

УДК 621.373.826; 621.375.7

Новый метод модуляции добротности резонатора с синхронизацией мод в твердотельных лазерах

© 2018 г. **В. И. Донин, доктор физ.-мат. наук; Д. В. Яковин;
А. В. Грибанов; М. Д. Яковин**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

E-mail: donin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 12.12.2017

Предложен новый метод осуществления работы лазера в режиме модуляции добротности резонатора с синхронизацией мод путём использования сферического зеркала (СЗ) и одного акустооптического модулятора бегущей волны (АОМ) — метод СЗАОМ. Представлены временные, спектральные и энергетические выходные характеристики диодно-накачиваемого Nd³⁺:YAG лазера с СЗАОМ, а также новые результаты по получению мощного УФ и среднего ИК излучения на основе накачки нелинейных кристаллов таким лазером.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, модуляция добротности, синхронизация мод, лазеры с высокой пиковой мощностью, нелинейное преобразование.

Коды OCIS: 140.3580, 140.3540, 140.4050, 190.0190.

Мы предлагаем новый метод (СЗАОМ) осуществления работы лазера в режиме модуляции добротности резонатора с синхронизацией мод путём использования сферического зеркала (СЗ) и одного акустооптического модулятора бегущей волны (АОМ), а также с использованием дополнительно сокращения импульса генерации путём образования керровской линзы в удваивающем частоту кристалле или другом керровском элементе внутри резонатора [1, 2]. Предложенный метод был опробован на твердотельных лазерах (Nd³⁺:YAG и Ti³⁺:Al₂O₃) с высокой пиковой мощностью при высоких частотах повторения импульсов.

В настоящей статье представлены временные, спектральные и энергетические выходные характеристики Nd³⁺:YAG лазера с диодной накачкой, поскольку детальные исследования метода были проведены с таким лазером [3–7]. Кроме того, представлены новые результаты по получению мощного УФ и среднего ИК излучения на основе накачки указанным лазером нелинейных кристаллов, расположенных вне резонатора.

Общая схема лазера показана на рис. 1. В качестве активной среды использовался кристалл Nd:YAG (массовая концентрация Nd составляла 1%) диаметром 2 мм и длиной 63 мм с поперечной диодной накачкой тремя линейками лазерных диодов на длине волны 808 нм. Коэффициент от-

ражения зеркал 31–34 на 1064 нм составлял более 99,5%. Зеркало 34 было дихроичным и имело отражение более 99,5% на $\lambda = 532$ нм. На этой длине волны коэффициент пропускания зеркала 33 был равен $T = 92\%$. Керровская линза формировалась в нелинейном кристалле, использовавшемся для генерации второй гармоники (LBO длиной 20 мм с фазовым синхронизмом I-го типа).

Предлагаемый метод реализации режима QML (одновременной синхронизации мод и модуляции добротности резонатора) конструктивно состоит из сферического зеркала 31 резонатора и АОМа

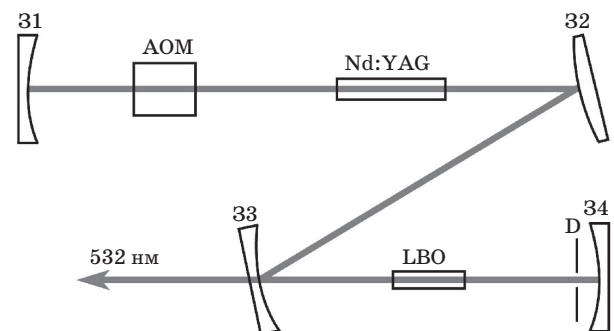


Рис. 1. Схема лазера. 31–34 — зеркала резонатора, АОМ — акустооптический модулятор, Nd:YAG — активный элемент, LBO — нелинейный кристалл, D — диафрагма.

бегущей волны. Принцип работы [1] метода СЗАОМ схематично иллюстрируется рис. 2.

Оптическая длина резонатора составляла $L = 1,5$ м. Для обеспечения режима QML модулятор располагался под углом Брэгга θ_B к оптической оси резонатора рядом с концевым сферическим зеркалом 31 так, чтобы оптическая длина пути между центром модулятора и отражающей поверхностью зеркала была равна радиусу кривизны R_1 этого зеркала. При подаче на пьезопреобразователь АОМа рабочей частоты $f = 50$ МГц, равной половине межмодового интервала лазера $c/2L = 2f$, в кварцевом светозвукопроводе образуется бегущая звуковая волна, на которой происходит брэгговская дифракция лазерного излучения. Для определенности полагаем 50-процентную дифракционную эффективность АОМа, которая является оптимальной. При прохождении светового луча 1 с частотой ν_0 через АОМ справа налево на зеркало падает два луча (лучи 2 и 3). Луч 2 с частотой ν_0 проходит по оси резонатора, отражается от зеркала и возвращается в АОМ, где распадается на лучи 4 и 5 с частотами ν_0 и $(\nu_0 - f)$ соответственно. Луч 4 распространяется в обратном направлении по оси резонатора, луч 5 выходит из резонатора в обратном направлении под углом $2\theta_B$. Луч 3, испытывающий брэгговскую дифракцию, падает на зеркало с частотой $(\nu_0 + f)$ и, отражаясь от сферической поверхности зеркала, попадает обратно в АОМ, где распадается на луч 6 без изменения частоты $(\nu_0 + f)$, выходящий из резонатора в обратном направлении под углом $2\theta_B$, и на луч 7 после повторной дифракции в светозвукопроводе модулятора. Последний луч с частотой $(\nu_0 + 2f)$ распространяется в обратном направлении по оси резонатора. За счёт этого луча достигается эффект фазовой синхронизации мод. Выходящие под углом $2\theta_B$ из резонатора лучи 5 и 6 с частотами $(\nu_0 - f)$ и $(\nu_0 + f)$ обеспечивают модулирующие добротности резонатора потери, и лазер работает в режиме модуляции добротности с частотой повторения импульсов, задаваемой частотой переключения модулятора (1–100 кГц). При этом после отключения рабочей частоты звуковая волна

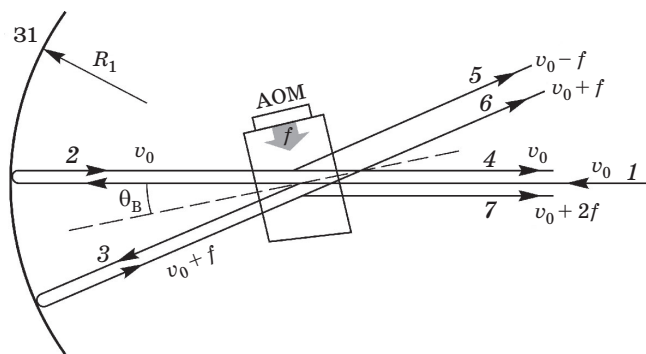


Рис. 2. Схема работы СЗАОМ.

в светозвукопроводе АОМа отключается за время $t = d_c/V_S = 0,2 \text{ см}/5 \times 10^5 \text{ см/с} \approx 0,4 \text{ мкс}$ (где d_c — диаметр лазерного луча в светозвукопроводе, V_S — скорость звука). Длительность импульса генерации лазера в режиме Q-switch составляет порядка 100 нс, т.е. в течении t за счёт луча повторной дифракции с частотой $(\nu_0 + 2f)$ в импульсе генерации одновременно происходит синхронизация мод.

Вернёмся к рассмотрению выходящих из резонатора лучей 5 и 6. Интенсивности этих лучей равны, а их сумма будет включать интерференционный член, содержащий составляющую на разностной частоте $2f$. Таким образом, суммарная интенсивность лучей 5 и 6 будет промодулирована с частотой $2f$. Следовательно, вносимые этими лучами потери можно рассматривать, как модулирующие потери, также обеспечивающие синхронизацию мод лазера.

Осциллограмма Q-switch импульса с синхронизацией мод показана на рис. 3. Измеренная нестабильность интенсивности Q-switch импульсов была не выше $\pm 2\%$ (в области частот повторения 1–5 кГц).

Измеренная оптическим коррелятором с регистрацией фототока двухфотонного поглощения в GaAsP-фотодиоде (G1116, Hamamatsu) длительность отдельного импульса внутри цуга Q-switch составила 3,25 пс (см. рис. 3). Средняя мощность лазера на $\lambda = 532$ нм составляла 1,5 Вт при частоте повторения 2 кГц. С помощью акустооптического монохроматора «Фотон-2102И» были измерены спектральные ширины $\Delta\nu$ линий генерации на $\lambda = 1064$ и 532 нм, составившие приблизительно 200 и 400 ГГц соответственно. Следовательно, $\Delta\nu\Delta t \approx 0,65$, что с точностью до 2 близко к случаю спектрально-ограниченного импульса, форма которого описывается функцией sech^2 . Пиковая мощность отдельного импульса вблизи максимума огибающей Q-switch (см. рис. 3) составила 50 МВт. Измерения длительности Q-switch импульсов

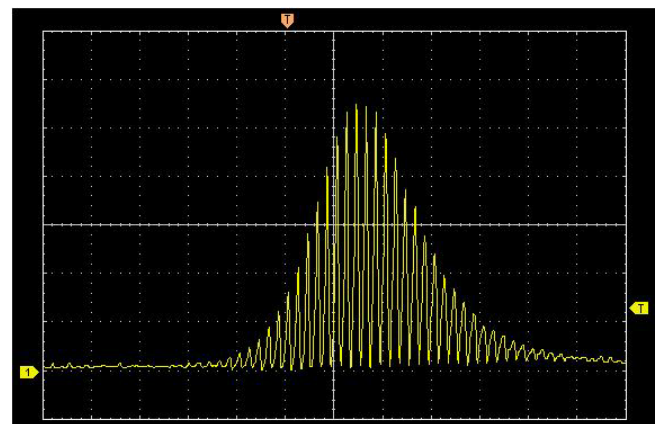


Рис. 3. Осциллограмма импульса генерации на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм в режиме QML. Цена деления по оси абсцисс — 50 нс.

показали, что на $\lambda = 532$ нм длительность импульса приблизительно в $\sqrt{2}$ раз меньше. Следует отметить, что Δt измерялась по автокорреляционной функции на $\lambda = 1064$ нм. Если учесть, что импульсы синхронизации мод при генерации второй гармоники должны сократиться в $\sqrt{2}$ раз, то реально пиковая мощность на $\lambda = 532$ нм может достигать почти 100 МВт.

Получение таких пиковых мощностей позволяет осуществлять эффективное нелинейное преобразование частоты излучения вне резонатора, в том числе и ПГС в режиме суперлюминесценции.

Так, нами был проведён эксперимент по генерации четвёртой гармоники излучения (266 нм) вне резонатора лазера. Излучение второй гармоники лазера фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 14 см в нелинейный кристалл ВВО (синхронизм I-го типа) длиной 6 мм. Пространственное разделение лучей второй и четвертой гармоники проводилось при помощи призмы. График зависимости мощностей второй и четвертой гармоники от тока накачки лазера показан на рис. 4. Максимальная средняя мощность УФ излучения составляла 80 мВт при эффективности преобразования около 7%. Если учесть длительность импульсов порядка 1,62 пс (в 2 раза короче импульсов на 1,064 мкм), то пиковая мощность на длине волны 266 нм составляла около 3 МВт.

На рис. 5 представлена используемая схема экспериментальной установки безрезонаторного ПГС. В качестве лазера накачки 1 использовался описанный выше Nd:YAG лазер, в котором кристалл ЛВО вынимался, а зеркало 31 имело пропускание $T \approx 15\%$. Длительность цуга была на уровне 150 нс. Измеренная с помощью стрик-камеры длительность отдельных импульсов внутри цуга Q-switch составляла (45 ± 10) пс [6]. Поляризация излучения лазера с помощью дополнительных поляризаторов в резонаторе задавалась линейной. Максимальная средняя мощность была на уровне 500 мВт и 350 мВт на частоте в 1,7 кГц и 1 кГц, соответственно. Резонатор лазера настраивался на работу в «моноимпульсном режиме» [6]. Максимальная пиковая мощность составляла не менее 0,5 МВт.

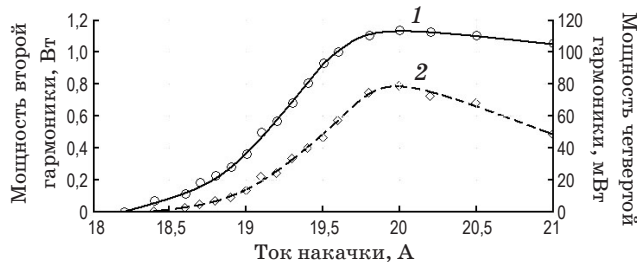


Рис. 4. Зависимости мощностей второй и четвертой гармоники от тока накачки. Вторая гармоника — сплошная линия (1), четвертая гармоника — штриховая линия (2).

В качестве регулятора мощности накачки 2 использовался поляризационный аттенуатор. Телескоп 3 использовался для уменьшения расходимости лазера накачки в 3,5 раза. Общая расходимость после телескопа составила примерно 0,57 мрад. Фокусирующая линза 4 имела фокусное расстояние в 280 мм. Фокус в кристалле PPLN находился вблизи передней грани, диаметр фокусировки составлял 160 мкм. Нелинейный кристалл PPLN, допированный MgO (5% mol.), имел размеры $5 \times 1 \times 50$ мм и период регулярной доменной структуры 29,5 мкм. В качестве фильтрующего элемента 6 использовалось плотное зеркало на 1064 нм или пластинка из германия, соответственно при измерении суммарной или холостой мощности излучения. Термопарным измерителем мощности 7 регистрировалась суммарная выходная мощность и мощность на холостой длине волны. Термопарный измеритель мощности 8 использовался для измерения падающей и прошедшей через кристалл мощности накачки.

На рис. 6 представлены мощность на холостой длине волны 3820 нм и суммарная выходная мощность на холостой и сигнальной 1475 нм (с 15% добавкой линии каскадной генерации 2162 нм — см. ниже) при частоте повторения в 1,0 и 1,7 кГц

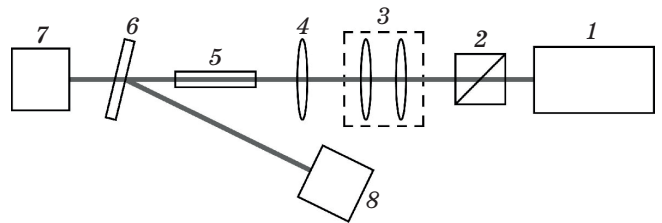


Рис. 5. Схема безрезонаторного ПГС. 1 — Nd:YAG лазер с синхронизацией мод и модуляцией добротности, 2 — регулятор мощности, 3 — телескоп, 4 — фокусирующая линза, 5 — нелинейный кристалл PPLN, 6 — фильтрующий элемент, 7, 8 — измерители мощности.

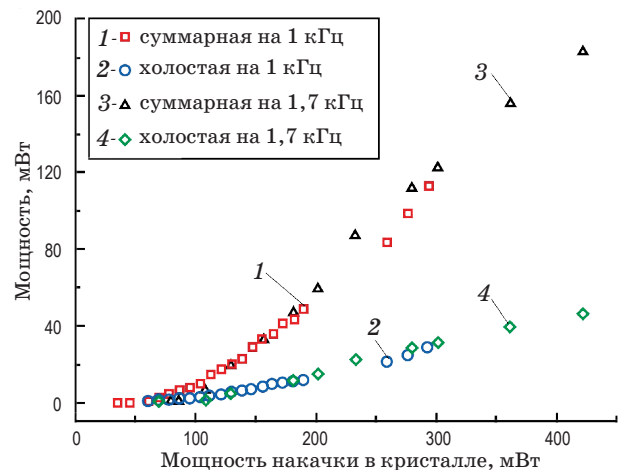


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от мощности накачки в кристалле при 1,0 и 1,7 кГц.

в зависимости от мощности накачки. Все измерения проводились при температуре кристалла 24 °С.

Максимальная суммарная выходная средняя мощность на холостой и сигнальной длинах волн достигала 115 и 185 мВт на частоте повторения 1,0 и 1,7 кГц, максимальная пиковая мощность была приблизительно 210 и 200 кВт соответственно. Максимальная средняя мощность на холостой длине волны была 30 мВт при 1 кГц и 46 мВт при 1,7 кГц. Соответственно пиковая мощность составляла около 55 и 50 кВт. Максимальное значение КПД по суммарной преобразованной мощности было приблизительно 40 и 44% соответственно для частот следования 1,0 и 1,7 кГц.

Также была измерена выходящая из кристалла PPLN мощность накачки P_{out} в зависимости от величины входящей в кристалл мощности накачки P_{in} . На основании этой зависимости было посчитано истощение накачки $\eta = 1 - P_{out}/P_{in}$. Максимум истощения составил примерно 50 и 53%, соответственно на 1,0 и 1,7 кГц. Следовательно, КПД по поглощённой мощности составлял приблизительно 80 и 83%.

С помощью монохроматора МДР-23 был получен спектр выходного излучения в УФ и видимой области спектра (генерация кратных и комбинационных гармоник). Присутствовали линии на длинах волн: 354,9 нм; 391,2 нм; 412,2 нм; 416,2 нм; 435,8 нм; 461,9 нм; 467 нм; 472,4 нм; 491,8 нм; 516,6 нм; 526,1 нм; 532 нм; 535,9 нм; 537,8 нм; 538,4 нм; 540,6 нм; 547,7 нм; 617,9 нм. Суммарная мощность излучения на этих коротковолновых линиях составляла 1% от полной выходной мощности.

В режиме суперлюминесценции, который реализован в нашем случае, расходимость излуче-

ния определялась геометрией излучающей области в PPLN кристалле. Так, расходимость излучения суперлюминесценции с длиной волны 617,9 нм (сумма сигнальной волны и волны накачки) в дальней зоне на расстоянии 200 см (которое много больше параметра конфокальности $\pi w_0/\lambda$, где w_0 — радиус фокусировки, n — показатель преломления) от PPLN кристалла была равна (30 ± 5) мрад. Такое же значение расходимости дали измерения для сигнальной, холостой и падающей на кристалл волны накачки. Одинаковая расходимость на всех указанных линиях связана с многомодовостью (несколько конкурирующих поперечных мод) лазера накачки [6] и коллинеарность квазисинхронной параметрической суперлюминесценции.

Эффективность преобразования PPLN кристалла в ИК область (1475–3820 нм) по поглощённой мощности составляет почти 83%. Недостающие 17% мощности обусловлены, по нашему мнению, следующими причинами: поглощение излучения с $\lambda = 3820$ нм в PPLN (около 5%), генерация кратных и комбинационных гармоник (примерно 1%), каскадная параметрическая генерация (накачка от 1475 нм и параметрика на 2162 нм и 4642 нм) с поглощением холостой волны $\lambda = 4642$ нм (около 5%) и светоиндуцированное зелёными и синими линиями поглощение накачки (около 6%) [8].

В заключение заметим, что предлагаемый простой и не требующий точной автоподстройки частоты резонатора, а также каких-либо ограничений на интенсивность излучения СЗАОМ-метод может быть использован в ряде лазерных приложений: медицина, нелинейная оптика (в том числе получение мощного УФ, видимого и инфракрасного излучения), рамановская спектроскопия, прецизионная обработка материалов и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Патент РФ № 2478242. 2013.
2. Donin V.I., Yakovin D.V., Griбанov A.V. Diode-pumped green Nd:YAG laser with Q-switch and mode locking // Opt. Lett. 2012. V. 37. № 3. P. 338–340.
3. Donin V.I., Yakovin D.V., Griбанov A.V. Diode-pumped green Nd:YAG laser with Q-Switch and mode locking // Nd:YAG Laser / Ed. by Dan C. Dumitras. Croatia, London: InTech Publish, 2012. P. 97–110. (www.intechopen.com).
4. 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. Т. 42. № 2. С. 107–110.
5. Донин В.И., Грибанов А.В., Яковин Д.В. Самоорганизация режима Q-switch с одновременной синхронизацией мод в диодно-накачиваемом Nd:YAG лазере // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. № 12. С. 881–884.
6. Донин В.И., Грибанов А.В., Яковин Д.В. Структура пикосекундных импульсов генерации в диодно-накачиваемом Nd:YAG лазере с модуляцией добротности и синхронизацией мод // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 12. С. 1117–1120.
7. Донин В.И., Яковин Д.В., Яковин М.Д. Параметрический генератор света среднего ИК, видимого и УФ диапазонов с синхронной накачкой излучением Nd:YAG лазера с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 7. С. 601–605.
8. Hirohashi J., Tago T., Nakamura O., Miyamoto A., Furukawa Y. Characterization of GRIIRA properties in LiNbO₃ and LiTaO₃ with different compositions and doping // Proc. SPIE. 2008. V. 6875. P. 687516.