерно 300 мВт. Спектр излучения фемтосекундного лазера после преобразования в излу-

чение ТГ приведен на рис. 2, а. На графике виден провал в спектре излучения в области длины волны 1032 нм, соответствующей спектральному максимуму излучения фемтосекундного лазера, на котором происходила генерация ТГ с длиной волны 344 нм (рис. 2, б). Ширина спектра излучения ТГ составляет около 2 нм.

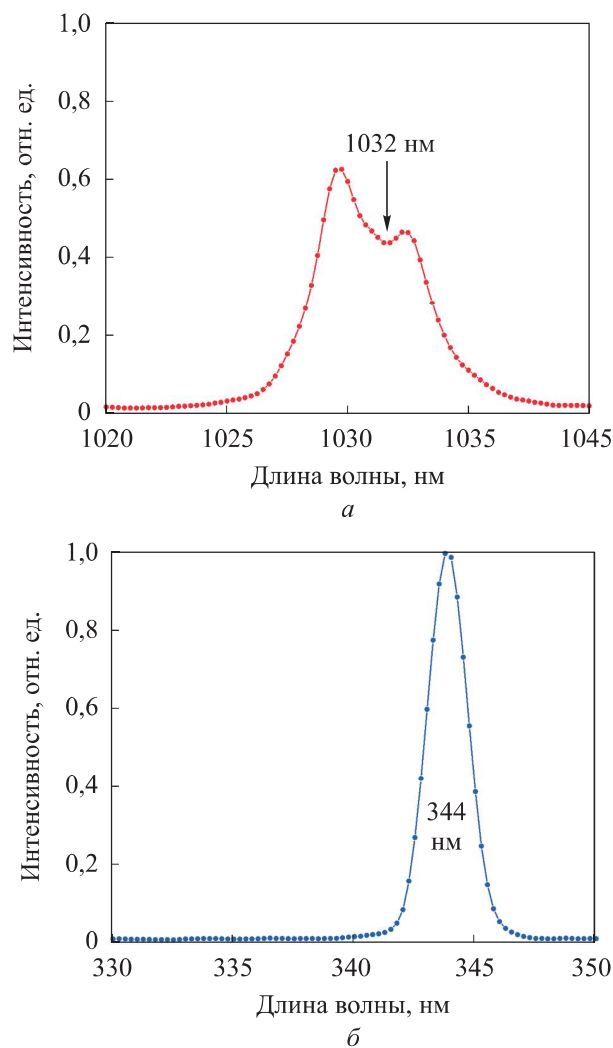


Рис. 2. Спектр излучения фемтосекундного лазера после преобразования в излучение ТГ (а) и спектр излучения ТГ (б)

Измеренные зависимости средней мощности излучения ТГ и эффективности преобразования в ТГ от средней мощности излучения накачки приведены на рис. 3. Во всем диапазоне изменения средней мощности излучения накачки 150...1750 мВт полученная зависимость имеет линейный характер. Максимальное значение средней мощности излучения накачки

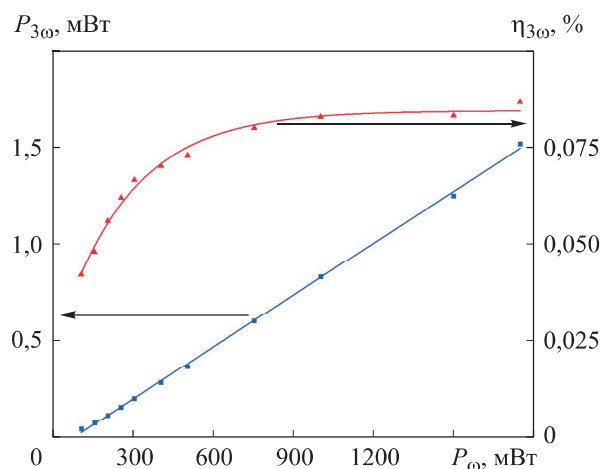


Рис. 3. Зависимости средней мощности излучения ТГ $P_{3\omega}$ и эффективности преобразования в ТГ $\eta_{3\omega}$ от средней мощности излучения накачки P_{ω}

ограничивалось возникающим вынужденным комбинационным рассеянием в линзах и призме, изготовленных из кварцевого стекла марки КУ. Максимальная средняя мощность излучения ТГ составляет 1,52 мВт при эффективности преобразования в ТГ около 0,085 %.

Измерение пространственных характеристик излучения ТГ проведено при средней мощности излучения накачки примерно 300 мВт. Поперечный профиль пучка излучения ТГ в ближней зоне показан на рис. 4, а. Размер пучка в ближней зоне составлял $4,5 \times 3,6$ мм. Пучок имел эллиптическую симметрию вследствие небольшой децентрировки фокусирующих и коллимирующих линз. Поперечный профиль пучка излучения ТГ в дальней зоне приведен на рис. 4, б. Профиль пучка в дальней зоне имеет симметричный гауссов профиль с расходимостью излучения 0,11 мрад, что соответствует дифракционному качеству пучка ($M^2 \approx 1$).

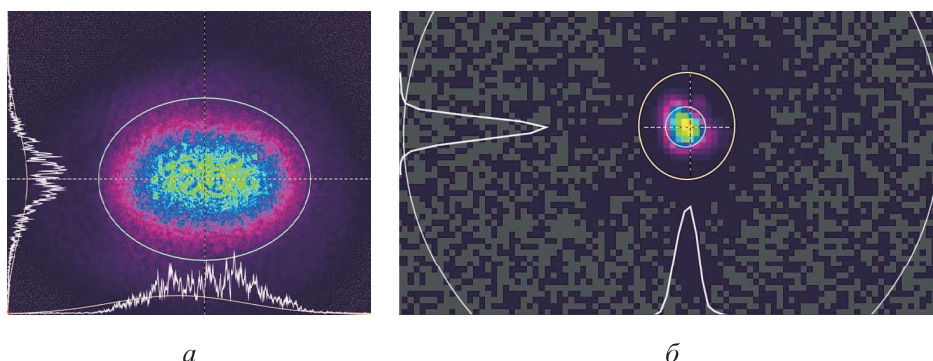


Рис. 4. Поперечные профили пучка излучения ТГ в ближней (а) и дальней (б) зонах

Заключение. Представлены результаты исследований генерации ТГ при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1032 нм и длительностью примерно 250 фс в воздухе. Генерация излучения ТГ происходила на длине волны 344 нм. Максимальная средняя мощность излучения ТГ составляет 1,52 мВт при эффективности преобразования в ТГ около 0,085 %. Пучок излучения ТГ имел симметричный гауссов профиль с расходимостью излучения 0,11 мрад и близкое к дифракционному качество ($M^2 \approx 1$). В дальнейшем предполагается провести оптимизацию схемы генерации ТГ для увеличения эффективности преобразования в ТГ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Couairon A., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media. *Phys. Rep.*, 2007, vol. 441, iss. 2-4, pp. 47–189.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.12.005>
- [2] Backus S., Peatross J., Zeek Z., et al. 16-fs, 1-mJ ultraviolet pulses generated by third-harmonic conversion in air. *Opt. Lett.*, 1996, vol. 21, iss. 9, pp. 665–667.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.21.000665>
- [3] Fedotov A.B., Koroteev N.I., Loy M.M.T., et al. Saturation of third-harmonic generation in a plasma of self-induced optical breakdown due to the self-action of 80-fs light pulses. *Opt. Commun.*, 1997, vol. 133, iss. 1-6, pp. 587–595.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(96\)00415-4](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(96)00415-4)
- [4] Peatross J., Backus S., Zhou J., et al. Spectral-spatial measurements of fundamental and third-harmonic light of intense 25-fs laser pulses focused in a gas cell. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, vol. 15, iss. 1, pp. 186–192. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.15.000186>
- [5] Aközbek N., Iwasaki A., Becker A., et al. Third-harmonic generation and self-channeling in air using high-power femtosecond laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 89, iss. 14, art. 143901. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.143901>
- [6] Alexeev I., Ting A.C., Gordon D.F., et al. Characterization of the third-harmonic radiation generated by intense laser self-formed filaments propagating in air. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, iss. 12, pp. 1503–1505. DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.30.001503>
- [7] Théberge F., Ting A.C., Gordon D.F., et al. Third harmonic beam profile generated in atmospheric air using femtosecond laser pulses. *Opt. Commun.*, 2005, vol. 245, iss. 1-6, pp. 399–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2004.10.020>
- [8] Naudeau M.L., Law R.J., Luk T.S., et al. Observation of nonlinear optical phenomena in air and fused silica using a 100 GW, 1.54 μm source. *Opt. Exp.*, 2006, vol. 14, iss. 13, pp. 6194–6200. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.14.006194>
- [9] Théberge F., Aközbek N., Liu W., et al. Conical emission and induced frequency shift of third-harmonic generation during ultrashort laser filamentation in air. *Opt. Commun.*, 2007, vol. 276, iss. 2, pp. 298–304.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.04.018>

[10] Xiong H., Xu H., Fu Y., et al. Spectral evolution of angularly resolved third-order harmonic generation by infrared femtosecond laser-pulse filamentation in air. *Phys. Rev. A*, 2008, vol. 77, iss. 4, art. 043802.

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.043802>

[11] Yang X., Wu J., Peng Y., et al. Noncollinear interaction of femtosecond filaments with enhanced third harmonic generation in air. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, iss. 11, art. 111103. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3227658>

[12] Suntsov S., Abdollahpour D., Papazoglou D.G., et al. Efficient third-harmonic generation through tailored IR femtosecond laser pulse filamentation in air. *Opt. Exp.*, 2009, vol. 17, iss. 5, pp. 3190–3195. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.17.003190>

[13] Suntsov S., Abdollahpour D., Papazoglou D.G., et al. Filamentation-induced third-harmonic generation in air via plasma-enhanced third-order susceptibility. *Phys. Rev. A*, 2010, vol. 81, iss. 3, art. 033817. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.033817>

[14] Liu Y., Durand M., Houard A., et al. Efficient generation of third harmonic radiation in air filaments: a revisit. *Opt. Commun.*, 2011, vol. 284, iss. 19, pp. 4706–4713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.05.050>

[15] Ganeev R.A., Suzuki M., Baba M., et al. Third-harmonic generation in air by use of femtosecond radiation in tight-focusing conditions. *Appl. Opt.*, 2006, vol. 45, iss. 4, pp. 748–755. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.45.000748>

Гладышев Владимир Олегович — д-р физ.-мат. наук, руководитель НУК ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Николаев Павел Петрович — канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер НУК ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Скрабатун Александр Владимирович — ассистент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); младший научный сотрудник отделения оптики ФИАН (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53).

Шарандин Евгений Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер НУК ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гладышев В.О., Николаев П.П., Скрабатун А.В. и др. Генерация третьей гармоники при фокусировке фемтосекундного излучения с длиной волны 1032 нм в воздухе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 6 (99), с. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-35-44>

THIRD HARMONIC GENERATION BY FOCUSING FEMTOSECOND RADIATION WITH A WAVELENGTH OF 1032 nm IN AIR

V.O. Gladyshev¹

P.P. Nikolaev¹

A.V. Skrabatun^{1,2}

E.A. Sharandin¹

gladyshev@bmstu.ru

ppn@bmstu.ru

skrabatunav@bmstu.ru

shar@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

²Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Abstract

In open publications the results of research on the third harmonic generation in the air by femtosecond laser radiation are presented. Most of the studies have been carried out using a titanium-sapphire laser with a central emission wavelength of 800 nm. This work presents for the first time the results of studies of the third harmonic generation in the air from laser radiation with a wavelength of 1032 nm. The source of the laser radiation was an ytterbium femtosecond laser which generated pulses with duration of ~ 250 fs and a repetition rate of 1 kHz. The average output power of the laser reached 1750 mW. Maximum peak intensity of excitation laser radiation was up to 10 TW/cm^2 . When focusing the laser radiation its filamentation took place and was accompanied by generation of the third harmonic radiation at wavelength of 344 nm. Spectral, energy and spatial characteristics of the generated third harmonic radiation were investigated. Energy measurements were carried out up to the threshold power of pump radiation at which the competing nonlinear processes in the circuit optical elements of the experimental setup began to occur. The maximum average third harmonic emission power was 1.52 mW with a third harmonic conversion efficiency of about 0.085 %. The far-field beam pattern had a symmetric Gaussian profile with a radiation divergence of 0.11 mrad which corresponds to the diffraction quality of the beam ($M^2 \approx 1$)

Keywords

Third harmonic, femtosecond radiation, filamentation, ultraviolet radiation

Received 04.08.2021

Accepted 31.08.2021

© Author(s), 2021

This work was funded by the Russian Science Foundation (grant no. 19-12-00242)

REFERENCES

- [1] Couairon A., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media. *Phys. Rep.*, 2007, vol. 441, iss. 2-4, pp. 47–189.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.12.005>
- [2] Backus S., Peatross J., Zeek Z., et al. 16-fs, 1-mJ ultraviolet pulses generated by third-harmonic conversion in air. *Opt. Lett.*, 1996, vol. 21, iss. 9, pp. 665–667.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.21.000665>
- [3] Fedotov A.B., Koroteev N.I., Loy M.M.T., et al. Saturation of third-harmonic generation in a plasma of self-induced optical breakdown due to the self-action of 80-fs light pulses. *Opt. Commun.*, 1997, vol. 133, iss. 1-6, pp. 587–595.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(96\)00415-4](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(96)00415-4)
- [4] Peatross J., Backus S., Zhou J., et al. Spectral-spatial measurements of fundamental and third-harmonic light of intense 25-fs laser pulses focused in a gas cell. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, vol. 15, iss. 1, pp. 186–192. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.15.000186>
- [5] Aközbek N., Iwasaki A., Becker A., et al. Third-harmonic generation and self-channeling in air using high-power femtosecond laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 89, iss. 14, art. 143901. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.143901>
- [6] Alexeev I., Ting A.C., Gordon D.F., et al. Characterization of the third-harmonic radiation generated by intense laser self-formed filaments propagating in air. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, iss. 12, pp. 1503–1505. DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.30.001503>
- [7] Théberge F., Ting A.C., Gordon D.F., et al. Third harmonic beam profile generated in atmospheric air using femtosecond laser pulses. *Opt. Commun.*, 2005, vol. 245, iss. 1-6, pp. 399–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2004.10.020>
- [8] Naudeau M.L., Law R.J., Luk T.S., et al. Observation of nonlinear optical phenomena in air and fused silica using a 100 GW, 1.54 μm source. *Opt. Exp.*, 2006, vol. 14, iss. 13, pp. 6194–6200. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.14.006194>
- [9] Théberge F., Aközbek N., Liu W., et al. Conical emission and induced frequency shift of third-harmonic generation during ultrashort laser filamentation in air. *Opt. Commun.*, 2007, vol. 276, iss. 2, pp. 298–304.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.04.018>
- [10] Xiong H., Xu H., Fu Y., et al. Spectral evolution of angularly resolved third-order harmonic generation by infrared femtosecond laser-pulse filamentation in air. *Phys. Rev. A*, 2008, vol. 77, iss. 4, art. 043802.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.043802>
- [11] Yang X., Wu J., Peng Y., et al. Noncollinear interaction of femtosecond filaments with enhanced third harmonic generation in air. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, iss. 11, art. 111103. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3227658>
- [12] Suntsov S., Abdollahpour D., Papazoglou D.G., et al. Efficient third-harmonic generation through tailored IR femtosecond laser pulse filamentation in air. *Opt. Exp.*, 2009, vol. 17, iss. 5, pp. 3190–3195. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.17.003190>

- [13] Suntsov S., Abdollahpour D., Papazoglou D.G., et al. Filamentation-induced third-harmonic generation in air *via* plasma-enhanced third-order susceptibility. *Phys. Rev. A*, 2010, vol. 81, iss. 3, art. 033817. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.033817>
- [14] Liu Y., Durand M., Houard A., et al. Efficient generation of third harmonic radiation in air filaments: a revisit. *Opt. Commun.*, 2011, vol. 284, iss. 19, pp. 4706–4713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.05.050>
- [15] Ganeev R.A., Suzuki M., Baba M., et al. Third-harmonic generation in air by use of femtosecond radiation in tight-focusing conditions. *Appl. Opt.*, 2006, vol. 45, iss. 4, pp. 748–755. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.45.000748>

Gladyshev V.O. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Head of Scientific Research Complex Fundamental Sciences, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Nikolaev P.P. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Lead Engineer, Scientific Research Complex Fundamental Sciences, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Skrabatun A.V. — Assistant, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Junior Researcher, Department of Optics, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences (Leninsky prospekt 53, Moscow, 119991 Russian Federation).

Sharandin E.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Lead Engineer, Scientific Research Complex Fundamental Sciences, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gladyshev V.O., Nikolaev P.P., Skrabatun A.V., et al. Third harmonic generation by focusing femtosecond radiation with a wavelength of 1032 nm in air. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 6 (99), pp. 35–44 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-35-44>