DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.5.420.426

Исследование синхронизации мод лазера с диодной накачкой для генератора несущей в фотонных схемах

П. О. Якушенков, Е. А. Чешев, И. М. Тупицын
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В радиофотонике лазеры являются генераторами, аналогично электронным в радиоэлектронике. Для генерации несущей в фотонных информационных системах используются лазеры с синхронизацией мод. Статья посвящена результатам исследования диодной накачки для лазера с синхронизацией мод и их сравнению с результатами волоконной накачки.

Ключевые слова: диодная накачка, лазер с синхронизацией мод, высокочастотная последовательность импульсов, керровская линза, насыщающийся поглотитель

Статья поступила: 20.08.2021
Статья принята: 02.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

За последние 10 лет объем передаваемой информации вырос в 50 раз. Потребности в СВЧ-устройствах приема, передачи и обработки сигнала неуклонно возрастают. Быстродействие кремниевых интегральных схем замерло на отметке 3,5 ГГц. В прошедшее десятилетие увеличение производительности происходит преимущественно за счет реализации многопоточности вычислений, в целом ряде областей электроника приблизилась к физическому пределу. В XXI веке радиофотоника становится приоритетным направлением исследований. К настоящему времени разработана богатая элементная база интегральной оптоэлектроники, связанная с обработкой сигнала в оптоволоконных линиях связи: разветвители и сумматоры, спектральные, модовые и поля-

Investigation of Mode Locking of the Diode-Pumped Laser for the Generator of a Carrier Train in Photonic Circuits

P. O. Yakushenkov, E. A. Cheshev, I. M. Tupitsin
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

Lasers are used in radio photonics as a generator, like an electronic one in radio electronics. Mode-locked lasers are used to generate a carrier train in photonic circuits. The report is devoted to the study of the diode pumping for the mode-locked laser and its comparison with the results fiber pumping.

Key words: diode pumping, mode-locked laser, high frequency pulse train, Kerr lens, saturable absorber.

Received on: 20.08.2021
Accepted on: 02.09.2021

INTRODUCTION

Last 10 years the volume of the transmitted information has increased 50 times. The need of SHF devices of detection, transmission and processing the signal is increasing. The operating speed of the silicon integrated circuits has stopped at 3.5 GHz, and last 10 years increasing by realizing the parallel calculations, in a number of areas electronics has approached the physical limit. In the 21-st century the radio photonics becomes the priority direction of the development. Now, the large element base of the integrated optics has been developed, associated with signal processing in fiber-optic communication lines: splitters and combiners, spectral, mode and polarization filters, modulators, switches, deflectors. Laser in photonic integrated circuits is serving as a generator, as the signal-to-noise ratio is very important in photonic information systems, then, due to spontaneous emission and spikes, mode-locked lasers are used, generating ultra short powerful pulses with a high repetition rate.

ризационные фильтры, модуляторы, коммутаторы, дефлекторы и другие элементы.

Генератором сигналов в интегральных оптических схемах служит лазер. Поскольку для фотонных информационных систем очень важно отношение сигнал/шум, то из-за спонтанного излучения и пичков используют лазеры, работающие в режиме синхронизации мод и генерирующие ультракороткие мощные импульсы с высокой скважностью.

Существуют множество способов добиться синхронизации мод. При активной синхронизации мод используют внешний генератор (частота следования импульсов получается около 5 ГГц и длительность импульса 48 пс) [1, 2]. При пассивной синхронизации мод – KLM – метод (метод синхронизации мод излучения с помощью нелинейно-оптического эффекта Керра, *англ.* – Kerr Lens Mode-locking) (длительность импульса 82 фс и частота следования 4 ГГц) [3]; асыщающиеся поглотители (длительность импульса 20 пс и частота следования 10 ГГц) [4]; SESAM - Semiconductor saturable-absorber mirror (длительность импульса 3 пс и частота следования 160 ГГц) [5, 6]; Ti:sapphire (самая короткая длительность импульса 6 фс и частота следования 86 МГц) и MIXEL – Modelocked integrated external-cavity surface emitting laser (длительность импульса 500 фс и частота следования 100 ГГц). Все они предназначены для того, чтобы добиться создания одинаковой фазы у разных мод, появляющихся в резонаторе, то есть сфазировать моды генерации лазера.

Для интегральных фотонных схем генератором может служить полупроводниковый лазер. Можно выращивать гетероструктуру с полупроводниковым лазером и диодом накачки непосредственно на интегральной схеме. Тогда излучение от полупроводникового лазера будет сразу попадать в попадать в планарные волноводы, сформированные на подложке. Либо излучение можно заводить в схему из внешнего источника с лучшими характеристиками, но с большими потерями, например из волоконного лазера. Существуют очень качественные внешние волоконные источники лазерных импульсов длительностью порядка фемтосекунд и с частотами следования порядка сотен гигагерц. Также волоконная накачка позволяет сформировать хорошую керровскую линзу благодаря более оптимальному распределению интенсивности по площади пятна накачки. Моды могут синхронизовываться благодаря эффекту возникновения керровской линзы, появляющейся в кристалле в результате поглощения энергии накачки за счет формирования термолинзы.

Керровская линза моделирует тем самым показатель преломления, что заставляет моды распро-

There are many ways to achieve mode locking: active mode locking, uses an oscillator [1, 2], pulse repetition rate 5 GHz, pulse duration 48 ps; passive mode locking – Kerr Lens Mode-locking (KLM), mode-locking, using the nonlinear-optical Kerr effect, pulse duration 82 fs, pulse repetition rate 4 GHz [3]; saturable absorbers with pulse duration 20 ps, pulse repetition rate 10 GHz [4]; SESAM (Semiconductor saturable-absorber mirror) pulse duration 3 ps, pulse repetition rate 160 GHz [5] the shortest pulse duration 6 fs, pulse repetition rate 86 MHz (Ti: Sapphire) [6]; and MIXEL (Modelocked integrated external-cavity surface emitting laser) pulse duration 500 fs, pulse repetition rate 100 GHz. All of them are to achieve the same phase for different modes.

For integrated photonic circuits, such a laser can be a semiconductor one; it is possible to grow a heterostructure with a semiconductor laser with a pumping diode directly on an integrated circuit, the radiation from which will immediately go out into the waveguides on it; or the radiation can be fed into the circuit from an external source with better characteristics, for example, from a fiber laser, but with high losses. There are very high-quality external fiber sources of laser pulses with a duration of the order of femtoseconds and with repetition rates of the order of hundreds of gigahertz. Also, fiber pumping can form a better Kerr lens due to a more optimal intensity distribution along the spot radius. The modes can be synchronized by the Kerr lens effect, in which a thermal lens is formed due to absorption.

The Kerr lens is making the refractive index so, that the modes are in the same phase on the same part of the optical path, generating a higher intensity, that enhances the effect till the modes are synchronizing. This is a third-order nonlinear effect similar to self-focusing. The effective focal length of the Kerr lens can be roughly estimated as $f=r^2/4n_2I$, where r is the spot radius, n_2 is the nonlinear refractive index, I is the intensity, since this is a thermal lens, then the law is parabolic; it can be more accurately estimated as [7]:

$$T(z,t)=\frac{AI_0}{\lambda}\sqrt{4at}\cdot ierf\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right),$$

where A is the absorption capacity of the medium; I_0 is the intensity of the incident radiation; $a=\lambda/\rho c$ is the thermal conductivity, the probability integral function $ierf(x)=\int_x^\infty erf(y)dy$, the error function $erf=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^y \exp(-t^2)dt$. In this case, the radius of the mode spot can be calculated as $\sqrt{\lambda/\pi}\cdot(Lf)^{1/4}/(1-L/f)^{1/4}$, where $L=l/n$ is the effective length, l is the length of the nonlinear crystal. In one of the works [8], due to such self-focusing, the spot size varied from 0,2 to 0,05 mm.

страняться на одном и том же участке оптического пути в одной и той же фазе, генерируя большую интенсивность излучения. Интенсивность усиливает эффект KLM до тех пор, пока моды будут синхронизироваться. Это нелинейный эффект третьего порядка, аналогичный явлению самофокусировки. Эффективное фокусное расстояние керровской линзы можно примерно оценить как $f=r^2/4n_2I$, где r – радиус пятна, n_2 – нелинейный показатель преломления I – интенсивность. Поскольку это термолинза, то распределение температуры подчиняется параболическому закону, более точно его можно оценить как [7]:

$$T(z,t)=\frac{AI_0}{\lambda}\sqrt{4at}\cdot ierf\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right),$$

где A – поглощательная способность среды; I_0 – интенсивность падающего излучения; $a=\lambda/\rho c$ – температуропроводность, функция интеграла вероятности $ierf(x)=\int_x^\infty erf(y)dy$, функция ошибок $erf=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^y \exp(-t^2)dt$. При этом радиус пятна моды может быть вычислен, как $\sqrt{\lambda/\pi}\cdot(Lf)^{1/4}/(1-L/f)^{1/4}$, где $L=l/n$ – эффективная длина, l – длина нелинейного кристалла. В одной из работ [8] благодаря такой самофокусировке размер пятна изменялся от 0,2 до 0,05 мм.

Оптические свойства твердотельного лазера в процессе генерации излучения значительно изменяются из-за появления термооптических неоднородностей при неравномерном нагреве в процессе накачки. Появление термолинзы можно моделировать линзой, оптическая сила которой зависит от мощности накачки.

В связи с этим целью данной работы стало исследование генерации высокочастотной (ГГц) последовательности импульсов на нелинейном кристалле $Nd:YVO_4$ с диодной накачкой.

ДИОДНАЯ НАКАЧКА

Для получения высокочастотной последовательности импульсов на нелинейном кристалле $Nd:YVO_4$ с диодной накачкой использовалась схема, представленная на рис. 1.

Питание лазерного диода шло от блока управления, который также поддерживал заданную температуру с помощью термодатчика и элемента Пельтье. На диод наклеивалась цилиндрическая линза *Л1*, а линза *Л2* фокусировала накачку на активный элемент. Плоское зеркало *31* было расположено вплотную к активному элементу; сферическое зеркало *32* имело радиус кривизны 300 мм и отражение 95%;

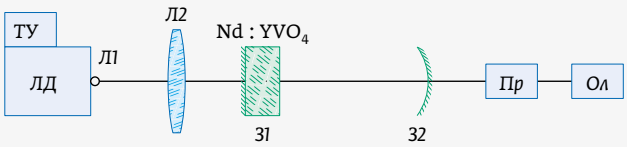

Рис. 1. *Измерительная установка: ТУ – термоуправление, ЛД – лазерный диод, Л1 - цилиндрическая линза и Л2 – линза, 31 – глухое зеркало на активном элементе, 32 – сферическое зеркало радиусом 300 мм и отражением 95%, длина резонатора L=15 см, Nd:YVO4 – активный элемент длины 0,5 мм и с уровнем легирования 0,5%, Пр – приемник, Ол – осциллограф*

Fig.1. *ТУ – thermal control, ЛД – laser diode, Л1 – cylindrical lens and Л2 – lens, 31 – deaf mirror on the active element, 32 – spherical mirror with a radius of 300 mm and 95% reflection, cavity length L = 15 cm, Nd:YVO4 – active element of length 0,5 mm and with a doping level of 0,5%, Пр – receiver, Ол – oscilloscope*

The optical properties of the solid-state laser in the process of generating radiation are significantly changed due to the appearance of thermopotic inhomogeneities during uneven heating during the pumping process. The appearance of the thermo lens can be simulated by a lens, the optical force of which depends on the pump power.

So, the purpose of this work was to study the generation of a high-frequency (GHz) pulse train on a diode-pumped $Nd:YVO_4$ nonlinear crystal.

DIODE PUMPING

To obtain a high-frequency pulse train on a diode-pumped nonlinear $Nd:YVO_4$ crystal, the scheme on fig. 1 was used.

The laser diode was powered from a control unit, which also maintained a given temperature using a temperature sensor and a Peltier element, a cylindrical lens *Л1* was glued to the diode, and lens *Л2* focused the pump on the active element. Mirror *31* was flat and located close up to the active element, mirror *32* was spherical with a curvature radius of 300 mm and 95% reflection, the cavity length was 15 cm, and the frequency corresponding to its round trip time was 1 GHz. The $Nd:YVO_4$ active element had a length of 0,5 mm and a doping level of 0,5%, the signal from the receiver was analyzed on an oscilloscope, a laser pointer was used to align the elements along the optical axis, and the spectrum of the output radiation of the diode and laser was analyzed separately using a spectrometer. The threshold current of the diode was 1.7–1.8 A, for pumping the active element, the spectrum of the diode was tuned to the maximum absorption of

длина резонатора составила 15 см; частота, соответствующая времени обхода резонатора, 1 ГГц. Активный элемент $Nd:YVO_4$ имел длину 0,5 мм и уровень легирования 0,5%. Сигнал с приемника анализировался на осциллографе. Для выставления элементов по оптической оси использовалась лазерная указка, а также отдельно анализировался спектр выходного излучения диода и лазера с помощью спектрометра. Пороговый ток диода составлял 1,7–1,8 А. Для накачки активного элемента спектр диода настраивался на максимальное поглощение элементом – на длину волны 808 нм, для этого температура диода поддерживалась на уровне 28 °С.

Радиус пятна моды рассчитывался по формулам для Гаусова пучка. При выбранном для эксперимента резонаторе он составлял около 200 мкм (рис. 2). Накачка на активный элемент фокусировалась в пятно диаметром около 150 мкм (из опыта известно, что для эффективной перекачки энергии в моду излучения фокусировать излучение накачки лучше в пятно, чуть меньшего радиуса моды, чтоб не создавать лишних термооптических эффектов). Длина волны генерации излучения – 1064 нм. На осциллографе (рис. 3) наблюдалась высокочастотная последовательность импульсов с частотой 1 ГГц, соответствующая времени обхода резонатора. На рис. 4 наблюдались межмодовые биения, соответствующие частичной синхронизации мод. Выполнив преобразование Фурье такого сигнала, мы заметили, что часть мод оказалась сфазиро-

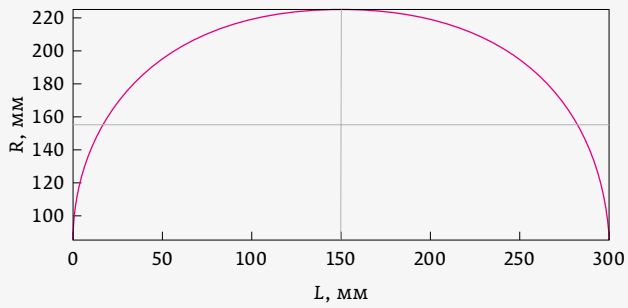

Рис. 2. *Радиус пучка в зависимости от длины резонатора*

Fig. 2. *Beam radius versus cavity length.*

the element – 808 nm, for this the diode temperature was maintained at 28 °C.

The mode spot radius was calculated using the formulas for a Gaussian beam, with such resonator as in the experiment, it was about 200 μm (Fig. 2), pumping to the active element was focused into a spot of about 150 μm (from experience, it is known that for efficient energy transfer to the radiation mode, it is better to focus the pumping into a spot slightly less than the mode radius, so as not to create unnecessary thermopotic effects). The laser emission spectrum was 1064 nm. On the oscilloscope (Fig. 3) we observed a high-frequency pulse train with a 1 GHz frequency, corresponding to the cavity round-trip time. Fig. 4

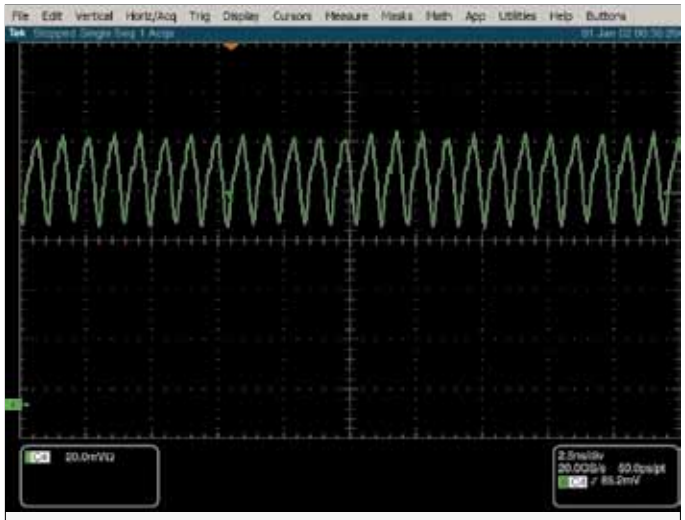

Рис. 3. *Генерация высокочастотной последовательности импульсов 1 ГГц, соответствующей времени обхода резонатора.*

Fig. 3. *Generation of a 1 GHz high frequency pulse train corresponding to the cavity round trip time.*

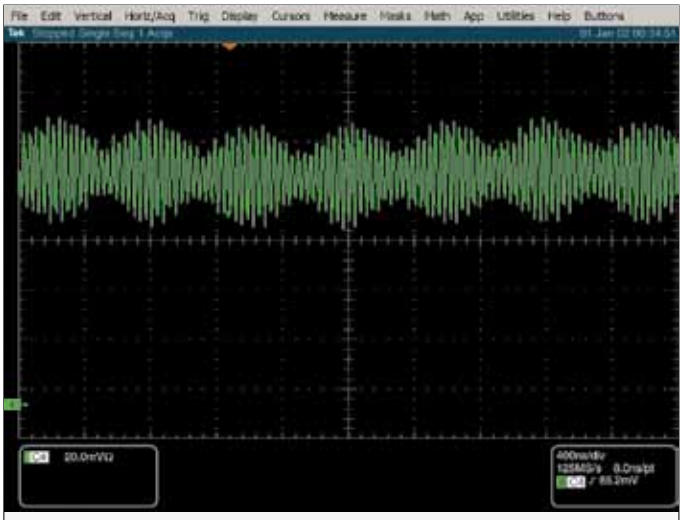

Рис. 4. *Межмодовые биения, соответствующие частичной синхронизации мод*

Fig. 4. *Intermode beats corresponding to partial mode locking*

ванной, в отличие от сигнала без синхронизованных мод с разными случайными фазами, где мы наблюдали бы равномерный белый шум. Далее мы варьировали длину резонатора в области устойчивости от 15 см до 30 см (для расчета области устойчивости резонатора использовалась программа reZonator).

При длине резонатора 22 см (ближе к рассчитанной границе области устойчивости) также наблюдалась частичная синхронизация мод (рис. 5). Частота следования импульсов соответствовала времени обхода резонатора – около 800 МГц. При такой длине резонатора полной синхронизации мод достигнуть не удалось даже при разных уровнях мощности накачки, потому что не удается синхронизовать нестабильные моды, как и в случае с резонатором длиной 15 см.

На длине резонатора около 17 см наблюдалась почти полная синхронизация мод при мощности накачки 2,7 А (рис. 6), а при мощности накачки 3 А была получена полная синхронизация (рис. 7); при накачке 3,5 А опять наблюдалась частичная синхронизация (рис. 8) в связи с появлением новых мод, которые не синхронизируются. Для того чтобы добиться большей синхронизации мод планировалось увеличивать мощность накачки. По нашему мнению, это позволило бы усилить самофокусировку и эффект образования керровской линзы. А для того чтобы эффект продолжал усиливаться с появлением новых мод, планировалось взять кристалл с меньшим легированием (0,2%), и соответственно

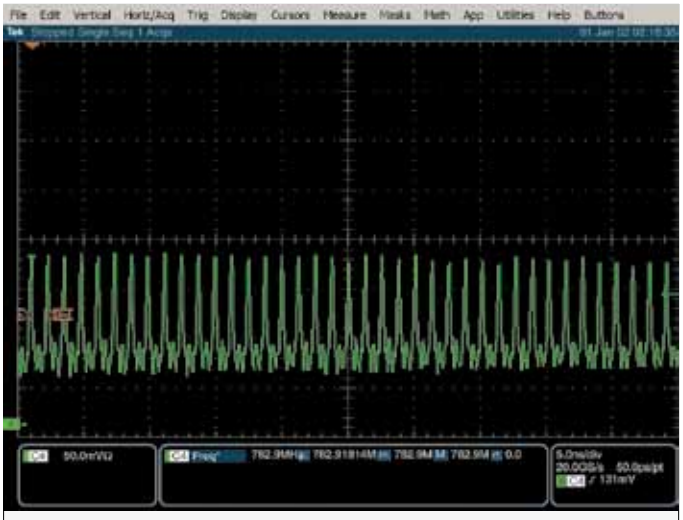

Рис. 5. *Частичная синхронизация мод на длине резонатора 22 см*

Fig. 5. *Partial mode locking at 22 cm cavity length*

shows intermode beats corresponding to partial mode locking – by making the Fourier transform of such signal, we will notice, that some of the modes are in the same phase, in contrast to a signal without synchronized modes with different random phases, where we would observe uniform white noise. Next, the length of the resonator in the stability region was changed from 15 cm to 30 cm; the program 'reZonator' was used to calculate the stability region of the resonator.

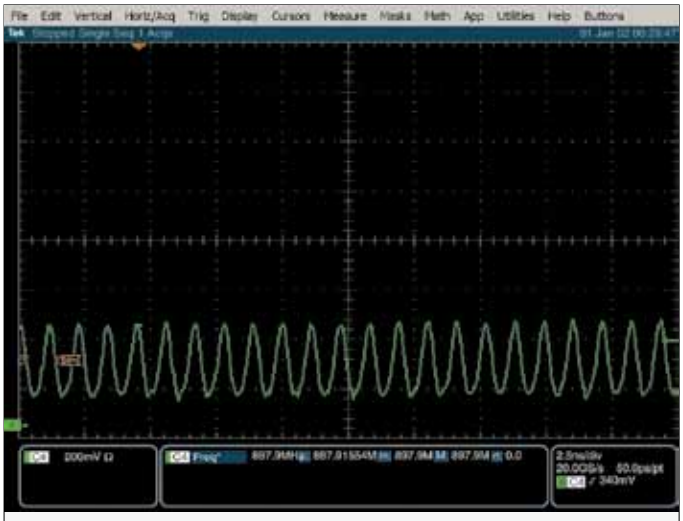

Рис. 6. *Почти полная синхронизация мод, при мощности накачки 2,7 А на длине резонатора 17 см*

Fig. 6. *Almost full mode locking at the pump power of 2,7 A at 17 cm cavity length*

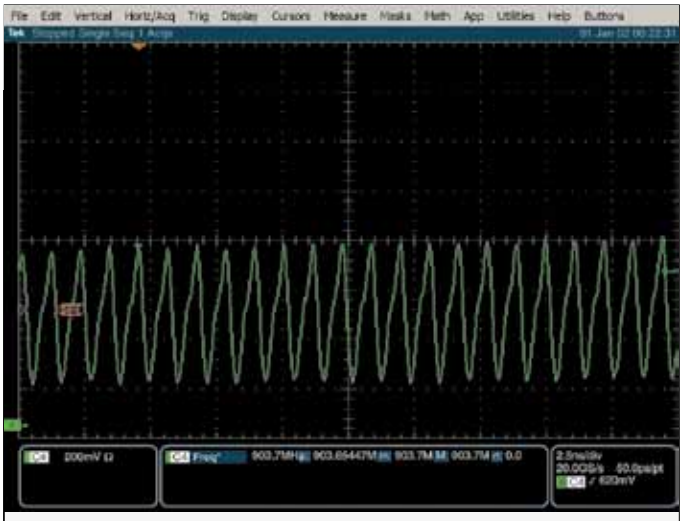

Рис. 7. *Полная синхронизация мод, при мощности накачки 3 А на длине резонатора 17 см*

Fig. 7. *Full mode locking at the pump power of 3 A at 17 cm cavity length*

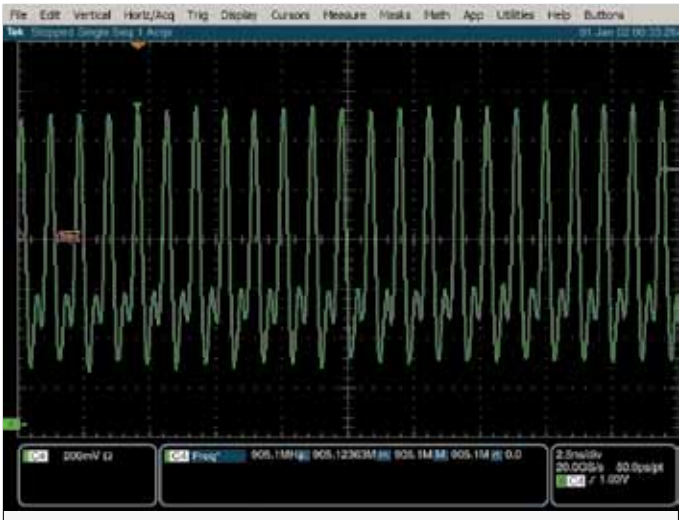

Рис. 8. *Частичная синхронизация мод, при мощности накачки 3,5 А на длине резонатора 17 см*
Fig. 8. *Partial mode locking, at the pump power of 3,5 A at 17 cm cavity length*

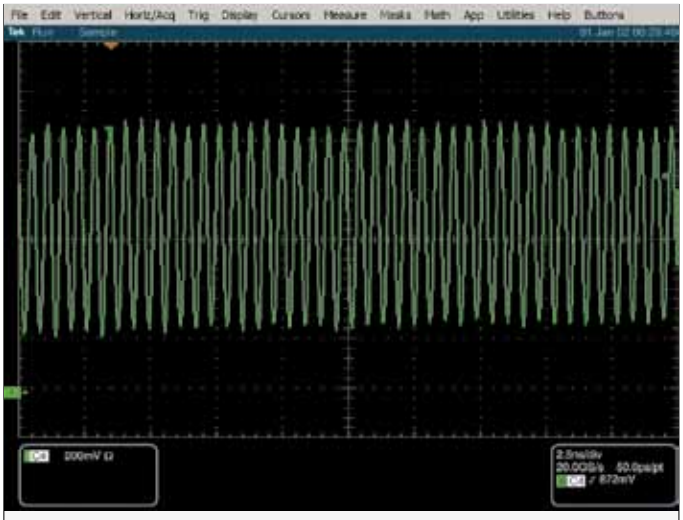

Рис. 9. *Полностью синхронизованные моды со стеклом «Конашима»*
Fig. 9. *Full mode locking with Konashima glass*

большим нелинейным показателем преломления. Оптимальный уровень легирования зависит от конфигурации резонатора, диаметра пятна накачки и не только.

Взяв кристалл с меньшей концентрацией примеси (обеспечив бóльший нелинейный показатель преломления), мы получали меньше генерируемых мод, потому что при этом порог генерации излучения возрастал. В опыте все генерируемые моды удавалось полностью синхронизовать. Однако, когда все моды удавалось синхронизировать, процесс самофокусировки заканчивался, поскольку в отличие от использования кристалла с более высоким легированием, в нашем случае новых мод не появляется. Мы наблюдали появляющиеся и сразу же полностью исчезающие синхронизированные моды.

В связи с таким результатом мы решили для лучшей самофокусировки поставить насыщающийся поглотитель (рис. 9). В этом случае мы стали свидетелями появления стабильных полностью синхронизованных мод – наблюдалась стабильная самофокусировка. В статье «Compact efficient multi-GHz Kerr-lens modelocked diode-pumped Nd : YVO_4 laser» [8] авторы описали эксперимент с получением синхронизации мод при использовании волоконной накачки.

На фотонной интегральной схеме диодную накачку можно осуществить непосредственно на схеме, однако волоконная накачка с более высокими потерями может сформировать более хорошую керровскую линзу благодаря более оптимальному

At 22 cm cavity length, closer to the calculated boundary of the stability region, we also observed partial mode locking (Fig. 5). The pulse repetition rate corresponded to the cavity round-trip time – about 800 MHz. With such cavity length, it was not possible to achieve complete mode locking at different pump power levels, because unstable modes cannot be synchronized, as in the case of 15 cm cavity.

At 17 cm cavity length, almost complete mode locking was observed at a pump power of 2.7 A, and at a pumping of 3 A, there was complete synchronization; at a pumping of 3.5 A, a partial synchronization was again observed with the appearance of new modes that were not synchronized. We planned to increase the pump power for better

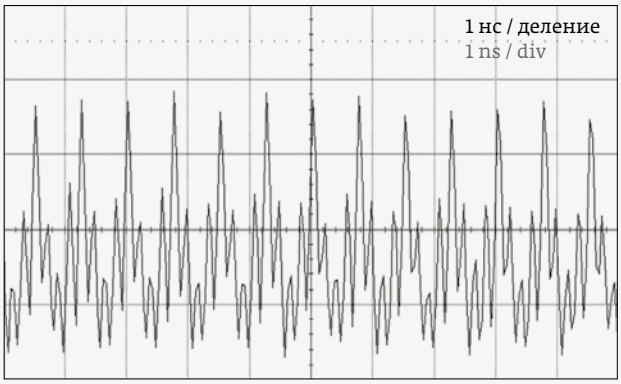

Рис. 10. *Синхронизация мод с волоконной накачкой*
Fig. 10. *Fiber-pumped mode locking*

распределению интенсивности по площади лазерного пятна накачки. Однако авторы отмечают, что при волоконной накачке синхронизация мод и генерация стабильных высокочастотных импульсов была гораздо хуже, чем при использовании диодной накачки и насыщающегося поглотителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнивая результаты экспериментов с использованием диодной и волоконной накачки, мы приходим к выводу, что основную роль для синхронизации мод и генерации стабильных высокочастотных импульсов играет насыщающийся поглотитель, так что разница в керровской линзе при диодной и волоконной накачке не видна.

REFERENCES

1. **Letohov B. C., Morozov B. H.** Generaciya ul'trakorotkih impul'sov kogerentnogo sveta. *ZHurnal tekhnicheskoj fiziki (JTP)*. 1967; 52(5):1296–1302.
   Летохов В. С., Морозов В. Н. Генерация ультракоротких импульсов когерентного света. Журнал технической физики. 1967; 52(5):1296–1302.
2. **Longhi S., Sorbello G., Taccheo S., Laporta P.** 5-GHz repetition-rate dual-wavelength pulse-train generation from an intracavity frequency-modulated Er-Yb: glass laser. *Optics Letters*. October 1, 1998; 23(19).
3. **Leburn C. G., Lagatsky A. A., Brown C. T. A., Sibbett W.** Femtosecond Cr_4^{+}: YAG laser with a 4 GHz pulse repetition rate. *Electronics Letters*. July 2004;40(13):805–807.
4. **Ponarina M. V., Ohrimchuk A. G., Rybin M. G., Obrazcov P. A.** GGc chastota povtoreniya pikosekundnyh impul'sov v volnovodnom Nd : YAG lazere. *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN*. 2019;3:35–40.
   Понарина М. В., Охримчук А. Г., Рыбин М. Г., Образцов П. А. ГГц частота повторения пикосекундных импульсов в волноводном Nd : YAG лазере. Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019;3:35–40.
5. **Krainer L., Paschotta R., Lecomte S., Moser M., Weingarten K. J., Keller U.** Compact Nd: YVO_4 Lasers With Pulse Repetition Rates up to 160 GHz. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. October 2002;38(10):1331–1338.
6. **Jung I. D., Kärtner F. X., Matuschek N., Sutter D. H., Morier-Genoud F., Zhang G., Keller U.** Self-starting 6.5-fs pulses from a Ti: sapphire laser. *Optics Letters*. 1997; 22:1009–1011.
7. **Klimkov YU.M., Majorov V. S., Horoshev M. V.** *Vzaimodejstvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom: uchebnoe posobie*. – M.: MIIGAiK, 2014.108 p.
   Климков Ю. М., Майоров В. С., Хорошев М. В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2014. 108 с.
8. **Liang H. C., Ross C. C. Chen, Huang Y. J., Su K. W., Chen Y. F.** Compact efficient multi-GHz Kerr-lens modelocked diode-pumped Nd : YVO_4 laser. Optics Express. Dec. 2008;16(25): 21149–21154.

АВТОРЫ

Якушенков П. О., м. н. с., Лаборатория фотоники молекул, ФИАН им. П. Н. Лебедев, yakushenkovpo@lebedev.ru, Москва, Россия.
AuthorID: 934131
ORCID: 0000-0002-6171-3720

Чешев Е. А., к. ф.- м. н., в. н. с., Лаборатория полупроводниковых лазеров, ФИАН им. П. Н. Лебедев, cheshevea@lebedev.ru, Москва, Россия.
Researcher ID: N-1588-2015
AuthorID: 160546

Тупицын И. М., м. н. с., Лаборатория полупроводниковых лазеров, ФИАН им. П. Н. Лебедев, tupitsynim@lebedev.ru, Москва, Россия.
ResearcherID: R-5257-2017

ВКЛАД АВТОРОВ

Эксперименты были проделаны в рамках диссертационной работы Якушенкова П. О. при руководстве Чешева Е. А. и помощи в экспериментальной части Тупицына И. М.

synchronization, we thought, that it would enhance self-focusing and the Kerr lens effect. To continue increasing the effect with the appearance of new modes, it was planned to take a crystal with a lower doping (0,2%) and accordingly a higher nonlinear refractive index. The optimal doping level depends on the cavity configuration, the pump spot and more.

Taking a crystal with concentration less, making the nonlinear refractive index higher, we had fewer generated modes, because threshold increased. During experiment all generated modes were completely synchronized, but when all modes are synchronized, the self-focusing process ends, since no new modes appear in this case, in contrast to the case with a more doped crystal. We observed appearing and immediately disappearing fully synchronized modes.

Having such results, we decided to use saturable absorber for better self-focusing (Fig. 9), then we began to observe stable fully synchronized modes – self-focusing was stable. In the article "Compact efficient multi-GHz Kerr-lens modelocked diode-pumped Nd : YVO_4 laser" [8], the authors wrote about the experiment in which they observed mode locking using fiber-pumping.

On a photonic integrated circuit, diode pumping can be performed directly in the circuit, however, fiber pumping with higher losses can form a better Kerr lens due to better intensity distribution over the pumping spot radius. However, the authors note, that with fiber pumping, mode locking and generation of stable high-frequency pulses were much worse than with diode pumping and saturable absorber.

CONCLUSION

Comparing diode and fiber pumping, we come to the conclusion, that the main for mode locking and generation of stable high-frequency pulses is a saturable absorber, so that the difference in the Kerr lens under diode and fiber pumping is not visible.

ABOUT AUTHORS

Yakushenkov P. O., junior researcher, Laboratory of Photonics of Molecules, Lebedev Physical Institute P. N. Lebedev, yakushenkovpo@lebedev.ru, Moscow, Russia.
AuthorID: 934131

Cheshev E. A., Cand.of Sc. (Phys.&Math), Leading Researcher, Laboratory of Semiconductor Lasers, Lebedev Physical Institute P. N. Lebedev, cheshevea@lebedev.ru, Moscow, Russia.
Researcher ID: N-1588-2015
AuthorID: 160546

Tupitsyn I. M., junior researcher, Laboratory of Semiconductor Lasers, Lebedev Physical Institute P. N. Lebedev, tupitsynim@lebedev.ru, Moscow, Russia.ResearcherID: R-5257-2017

CONTRIBUTION OF AUTHORS

The experiments were done within the framework of the dissertation of Yakushenkov P. O. under the leadership of Czech E. A. and assistance in the experimental part of Tupitsyn I. M.

Международный форум по аддитивным технологиям и 3D-решениям

В рамках выставки «ТЕХНОФОРУМ-2021» в Москве в ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне с 18 по 21 октября 2021 года пройдет Международный форум по аддитивным технологиям и 3D-решениям.

Главная цель форума – объединить всех участников рынка аддитивных технологий (АТ): производителей, интеграторов, пользователей, профессионалов и экспертов, ученых и научных сотрудников, профессоров и преподавателей на единой независимой площадке при поддержке профильных федеральных органов власти, министерств и ассоциаций. Форум предоставит для профессионалов АТ-отрасли России и мира удобный формат для продвижения своих решений, технологий, сервисов, материалов, образовательных программ и научных разработок. Участие в форуме – это прекрасная возможность общения друг с другом и обсуждения актуальных тем по АТ и 3D-решениям.

Спикеры-эксперты в области аддитивных технологий из России и других стран мира поделятся своим опытом и выступят с докладами на тему: внедрение АТ и 3D-решений в отраслях медицины, ювелирной промышленности, машиностроения, литья и метрологии. Они расскажут о самых последних событиях и новинках на рынке АТ и 3D-решений. Участники форума получат возможность обсудить актуальные вопросы, волнующие всех игроков рынка.

Участие в форуме «ИНДУСТРИЯ-3D» предполагает гибридный формат: офлайн – в павильоне № 1 ЦВК «Экспоцентр» и онлайн-трансляция в Интернете на портале web.Industry3D.ru с возможностью просмотра в прямом эфире. После окончания 3D-форума все выступления будут архивированы и доступны к общему просмотру. Участники форума в ходе трансляции сумеют общаться друг с другом и участвовать в дискуссии. В прямом эфире можно будет задать вопросы спикерам.

Регистрация участия доступна до 5 октября 2021 года на сайте: https://web.industry3d.ru.

https://web.industry3d.ru