

УДК 535.3

ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИНЕЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА ПРИ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ YAG:Nd-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,34 МКМ

**А. О. Щукина, Ю. С. Куракина, М. Н. Ершков,
С. А. Солохин, С. Н. Сметанин**

В статье представлены результаты исследования генерации излучения в синей области спектра при последовательном нелинейно-оптическом преобразовании излучения YAG:Nd³⁺-лазера на длине волны 1,34 мкм.

Ключевые слова: синее излучение, YAG:Nd³⁺-лазер, генерация суммарной частоты.

LASING IN THE BLUE SPECTRAL RANGE BY THE NONLINEAR FREQUENCY CONVERSION OF A ND:YAG LASER RADIATION AT A WAVELENGTH OF 1,34 MM

**A. O. Schukina, Y. S. Kurakina, M. N. Ershkov,
S. A. Solokhin, S. N. Smetanin**

In the paper we are presenting the experimental results of the blue-laser generation by nonlinear frequency conversion of Nd³⁺:YAG laser on the 1,34 μm wavelength. Blue radiation at the wavelength of 0,446 μm was realized by sum-frequency oscillation under nonlinear mixing of radiation at wavelengths of the main (1,34 μm) and the second (0,67 μm) harmonics in DKDP crystal. It is shown that pulse energy of the blue radiation achieved 2 mJ with pulse duration of 20 ns and conversion efficiency of 2 %.

Keywords: blue radiation, YAG:Nd³⁺-laser, sum-frequency oscillation.

Исследование и разработка твердотельных лазеров с длиной волны в сине-голубой области спектра представляют большой интерес для решения различных практических задач лазерной техники. Это связано с тем, что излучение с длиной волны около 450 нм попадает в минимум поглощения морской воды [6] и может эффективно использоваться для подводной лазерной локации, батиметрии и связи [1–2], а также когерентной накачки твердотельных лазеров на ионах празеодима Pr³⁺ для получения генерации в видимой области [8].

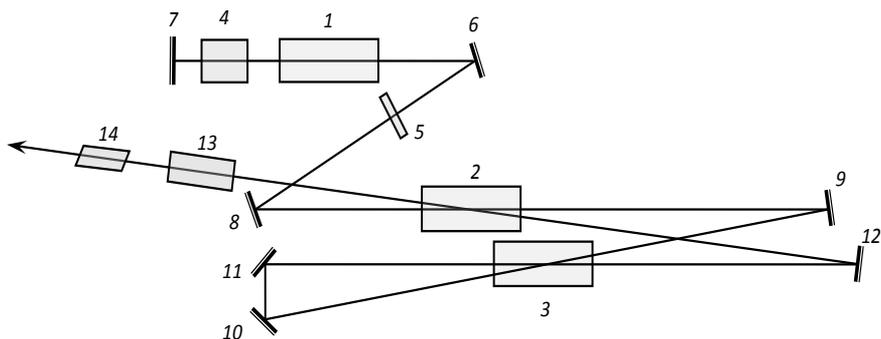
В настоящее время особый интерес представляют полностью твердотельные лазеры, которые позволяют реализовать генерацию синего излучения с высокой пиковой мощностью и малой длительностью отдельного импульса [3–5; 7], а также обладают достаточно высокой эффективностью, компактностью и надежностью. Применяется два основных метода для получения синего излучения: первый основан на методе генерации второй гармоники лазеров, работающих по квазитрехуровневой схеме, таких как Ti:Al₂O₃ [4] и Nd:GdVO₄ [3]; вто-

© Щукина А. О., Куракина Ю. С., Ершков М. Н., Солохин С. А., Сметанин С. Н., 2014

рой заключается в генерации суммарной частоты, в том числе третьей гармоники, лазеров, работающих по четырехуровневой схеме [5–7]. Данный метод представляется более перспективным, поскольку квазитрехуровневые лазеры менее эффективны, а в случае $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазера используется исключительно лазерная накачка (лазер на парах меди или вторая гармоника на длине волны 532 нм Nd:YAG-лазера).

В нашей работе представлены результаты генерации синего излучения при последовательном нелинейно-оптическом преобразовании YAG:Nd - лазерного излучения на длине волны неосновного перехода 1,34 мкм во вторую (0,67 мкм) и третью гармонику (0,446 мкм). Оптическая схема экспериментальной лазерной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из трех основных элементов: задающего генератора, усилительного каскада и нелинейно-оптического преобразователя частоты. В задающем генераторе использовался активный YAG:Nd - элемент размером $\varnothing 6,3 \times 100$ мм, установленный в квантроне К-301 В. В схеме использовалась ламповая накачка активных элементов (энергия накачки на квантрон – до 60 Дж, длительность импульсов накачки – 250 мкс, частота следования импульсов – 2 Гц). Для исключения развития генерации на длине волны 1,064 мкм применили V – образную схему резонатора, используя плоское спектрально-селективное зеркало 6 (коэффициент отражения на длине волны 1,34 мкм $R_{1,34} > 99\%$, коэффициент отражения на длине волны

1,064 мкм $R_{1,064} < 1\%$). Коэффициент отражения выходного 5 и концевого 7 зеркал резонатора составил соответственно 50 % и 100 % на длине волны 1,34 мкм, длина резонатора – около 30 см. Для модуляции добротности использовали пассивный лазерный затвор (ПЛЗ) 4 на кристалле YAG:V размером $\varnothing 6,3 \times 4$ мм с начальным пропусканием 59 %. Усилительный каскад был составлен из двух YAG:Nd - активных элементов (АЭ) 2 и 3 размером $\varnothing 6,3 \times 130$ мм. Торцы активных элементов и ПЛЗ были просветлены на длине волны 1,064 мкм. Для исключения возможной завязки генерации, торцы активных элементов усилителей разводились друг относительно друга на угол около 1° к оптической оси. Параметры накачки усилителей устанавливались аналогично параметрам задающего генератора. Система зеркал 8–12 с коэффициентами отражения $R_{1,34} > 99\%$ и $R_{1,064} < 1\%$ обеспечивала двухпроходную схему усиления излучения. Нелинейно-оптический преобразователь состоял из двух последовательно установленных кристаллов. Для генерации второй гармоники на длине волны 0,67 мкм мы использовали кристалл LiNbO_3 размером $8 \times 10 \times 20$ мм. Генерация суммарной частоты в синей спектральной области на длине волны 0,446 наблюдалась в кристалле DKDP диаметром ~ 20 мм и длиной 60 мм, торцы которого были срезаны под углом 18° к оси для оптимального выполнения фазового синхронизма. Торцы нелинейных кристаллов не имели просветляющих покрытий.



Р и с . 1. Оптическая схема лазерной установки: 1, 2, 3 – YAG:Nd-активные элементы; 4 – ПЛЗ ($T_0 = 59\%$); 5–7 – зеркала резонатора; 8–12 – система зеркал усилителя; 13 – LiNbO_3 , 14 – DKDP

В нашей работе были исследованы параметры лазерной генерации на следующих длинах волн: накачки (1,34 мкм), второй гармоники (0,67 мкм) и суммарной частоты (0,446 мкм). Энергетические характеристики излучения регистрировались с помощью измерителя мощности и энергии Ophir. Временные параметры измерялись лавинным фотодиодом ЛФД-2А, подключенным к осциллографу Agilent 350 MGz.

Без использования дополнительных элементов излучение на выходе задающего генератора являлось близким к одномодовому и вертикально поляризованным. Порог генерации наблюдался при энергии накачки, близкой к 28 Дж. При изменении энергии накачки до 50 Дж генерировался один импульс длительностью около 20 нс с энергией до 16 мДж. При максимальной энергии накачки (60 Дж) излучались два импульса аналогичной длительности и периодом следования порядка 30 мкс. Энергия излучения при этом достигла 20 мДж. Для ее увеличения была использована двухпроходная схема усиления. При энергии накачки, равной 50 Дж, на выходе усилителя максимальное значение энергии импульса достигло 94 мДж, что соответствовало общему усилению на длине волны 1,34 мкм около 6. Зависимости энергии излучения на выходе генератора и усилителя от энергии накачки на квантрон представлены на рис. 2.

Излучение с выхода усилителя направлялось в нелинейный кристалл LiNbO_3 для генерации второй гармоники на длине волны 0,67 мкм. С увеличением энергии накачки энергия красного излучения варьировалась от 8,5 до 20,5 мДж (рис. 3). Эффективность преобразования при этом оставалась практически постоянной и превышала 21 % (рис. 4). В результате нелинейного смешения излучений на длинах волн 1,34 и 0,67 мкм в кристалле DKDP генерация излучения сум-

марной частоты наблюдалась в синей области спектра. Максимальное значение энергии излучения на длине волны 0,446 мкм составило почти 2 мДж (рис. 3), что соответствует пиковой мощности импульса 100 кВт. Зависимость энергетической эффективности преобразования от энергии излучения на длине волны 1,34 мкм представлена на рис. 4. Из графика видно, что по мере перехода в область насыщения наблюдается последовательный рост эффективности преобразования. При этом его максимальное значение являлось недостаточно высоким (около 2 %). Это связано с существенным различием интенсивностей импульсов складываемых излучений основной и второй гармоник на длинах волн 1,34 и 0,67 мкм: 16,6 и 3,6 МВт/см² соответственно. Следовательно, для повышения энергетических параметров излучения на длине волны 0,446 мкм необходимо повысить интенсивность красного излучения посредством дополнительной фокусировки излучения, а также повышения эффективности преобразования во вторую гармонику с помощью внутрирезонаторной схемы преобразования.

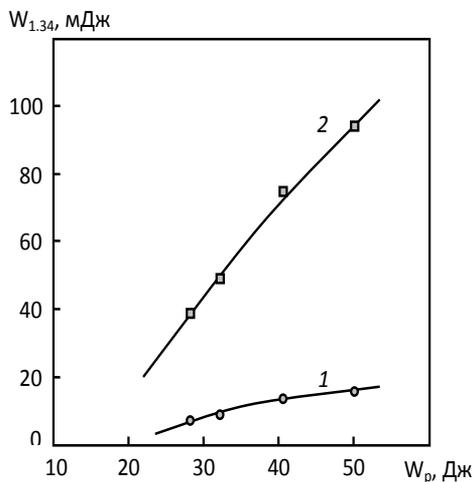


Рис. 2. Зависимость энергии излучения на длине волны 1,34 мкм от энергии накачки на квантрон: 1 – на выходе генератора, 2 – на выходе усилителя

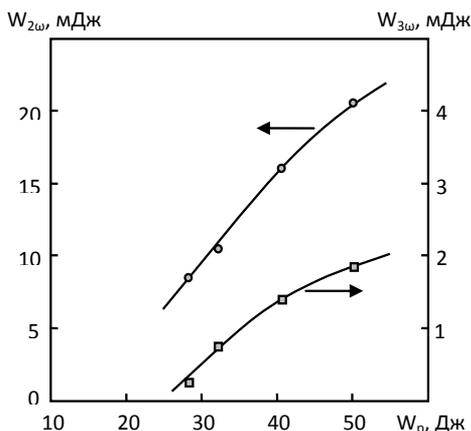


Рис. 3. Зависимость энергии излучения кратных гармоник от энергии накачки на квантрон

Таким образом, нами были проведены исследования генерации в синей области спектра при последовательном нелинейно-оптическом преобразовании YAG:Nd-лазерного излучения на длине волны, рав-

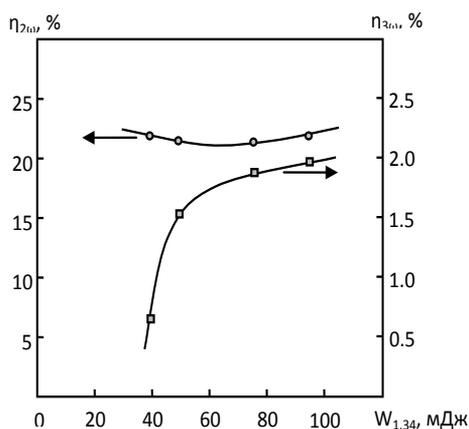


Рис. 4. Зависимость эффективности преобразования во вторую и третью гармоники от энергии импульса на длине волны 1,34 мкм

ной 1,34 мкм. В ходе исследований было установлено, что энергия излучения на длине волны 0,446 мкм достигает 2 мДж при длительности импульса 20 нс и эффективности преобразования 2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Борейшо, А. С.** Лазеры : Устройство и действие : учебное пособие / А. С. Борейшо. – Санкт-Петербург : Изд-во механ. ин-та, 1992. – 215 с.
2. **Карасик, В. Е.** Лазерные системы видения : учебное пособие / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 352 с.
3. Квазитрехуровневый Nd:GdVO₄-лазер на $\lambda = 456$ нм с диодной накачкой / Ю. Д. Заварцев [и др.] // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – № 7. – С. 651–654.
4. Перестраиваемый импульсно-периодический конвертор в синей области спектра с накачкой лазером на парах меди / М. А. Казарян [и др.] // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 9. – С. 773–774.
5. Generation of 7.6-W blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals / Peng Naibo [et al.] // OPTICS EXPRESS. – 2006. – Vol. 14. – № 14. – P. 6543–6549.
6. **Hale, G. M.** Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region / G. M. Hale, M. R. Querry // Appl. Opt. – 1973. – № 12. – P. 555–563.
7. Pulsed blue laser at 491 nm by Nonlinear Cavity Dumping / E. Heralut [et al.] // Optics Express. – 2008. – Vol. 16. – № 24. – P. 19419–19426.
8. Visible cw laser emission of GaN-diode pumped Pr:YAlO₃ crystal / M. Fibrich [et al.] // Appl. Phys. B. – 2009. – № 97. – P. 363–367.

Поступила 20.10.2013 г.

Об авторах:

Шукина Анна Олеговна, студент ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), anna_shukina92@mail.ru

Куракина Юлия Сергеевна, студент ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), anastill@gmail.com

Ершков Михаил Николаевич, доцент кафедры лазерной физики и технологии, ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), ershkovm@yandex.ru

Солохин Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики и технологии, ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), SolokhinS@gmail.com

Сметанин Сергей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики и технологии, ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), ssmetanin@bk.ru

Для цитирования: Генерация излучения в синей области спектра при нелинейно-оптическом преобразовании YAG:Nd-излучения на длине волны 1,34 мкм / А. О. Щукина [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 12–16.

REFERENCES

1. Boreysho A. S. Lazery: Ustrojstvo i dejstvie [Lasers: arrangement and operation], textbook. St. Petersburg, Mechanical Institute Publ., 1992, 215 p.
2. Karasik V. E., Orlov V. M. Lazernye sistemy videnija [Laser vision systems], textbook. Moscow, Bauman Moscow State Technical Publ., 2001, 352 p.
3. Zavartsev Yu. D., Zagumennyi A. I., Zerrouk F., Kutovoi S. A., Mikhailov V. A., Podreshetnicov V. V., Sirotkin A. A., Shcherbakov I. A. Nd:GdVO₄-lazer na $\lambda = 456$ nm s diodnoj nakachkoj [Diode-pumped quasi-three-level 456-nm Nd:GdVO₄ laser]. *Kvantovaja jelektronika – Quantum Electronics*. 2003, vol. 33, no. 7, pp. 651 – 654.
4. Kazaryan M. A., Kruzhalov S. V., Lyabin N. A., Mokrushin Yu. M., Parfenov V. A., Prokhorov A. M., Shakin O. V. Perestraivaemyj impul'sno-periodicheskiy konvertor v sinej oblasti spektra s nakachkoj lazerom na parah medi [Tunable pulse-periodic converter operating in the blue part of the spectrum and pumped by a copper vapour laser]. *Kvantovaja jelektronika – Quantum Electronics*. 1998, vol. 28, no. 9, pp.751 – 752.
5. Haibo Peng, Wei Hou, Yahui Chen, Dafu Cui, Zuyan Xu. Generation of 7.6-W blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals. *Optics Express*. 2006, vol. 14, no. 14, pp. 6543 – 6549.
6. Hale G. M., Querry M. R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region. *Applied Optics*. 1973, no. 12, pp. 555 – 563.
7. Heralut E., Lelek M., Balembois F., Georges P. Pulsed blue laser at 491 nm by Nonlinear Cavity Dumping. *Optics Express*. 2008, vol. 16, no. 24, pp. 19419 – 19426.
8. Haibo Peng, Wei Hou, Yahui Chen, Dafu Cui, Zuyan Xu. Generation of 7.6-W blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals. *Optics Express*. 2006, vol. 14, no. 14, pp. 6543 – 6549.

About the authors:

Schukina Anna Olegovna, student, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), anna_shukina92@mail.ru

Kurakina Yuliya Sergeyevna, student, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), anastill@gmail.com

Ershkov Mikhail Nikolayevich, Associate Professor (docent), Department of Laser Physics and Technology, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), ershkovm@yandex.ru

Solokhin Sergei Aleksandrovich, Associate Professor (docent), Department of Laser Physics and Technology chair, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, SolokhinS@gmail.com

Smetanin Sergei Nikolayevich, Associate Professor (docent), Department of Laser Physics and Technology, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, ssmetanin@bk.ru

For citation: Shchukina A. O., Kurakina Ju. S., Ershkov M. N., Solohin S. A., Smetanin S. N. Generacija Izluchenija V Sinej Oblasti Spektra Pri Nelinejno-Opticheskom Preobrazovanii Yag:Nd-Izluchenija Na Dline Volny 1,34 Mkm [Lasing In The Blue Spectral Range By The Nonlinear Frequency Conversion Of A Nd:Yag Laser Radiation At A Wavelength Of 1,34 Mm]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta – Mordovia University Bulletin*. 2014, no. 1, pp. 12 – 16.