

ОДНОЧАСТОТНЫЙ Yb,Er-ЛАЗЕР С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

Е. О. Батура¹, М. В. Богданович¹, А. В. Григорьев¹,
В. Н. Дудиков¹, К. И. Ланцов^{1*}, А. Г. Рябцев¹, Г. И. Рябцев¹,
П. В. Шпак¹, Л. Л. Тепляшин¹, М. А. Щемелев¹, П. И. Садовский²

УДК 535.37+621.371.378

¹ Институт физики НАН Беларуси,

220072, Минск, Беларусь; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской АН, 141190, Фрязино Московской обл., Россия; e-mail: spavi@rambler.ru

(Поступила 12 августа 2020)

Исследованы условия формирования режима одночастотной моноимпульсной генерации в Yb,Er-лазере на основе иттербий-эрбиевого фосфатного стекла с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности, реализуемой с помощью кристалла $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$. Экспериментально показано, что степень спектральной селективности, обеспечивающая устойчивую одночастотную генерацию в Yb,Er-лазере, достигается в резонаторе, включающем в себя внутрирезонаторный интерферометр Фабри–Перо, образованный глухим зеркалом и ближней к нему торцевой поверхностью активного элемента с плоскопараллельными гранями, а также интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ, фильтр Лью). При этом ИПФ, формируемый активным элементом с термически наведенной анизотропией и поляризатором в виде пластинки пассивного затвора, установленной под углом Брюстера к оси резонатора, выступает в качестве предварительного спектрального селектора. Максимальная энергия сформированных выходных лазерных импульсов составила 6 мДж при длительности 20.2 нс, частоте следования 1 Гц и ширине спектра одночастотной генерации 41 МГц.

Ключевые слова: иттербий-эрбиевый лазер, фосфатное стекло, поперечная диодная накачка, пассивная модуляция добротности, одночастотный моноимпульсный режим генерации на длине волны 1.535 мкм.

We investigated the conditions for forming the single-frequency monopulse operation mode of the transversally diode pumped Yb,Er-phosphate glass laser with a passive Q-switch based on the $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal. It was shown experimentally that the spectral selectivity that ensures the stable single-frequency operation for the Yb,Er-laser is achieved in the intracavity Fabry–Perot interferometer in the form of the totally reflecting mirror and nearest end surface of an active element with plane-parallel faces, as well as the polarization interference filter (PIF, Lyot filter). Meanwhile, the PIF created by an active element with thermally induced anisotropy and a polarizer in the form of a passive Q-switch plate, oriented at Brewster's angle to the resonator axis, acts as a preliminary spectral selector. The maximum energy of the formed output laser pulses was 6 mJ with a duration of 20.2 ns, a repetition rate of 1 Hz, and a single-frequency lasing spectrum width of 41 MHz.

Keywords: ytterbium-erbium laser, phosphate glass, transversal diode pump, passive Q-switching, single-frequency monopulse lasing at the wavelength of 1.535 μm .

SINGLE-FREQUENCY TRANSVERSALLY DIODE PUMPED Yb,Er-LASER WITH PASSIVE Q-SWITCHING UNIT

Е. О. Батура¹, М. В. Богданович¹, А. В. Григорьев¹, В. Н. Дудиков¹, К. И. Ланцов^{1*}, А. Г. Рябцев¹, Г. И. Рябцев¹, П. В. Шпак¹, Л. Л. Тепляшин¹, М. А. Щемелев¹, П. И. Садовский²
(¹ В. И. Степанов Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by; ² Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (branch in Fryazino), Fryazino, Moscow region, 141190, Russia; e-mail: spavi@rambler.ru)

Введение. Моноимпульсные одночастотные твердотельные лазеры (ОТЛ), генерирующие на одной продольной моде резонатора с шириной спектра порядка нескольких десятков мегагерц при относительно высокой энергии импульсов излучения (на уровне единиц и даже десятков мДж), востребованы в различных научно-технических сферах: спектроскопии высокого разрешения [1—3], метрологии, оптической доплеровской локации, лидарных комплексах наземного, воздушного и космического базирования [4—7].

Селекция продольных мод генерации в ОТЛ осуществляется созданием в лазерном резонаторе условий, при которых оптические потери для селективируемой моды/частоты становятся минимальными [8—10], или путем инъекции излучения одночастотного маломощного лазера, настроенного на одну из собственных продольных мод/частоту резонатора [11—13]. В качестве актуальной задачи данного направления следует выделить разработку компактных высокоэнергетических ОТЛ, генерирующих в условно безопасном для органов зрения спектральном диапазоне 1.5—2.0 мкм. К настоящему времени большинство работ по ОТЛ выполнено применительно к лазерам на основе неодимосодержащих активных сред, излучающих на длинах волн $\lambda = 0.1—1.1$ мкм [1, 6, 11—18]. Проблемы, связанные с разработкой и созданием условно безопасных твердотельных одночастотных излучателей с диодной накачкой, например, на основе иттербий-эрбиевых сред, исследованы меньше [19—22].

Цель настоящей работы — изучение условий формирования одночастотного режима генерации Yb,Er-лазера с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности. Моноимпульсный одночастотный режим генерации осуществлялся методом дискриминации продольных мод с учетом селективных свойств резонатора и особенностей механизма развития моноимпульса в Yb,Er-лазере с $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ пассивным затвором.

Эксперимент. Получение одночастотного моноимпульсного режима генерации эрбиевого лазера экспериментально рассмотрено применительно к трем различным конфигурациям резонатора (рис. 1). На всех этапах работы в качестве активной среды использовано фосфатное стекло марки ЛГС-ДЕ (филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино). Концентрации ионов иттербия и эрбия $1.8 \cdot 10^{21}$ и $3.0 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Активные элементы (АЭ) изготавливались в виде параллелепипедов длиной $L_{\text{АЭ}} = 30$ мм с различными углами наклона торцевых граней. Твердотельные пассивные затворы 4 в виде плоскопараллельных пластин из кристалла $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ имели начальное пропускание $T_Q = 75\%$ на $\lambda = 1535$ нм. Затворы располагались под углом Брюстера к оси резонаторов лазеров. Возбуждение АЭ проводилось линейками лазерных диодов (ЛЛД) 2 по схеме поперечной накачки (НПП “Инжект”, Саратов). Лазеры генерировали импульсы излучения с энергией 4.5—9.0 мДж (в зависимости от уровня возбуждения и типа резонатора) при частоте следования 1 Гц. Эксперименты проводились при комнатной температуре.

Спектральный состав излучения исследуемых лазеров с резонаторами C_1 , C_2 и C_3 (рис. 1, а—в) и их временные характеристики изучались с помощью системы регистрации б, включающей в себя измерительный интерферометр Фабри–Перо с шириной аппаратной функции 470 МГц и ССD-линейку в фокальной плоскости камерного объектива интерферометра, скоростной фотодетектор с полосой пропускания 5 ГГц и осциллограф с полосой пропускания 8 ГГц. На рис. 2—4 представлены диаметрально сечения интерферограмм спектров излучения лазера и соответствующие им временные развертки импульсов излучения лазеров с резонаторами C_1 , C_2 и C_3 . По виду временных разверток импульсов излучения лазеров можно четко фиксировать одночастотный или многочастотный режим генерации лазера. Такой дополнительный контроль необходим, когда интерферометр Фабри–Перо не разрешает соседние моды резонатора лазера или интервал между ними больше области свободной дисперсии интерферометра и может происходить наложение со стороны соседних порядков.

Длина первого резонатора C_1 , сформированного “глухим” зеркалом 1 и выходным зеркалом 5 с коэффициентом отражения $R = 70\%$, составляет $L_{C1} = 12$ см (рис. 1, а). АЭ 3 изготовлен в форме параллелепипеда со скошенными торцами. Накачка АЭ осуществлялась через две его боковые поверхности шестью ЛЛД 2 с максимальной мощностью импульса излучения $P_p = 6 \times 70$ Вт. Энергия импульсов генерируемого излучения составила 9.0 мДж при длительности импульсов 16.0 нс и частоте следования 1 Гц.

Лазер с резонатором C_1 генерирует излучение на двух или более продольных модах резонатора (многочастотный режим) (рис. 2). Продольные моды в резонаторе C_1 выделялись в результате “естественной” селекции мод в условиях пассивной модуляции добротности [23] и формирования в резонаторе интерференционно-поляризационного фильтра (ИПФ) — фильтра Лию [24, 25].

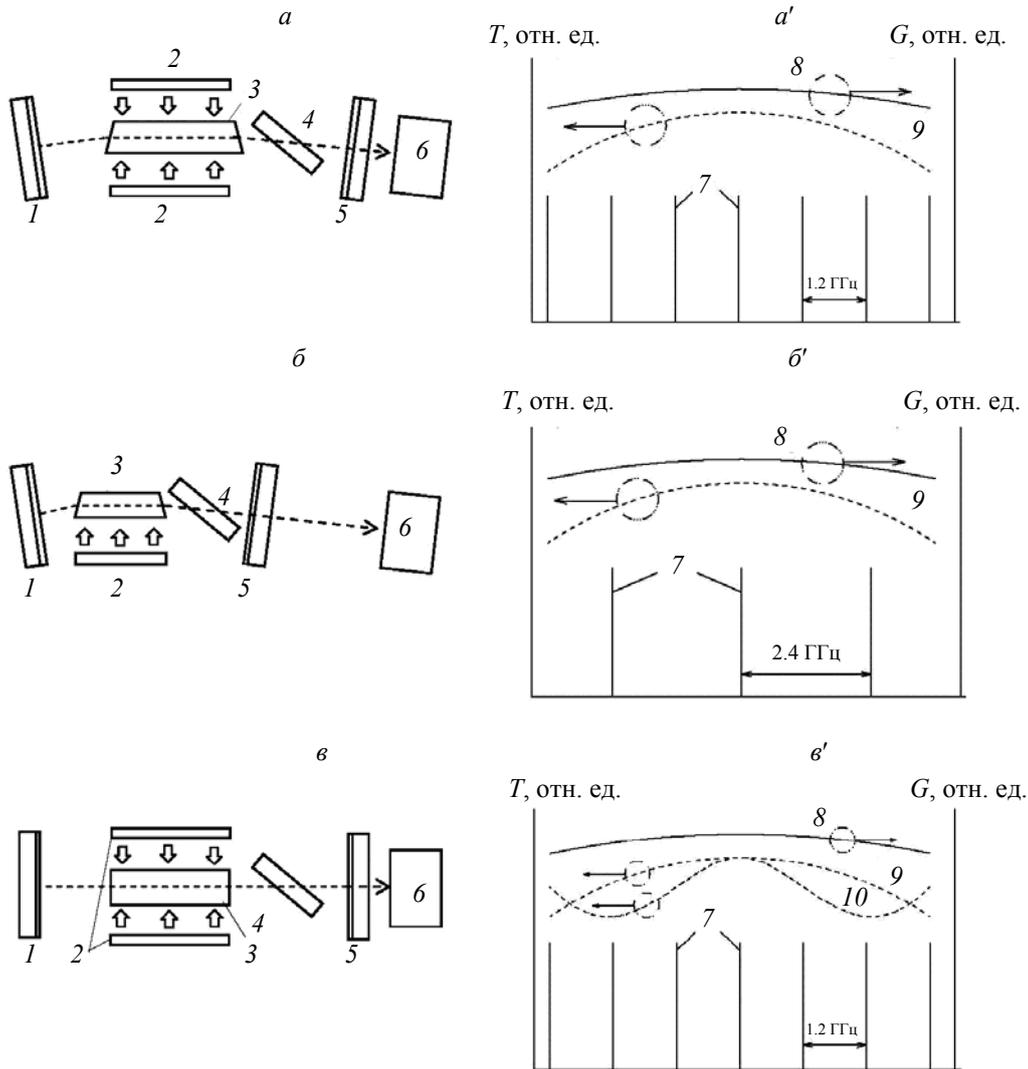


Рис. 1. Оптические схемы (a — v) и спектральный состав (a' — v') исследуемых лазеров: a — резонатор C_1 , АЭ со скошенными торцами, $L_{C1} = 12$ см; b — резонатор C_2 , АЭ со скошенными торцами, $L_{C2} = 6$ см; v — резонатор C_3 , АЭ в форме прямоугольного параллелепипеда, $L_{C3} = 12$ см; 1 — глухое зеркало; 2 — ЛЛД; 3 — АЭ; 4 — пассивный затвор; 5 — выходное зеркало; 6 — система регистрации; 7 — положение собственных продольных мод лазерного резонатора в шкале частот ν ; 8 — частотный профиль усиления $G(\nu)$ активной среды; 9, 10 — кривые пропускания $T(\nu)$ интерференционно-поляризационного фильтра (зеркало 1 — пассивный затвор 4) и интерферометра Фабри–Перо (зеркало 1 — торец прямоугольного АЭ)

Для повышения степени спектральной селективности лазера (формирования генерации на одной продольной моде резонатора) предложено сократить длину резонатора вдвое, увеличив тем самым расстояние между его собственными модами. Это позволило получить лазерную генерацию при меньшем количестве продольных мод. Данный вариант резонатора C_2 ($L_{C2} = 6$ см) представлен на рис. 1, б. Накачка АЭ осуществлялась с одной боковой стороны тремя ЛЛД, $P_p = 3 \times 70$ Вт, лазер генерировал импульсы с выходной энергией 4.5 мДж при длительности импульсов 9.5 нс и частоте следования 1 Гц. Как видно из рис. 3, лазер с резонатором C_2 генерировал на двух (рис. 3, а) или одной (рис. 3, б) продольной моде.

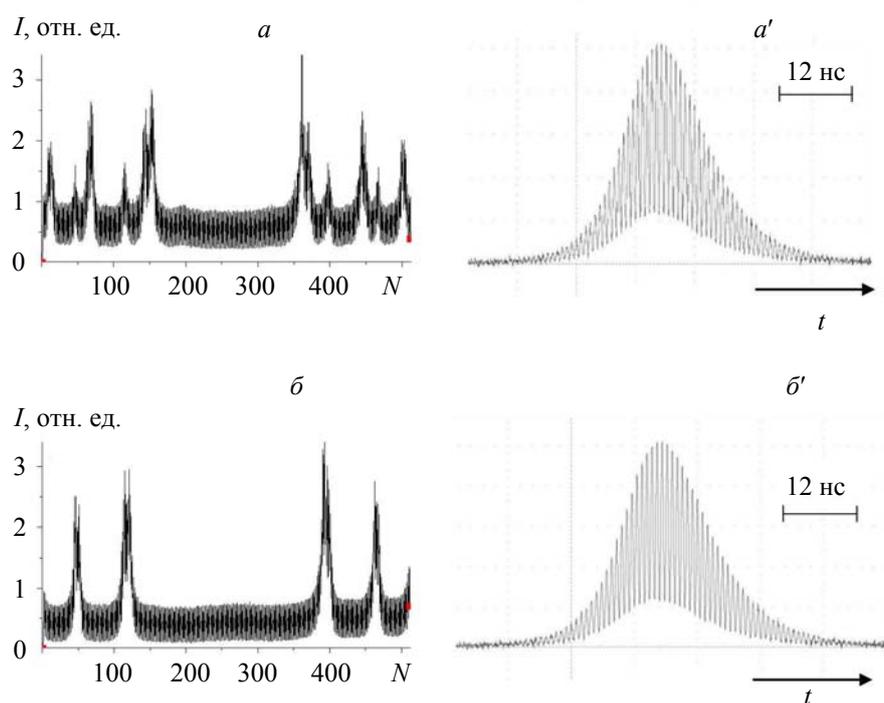


Рис. 2. Диаметральные сечения интерферограмм лазера с резонатором C_1 для трехчастотного (a) и двухчастотного (b) режимов генерации и соответствующие осциллограммы импульсов излучения (a' и b'); N — номер пикселя измерительной CCD-линейки, t — время

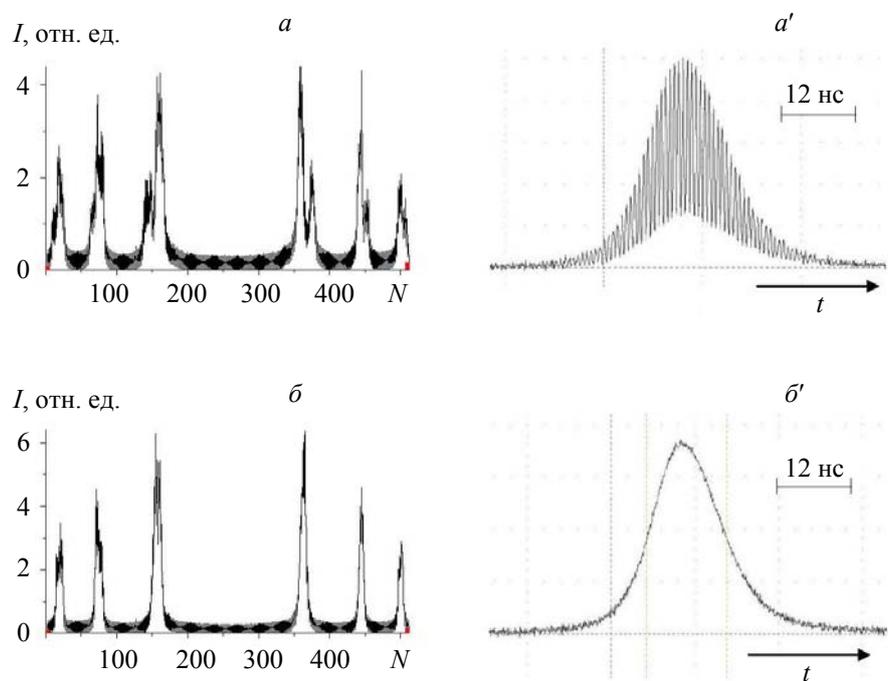


Рис. 3. Диаметральные сечения интерферограмм лазера с резонатором C_2 для двухчастотного (a) и одночастотного (b) режимов генерации и соответствующие осциллограммы импульсов излучения (a' и b'); N — номер пикселя измерительной CCD-линейки, t — время

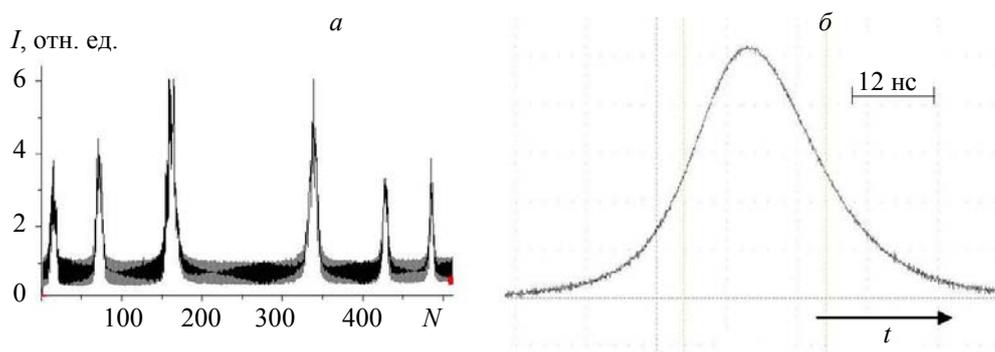


Рис. 4. Диаметральное сечение интерферограммы лазера с резонатором C_3 для одночастотного режима генерации (а) и соответствующая осциллограмма импульса излучения (б); N — номер пикселя измерительной CCD-линейки, t — время

Для получения стабильного одночастотного режима генерации Yb-Er-лазера с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности предложено сформировать в резонаторе лазера дополнительный селектирующий элемент — интерферометр Фабри–Перо (лазер с резонатором C_3 , рис. 1, б). Длина резонатора данного лазера $L_{C_3} = 12$ см. Резонатор C_3 образован зеркалами 1 и 5, однако АЭ имел форму прямоугольного параллелепипеда. Накачка АЭ осуществлялась через две боковые поверхности шестью импульсными ЛЛД, $P_p = 6 \times 70$ Вт. Энергия импульсов выходного излучения лазера 6.0 мДж при длительности импульсов 20.2 нс и частоте следования 1 Гц. Дополнительный селектор резонатора C_3 в виде интерферометра Фабри–Перо формировался глухим зеркалом резонатора 1 и ближней к нему торцевой поверхностью АЭ с плоскопараллельными гранями. Наличие в C_3 (наряду с пассивным затвором с его “естественной” селекцией собственных мод и фильтром Лио) дополнительного селектора на основе интерферометра Фабри–Перо позволило добиться формирования устойчивого одночастотного режима генерации Yb-Er-лазера (рис. 4).

На рис. 1, а'—в' в зависимости от частоты ν схематично представлены: положения собственных продольных мод резонаторов C_1 , C_2 и C_3 (7), усиление активной среды G (8), пропускание T внутрирезонаторного интерферометра Фабри–Перо, образованного зеркалом 1 и плоским торцом АЭ лазера с резонатором C_3 (10). Кривые $G(\nu)$ строились на основании результатов измерений спектров излучения Yb,Er-лазеров в режиме свободной генерации, а также данных [26]. Внутрирезонаторный интерферометр Фабри–Перо с начальной базой 3 см формировался “глухим” зеркалом 1 резонатора и ближайшей к нему торцевой поверхностью АЭ. Величина базы варьировалась в небольших пределах перемещением зеркала 1 с целью изменения взаимного положения продольных мод резонатора и максимума пропускания внутрирезонаторного интерферометра Фабри–Перо. Кроме того, схематично отображен частотный спектр пропускания ИПФ $T(\nu)$ в области его максимума (кривая 9). Кривая зависимости $T(\nu)$ для ИПФ строилась на основании исходной формулы $T(\lambda) = T_0 \cos^2(\pi \Delta n L_m / \lambda)$, где T_0 — максимальное пропускание ИПФ с учетом потерь на поглощение и отражения, $\Delta n = n_o - n_e$ — разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной световых волн, L_m — длина двулучепреломляющей среды. При этом область частотной дисперсии $\delta\nu$ задается в виде $\delta\nu = c[\Delta n L_m]^{-1}$, где c — скорость света [25]. Величина Δn , а следовательно, и $\delta\nu$ для твердотельных активных сред задается градиентом температуры между центром и боковой поверхностью АЭ, термооптически/термоупругими постоянными и т. п. [27].

Разность показателей преломления Δn в Yb,Er-активных средах в условиях термонаведенного двулучепреломления находилась следующим образом. При определенных значениях T_Q и уровней накачки Yb,Er-лазера, АЭ которого имеет скошенные грани, в его спектре наблюдаются две группы собственных продольных мод, разнесенные по частоте на ~ 30 ГГц. В предположении, что спектральные максимумы групп мод приходятся на соседние максимумы пропускания ИПФ, это значение взято в качестве области частотной дисперсии $\delta\nu$ ИПФ. В рамках данного подхода для однократного полного обхода резонатора ($L_m = 2L_{AЭ}$) $\Delta n \approx 0.16$. Это согласуется с аналогичными величинами, характерными для сред с естественным и/или термонаведенным двулучепреломлением, применяемым в лазерной технике [25, 27]. С учетом Δn зависимость $T(\nu) = T_0 \cos^2(\pi \Delta n L_m c / \nu)$ строилась в пределах интервала частот 8.5 ГГц (рис. 1, кривая 9) при $T_0 = \text{const}$.

Ширина спектра генерации лазера в конфигурации C_3 определялась гетеродинным методом. Для этого уменьшена степень спектральной селективности лазера (подбором размера базы и резкости интерферометра Фабри–Перо, а также наклоном АЭ относительно оси резонатора) и получена генерация на двух соседних продольных модах. С помощью скоростного фотоприемника и осциллографа фиксировался сигнал межмодовых биений. С применением быстрого преобразования Фурье сигнала биений определялась спектральная ширина излучения на одной продольной моде. Форма регистрируемого спектра излучения аппроксимировалась профилем Фойгта (рис. 5). Ширина спектра генерации лазера C_3 составила 41 МГц.

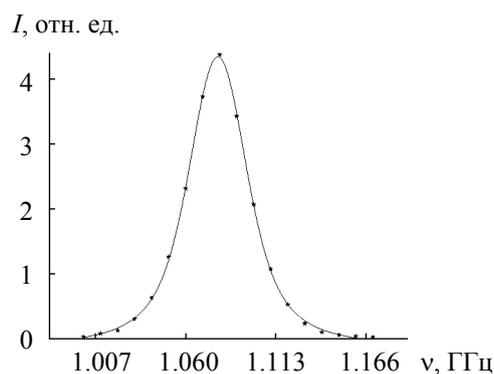


Рис. 5. Спектр генерации лазера с резонатором C_3 , зарегистрированный методом гетеродинирования

Результаты и их обсуждение. Полученные экспериментальные результаты объясняются следующим образом. В лазерах с пассивной модуляцией добротности до начала нелинейного развития монопulses (вблизи порога генерации) импульс излучения совершает большое количество проходов (от единиц до десятков тысяч) в режиме квазилинейного роста интенсивности. В течение этого времени даже небольшое различие в усилении или в оптических потерях для различных мод приводит к значительному различию их интенсивностей, происходит “естественная” селекция мод. Это означает, что на этапе формирования импульсов генерации в лазерах с пассивной модуляцией добротности происходит сужение спектра излучения лазера путем дискриминации продольных мод лазера. В случае, когда для получения одночастотной генерации недостаточно “естественной” селекции мод, в резонатор лазера необходимо вводить дополнительные внутррезонаторные селекторы. В качестве таких дополнительных селекторов можно использовать интерферометр Фабри–Перо, формируемый плоскопараллельными поверхностями ряда внутррезонаторных элементов, и/или ИПФ, формируемый АЭ с термически наведенной анизотропией и поляризатором в виде пластинки пассивного затвора, установленной под углом Брюстера к оси резонатора.

В лазере с конфигурацией резонатора C_1 (рис. 1, а) торцы АЭ скошены под небольшим углом к оси резонатора. Кроме “естественной” селекции продольных мод лазера дополнительная селекция осуществляется с помощью ИПФ. Однако результаты экспериментов свидетельствуют о том, что данный вид дополнительного селектора не обеспечивает режим одночастотной генерации для исследуемых Yb,Er -лазеров с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности. В зависимости от взаимного расположения собственных продольных мод резонатора лазера и максимума кривой пропускания ИПФ лазер генерирует в двухчастотном или многочастотном режиме (рис. 2).

С целью установления надлежащих условий генерации Yb,Er -лазера в одночастотном режиме наряду с C_1 предложена конфигурация резонатора C_2 (рис. 1, б). Длина резонатора C_2 по сравнению с C_1 уменьшена вдвое, что позволило увеличить межмодовый интервал резонатора C_2 в два раза (до 2.4 ГГц) и повысить степень спектральной селективности лазера. Применялась односторонняя боковая накачка. В случае резонатора C_2 одночастотная генерация получена только при точном совпадении частоты одной из собственных продольных мод с частотой максимума кривой пропускания ИПФ. В отсутствие активной температурной стабилизации параметров резонатора лазер в основном генерировал в двухчастотном режиме. Селекция продольных мод в резонаторе C_2 , как и в резонаторе C_1 , осуществлялась по механизму “естественной” селекции мод лазеров с пассивной модуляцией

добротности и внутрирезонаторным ИПФ (фильтром Лио). Однако уменьшение длины резонатора C_1 и, соответственно, увеличение расстояния между собственными модами резонатора в два раза позволило добиться сужения спектра генерации лазера.

Для формирования устойчивой одночастотной генерации предложено дополнить C_1 еще одним внутрирезонаторным селектором. В качестве такого дополнительного селектора использован внутрирезонаторный интерферометр Фабри–Перо, образованный глухим зеркалом I и ближней к нему торцевой поверхностью прямоугольного АЭ (рис. 1, *в*). Таким образом, в резонаторе C_3 селекция продольных мод осуществлялась в результате “естественной” селекции мод при наличии в резонаторе как ИПФ, так и внутрирезонаторного интерферометра Фабри–Перо. При этом ИПФ, как следует из рис. 1, $a'—e'$, выступал в качестве предварительного спектрального селектора. Настройка внутрирезонаторного интерферометра Фабри–Перо осуществлялась прецизионным перемещением глухого зеркала резонатора, которое приводило к изменению частоты пропускания интерферометра Фабри–Перо и собственных мод резонатора C_3 , что позволило получить устойчивую одночастотную генерацию.

Результаты спектральных измерений коррелируют с осциллограммами импульсов излучения. В многочастотном режиме генерации наблюдаются биения не только между двумя соседними модами. Наложение друг на друга пиков модовых биений с различными частотными интервалами усложняет форму временного импульса лазера с резонатором C_1 , поэтому отдельные пики почти не разрешаются на рис. 2, a' . В двухчастотном режиме генерации (лазеры с резонаторами C_1 и C_2) биения наблюдаются в основном между соседними модами. На рис. 2, b' и рис. 3, a' хорошо проявляются отдельные амплитудные пики. Контур импульсов лазеров, работающих в одночастотном режиме (с резонаторами C_2 и C_3 , рис. 3, b' и рис. 4, b), изображаются в виде гладких линий [15]. Для лазера с резонатором C_3 (АЭ в виде прямоугольного параллелепипеда), работающего в устойчивом одночастотном режиме, методом гетеродинирования установлена ширина спектра генерации одночастотного лазера 41 МГц.

Заключение. Исследованы условия формирования режима одночастотной моноимпульсной генерации в Yb,Eg-лазере с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности, реализуемой с помощью кристалла $Co^{2+}:MgAl_2O_4$. Степень спектральной селективности, обеспечивающая устойчивую одночастотную генерацию в лазере на основе иттербий-эрбиевого фосфатного стекла с пассивной модуляцией добротности, достигается в лазерном резонаторе, который включает в себя интерференционно-поляризационный фильтр (фильтр Лио) и внутрирезонаторный интерферометр Фабри–Перо. Интерференционно-поляризационный фильтр, образованный активным элементом с наведенным под воздействием излучения накачки двулучепреломлением и частичным поляризатором — пластинкой пассивного затвора, установленной под углом Брюстера к оси резонатора, служит в данном случае предварительным селектором. Селективные свойства интерференционно-поляризационного фильтра усиливаются интерферометром Фабри–Перо, образованным “глухим” зеркалом резонатора и ближайшей к нему торцевой поверхностью активного элемента с плоскопараллельными гранями. Следует отметить, что все внутрирезонаторные селекторы могут быть образованы с помощью стандартных оптических элементов, входящих в состав резонатора.

Максимальная энергия выходных импульсов одночастотного Yb,Eg-лазера 6 мДж при длительности 20.2 нс и частоте следования импульсов 1 Гц. Ширина спектра генерации, определенная гетеродинным методом, 41 МГц превышает ширины линий, получаемые методом инъекции внешнего узкополосного сигнала или путем применения телескопических резонаторов длиной до 2 м (1.4—1.5 МГц [20, 22], 15—30 МГц [15, 6]). Предлагаемый подход, основанный на применении внутрирезонаторных интерферометра Фабри–Перо и интерференционно-поляризационного фильтра, позволяет значительно уменьшить габариты узкополосных излучателей при обеспечении относительно высоких энергетических показателей. При скорости воздушного потока 1 м/с частотный доплеровский сдвиг ~ 1.8 МГц ($\lambda = 1064$ нм) [6], поэтому большое внимание обращается на обеспечение не только предельно узкой полосы генерации, но и максимально высокой ее временной стабильности.

Результаты могут быть использованы при разработке и создании компактных одночастотных источников лазерного излучения для ветровых доплеровских систем и лидаров дифференциального поглощения, работающих в условно безопасном для органов зрения спектральном диапазоне.

- [1] М. Н. Скворцов, М. В. Охупкин, А. Ю. Невский, С. Н. Багаев. Квант. электрон., **34** (2004) 1101—1106
- [2] А. А. Диденко, В. В. Бирюк, С. В. Лукачев, С. Г. Матвеев. Лазерно-оптические методы диагностики процессов горения, Самара, СГАУ (2006)
- [3] С. М. Игнатович, Н. Л. Квашнин, М. В. Охупкин, М. Н. Скворцов. Квант. электрон., **42** (2012) 514—517
- [4] Б. С. Ринкевичюс, С. М. Игнатович, Н. Л. Квашнин, М. В. Охупкин, М. Н. Скворцов. Квант. электрон., **9** (1974) 1917—1922
- [5] А. П. Погода, А. А. Ермолаев, В. Ф. Лебедев, С. Н. Сметанин, А. С. Борейшо. Научно-технические ведомости СПбГПУ, Физ.-мат. науки, **2** (2013) 121—129
- [6] D. R. Cremons, J. B. Abshire, X. Sun, G. Allan, H. Riris, M. D. Smith, S. Guzewich, A. Yu, F. Novis. CEAS Space J., **12** (2020) 149—162
- [7] O. Reitebuch, Ch. Lemmerz, E. Nagel, U. Paffrath, Y. Durand, M. Endemann, F. Fabre, M. Chaloupy. J. Atm. Ocean Tech., **26** (2009) 2501—2515
- [8] Методы расчета оптических квантовых генераторов, под ред. Б. И. Степанова, т. 2, Минск, Наука и техника (1968)
- [9] Н. В. Кравцов. Квант. электрон., **20** (1993) 322—344
- [10] В. Э. Кисель, А. С. Ясюкевич, Н. В. Кондратюк, Н. В. Кулешов. Квант. электрон., **39** (2009) 1018—1022
- [11] T. Taira, H. Ogishi, T. Kobayashi. Electron. Commun. Jpn., **76** (1993) 23—30
- [12] М. В. Богданович, В. С. Калинов, О. Е. Костик, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, В. В. Машко, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, Л. Л. Тепляшин. Журн. прикл. спектр., **83** (2016) 211—215 [M. V. Bogdanovich, V. S. Kalinov, O. E. Kostik, K. I. Lantsov, K. V. Lepchenkov, V. V. Mashko, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, L. L. Teplyashin. J. Appl. Spectr., **83** (2016) 194—197]
- [13] М. В. Богданович, В. П. Дураев, В. С. Калинов, О. Е. Костик, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, В. В. Машко, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, Л. Л. Тепляшин. Квант. электрон., **46** (2016) 870—872
- [14] R. L. Schmitt, L. A. Rahn. Appl. Opt., **25** (1986) 629—633
- [15] T. Schroder, C. Lemmerz, O. Reitebuch, M. Wirth, C. Wuhner, R. Treichel. Appl. Phys. B, **83** (2007) 437—444
- [16] P. Piironen, E.W. Eloranta. Opt. Lett., **19** (1994) 234—236
- [17] D. Y. Shen, S. C. Tam, Y. L. Lam, T. Kobayashi. Opt. Rev., **7** (2000) 451—454
- [18] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. С. Калинов, О. Е. Костик, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, П. В. Шпак, Л. Л. Тепляшин, М. А. Щемелев. Журн. прикл. спектр., **86** (2019) 58—65 [M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. S. Kalinov, O. E. Kostik, K. I. Lantsov, K. V. Lepchenkov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, P. V. Shpak, L. L. Teplyashin, M. A. Shchemelev. J. Appl. Spectr., **86** (2019) 50—55]
- [19] C. Svelto, S. Taccheo, E. Bava, P. Laporta. Measurement, **26** (1999) 119—128
- [20] T. Yanagisawa, K. Asaka, Y. Hirano. Opt. Lett., **26** (2001) 1262—1264
- [21] S. Taccheo, P. Laporta, S. Longhi, O. Svelto, C. Svelto. Appl. Phys. B, **63** (1996) 425—436
- [22] A. J. McGrath, J. Munch, G. Smith, P. Veitch. Appl. Opt., **37** (1998) 5706—5709
- [23] W. R. Sooy. Appl. Phys. Lett., **7** (1965) 36—37
- [24] J. W. Evans. J. Opt. Soc. Am., **39** (1949) 229—242
- [25] W. Demtroder. Laser Spectroscopy. Basic Concepts and Instrumentation, Sec. Corrected Printing, Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag (1982)
- [26] А. И. Енжиевский, М. В. Богданович, Г. И. Рябцев, В. В. Супрун, А. В. Григорьев, А. Г. Рябцев, М. А. Щемелев. Журн. прикл. спектр., **76** (2009) 505—509 [A. I. Yenzhyeuskii, M. V. Bogdanovich, G. I. Ryabtsev, V. V. Suprun, A.V. Grigor'ev, A. G. Ryabtsev, M. A. Shemelev. J. Appl. Spectr., **76** (2009) 476—481]
- [27] А. В. Мезенов, Л. Н. Сомс, А. И. Степанов. Термооптика твердотельных лазеров, Ленинград, Машиностроение (1986)