Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 12, с. 881 – 884

Самоорганизация режима Q-switch с одновременной синхронизацией мод в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере

В. И. Донин[1)], *Д. В. Яковин, А. В. Грибанов*

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 15 мая 2015 г.

Сообщается о первом наблюдении нового режима генерации твердотельного лазера с Q-switch и синхронизацией мод, в котором Q-switch "самопроизвольно" формируется на частоте релаксационных колебаний. Новый режим генерации реализуется с помощью ранее предложенного метода акустического модулятора бегущей волны в сочетании со сферическим зеркалом резонатора. В диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере со средней выходной мощностью ~ 3 Вт наблюдались стабильные цуги импульсов с частотой повторения ~ 30 кГц и длительностью ~ 2 мкс. Внутри каждого цуга содержалось около 200 равноотстоящих моноимпульсов с длительностью ~ 45 пс.

DOI: 10.7868/S0370274X15120024

1. Введение. В работах [1–3] предложен оригинальный метод осуществления одновременно модуляции добротности резонатора и синхронизации мод твердотельного лазера с помощью сферического зеркала (СЗ) и акустооптического модулятора (АОМ) бегущей волны (метод СЗАОМ). При этом частота повторения импульсов Q-switch регулируется АОМом. При частотах повторения $\leq \tau^{-1}$ пиковая мощность увеличивается в τ/τ_c раз (здесь τ – время жизни верхнего рабочего уровня, τ_c – время жизни фотона в резонаторе). Дальнейшее увеличение пиковой мощности происходит за счет синхронизации мод (СМ). Для типичного Nd:YAG-лазера, работающего в режиме QCM с керровским элементом в резонаторе, увеличение пиковой мощности по отношению к средней составляло $\sim 10^7$ раз [1, 2].

В настоящей работе мы сообщаем о первом наблюдении в твердотельном лазере нового режима QCM, в котором модуляция добротности "самопроизвольно" происходит на частоте релаксационных колебаний. Такой "автоQCM-режим" также осуществляется с помощью метода СЗАОМ при подаче на модулятор непрерывного питающего сигнала ультразвуковой частоты (в отличие от обычного QCM-режима с периодическим отключением ультразвуковой частоты, которое задает частоту повторения Q-switch).

2. Описание установки и экспериментальные результаты. Экспериментальная схема лазера с четырехзеркальным Z-образным резонатором показана на рис. 1. Активным элементом служил кри-

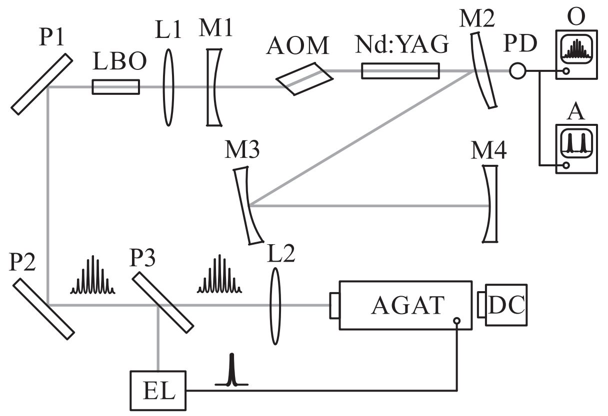

Рис. 1. Схема эксперимента: M1–M4 – зеркала резонатора, AOM – акустооптический модулятор, Nd:YAG – активный элемент, LBO – нелинейный кристалл, PD – лавинный фотодиод, O – осциллограф, A – анализатор спектра, L1 и L2 – линзы, P1–P3 – внешние плоские зеркала, EL – электронная схема запуска, AGAT – стрик-камера Агат-СФ3М, DC – видеокамера

сталл Nd:YAG диаметром 2 мм и длиной 63 мм с поперечной диодной накачкой на длине волны 808 нм. Радиусы кривизны сферических зеркал M1, M2, M3 и M4 составляли 300, -900, 200 и 150 мм соответственно. Коэффициент отражения зеркал M2–M4 на рабочей длине волны $\lambda = 1064$ нм составлял более 99.5 %. Зеркало M1 являлось выходным и имело пропускание 14 % на 1064 нм. Оптическая длина резонатора составляла $L \approx 151$ см. Акустооптический модулятор располагался под углом Брэгга к оптической оси резонатора рядом с концевым сферическим зеркалом M1. Центр модулятора, имеющего скосы под

[1)]e-mail: donin@iae.nsk.su

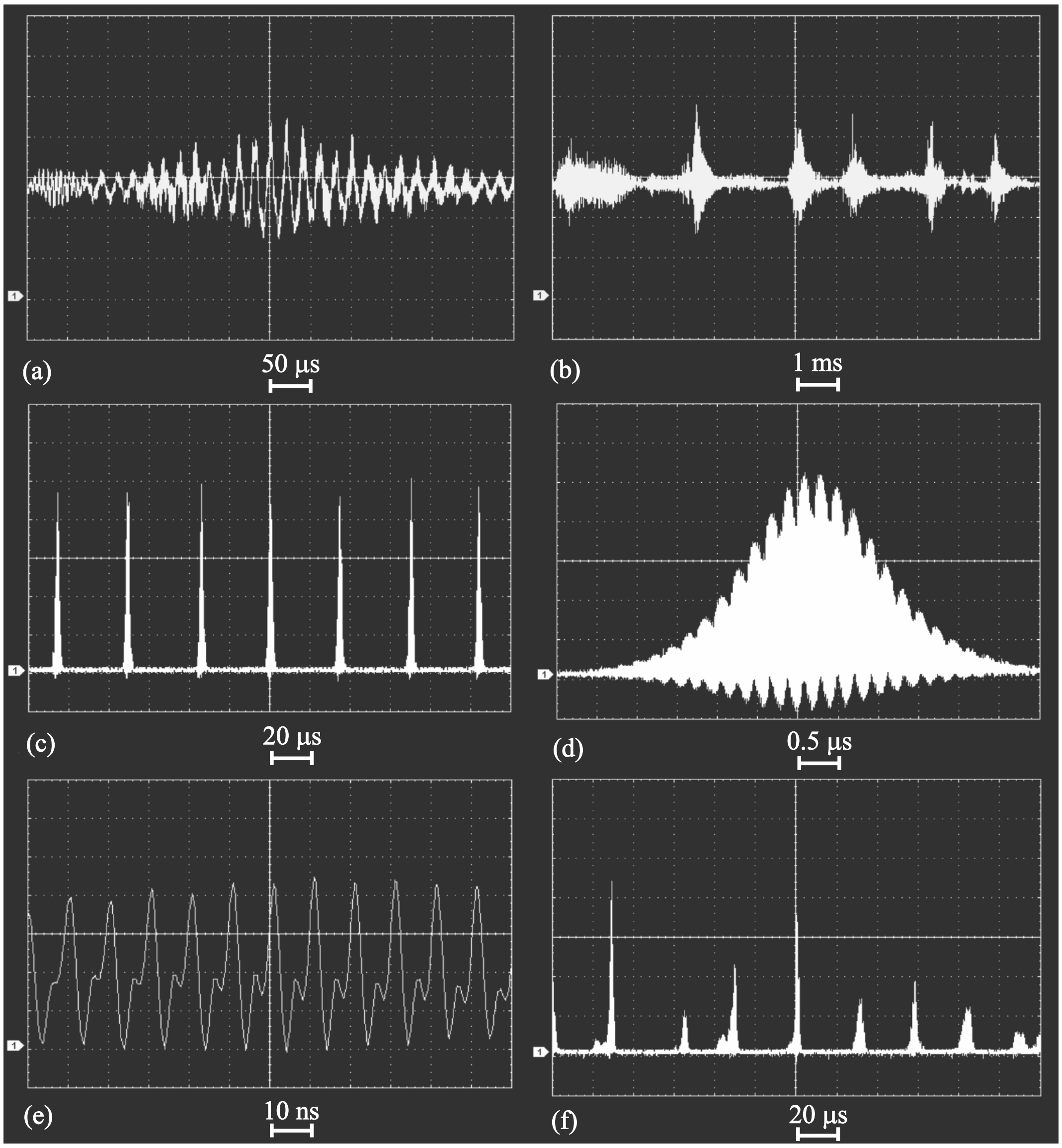

Рис. 2. Осциллограммы релаксационных колебаний. (a, b) – Непрерывный режим. (c–e) – АвтоQML-режим при точной настройке длины резонатора. (f) – АвтоQML-режим при отстройке $\Delta = 0.5$ мм

углом Брюстера, был удален от отражающей поверхности зеркала на расстояние, равное радиусу кривизны этого зеркала. На пьезопреобразователь АОМа подавалась рабочая частота $f = 49.5$ МГц, равная половине межмодового интервала, $c/2L = 2f$. Выходное излучение лазера фокусировалось линзой L1 в нелинейный кристалл (LBO длиной 20 мм, синхронизм 1-го типа). Плоские зеркала P1 и P2 обладали высоким отражением на 1064 и 532 нм, а зеркало P3 – высоким отражением на 1064 нм и высоким пропусканием на 532 нм. Таким образом, при помощи системы зеркал P1–P3 излучение второй гармоники направлялось в streak-камеру АГАТ, а излучение на основной длине волны – в электронную схему запуска EL. Схема запуска производила деление частоты повторения Q-switch и формирование отдельных импульсов. В результате запуск камеры производился одиночными импульсами длительностью ≈ 2 нс, следующими с частотой 8 Гц. Одновременно характеристики излучения, проходящего сквозь плотное зеркало M2, регистрировались лавинным фотодиодом PD (ЛФД-2), сигнал с которого направлялся на осциллограф и анализатор спектра SF 300 (Rohde&Schwarz). Изображение с экрана АГАТа записывалось на цифровую видеокамеру DC. Кадры видеозаписи обрабатывались в программе Mathcad. По результатам их обработки строились денситограммы. Калибровка камеры АГАТ осуществлялась при помощи пластинки лейкосапфира толщиной 12.2 мм. Пластинка устанавливалась перед камерой таким образом, чтобы поделить луч на две части. Одна часть попадала в камеру, минуя пластинку, другая проходила через нее, получая при этом задержку ≈ 31 пс. Это соответствовало сдвигу в 4 пикселей на снимках, полученных из видеозаписи.

Ток непрерывной накачки устанавливался близким к оптимальному для выходной мощности лазера и составлял 18.5–21.5 А. При этом выходная мощность менялась в пределах $W = (2{-}3)$ Вт. Частота межмодовых биений лазера и появление поперечных мод контролировались анализатором спектра.

На рис. 2a и b представлены осциллограммы релаксационных колебаний, полученные при токе 19 А в чисто непрерывном режиме генерации (т.е. без ультразвуковой волны в АОМе). При подаче звукового сигнала с частотой 49.5 МГц и мощностью 2 Вт (соответствующая дифракционная эффективность ≈ 5 %) на АОМ характер генерации лазера кардинально меняется и возникает "автоQCM-режим", иллюстрируемый рис. 2c–f.

Временное разрешение регистрационной системы (фотодиод и осциллограф) ~ 3 нс не позволяло определять длительность импульсов внутри цуга. Поэтому на рис. 3 представлены результаты ее измерения с камерой АГАТ.

3. Обсуждение результатов. Релаксационные колебания в лазерах являются результатом обмена между энергией генерируемого поля в резонаторе и энергией, запасенной в возбужденных атомах [4]. Они наиболее характерны для лазеров с большими временами жизни возбужденного рабочего уровня, $\tau \gg \tau_c$ (класс B), и характеризуются двумя основными константами [5]:

$$f_R = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{I}{I_0\tau\tau_c}}, \quad (1)$$

$$\tau_R = 2\tau\frac{I_0}{I}, \quad (2)$$

где f_R и τ_R – частота и время затухания релаксационных колебаний соответственно.

В нашем случае при изменении тока накачки (18.5–21.5 А) измеренная f_R менялась. В автоQCM-режиме она составляла 26–33 кГц. Вычисленное по (1) при $\tau = 250$ мкс и измеренным W и f_R отношение I/I_0 составило 0.11–0.18. При этом $\tau_c \sim 130$ нс было определено по ширине полосы "холодного" резонатора, $\Delta\nu = c\alpha/2\pi L = 1/\tau_c$, где α – полные потери на двойной проход (~ 24 %). В непрерывном режиме (рис. 2a и b) частота f_R была больше (50 кГц) за счет отсутствия дифракционных потерь АОМа, т.е. возрастания $I/I_0 \sim G/\alpha \sim 0.3$, где G – ненасыщенное усиление. Несмотря на некоторую "хаотичность" пульсаций, на рис. 2b наблюдается характерное $\tau_R \sim 1.5$ мс, что согласуется с (2).

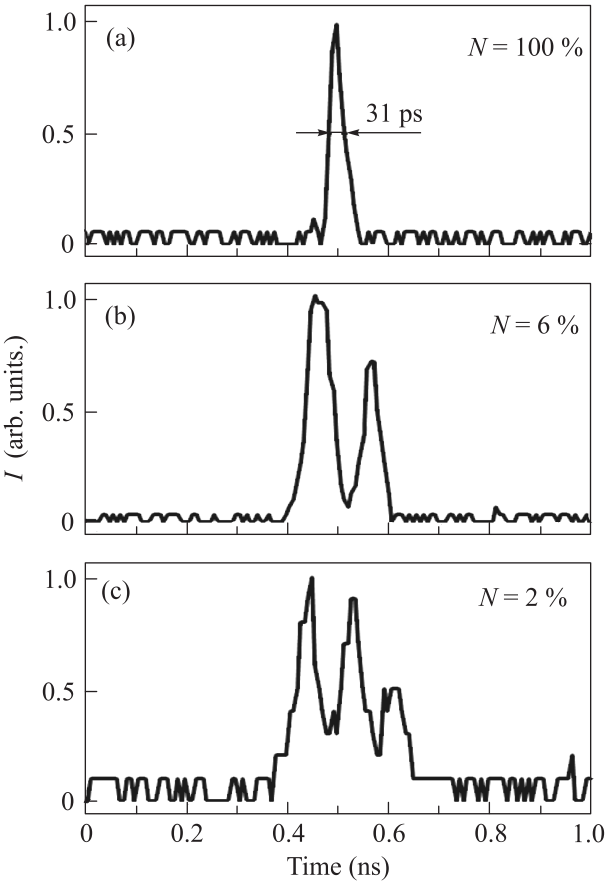

Рис. 3. Денситограммы импульсов на шкале 0.68 нс/см (предельное временное разрешение ≈ 12 пс). (a) – При точной настройке длины резонатора. (b, c) – При отстройке $\Delta = 0.5$ мм. Здесь N – % импульсов от их общего числа

В автоQCM-режиме при точной настройке длины резонатора на рабочую частоту АОМа (т.е. при $c/2L = 2f$) пульсации приобретают форму регулярных коротких импульсов (рис. 2c и d), следующих с частотой $f_R = 28$ кГц. Внутри каждого такого импульса наблюдается цуг более коротких импульсов, следующих с межмодовой частотой $c/2L = 99$ МГц (рис. 2e). По существу, это новый QCM-режим генерации, который "самопроизвольно" формируется на частоте релаксационных колебаний лазера. Поскольку режим Q-switch также хорошо описывается моделью затухающего осциллятора, по измеренной длительности импульса ~ 2 мкс и соотношению (2) можно получить оценку $I/I_0 \sim 250$, что приблизительно на порядок меньше τ/τ_c. На рис. 2d видна дополнительная структура пиков, отстоящих на ~ 200 нс. Пики вверху и внизу осциллограммы сдвинуты по фазе на π. Это свидетельствует о колебательном процессе с характерным временем, близким к $\tau_c \sim 100$ нс.

Отметим, что в обычном QCM-режиме [1, 2] за счет возрастания $I/I_0 \sim \tau/\tau_c$ длительность импульса τ_R сокращается приблизительно до одного колебания, $\tau_c \sim 100$ нс.

Как видно из рис. 3a, при точной настройке длины резонатора на рабочую частоту АОМа наблюдается моноимпульсная структура пикосекундных импульсов. При этом точность "нулевой" настройки резонатора определялась джиттером (jitter) рабочей частоты модулятора ± 3 кГц (что равноценно отстройке длины резонатора $\Delta = \pm 0.05$ мм). При отстройке порядка $\Delta = 0.5$ мм наблюдалась хаотичность релаксационных колебаний (рис. 2f) и наряду с доминирующими моноимпульсами появлялась немоноимпульсная структура (рис. 3b и c). Эта структура связана с возбуждением поперечных мод, которые, как показали измерения со спектроанализатором, отстоят от TEM_{00}-моды на 1 МГц[2]. С учетом временно́го разрешения стрик-камеры и факта измерения длительности импульса по второй гармонике (которая в $\sqrt{2}$ раз короче) измеренная длительность импульса генерации на 1064 нм составляет 45 ± 10 пс для моноимпульсов рис. 3a.

В заключение отметим, что влияние периодической низкочастотной модуляции потерь (порядка частоты релаксационных колебаний) на упорядоченность релаксационных колебаний неоднократно наблюдалось ранее (см., например, [6, 7]). Однако возникновение QCM-режима генерации в них обнаружено не было.

Авторы выражают благодарность А.В. Трубецкому за полезные обсуждения.

1. В. И. Донин, Д. В. Яковин, А. В. Грибанов, Квантовая электроника **42**, 107 (2012).
2. V. I. Donin, D. V. Yakovin, and A. V. Gribanov, Opt. Lett. **37**, 338 (2012).
3. В. И. Донин, Д. В. Яковин, А. В. Грибанов, *Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод*. Патент # 2478242 от 27.03.2013.
4. H. Statz, G. A. DeMars, D. T. Wilson, and C. L. Tang, J. Appl. Phys. **36**, 1510 (1965).
5. W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Springer Science and Business Media Inc., N.Y. (2006).
6. П. А. Хандохин, Я. И. Ханин, Квантовая электроника **11**, 1483 (1984).
7. K. Otsuka, D. Pieroux, and P. Mandel, Opt. Comm. **108**, 265 (1994).

[2] Подробнее немоноимпульсная структура в режиме QCM будет опубликована в другом месте.