

**ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ
РЕЗОНАТОРА Er:YAG-ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ
С ПОМОЩЬЮ ЗАТВОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА
Fe²⁺:ZnSe**

А. А. Воронов¹, В. И. Козловский², Ю. В. Коростелин², А. И. Ландман²,
Ю. П. Подмарьков^{1,2}, В. Г. Полушкин³, Тале Илхам-Оглы Рагимов¹,
Я. К. Скасырский², М. Ю. Филипчук¹, М. П. Фролов^{1,2}

Осуществлена импульсно-периодическая генерация Er:YAG-лазера ($\lambda = 2.94$ мкм) с диодной накачкой в свободном режиме и в режиме пассивной модуляции добротности резонатора с помощью затвора на основе кристалла Fe²⁺:ZnSe. При использовании импульсов накачки длительностью 3 мс средняя за импульс выходная мощность Er:YAG-лазера в режиме свободной генерации составила 0.5 Вт. В режиме пассивной модуляции добротности получены гигантские импульсы с энергией 3 мкДж и длительностью 180 нс.

Ключевые слова: твердотельные непрерывные инфракрасные лазеры, диодная накачка, модуляция добротности, твердотельный пассивный затвор.

Лазеры трехмикронного диапазона на основе кристаллов Er:YAG находят в настоящее время широкое применение в медицине, различных областях науки и техники. В частности, они являются удобными источниками накачки перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона на основе кристаллов A2B6, легированных двухвалентными ионами железа. Режим генерации коротких импульсов длительностью в десятки и сотни наносекунд, достигаемый с помощью модуляции добротности резонатора Er:YAG-

¹ Московский физико-технический институт, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр., 53; e-mail: frolovmp@x4u.lebedev.ru.

³ “Инженерный центр новых технологий Института ядерных исследований РАН”, 142190, Московская обл., г.Троицк, ИЯИ РАН, корп.115, ИЦНТ.

лазеров, позволяет расширить возможности их применения. Например, при возбуждении однократными наносекундными импульсами излучения, генерируемыми Er:YAG-лазером с ламповой накачкой, в кристаллах $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ и $\text{Fe}^{2+}:\text{CdSe}$ при комнатной температуре была получена генерация, плавно перестраиваемая в спектральной области 3.95–5.05 мкм и 4.7–6.1 мкм соответственно [1, 2]. Переход к импульсно-периодическому режиму накачки этих кристаллов наносекундными импульсами открывает перспективы для реализации на их основе квазинепрерывных лазеров с высокой средней мощностью выходного излучения, работающих при комнатной температуре в диапазоне спектра 4–6 мкм. В связи с этим представляет интерес разработка Er:YAG-лазеров с диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора.

Ранее модуляция добротности резонатора Er:YAG-лазера ($\lambda = 2.94$ мкм) была осуществлена с помощью вращающегося зеркала [3], электрооптического затвора [4], акустооптического затвора [5] и пассивного затвора на основе тонких слоев жидкости [6]. Недавно в Er:YAG-лазере с импульсной ламповой накачкой для этой цели был успешно использован пассивный затвор на основе кристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ [7]. Очевидными достоинствами твердотельного пассивного затвора являются его компактность и простота практического использования. В настоящей работе исследуется возможность применения такого кристалла для пассивной модуляции добротности резонатора Er:YAG-лазера с диодной накачкой.

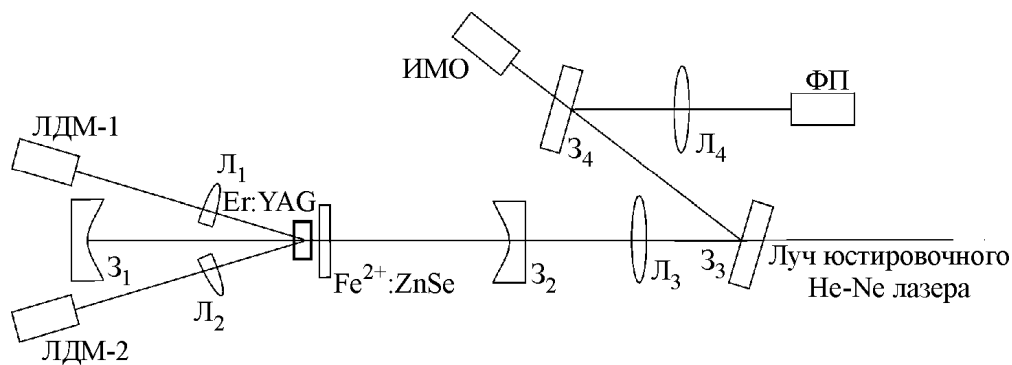


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: Z_1 , Z_2 – зеркала резонатора; Z_3 , Z_4 – поворотные зеркала; L_1 – L_4 – фокусирующие линзы; ЛДМ-1, ЛДМ-2 – лазерные диодные модули; ФП – фотоприемник; ИМО – измеритель мощности ИМО-2Н.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Активным элементом лазера служил плоскопараллельный кристалл Er:YAG (концентрация ионов Er^{3+} 50%) толщиной 1.2 мм без просветляющих покрытий, установленный в центре резонатора

перпендикулярно его оси. Использовался близкий к концентрическому резонатор, состоящий из двух сферических ($R = 50$ мм) зеркал. “Глухое” зеркало Z_1 имело коэффициент отражения 99.7% на длине волны 2.94 мкм, выходное зеркало Z_2 – 98.5%. Для накачки применялись два лазерных диодных модуля с волоконным выводом излучения DLM-10 производства НТО “ИРЭ-Полюс”, выходная мощность каждого из которых на длине волны 965 нм могла достигать 10 Вт. Пучки накачки падали на кристалл под углом 10° симметрично относительно оси резонатора. С помощью линз L_1 и L_2 с фокусным расстоянием 15 мм излучение накачки от каждого из диодных модулей фокусировалось в центр кристалла в пятно диаметром около 150 мкм. Края линз, обращенные к оси резонатора, были спилены для уменьшения углов между пучками накачки и осью резонатора.

Для предварительной юстировки резонатора Er:YAG-лазера использовался луч He-Ne лазера, который проходил через поворотное зеркало Z_3 и линзой L_3 фокусировался в центр кристалла. Коэффициент отражения зеркала Z_3 на длине волны 2.94 мкм составлял 99%.

Чтобы избежать необходимости принудительного охлаждения кристалла Er:YAG (суммарная мощность излучения накачки до 20 Вт), в настоящей работе использовался импульсно-периодический режим работы диодных модулей. Интервал между импульсами значительно превосходил их длительность. Накачка Er:YAG-лазера осуществлялась прямоугольными импульсами излучения диодов длительностью 3 мс, следовавших с частотой 4 Гц. Пиковая мощность излучения каждого из диодов могла регулироваться в диапазоне от 0.5 до 10 Вт за счет изменения тока накачки диодов. Временной ход генерации Er:YAG-лазера регистрировался с помощью фотоприемника ФП, сигнал с которого поступал на осциллограф Tektronix TDS3052B. В большинстве экспериментов в качестве фотоприемника ФП использовался фотодиод PD-36 с временным разрешением 0.3 мкс производства фирмы IBSG. При измерениях длительности гигантских импульсов фотодиод заменялся на охлаждаемое жидким азотом фотосопротивление на основе германия, легированного золотом (временное разрешение не хуже 10 нс). Для измерения мощности излучения использовался калориметр ИМО-2Н.

Для корректного определения поглощаемой в лазере мощности накачки нами были проведены прямые измерения поглощения излучения диодных модулей в активном элементе лазера при различных токах накачки. Измеренный коэффициент поглощения кристалла Er:YAG составлял 88% при низких уровнях мощности излучения диодов и монотонно снижался до 69% при максимальном токе, что было обусловлено изменением

спектрального состава излучения диодов при изменении тока накачки. Это обстоятельство учитывалось при обработке экспериментальных результатов.

Пассивный затвор на основе кристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ представлял собой плоскопараллельную (угол клина не более $30''$) пластинку толщиной 2.45 мм без просветляющих покрытий. Затвор устанавливался на расстоянии 2–3 мм от активного элемента перпендикулярно оси резонатора со стороны, противоположной накачке. Ненасыщенное поглощение в пассивном затворе составляло 1% на длине волны 2.94 мкм.

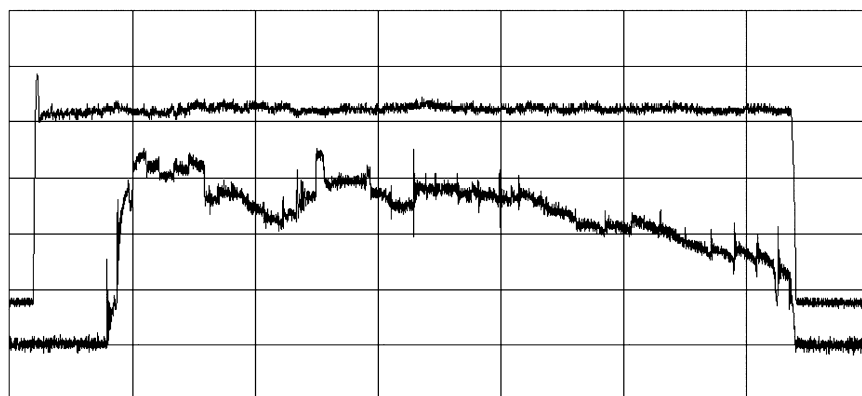


Рис. 2: Осциллограммы импульсов накачки (вверху) и свободной генерации $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера (внизу) при максимальной мощности накачки. Развертка 0.5 мс/дел.

В предварительных экспериментах нами были проведены исследования $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера, работающего в режиме свободной генерации (без пассивного затвора в резонаторе). На рис. 2 представлены осциллограммы импульса накачки и импульса свободной генерации, полученного при максимальной мощности накачки. Падение мощности генерации, наблюдающееся в течение импульса накачки на временах более 1 мс, по-видимому, связано с нагревом активного элемента излучением накачки, приводящего, с одной стороны, к изменению больцмановских факторов заселения верхнего и нижнего лазерных уровней [8], а, с другой, к возникновению развивающихся во времени термооптических эффектов.

При исследовании энергетических характеристик лазера с помощью калориметра ИМО-2 измерялись средние значения мощности накачки и генерации, из которых с учетом френелевских потерь на оптических элементах схемы и коэффициента поглощения кристалла $\text{Er}:\text{YAG}$, а также частоты следования импульсов накачки 4 Гц определялись соответствующие отдельному импульсу накачки поглощенная энергия накачки и выходная энергия $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера.

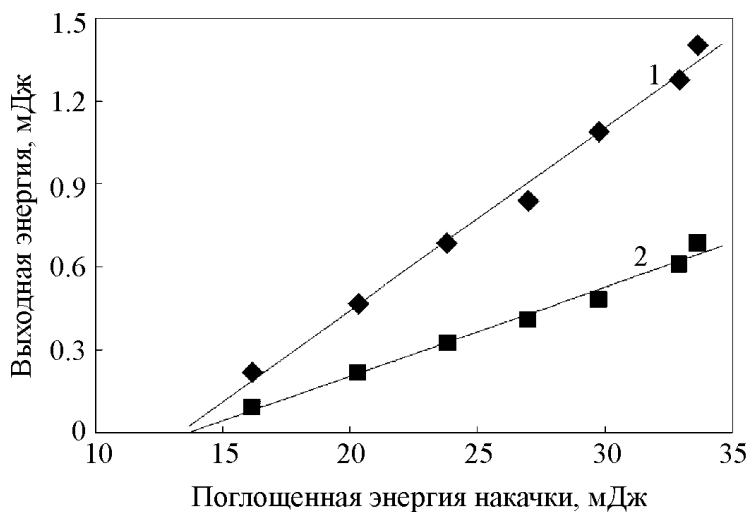


Рис. 3: Зависимости выходной энергии Er:YAG-лазера от поглощенной энергии накачки, полученные в режиме свободной генерации (1) и режиме пассивной модуляции добротности (2).

На рис. 3 показана зависимость выходной энергии лазера от поглощенной энергии накачки, полученная в режиме свободной генерации (кривая 1). При максимальной накачке (поглощенная в активном элементе энергия 33 мДж) энергия лазера в одном импульсе составляла 1.4 мДж, что соответствует средней за время импульса выходной мощности 0.5 Вт. Дифференциальная эффективность лазера по поглощенной энергии накачки, определенная по наклону проведенной через экспериментальные точки прямой, в режиме свободной генерации составила 6.6%. По-видимому, эффективность лазера может быть увеличена при использовании выходного зеркала с более высоким пропусканием.

С установленным в резонаторе кристаллом $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ Er:YAG-лазер работал в режиме пассивной модуляции добротности резонатора и генерировал цуг гигантских импульсов, следовавших друг за другом через 3–30 мкс в зависимости от мощности накачки. Кроме того, интервал между гигантскими импульсами изменялся с течением импульса накачки. Осциллограммы импульса накачки и цуга гигантских импульсов, записанные в таком режиме при максимальной мощности накачки, приведены на рис. 4.

Зависимость суммарной энергии цуга гигантских импульсов от поглощенной энергии накачки представлена на рис. 3 (кривая 2). При максимальной накачке такой цуг содержал ~ 500 гигантских импульсов. Суммарная энергия гигантских импульсов была 0.7 мДж, что лишь в два раза ниже значения энергии свободной генерации лазера.

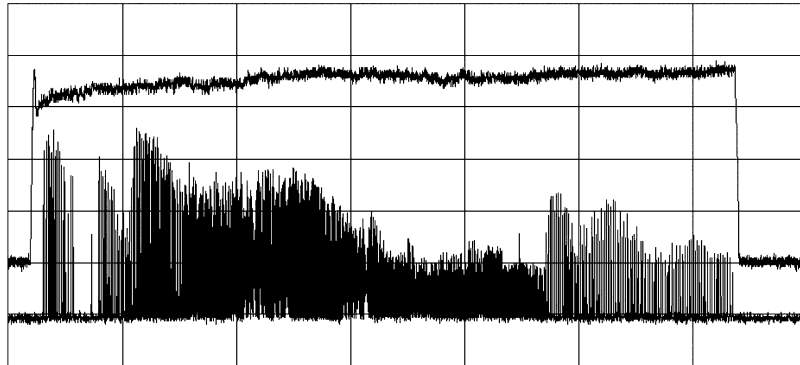


Рис. 4: Осциллограммы импульсов накачки (вверху) и генерации Er:YAG-лазера (внизу) в режиме пассивной модуляции добротности резонатора при максимальной мощности накачки. Развертка 0.5 мс/дел.

Средняя энергия отдельного гигантского импульса была 1.4 мкДж. Длительность гигантских импульсов, измеренная на половинном уровне интенсивности, составила 350–600 нс. При этом мощность излучения гигантских импульсов достигала 5 Вт, что на порядок превышает значение, полученное в режиме свободной генерации.

Нами была предпринята попытка увеличить мощность отдельного гигантского импульса за счет использования пассивного затвора с более высоким начальным поглощением (2.5%). Действительно, с таким затвором были получены гигантские импульсы длительностью 180 нс с энергией до 3 мкДж, что соответствует мощности 17 Вт. Однако при этом наблюдалось двукратное возрастание порога генерации лазера и снижение его дифференциальной эффективности в 4 раза по сравнению с режимом свободной генерации, что, вероятно, было обусловлено высоким уровнем внутренних потерь в материале имевшегося в нашем распоряжении затвора. По-видимому, при использовании более плотного затвора, изготовленного из материала с малыми внутренними потерями, возможно существенное улучшение характеристик лазера.

Таким образом, в данной работе впервые реализована пассивная модуляция добротности резонатора Er:YAG-лазера с диодной накачкой, работающего в импульсно-периодическом режиме. Полученные результаты открывают возможность для запуска при комнатной температуре квазинепрерывных лазеров на основе кристаллов A2B6, легированных двухвалентными ионами железа, для области спектра 4–6 мкм. Кроме того, квазинепрерывный Er:YAG-лазер, работающий в режиме модуляции добротности, представляет интерес для медицинских применений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09-02-00864-а, 09-02-00877-а), Программы Министерства образования и науки РФ “Развитие научного потенциала высшей школы” и Программы “Участник молодежного научно-инновационного конкурса 2009” (“У.М.Н.И.К.”) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Акимов, А. А. Воронов, В. И. Козловский и др., Квантовая электроника **36**, 299 (2006).
- [2] В. В. Миславский, В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин и др., *Труды 52-й научной конференции МФТИ*, 2009, Москва-Долгопрудный (МФТИ, Долгопрудный, 2009), с. 100-102.
- [3] Х. С. Багдасаров, В. П. Данилов, В. И. Жеков и др., Квантовая электроника **5**, 150 (1978).
- [4] Х. С. Багдасаров, В. И. Жеков, Л. А. Кулевский и др., Квантовая электроника **7**, 1959 (1980).
- [5] S. Schnell, V. G. Ostroumov, J. Bregue, et al., IEEE J. Quantum Electronics **26**, 1111 (1990).
- [6] К. Л. Водопьянов, Л. А. Кулевский, П. П. Пашинин, А. М. Прохоров, ЖЭТФ **82**, 1820 (1982).
- [7] А. А. Воронов, В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин и др., Квантовая электроника **36**, 1 (2006).
- [8] S. Georgescu, O. Toma, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics **11**, 682 (2005).

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.