

УДК 621.373.826; 621.375.7

РЕЖИМЫ ИМПУЛЬСНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В Nd:YAG-ЛАЗЕРЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СХЕМАМИ РЕЗОНАТОРОВ

© А. В. Грибанов, Д. В. Яковин, М. Д. Яковин

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: gribanov84@mail.ru*

Рассмотрены результаты исследования различных схем реализации одновременной синхронизации мод и модуляции добротности резонатора с помощью сферического зеркала и акустооптического модулятора (метод СЗАОМ) бегущей волны в Nd:YAG-лазере. Представлены временные и энергетические выходные характеристики диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с СЗАОМ, а также полученного мощного пикосекундного перестраиваемого излучения в области ~ 620 нм на основе каскадного преобразования частоты суперлюминесцентного параметрического генератора с накачкой таким лазером.

Ключевые слова: Nd:YAG-лазер, диодная накачка, модуляция добротности, синхронизация мод, параметрическая суперлюминесценция.

DOI: 10.15372/AUT20200313

Введение. Высокая пиковая мощность видимого излучения от твердотельного лазера с непрерывной диодной накачкой актуальна для различных областей применения: точной абляционной обработки материалов, получения коротковолнового УФ-излучения на многозарядных ионах и на этой основе сверхкоротких длительностей импульсов, нелинейной оптики, спектроскопии комбинационного рассеяния, медицины, накачки параметрических генераторов (в том числе безрезонаторных) и других.

Обычно устойчивый режим генерации с модуляцией добротности (Q-switch) и синхронизацией мод (QML) реализуется с помощью двух акустооптических модуляторов (АОМ) в резонаторе [1]. Режим QML может быть получен и на основе поглощающих элементов в резонаторе [2–5], однако в этом случае частота следования импульсов зависит от уровня накачки, а достигаемые пиковые мощности оказываются невысокими. Для улучшения характеристик лазера иногда используется комбинация АОМ с поглощающими элементами [6]. В работе [7] удалось организовать режим QML с помощью одного электрооптического модулятора, который был установлен в одном из плеч управляемого интерферометра Майкельсона, применяемого в качестве выходного зеркала резонатора.

В работах [8–13] предложен метод, позволяющий с помощью АОМ бегущей волны и концевого сферического зеркала (СЗ) резонатора (метод СЗАОМ) получать одновременно синхронизацию мод и модуляцию добротности в твердотельных лазерах. Этот метод даёт возможность создать конструкцию лазера, которая обеспечивает компактность, простоту и сравнительно низкую цену изготовления устройства. Предлагаемый лазер позволяет при средних выходных мощностях около 1 Вт и частотах повторения импульсов Q-switch 1–2 кГц получать пиковые мощности ~ 1 МВт и обладает высокой стабильностью выходных характеристик без использования каких-либо схем автоподстройки. В [13] был обнаружен режим автоQML, при котором модуляция добротности возникает на частоте релаксационных колебаний лазера. Режим QML формируется без периодического отключения звуковой волны. Теоретически метод СЗАОМ исследуется в [14, 15].

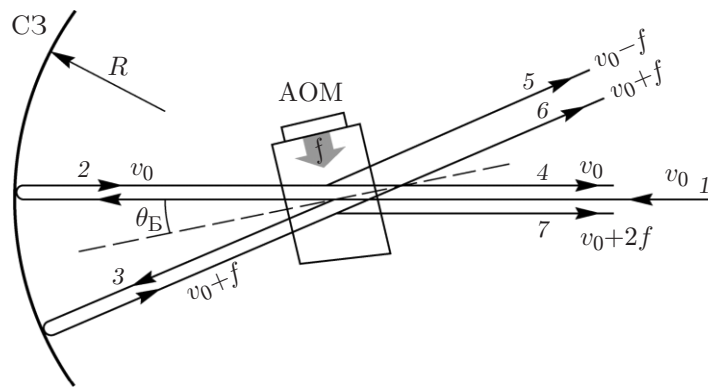


Рис. 1. Принцип работы метода СЗАОМ

В предлагаемой работе представлены различные схемы Nd:YAG-лазера на основе метода СЗАОМ. Рассмотрена схема лазера с четырёхзеркальным резонатором с возможностью внутррезонаторной генерации второй гармоники и формирования керровской линзы. Приведена схема с трёхзеркальным резонатором, в котором дифрагировавший в акустооптическом модуляторе луч может быть выведен без потерь из резонатора и использоваться в качестве выходного излучения лазера. Разработан мощный пикосекундный перестраиваемый источник излучения в области ~ 620 нм на основе каскадного преобразования частоты суперлюминесцентного параметрического генератора среднего ИК-диапазона с накачкой пикосекундным Nd:YAG-лазером с СЗАОМ.

Принцип работы метода СЗАОМ. Принцип работы представленного метода [9] иллюстрирует рис. 1. Модулятор располагается под углом Брэгга (θ_B) к оптической оси резонатора рядом с концевым сферическим зеркалом резонатора так, чтобы оптическая длина пути между центром модулятора и отражающей поверхностью зеркала была равна радиусу кривизны (R) этого зеркала. На пьезопреобразователь АОМ подаётся рабочая частота f , равная половине межмодового интервала лазера ($c/2L = 2f$). При прохождении светового луча 1 (с частотой ν_0) через АОМ справа налево на зеркало падает два луча (лучи 2 и 3 с частотами ν_0 и $\nu_0 + f$ соответственно). Эти лучи, отражаясь от зеркала, возвращаются в АОМ по тому же оптическому пути, где подвергаются повторной дифракции. Луч 2 распадается на лучи 4 и 5 с частотами ν_0 и $\nu_0 - f$ соответственно. Луч 3 распадается на лучи 6 и 7 с частотами $\nu_0 + f$ и $\nu_0 + 2f$. Лучи 5 и 6 выходят из резонатора под углом $2\theta_B$, а лучи 4 и 7 остаются в резонаторе, и за счёт луча 7 с частотой $\nu_0 + 2f$ достигается эффект синхронизации мод.

В [14] теоретически, а в [12] экспериментально показано, что коэффициент дифракционной связи k_d (дифракционная эффективность АОМ) при его изменении может служить управляющим параметром динамическими режимами генерации лазера. Таким образом, при подаче на модулятор непрерывного питающего сигнала ультразвуковой частоты и точной настройке межмодового интервала лазера на удвоенную частоту бегущей звуковой волны модулятора, изменяя величину k_d , можно получить генерацию в двух режимах: непрерывная синхронизация мод (CWML) и автоQML.

Режим генерации QML осуществляется включением периодической модуляции звуковой волны АОМ с частотой приблизительно 1–20 кГц и увеличением k_d по сравнению с режимами CWML и автоQML. Выходящие под углом $2\theta_B$ из резонатора лучи 5 и 6 с частотами $\nu_0 - f$ и $\nu_0 + f$ обеспечивают потери, модулирующие добротность резонатора. При этом после отключения рабочей частоты звуковая волна в светозвукопроводе АОМ отключается за время $\sim 0,1$ мкс (время прохождения заднего фронта звуковой волны через световой пучок). За это время в импульсе генерации Q-switch за счёт луча повторной

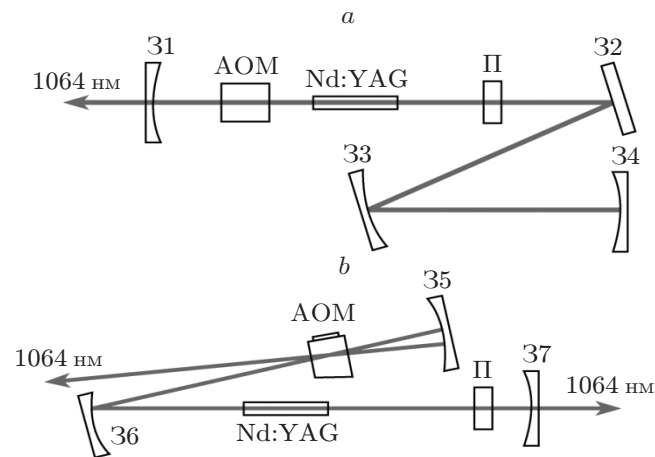


Рис. 2. Экспериментальная схема лазера: с четырёхзеркальным (а) и трёхзеркальным (b) резонаторами (31–37 — зеркала резонатора, АОМ — акустооптический модулятор, Nd:YAG — активный элемент, П — поляризатор)

дифракции с частотой $\nu_0 + 2f$ одновременно происходит синхронизация мод.

Схемы лазерного резонатора. В качестве активного элемента лазера использовался кристалл Nd:YAG диаметром 2 мм и длиной 63 мм с поперечной диодной накачкой на длине волны 808 нм. Также применялся акустооптический модулятор с просветлёнными торцами (модель МЗ-322), рабочая частота которого составляла $f = 50049,6$ кГц. Оптическая длина резонатора L составляла 150 см. В качестве поляризатора использовались две брюстеровские пластинки из плавленого кварца.

Экспериментальная схема лазера с четырёхзеркальным Z-образным резонатором показана на рис. 2, а. Зеркало 32 плоское, радиусы кривизны сферических зеркал 31, 33 и 34 составляли 300, 200 и 150 мм соответственно. Коэффициент отражения зеркал 32–34 на рабочей длине волны 1064 нм составлял более 99,5 %. Зеркало 31 являлось выходным и имело пропускание 14 % на $\lambda = 1064$ нм.

Экспериментальная схема лазера с трёхзеркальным резонатором показана на рис. 2, б. Радиусы кривизны сферических зеркал 35, 36 и 37 составляли 200, 400 и 500 мм соответственно. Зеркала 35 и 36 были плотными на рабочей длине волны $\lambda = 1064$ нм. Зеркало 37 являлось выходным и имело пропускание 14 % на 1064 нм. Такая конфигурация резонатора позволяет вывести дифрагировавший пучок из резонатора без потерь для дальнейшего его использования.

Характеристики лазерного излучения. В случае четырёхзеркального резонатора средняя выходная мощность лазера ($P_{\text{ВЫХ}}$) составляла в режиме CWML 1 Вт, в режиме автоQML 620 мВт, а в режиме QML $P_{\text{ВЫХ}} = 580$ мВт. Преимущество данной схемы в том, что в области между зеркалами 33 и 34 можно размещать дополнительные элементы, например, для формирования керровской линзы или внутрирезонаторной генерации второй гармоники (532 нм). Для получения излучения на второй гармонике в область перетяжки между зеркалами 33 и 34 помещается нелинейный кристалл. В этом случае все зеркала резонатора должны быть плотными на $\lambda = 1064$ нм, зеркало 34 — дихроичным с высоким отражением для $\lambda = 532$ нм. Зеркало 33 должно обладать высоким пропусканием для $\lambda = 532$ нм.

Выходная мощность лазера с трёхзеркальным резонатором состоит из луча, выходящего через зеркало 37, и дифрагированного луча, выводимого АОМ. Суммарная средняя выходная мощность лазера в режиме CWML составила $\approx 1,5$ Вт, при этом около 25 % мощности приходилось на дифрагировавший пучок. В режиме автоQML выходная мощность

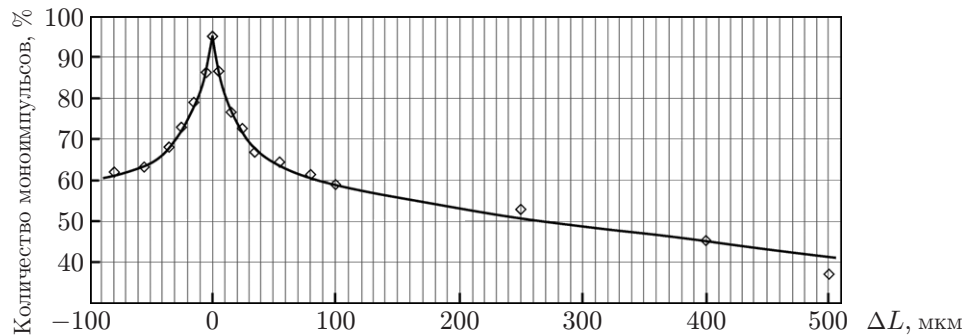


Рис. 3. Зависимость количества моноимпульсов от отстройки длины резонатора

составила 940 мВт, доля выходной мощности, приходящаяся на дифрагировавший пучок, была $\approx 34\%$. В режиме QML доля мощности, приходящаяся на дифрагировавший пучок, составила $\approx 20\%$ при общей выходной мощности лазера 750 мВт.

В таком резонаторе получается максимальная средняя выходная мощность, а дифрагировавший луч можно использовать, например, для проведения дополнительных измерений или для контроля выходных характеристик лазера. В данной схеме существует возможность установкой дополнительных зеркал вернуть выходящий дифрагировавший луч обратно в резонатор лазера, т. е. настроить дополнительный резонатор по дифрагировавшим лучам. Длины дополнительного и основного резонаторов должны быть равны. В случае настройки дополнительного резонатора по дифрагировавшим лучам выходная мощность (через зеркало 37) увеличивалась на $\approx 10\%$. Однако такая схема подходит только для работы в режиме CWML, поскольку возврат дифрагировавшего луча приводит к демпфированию режима автоQML. Режим QML также не реализуем из-за отсутствия необходимых для него потерь.

Длительность импульсов выходного излучения, измеренная автокорреляционным методом, для обеих схем лазера составила ≈ 105 пс (энергия импульса 11 нДж, пиковая мощность 107 Вт) для режима CWML, ≈ 70 пс (энергия импульса 103 нДж, пиковая мощность 1,5 кВт) для режима автоQML и ≈ 50 пс (энергия импульса 20 мкДж, пиковая мощность 400 кВт) для режима QML генерации. Прямые измерения длительности импульсов электронно-оптической камерой Агат-СФЗМ, проведённые в [10, 13], выявили немонотонность пикосекундных импульсов — появление дополнительных импульсов на аксиальном периоде. Число таких импульсов увеличивается с отстройкой частоты межмодовых биений продольных мод от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора. При точной настройке длины резонатора ($\Delta L = 0$) наблюдается практически моноимпульсный режим, стабильность которого определяется джиттером рабочей частоты модулятора. В нашем случае джиттер составлял ± 300 Гц (что соответствует отстройке $\Delta L = \pm 5$ мкм).

На рис. 3 показано изменение количества моноимпульсов в выходном излучении лазера при отстройке длины резонатора (положительная отстройка соответствует увеличению длины резонатора). При точной настройке резонатора (точность настройки порядка ± 2 мкм) количество моноимпульсов в статистике выходного излучения составляло 95%. Введение отстройки ($\Delta L \neq 0$) приводило к ухудшению статистики моноимпульсов, при этом длительность отдельных импульсов не изменялась. При $\Delta L > 3$ мм моноимпульсов вообще не наблюдалось, каждый импульс превращался в пучок длительностью ~ 2 нс, содержащий в себе до 20 отдельных импульсов. Таким образом, с помощью отстройки межмодового интервала резонатора от частоты $2f$ возможно регулировать параметр пиковой мощности независимо от параметров средней мощности и частоты следования.

Нелинейное преобразование излучения. Получаемые в лазере пиковые мощности позволяют осуществлять эффективные нелинейные преобразования частоты излучения, например генерацию гармоник или параметрический генератор света в режиме суперлюминесценции. Так, нами был проведён эксперимент по генерации второй гармоники излучения вне резонатора лазера. Использовалась трёхзеркальная схема резонатора (см. рис. 2, *b*). Перемещением зеркала 37 изменялась длина резонатора, т. е. вводилась отстройка межмодового интервала лазера от частоты $2f$. Излучение лазера в режиме QML фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 6 см в нелинейный кристалл LBO (с синхронизмом I-го типа) длиной 18 мм. График зависимости эффективности преобразования от отстройки длины резонатора показан на рис. 4. Максимальная эффективность преобразования была получена при $\Delta L = 0$ и составила около 50 %. Следует отметить, что такой эксперимент может быть использован для настройки длины резонатора.

В 4-зеркальной конфигурации резонатора излучение этого лазера в режиме QML использовалось для накачки суперлюминесцентного параметрического генератора и дальнейшего преобразования его частоты в видимую область спектра (каскадного смещения его сигнальной волны (1475 нм) с волной накачки (1064 нм) для получения перестраиваемого излучения в области 620 нм).

На рис. 5 представлена схема экспериментальной установки, характеристики которой в части получения суперлюминесцентной параметрической генерации на кристалле ниобата лития с периодически поляризованной структурой (Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN) подробно описаны в [16].

Диаметр перетяжки излучения накачки в кристалле PPLN составил 160 мкм. При падающей на кристалл PPLN мощности 420 мВт (1,7 кГц, пиковая мощность $\sim 0,5$ МВт) выходная мощность параметрической генерации составляла ~ 45 мВт для холостой длины волны ($\lambda = 3820$ нм) и 140 мВт (пиковая мощность $\sim 0,2$ МВт) для сигнальной ($\lambda = 1475$ нм). Приблизительно 200 мВт средней мощности излучения накачки ($\lambda = 1064$ нм) оставалось непретворённой и выходило из кристалла PPLN. Так как временная задержка импульсов волн накачки и сигнальной составляет $L\Delta n/c \sim 1,7$ пс (где L — длина кристалла PPLN, Δn — разность показателей преломления на длинах волн 1064 нм и 1475 нм, c — скорость света) и она много меньше длительности этих импульсов ~ 45 пс, а их расходимости равны [16], то возможно дальнейшее каскадное преобразование частоты в дополнительном нелинейном элементе в область 620 нм в простой оптической конфигурации. Для этого в схему были введены согласующая линза 6 с $F = 5$ см, нелинейный кристалл LBO ($6 \times 6 \times 15$ мм, $\Theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) 7 и оптические фильтры с измерительной аппаратурой 8 (измеритель мощности или монохроматор МДР-23). Для смещения

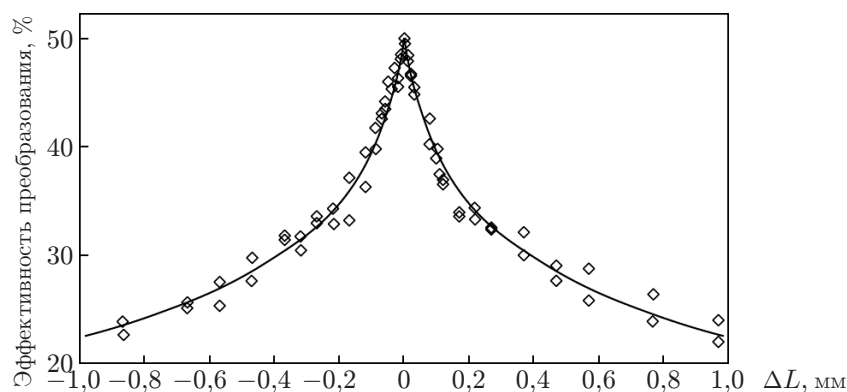


Рис. 4. Зависимость эффективности преобразования излучения с $\lambda = 1064$ во вторую гармонику от отстройки длины резонатора

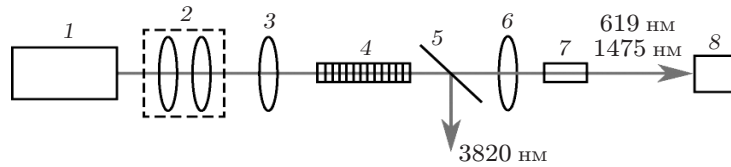


Рис. 5. Схема установки по получению перестраиваемой в области 620 нм суперлюминесцентной генерации (1 — лазер накачки, 2 — объектив, 3 — фокусирующая линза, 4 — кристалл PPLN (период поляризации 29,5 мкм, $L_1 = 50$ мм, синхронизм ee-e), 5 — фильтр, 6 — согласующая линза, 7 — кристалл LBO ($\Theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $L_2 = 15$ мм, синхронизм ee-o), 8 — фильтры и измерительная аппаратура (монохроматор или измеритель мощности))

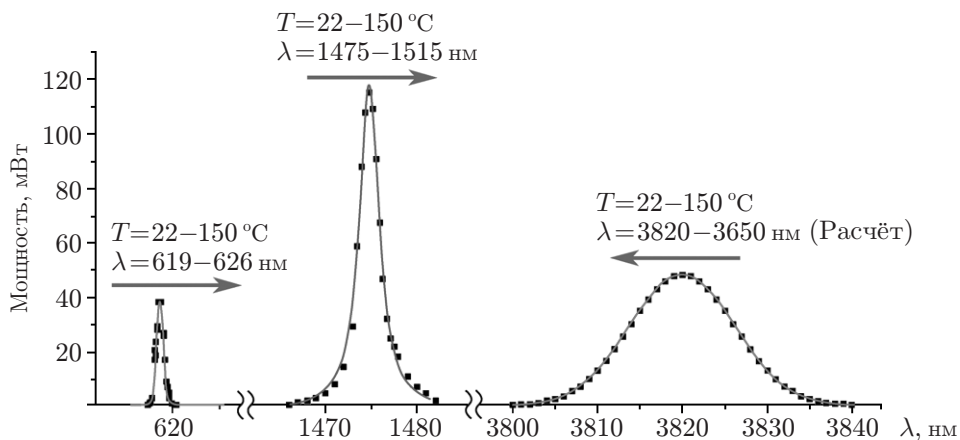


Рис. 6. Выходные характеристики источника излучения (стрелками показано направление перестройки при изменении температуры кристалла PPLN от 22 до 150 °C)

холостой волны и волны накачки использовался ee-o синхронизм нелинейного кристалла LBO, так как волны накачки и сигнальная имеют совпадающие линейные поляризации. Углы синхронизма при этом составляют (для 1475 нм и 1064 нм) $\Theta = 88,3^\circ$ и $\varphi = 0^\circ$ при 20 °C, что близко к некритическому фазовому синхронизму. При таких условиях у кристалла LBO длиной 15 мм спектральная и угловая ширины синхронизма составляют более 6 ТГц и около 40 мрад (согласно расчёту), что больше ширин участвующих в смешении линий (250 ГГц для 1064 нм и 300 ГГц для 1475 нм) и больше их расходимости (30 мрад).

На рис. 6 представлены мощностные и спектральные характеристики выходного излучения. Перестройка производилась путём изменения температуры кристалла PPLN и его сигнальной длины волны в области 1475–1515 нм и небольшой подстройки по углу кристалла LBO для каскадного преобразования частоты в область 620 нм.

Средняя мощность генерации на длине волны 620 нм составила 40 мВт при 1,7 кГц. Длительность импульса параметрического генератора оценивалась согласно [17] и при наших условиях (при 4-кратном превышении порога генерации) была менее 45 пс. Пиковая мощность источника излучения в области 619–626 нм составила 25 кВт.

Заключение. Рассмотрены две схемы резонатора диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с реализацией метода СЗАОМ, их особенности и полученные временные и энергетические характеристики выходного излучения данного лазера. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что метод СЗАОМ позволяет получать различные режимы генерации в пикосекундной области. Рассмотренный лазер хорошо зарекомендовал

себя в эффективном нелинейном преобразовании излучения без ввода дополнительных резонаторов. Результаты работы демонстрируют, что при накачке таким лазером возможно получение одновременно перестраиваемого мультиволнового излучения в различных областях оптического спектра (видимый, ближний и средний ИК-диапазоны) с высоким КПД преобразования. Получено 50 %-ное преобразование излучения во вторую гармонику во внешнем нелинейном кристалле. Также при накачке этим лазером разработан мощный пикосекундный перестраиваемый источник излучения в области ~ 620 нм на основе каскадного преобразования частоты суперлюминесцентного параметрического генератора среднего ИК-диапазона и пикосекундного Nd:YAG-лазера.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Новосибирской области (проект № 19-42-543002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kuizenga D. J.** Short-pulse oscillator development for the Nd: glass laser-fusion systems // IEEE Journ. Quantum Electronics. 1981. **17**, N 9. P. 1694–1708.
2. **Херман Й., Вильгельми Б.** Лазеры сверхкоротких световых импульсов. М.: Мир, 1986. 368 с.
3. **Chen Y. F., Huang K. F., Tsai S. W. et al.** Simultaneous mode locking in a diode-pumped passively Q-switched Nd: YVO₄ laser with a GaAs saturable absorber // Appl. Opt. 2001. **40**, N 33. P. 6038–6041.
4. **Agnesi A., Guandalini A., Reali G. et al.** Diode pumped Nd: YVO₄ laser at 1.34 μm Q-switched and mode locked by a V³⁺: YAG saturable absorber // Opt. Commun. 2001. **194**, N 4. P. 429–433.
5. **Pan S., Xue L., Fan X. et al.** Diode-pumped passively Q-switched mode-locked Nd: YLF laser with uncoated GaAs saturable absorber // Opt. Commun. 2007. **272**, N 1. P. 178–181.
6. **Lewis M. A., Knudtson J. T.** Active-passive mode-locked Nd: YAG oscillator // Appl. Opt. 1982. **21**, N 16. P. 2897–2900.
7. **Грязнов Н. А., Соснов Е. Н., Горячкин Д. А. и др.** Активная фазовая синхронизация мод в резонаторе с управляемым интерферометром Майкельсона // Оптический журнал. 2019. **86**, № 4. С. 3–10.
8. **Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В.** Модуляция добротности и синхронизация мод в диодно-накачиваемом Nd: YAG-лазере с удвоением частоты // Квантовая электроника. 2012. **42**, № 2. С. 107–110.
9. **Пат. № 2478242 РФ.** Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод /В. И. Донин, Д. В. Яковин, А. В. Грибанов. Опубл. 27.03.2013, Бюл. № 9.
10. **Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В.** Структура пикосекундных импульсов генерации в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере с модуляцией добротности и синхронизацией мод // Квантовая электроника. 2015. **45**, № 12. С. 1117–1120.
11. **Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Яковин М. Д.** Новый метод модуляции добротности резонатора с синхронизацией мод в твердотельных лазерах // Оптический журнал. 2018. **85**, № 4. С. 8–11.
12. **Грибанов А. В., Донин В. И., Яковин Д. В.** Режимы генерации Nd:YAG-лазера с синхронизацией мод акустооптическим модулятором бегущей волны и сферическим зеркалом // Квантовая электроника. 2018. **48**, № 8. С. 699–702.
13. **Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В.** Самоорганизация режима Q-switch с одновременной синхронизацией мод в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере // Письма в ЖЭТФ. 2015. **101**, № 12. С. 881–884.

14. **Наний О. Е., Одинцов А. И., Панаков А. И. и др.** Динамика QML-генерации твердотельного лазера с акустооптическим модулятором бегущей волны // Квантовая электроника. 2017. **47**, № 11. С. 1000–1004.
15. **Наний О. Е., Одинцов А. И., Панаков А. И. и др.** Одновременная синхронизация мод и модуляция добротности в твердотельном лазере с акустооптическим модулятором бегущей волны и ретрорефлектором // Квантовая электроника. 2019. **49**, № 2. С. 119–123.
16. **Donin V. I., Yakovin D. V., Yakovin M. D., Griбанov A. V.** Superluminescent high-efficient parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser // Laser Phys. Lett. 2018. **15**, N 3. 035005.
17. **Becker M. F., Kuizenga D. J., Phillion D. W., Siegman A. E.** Analytic expressions for ultrashort pulse generation in mode-locked optical parametric oscillators // Journ. Appl. Phys. 1974. **45**, N 9. P. 3996–4005.

Поступила в редакцию 03.02.2020

После доработки 03.03.2020

Принята к публикации 10.03.2020
