

ISSN 1561-2430 (Print)  
 ISSN 2524-2415 (Online)  
 УДК 621.3.038.825.2  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-4-485-494>

Поступила в редакцию 25.10.2021  
 Received 25.10.2021

**В. Э. Кисель, Н. В. Кулешов, А. С. Ясюкевич**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

## **КРИСТАЛЛ $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ КАК АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД**

**Аннотация.** Проведено математическое моделирование и экспериментальное исследование режима несолитонной синхронизации мод в лазере на кристалле  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  с продольной накачкой излучением лазерного диода. Моделирование на основе уравнения Хауса (the Haus master equation) позволило определить требования к параметрам насыщающегося поглотителя (НП), уровню средней выходной мощности, размерам  $\text{TEM}_{00}$  моды резонатора в активном элементе и на затворе для получения стабильного режима генерации пикосекундных лазерных импульсов. Лазерные эксперименты проведены в четырехзеркальном X-образном резонаторе с использованием полупроводникового насыщающегося зеркала (SESAM) в качестве пассивного затвора и лазерного диода с волоконным выходом максимальной мощностью до 30 Вт на длине волны 978,5 нм в качестве источника накачки. Получен стабильный режим пассивной синхронизации мод с максимальной средней выходной мощностью до 12 Вт и длительностью ультракоротких импульсов около 2 пс при оптической эффективности преобразования излучения накачки в излучение генерации около 38 %. Лазерные импульсы были получены на центральной длине волны около 999 нм с минимальным стоковым сдвигом (около 2 %) по отношению к излучению накачки, что существенно снижало тепловую нагрузку на активном элементе. Дополнительно приведены предварительные результаты по генерации второй гармоники и синхронной накачке параметрического генератора света с использованием лазера на кристалле  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  в качестве источника накачки.

**Ключевые слова:** пикосекундный лазер, пассивная синхронизация мод, кристалл  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ , полупроводниковое насыщающееся зеркало (SESAM)

**Для цитирования.** Кисель, В. Э. Кристалл  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  как активная среда для пикосекундных лазеров с синхронизацией мод / В. Э. Кисель, Н. В. Кулешов, А. С. Ясюкевич // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 485–494. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-4-485-494>

**Viktor E. Kisel, Nikolay V. Kuleshov, Anatol S. Yasukevich**

*Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus*

## **THE $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ CRYSTAL AS AN ACTIVE MEDIUM FOR PICOSECOND MODE-LOCKED LASERS**

**Abstract.** Herein, we report on the mathematical modelling and experimental study of the regime of nonsoliton mode locking in a laser based on the  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  ( $\text{Yb}:\text{LuAP}$ ) crystal with longitudinal pumping by laser diode radiation. Simulation based on the Haus master equation permitted to determine the requirements for the parameters of a saturable absorber (SA), the level of the average output power, the size of the  $\text{TEM}_{00}$  mode of the cavity in the active element and on the gate to obtain a stable regime of generation of picosecond laser pulses. Laser experiments were carried out in a four-mirror X-shaped resonator using a semiconductor saturable mirror (SESAM) as a passive modulator and a laser diode with a fiber output of a maximum power up to 30 W at a wavelength of 978.5 nm as a pump source. We obtained a stable passive mode locking with a maximum average output power of up to 12 W and an ultrashort pulse duration of about 2 ps at an optical conversion efficiency of pump radiation into lasing radiation of about 38 %. Laser pulses were obtained at a central wavelength of about 999 nm with a minimum Stokes shift (about 2 %) with respect to the pump radiation, which significantly reduced the thermal load on the active element. Additionally, the preliminary results on the second harmonic generation and synchronous pumping of a parametric light generator using a  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  crystal laser as a pump source are presented.

**Keywords:** picosecond laser, passive mode-locking,  $\text{Yb}:\text{LuAP}$  crystal, semiconductor saturable-absorber mirror (SESAM)

**For citation.** Kisel V. E., Kuleshov N. V., Yasukevich A. S. The  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  crystal as an active medium for picosecond mode-locked lasers. *Vestsi Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 485–494 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-4-485-494>

**Введение.** В последние десятилетия было исследовано большое число легированных иттербием лазерных материалов. Достоинствами этих материалов являются сравнительно широкие полосы поглощения и стимулированного излучения (СИ), что делает возможным получение эффективной лазерной генерации, в том числе в режиме пассивной синхронизации мод с характерными длительностями импульсов от единиц пикосекунд [1, 2] до сотен [3, 4] и десятков фемтосекунд [5, 6].

кунд [5, 6]. Малый стоксов сдвиг между поглощением и испусканием приводит к низкой тепловой нагрузке в активном элементе, что в сочетании с наличием лазерных диодов высокой яркости на основе соединения InGaAs, излучающих на длинах волн около 980 нм, создает условия для получения высоких выходных мощностей иттербиевых лазеров. Использование иттербиевых материалов для фемтосекундных лазеров является общепринятой практикой. Но в случае пикосекундных лазеров доминируют неодим-содержащие среды (кристаллы Nd:YAG и Nd:YVO), имеющие низкие пороги режима синхронизации мод благодаря большим сечениям стимулированного излучения. Некоторые характеристики пикосекундных неодимовых лазеров приведены в таблице.

#### Характеристики пикосекундных лазеров

Picosecond laser parameters

Кристалл	Выходная мощность, Вт	Длительность импульса, пс	Оптическая эффективность, %	Пиковая мощность импульсов, кВт	Ссылки
Nd:YAG	27	19	19	23	[7]
Nd:YVO	29	7	35	49	[8]
Nd:YVO	111	33	51	31	[9]
Nd:YVO	20	6	38	20	[10]
Yb:LuAP	12	2	38	86	Настоящая работа

В настоящей статье рассматривается кристалл лютециевого алюмината, допированного ионами трехвалентного иттербия ( $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  или Yb:LuAP), как активная среда для лазеров, генерирующих импульсы длительностью в единицы пикосекунд. Такие длительности импульсов недостижимы для неодимовых сред из-за узкой полосы усиления (наименьшая длительность 6–10 пс) и в то же время труднодостижимы для большинства иттербиевых сред с широкими полосами СИ, но низкими значениями сечения СИ, что делает их более пригодными для солитонной синхронизации мод фемтосекундных лазеров. Лазерный кристалл Yb:LuAP с уникальными спектральными свойствами позволяет получать лазерные импульсы длительностью в единицы пикосекунд с узким спектром, что представляет интерес для ряда практических применений, в частности, для параметрических генераторов света (ПГС) и когерентной спектроскопии комбинационного антистоксового рассеяния света (КАРС). В данном диапазоне длительностей ультракоротких импульсов (УКИ) наблюдается максимальная эффективность нелинейного преобразования при отсутствии эффектов, обусловленных дисперсией групповых скоростей (ДГС).

**Методика измерений.** Кристаллы лютециевого алюмината с иттербием Yb:LuAlO<sub>3</sub>, имеющие структуру перовскита, выращивались в Институте физических исследований национальной академии наук Армении (г. Аштарак-2) методом кристаллизации из раствора в расплаве модифицированным методом Бриджмена [11]. Были выращены монокристаллы Yb:LuAlO<sub>3</sub> высокого оптического качества диаметром 14–30 мм и длиной до 30–50 мм с содержанием ионов Yb<sup>3+</sup> до 10 ат.%. Ионы Yb<sup>3+</sup> замещают ионы Lu<sup>3+</sup> в кристаллической решетке в позициях с локальной симметрией C<sub>1h</sub>. Параметры элементарной ячейки:  $a = 5,173 \text{ \AA}$ ,  $b = 5,332 \text{ \AA}$ ,  $c = 7,361 \text{ \AA}$ , пространственная группа симметрии  $D_{2h}^{16}$ -Pbnm. С оптической точки зрения кристаллы лютециевого алюмината являются двусосными анизотропными кристаллами. Теплопроводность кристаллов – около 9,8 Вт/(м · К).

Измерение спектров поглощения кристаллов проводилось с применением двулучевого спектрофотометра Varian Cary 5000 в спектральной области 800–1200 нм. Для регистрации спектров в поляризованном свете в измерительный канал и канал сравнения спектрофотометра вводились поляризаторы на основе призм Глана – Тейлора. Максимальное спектральное разрешение прибора в данной спектральной области составляло около 0,4 нм.

Для регистрации кинетики затухания люминесценции кристаллов использовалась экспериментальная установка, построенная на основе Nd:YAG-лазера с модулированной добротностью резонатора LS 2137, параметрического генератора света LT-2214 ОРО, монохроматора МДР-12, InGaAs фотоприемника с постоянной времени <5 нс и цифрового осциллографа Tektronics TDS3052B с полосой пропускания 500 МГц.

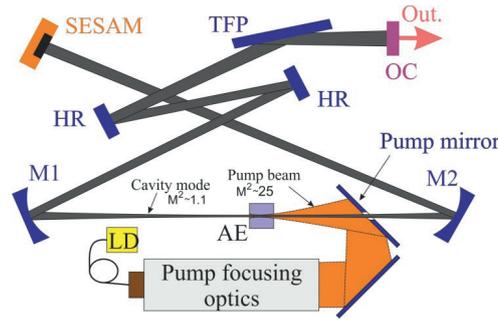


Рис. 1. Схема Yb:LuAP лазера с пассивной синхронизацией мод: TFP – тонкопленочный поляризатор; OC – выходное зеркало; HR – высокоотражающие зеркала; M1, M2 – поворотные зеркала; AE – активный элемент; LD – лазерный диод

Fig. 1. The set-up of the Yb:LuAP mode-locked laser: TFP – thin film polarizer; OC – output coupler; HR – highly reflective mirrors; M1, M2 – concave mirrors; AE – active element; LD – laser diode

Средняя мощность лазерного излучения измерялась приемником Ophir Optronics 30(150) A-BB-18 с дисплеем Nova с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ . Дифференциальная эффективность генерации  $\eta$  (отношение приращения выходной мощности генерации к соответствующему приращению поглощенной мощности накачки  $\eta = \Delta P_{\text{вых}}/\Delta P_{\text{погл}}$ ) определялась путем измерения выходной мощности генерации при различных уровнях накачки. Спектральные характеристики излучения определялись с помощью спектрометра Spectrastar S150 (Солар ЛС, г. Минск). Регистрируемый спектральный диапазон спектрометра составлял 967–1085 нм с разрешением 0,12 нм. Спектрометр построен по схеме Черни – Тернера с использованием дифракционной решетки 1200 штр/мм. Поперечные размеры пучков лазерного излучения измерялись анализатором поперечного профиля лазерных пучков Ophir Optronics BeamStar FX 50 с размером ячейки  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ . Лазерные эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1, состоящей из четырехзеркального резонатора, активного элемента, модуля накачки, поляризатора и полупроводникового насыщающегося зеркала (SESAM).

Расчетный размер ТЕМ<sub>00</sub> моды в кристалле равнялся 100 мкм. В качестве источника накачки использовался InGaAs лазерный диод с волоконным выходом диаметром 105 мкм и числовой апертурой 0,15 с максимальной выходной мощностью 30 Вт. Применялась схема осевой продольной накачки с помощью дополнительного зеркала (см. рис. 1), успешно протестированная в предыдущей нашей работе [11] и обеспечивающая полную спектральную и поляризационную независимость пучка накачки и моды генерации в лазерном резонаторе. Излучение накачки фокусировалось набором линз в пятно диаметром около 100 мкм (по уровню  $1/e^2$ ). Активный элемент из кристалла Yb<sup>3+</sup>(2at.%):LuAlO<sub>3</sub> длиной 1,6 мм был вырезан вдоль оси *a* кристалла, чтобы обеспечить возможность генерации излучения с поляризациями E//b и E//c, и имел размеры 1,6(*a*) × 5(*b*) × 1,5(*c*) мм<sup>3</sup>; обе боковых поверхности 5 × 1,6 мм<sup>2</sup> поддерживались при температуре 15 С° с помощью медной пластины, индиевой фольги для улучшения теплового контакта с ней активного элемента и термоэлектрического охлаждающего элемента с охлаждаемым водой теплообменником. На рабочие поверхности активного элемента 1,5 × 5 мм<sup>2</sup> наносились антиотражающие покрытия на длинах волн накачки и генерации. В зависимости от ориентации тонкопленочного поляризатора выходное излучение лазера имело поляризацию E//b или E//c. Резонатор лазера исходно рассчитывался для работы в середине зоны устойчивости, чтобы режим ПСМ обеспечивался в основном пассивным затвором SESAM лишь с небольшим вкладом керровской нелинейности (самофокусировки) в активном элементе.

**Спектрально-люминесцентные свойства кристаллов Yb<sup>3+</sup>:LuAlO<sub>3</sub>.** В спектрах поглощения кристалла Yb<sup>3+</sup>:LuAlO<sub>3</sub> с концентрацией иттербия 2 ат.% ( $4,02 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) полосы поглощения, соответствующие переходам между нижним <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> и верхним <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> мультиплетами ионов Yb<sup>3+</sup>, наблюдаются в спектральной области около 1 мкм. Наиболее интенсивная полоса поглощения с центральной длиной волны 978,5 нм наблюдается для E//c поляризации излучения.

Полуширина данной полосы поглощения составляет около 4 нм, коэффициент поглощения в пике –  $\alpha = 26,6 \text{ см}^{-1}$ . Соответствующее значение поперечного сечения поглощения  $\sigma_{\text{погл}}$  составляет около  $\sigma_{\text{погл}} = 6,6 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ . Для поляризаций излучения, параллельных осям  $a$  и  $b$  кристалла, наблюдается значительное снижение максимальных коэффициентов поглощения.

Измерения времен затухания люминесценции ионов  $\text{Yb}^{3+}$  проведены для образцов кристаллов с концентрациями 2, 5 и 10 ат.%. Для устранения влияния эффектов перепоглощения на результаты измерений изготавливались порошки кристаллов с характерными размерами частиц около 30–40 мкм (длина поглощения составляет 75 мкм на длине волны 978,5 нм для самого концентрированного образца –  $\text{Yb}^{3+}:(10\text{ ат.}\%):\text{LuAlO}_3$ ), которые помещались в этиленгликоль для уменьшения влияния эффекта полного внутреннего отражения. Возбуждение люминесценции проводилось на длине волны около 978,5 нм. Кинетики затухания люминесценции всех образцов описывались одноэкспоненциальным законом. Для кристаллов  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  с концентрацией иттербия 2 ат.% время затухания люминесценции составило 475 мкс, для кристаллов с концентрацией активных центров 5 и 10 ат.% наблюдалось концентрационное тушение люминесценции и время жизни состояния  $^2\text{F}_{5/2}$  сокращалось до 380 и 310 мкс соответственно.

Дополнительно радиационное время жизни возбужденного состояния  $^2\text{F}_{5/2}$  оценивалось на основе спектров поперечных сечений поглощения и данных по структуре энергетических уровней иона-активатора в кристалле [12] с использованием методов соответствия [13]:

$$\tau_{\text{рад}} = \frac{3}{8\pi n^2 c} \frac{Z_u}{Z_l} \frac{1}{\sum_{\beta} \int \sigma_{\text{погл}}^{\beta}(\lambda) \lambda^{-4} \exp(-hc / (kT\lambda)) d\lambda} \exp(-hc / (kT\lambda_0)), \quad (1)$$

где  $Z_{u(l)} = \sum_m g_m \exp(-E_m / (kT))$  – статистическая сумма нижнего ( $l$ ) или верхнего ( $u$ ) мультиплета;  $g_m$  – кратность вырождения подуровня с номером  $m$ , суммирование осуществляется по подуровням каждого из мультиплетов;  $\beta$  – индекс, указывающий состояние поляризации сечения поглощения;  $n$  – показатель преломления;  $c$  – скорость света;  $\lambda_0$  соответствует переходу между нижними подуровнями нижнего и верхнего мультиплетов.

Радиационное время жизни уровня  $^2\text{F}_{5/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$  оценено на уровне 475 мкс, что совпадает с измеренным значением для кристалла  $\text{LuAlO}_3$  с концентрацией ионов иттербия  $\text{Yb}^{3+}$  2 ат.%. Спектры поперечных сечений СИ для кристаллов  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ , рассчитанные по модифицированному методу соответствия [13], приведены на рис. 2. Спектры характеризуются широкими структурированными полосами. Пиковые значения поперечных сечений СИ в кристалле  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  составили  $0,79 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  на длине волны 1042 нм для поляризации  $E//b$  и  $0,87 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  на длине волны 1019 нм для поляризации  $E//c$  соответственно. Максимальное значение поперечного сечения СИ достигает  $3,74 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  на длине волны 999,6 нм для поляризации  $E//c$ .

**Моделирование работы лазера.** Полоса стимулированного излучения кристаллов  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAP}$  в области около 1000 нм представляет интерес с точки зрения генерации пикосекундных лазерных импульсов в режиме несолитонной пассивной синхронизации мод. Большое значение сечения СИ  $3,74 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  допускает приемлемую величину пороговой внутрирезонаторной энергии, а полуширина полосы СИ 4–5 нм позволяет получать генерацию УКИ с длительностью около 2 пс.

В работе проведено численное моделирование несолитонного режима пассивной синхронизации мод лазера на кристалле  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ , излучающего в спектральной области около 1000 нм с продольной диодной накачкой, на основе которого определены требования к параметрам насыщающегося поглотителя (НП), уровню средней выходной мощности, размерам  $\text{TEM}_{00}$  моды резонатора в активном элементе и на затворе для получения стабильного режима генерации пикосекундных лазерных импульсов. Моделирование работы лазера было проведено на основе уравнения Хауса (the Haus master equation) [14]:

$$T_R \frac{\partial}{\partial T} A(T, t) = \left( -iD \frac{\partial^2}{\partial t^2} + i\delta |A|^2 \right) A + \left( g - l + D_g \frac{\partial^2}{\partial t^2} - q(T, t) \right) A. \quad (2)$$

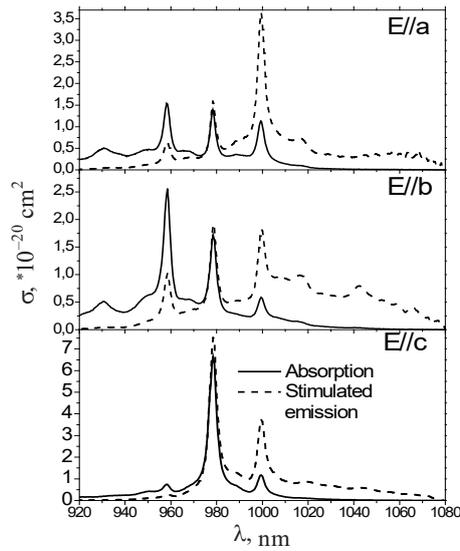


Рис. 2. Спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного излучения кристалла  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$

Fig. 2. Absorption cross section and stimulated emission spectra of the  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  crystal

Здесь  $A(T, t)$  – медленно изменяющаяся огибающая светового импульса, который совершает проходы по резонатору за время  $T_R$ ;  $T$  – время в лабораторной системе отсчета, связанное с проходами импульса по резонатору;  $t$  – время в системе отсчета, связанной с импульсом;  $D$  – внутрирезонаторная дисперсия групповых скоростей (ДГС);  $\delta$  – коэффициент самомодуляции;  $g$  и  $l$  – амплитудные коэффициенты усиления и потерь (без учета НП) соответственно,  $D_g = g / \Omega_g^2$  – дисперсионный коэффициент, описывающий конечную ширину полосы усиления;  $\Omega_g$  – полуширина полосы усиления;  $q(T, t)$  – насыщаемые потери, обусловленные пассивным модулятором.

Уравнение (2) удобно представить в операторном виде

$$T_R \frac{\partial}{\partial T} A(T, t) = (\hat{D} + \hat{N})A, \tag{3}$$

где

$$\hat{D} = g - l + (D_g - iD) \frac{\partial^2}{\partial t^2}, \tag{4}$$

$$\hat{N} = i\delta |A|^2 - q(T, t), \tag{5}$$

$\hat{D}$  и  $\hat{N}$  – линейный и нелинейный операторы.

С учетом того, что импульс формируется при последовательном обходе резонатора, формальное решение уравнения (3) может быть записано как

$$A(j + 1, t) = \exp(\hat{D} + \hat{N})A(j, t), \tag{6}$$

где  $j$  – номер очередного обхода резонатора. В предположении, что операторы в (6) коммутируют между собой (это приближение выполняется хорошо для широкого круга лазеров, работающих в режиме СМ),

$$A(j + 1, t) \approx \exp(\hat{D}) \exp(\hat{N})A(j, t). \tag{7}$$

Для решения уравнения (7) часто применяется расщепленный пошаговый метод Фурье (Split-Step Fourier Method (SSFM)). В общем виде решение (7) представляется как

$$A(j + 1, t) = \hat{F}^{-1} \left\{ \exp \left[ \hat{D}(i\omega) \right] \hat{F} \left\{ \exp(\hat{N})A(j, t) \right\} \right\}, \tag{8}$$

где  $\hat{F}$  и  $\hat{F}^{-1}$  – операторы прямого и обратного преобразований Фурье соответственно,  $\hat{D}(i\omega)$  – Фурье-образ линейного оператора  $\hat{D}$ . Различные подходы к реализации SSFM приведены в литературе, например, в [14].

Для полного описания работы лазера уравнение (7) необходимо дополнить уравнением для потерь НП

$$\frac{dq(j,t)}{dt} = -\frac{q(j,t) - q_0}{\tau_A} - q(j,t) \frac{|A(j,t)|^2}{E_A}, \quad (9)$$

где  $q_0$  – начальные (ненасыщенные) потери,  $\tau_A$  – время релаксации НП,  $E_A$  – энергия насыщения НП. В нашем случае в качестве НП используется полупроводниковое зеркало с насыщающимся поглощением (SESAM). Здесь насыщаемые потери  $q$  определяются величиной изменения коэффициента отражения зеркала  $\Delta R$ .

Величина  $g$  определяется уровнем потерь в резонаторе и вычисляется по формуле

$$g = l_a N_{Yb} (\beta_2 \sigma_l - \sigma_{\text{полгл}}^l), \quad (10)$$

где  $l_a$  – длина активного элемента,  $\beta_2 = N_2/N_{Yb}$  – относительная заселенность верхнего уровня иона иттербия,  $N_2$  – населенность уровня  ${}^2F_{5/2}$ ,  $N_{Yb}$  – концентрация ионов иттербия,  $\sigma_l = \sigma_{\text{abs}}^l + \sigma_{\text{em}}^l$ ,  $\sigma_{\text{abs}}^l$  и  $\sigma_{\text{em}}^l$  – сечения поглощения и стимулированного испускания на длине волны генерации соответственно. Относительная заселенность верхнего уровня  $\beta_2$  зависит от средних значений интенсивности накачки и генерируемого излучения:

$$\beta_2 = \frac{\frac{I_p}{I_{ps}} \beta_p + \frac{I_l}{I_{ls}} \beta_l}{1 + \frac{I_p}{I_{ps}} + \frac{I_l}{I_{ls}}}. \quad (11)$$

Здесь  $I_p$  и  $I_l$  – средние по объему активного элемента интенсивности излучения накачки и генерации соответственно,  $I_{ps}$  и  $I_{ls}$  – интенсивности насыщения на длине волны накачки и генерации соответственно,  $\beta_p$  и  $\beta_l$  – относительные населенности верхнего уровня иона иттербия, при которых происходит просветление на частоте накачки и генерации, соответственно. Таким образом, система уравнений (8), (9) и (11) является основой для моделирования работы лазера в режиме ПСМ.

Амплитуда импульса  $A(j,t)$  нормируется таким образом, чтобы  $P(j,t) = |A(j,t)|^2$ , где  $P(j,t)$  – мгновенная мощность светового импульса при  $j$ -м проходе по резонатору. Энергия импульса при  $j$ -м проходе  $E(j) = \int_{-\infty}^{\infty} |A(j,t)|^2 dt$ .

Расчет осуществляется следующим образом: при заданной мощности накачки на входе в активный элемент  $P_{\text{inc}}$  в резонатор «запускается» световой импульс малой амплитуды, который совершает последовательные обходы по резонатору, при этом его спектр, фаза и амплитуда «испытывают воздействие» со стороны линейного и нелинейного операторов.

В данном случае изучался несолитонный режим синхронизации мод, т. е. в резонатор не вводились чирпирующие элементы для компенсации внутрирезонаторной ДГС. Исследовались условия, при которых лазер выходит в стационарный режим работы после нескольких тысяч обходов резонатора.

В модели лазера использовались данные, полученные для непрерывного лазера. В качестве активного элемента применялся кристалл  $\text{Yb}^{3+}$  (2 ат. %):  $\text{LuAlO}_3$  толщиной 1,6 мм. Пропускание выходного зеркала составляло 20 %. На рис. 3 представлены спектры потерь в резонаторе  $k_L$  и усиления  $k_I$ , которые обуславливают достижение порога генерации на длине волны 999 нм.

В качестве затравочного импульса выбирался гауссов импульс с длительностью на полувысоте 2,5 пс, «чирп» отсутствовал.

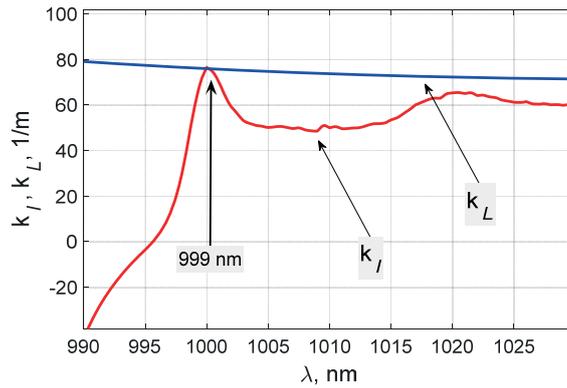


Рис. 3. Спектры полосы усиления  $k_I$  и коэффициента потерь в резонаторе  $k_L$  в области 1 мкм при пропускании выходного зеркала 20 %

Fig. 3. Spectra of the gain band  $k_I$  and cavity losses coefficient  $k_L$  in the range near 1  $\mu\text{m}$  at 20 % output coupler transmission

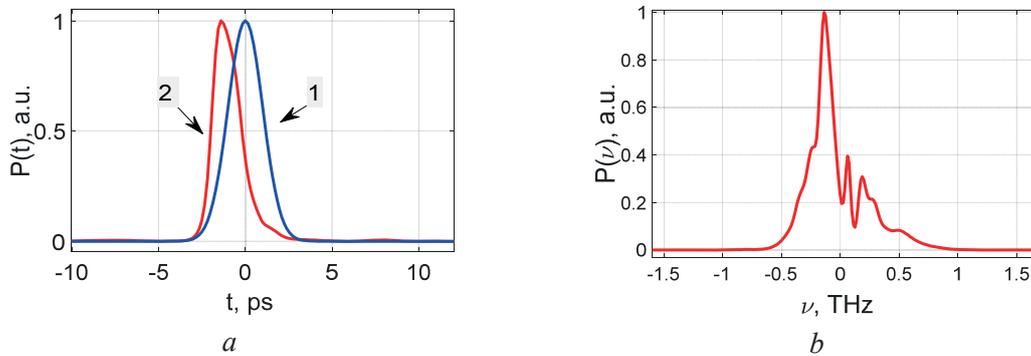


Рис. 4. Временной профиль (а) и спектр излучения (b) при средней выходной мощности лазера 9,2 Вт; мощность излучения накачки – 30 Вт: 1 – «затравочный» импульс; 2 – импульс после 2000 обходов по резонатору

Fig. 4. Temporal profile (a) and emission spectrum (b) of the laser with 9.2 W average output power; the pump power is 30 W: 1 – “seed” pulse; 2 – pulse after 2000 round trips over the cavity

При расчетах было установлено, что при средней мощности выходного излучения около 9 Вт (мощность накачки 30 Вт) в лазере устанавливается режим генерации импульсов, временной профиль  $P(t)$  и спектр  $P(\nu)$  которых представлены на рис. 4. При понижении мощности накачки работа лазера становится нестабильной.

Установлено также, что при частоте следования световых импульсов около 70 МГц плотности энергии насыщения НП – около  $F_A = 100 \text{ мкДж/см}^2$ , глубина модуляции  $\Delta R$  должна составлять не менее 0,06.

**Результаты лазерных экспериментов и их обсуждение.** Для лазерных экспериментов в непрерывном режиме пассивный затвор заменялся высокоотражающим зеркалом. Yb:LuAP-лазер был исследован в непрерывном режиме в нашей предыдущей работе [11], в которой максимальная выходная мощность 9,6 Вт с дифференциальной эффективностью 73,5 % была получена для поляризации излучения E//b с выходным зеркалом пропусканием 5 % на длине волны 1041 нм. С повышением пропускания выходного зеркала до 20 % длина волны излучения лазера сдвигалась на 999 нм для поляризации E//c, при этом выходная мощность достигала 7,2 Вт при дифференциальной эффективности 73,6 % и оптической эффективности 29,3 %. В настоящей работе благодаря использованию более мощного лазерного диода получена выходная мощность 13,3 Вт с дифференциальной эффективностью 68,4 % и оптической эффективностью 39 % на длине волны 999 нм для поляризации E//c при пропускании выходного зеркала 20 %.

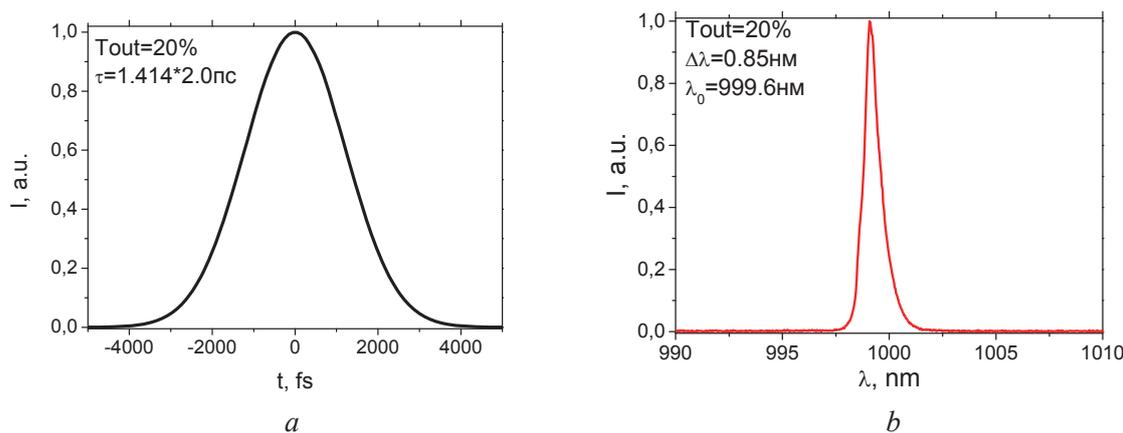


Рис. 5. Автокорреляционная функция (а) и спектр импульсов (б) пикосекундного  $\text{Yb}^{3+}$ (2ат.%) $\text{LuAlO}_3$  лазера ( $T_{\text{out}} = 20\%$ , E/c)

Fig. 5. Autocorrelation trace (a) and spectrum (b) of picosecond  $\text{Yb}^{3+}$ (2at.%) $\text{LuAlO}_3$  laser pulses ( $T_{\text{out}} = 20\%$ , E/c)

Для получения режима пассивной синхронизации мод использовался пассивный затвор SESAM с глубиной модуляции 1 % и энергией насыщения около  $70 \text{ мкДж/см}^2$ . При отсутствии НП с величиной насыщаемых потерь около 6 %, определенной при моделировании режима генерации пикосекундных импульсов, конфигурация резонатора лазера была оптимизирована для увеличения глубины модуляции за счет максимального использования эффекта самофокусировки и так называемой мягкой апертуры [15]. Стабилизация режима ПСМ достигалась путем изменения расстояний между сферическими зеркалами и активным элементом, что позволяло варьировать размер моды генерации на активном элементе и затворе.

Получен стабильный режим ПСМ с максимальной средней выходной мощностью до 12 Вт на длинах волн 999,2–999,8 нм с длительностью импульсов около 2 пс. Автокорреляционная функция и спектр выходных импульсов представлены на рис. 5. Следует отметить, что при повышении накачки от ее минимального значения до рабочего всегда наблюдался самостарт режима ПСМ при средней выходной мощности лазера от 7 до 9 Вт, что хорошо согласуется с результатами расчетов. При использовании лазерного диода накачки мощностью 30 Вт оптическая эффективность генерации достигала 40 %.

Проведены предварительные эксперименты по генерации второй гармоники излучения и синхронной накачке параметрического генератора света с использованием лазера на кристалле  $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$  в качестве источника накачки. При использовании кристалла LBO с критическим типом синхронизма ( $\varphi = 11^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ) толщиной 20 мм получено нелинейное преобразование пикосекундного излучения  $\text{Yb}:\text{LuAP}$ -лазера во вторую гармонику с эффективностью около 50 %. При использовании излучения второй гармоники пикосекундного  $\text{Yb}:\text{LuAP}$ -лазера реализован параметрический генератор света с синхронной накачкой и температурной перестройкой длины волны на кристалле LBO ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  Type I) толщиной 40 мм. Получен диапазон перестройки сигнальной волны 115 нм (668–783 нм). При мощности второй гармоники 3 Вт средняя выходная мощность ПГС составила 0,7 Вт с эффективностью преобразования 24 %.

**Заключение.** Впервые продемонстрирована генерация пикосекундных световых импульсов в лазере с пассивной синхронизацией мод на кристалле  $\text{Yb}:\text{LuAP}$ . Достигнута средняя выходная мощность ультракоротких импульсов до 12 Вт при длительности 2 пс и оптической эффективности до 40 %, что по характеристикам лазерного излучения и эффективности генерации превосходит известные лазерные системы на неодим-содержащих материалах.

#### Список использованных источников

1. 250 W average power, 100 kHz repetition rate cryogenic Yb:YAG amplifier for OPCPA pumping / L. E. Zapata [et al.] // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41, № 3. – P. 492–495. <https://doi.org/10.1364/ol.41.000492>

2. 1.1 J Yb:YAG picosecond laser at 1 kHz repetition rate / Y. Wang [et al.] // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45, № 24. – P. 6615–6618. <https://doi.org/10.1364/ol.413129>
3. 115 fs pulses from Yb<sup>3+</sup>:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser with low loss nanostructured saturable absorber / A. A. Kovalyov [et al.] // *Laser Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 8, № 6. – P. 431. <https://doi.org/10.1002/lapl.201110019>
4. Diode-pumped gigahertz femtosecond Yb:KGW laser with a peak power of 3.9 kW / S. Pekarek [et al.] // *Opt. Express.* – 2010. – Vol. 18, № 16. – P. 16320–16326. <https://doi.org/10.1364/OE.18.016320>
5. Yb<sup>3+</sup>-doped YVO<sub>4</sub> crystal for efficient Kerr-lens mode locking in solid-state lasers / A. A. Lagatsky [et al.] // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, № 23. – P. 3234–3236. <https://doi.org/10.1364/ol.30.003234>
6. Zhao, H. Powerful 67 fs Kerr-lens mode-locked prismless Yb:KGW oscillator / H. Zhao, A. Major // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, № 26. – P. 31846–31851. <https://doi.org/10.1364/oe.21.031846>
7. Passively mode-locked high-power Nd:YAG lasers with multiple laser heads / Spühler G. J. [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2000. – Vol. 71, № 1. – P. 19–25. <https://doi.org/10.1007/pl00021154>
8. Ruffing, B. All-solid-state cw mode-locked picosecond KTiOAsO<sub>4</sub> (KTA) optical parametric oscillator / B. Ruffing, A. R. Nebel, Wallenstein // *Appl. Phys. B.* – 1998. – Vol. 67, № 5. – P. 537–544. <https://doi.org/10.1007/s003400050541>
9. McDonagh, L. 111 W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> master oscillator power amplifier pumped at 888 nm / L. McDonagh, R. Wallenstein, A. Nebel // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32, № 10. – P. 1259–1261. <https://doi.org/10.1364/ol.32.001259>
10.  $\chi(2)$ -Lens Mode-Locking of a High Average Power Nd:YVO<sub>4</sub> Laser / V. Aleksandrov [et al.] // *CLEO: 2014. OSA Technical Digest (online).* – *Opt. Soc. Am.*, 2014. – Paper SM4F.3. [https://doi.org/10.1364/cleo\\_si.2014.sm4f.3](https://doi.org/10.1364/cleo_si.2014.sm4f.3)
11. Spectroscopy and continuous wave laser performance of Yb<sup>3+</sup>:LuAlO<sub>3</sub> crystal / A. Rudenkov [et al.] // *Opt. Lett.* – 2016. – Vol. 41, № 24. – P. 580–5808. <https://doi.org/10.1364/ol.41.005805>
12. Boulon, G. Characterization and comparison of Yb<sup>3+</sup>-doped YAlO<sub>3</sub> perovskite crystals (Yb:YAP) with Yb<sup>3+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> garnet crystals (Yb:YAG) for laser application / G. Boulon // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2008. – Vol. 25, № 5. – P. 884–896. <https://doi.org/10.1364/josab.25.000884>
13. Integral Method of Reciprocity in the Spectroscopy of Laser Crystals with Impurity Centers / A. S. Yasyukevich [et al.] // *J. Appl. Spectrosc.* – 2008. – Vol. 71, № 2. – P. 202–208. <https://doi.org/10.1023/b:japs.0000032875.04400.a0>
14. Agrawal, G. P. *Nonlinear Fiber Optics* / G. P. Agrawal. – 4th. ed. – Elsevier, 2007 – 529 p.
15. Magni, V. ABCD matrix analysis of propagation of gaussian beams through Kerr media / V. Magni, G. Cerullo, S. De Silvestri // *Opt. Commun.* – 1993. – Vol. 96, № 4–6. – P. 348–355. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(93\)90284-c](https://doi.org/10.1016/0030-4018(93)90284-c)

## References

1. Zapata L. E., Reichert F., Hemmer M., Kärtner F. X. 250 W average power, 100 kHz repetition rate cryogenic Yb:YAG amplifier for OPCPA pumping. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 3, pp. 492–495. <https://doi.org/10.1364/ol.41.000492>
2. Wang Y., Chi H., Baumgarten C., Dehne K., Meadows A. R., Davenport A., Murray G., Reagan B. A., Menoni C. S., Rocca J. J. 1.1 J Yb:YAG picosecond laser at 1 kHz repetition rate. *Optics Letters*, 2020, vol. 45, no. 24, pp. 6615–6618. <https://doi.org/10.1364/ol.413129>
3. Kovalyov A. A., Preobrazhenskii V. V., Putyato M. A., Pchelyakov O. P., Rubtsova N. N., Semyagin B. R., Kisel V. E., Kurilchik S. V., Kuleshov N. V. 115 fs pulses from Yb<sup>3+</sup>:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser with low loss nanostructured saturable absorber. *Laser Physics Letters*, 2011, vol. 8, no. 6, pp. 431. <https://doi.org/10.1002/lapl.201110019>
4. Pekarek S., Fiebig C., Stumpf M. C., Oehler A. E. H., Paschke K., Erbert G., Südmeyer T., Keller U. Diode-pumped gigahertz femtosecond Yb:KGW laser with a peak power of 3.9 kW. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 16, pp. 16320–16326. <https://doi.org/10.1364/OE.18.016320>
5. Lagatsky A. A., Sarmani A. R., Brown C. T. A., Sibbett W., Kisel V. E., Selivanov A. G., Denisov I. A., Troshin A. E., Yumashev K. V., Kuleshov N. V., Matrosov V. N., Matrosova T. A., Kupchenko M. I. Yb<sup>3+</sup>-doped YVO<sub>4</sub> crystal for efficient Kerr-lens mode locking in solid-state lasers. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 23, pp. 3234–3236. <https://doi.org/10.1364/ol.30.003234>
6. Zhao H., Major A. Powerful 67 fs Kerr-lens mode-locked prismless Yb:KGW oscillator. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 26, pp. 31846–31851. <https://doi.org/10.1364/oe.21.031846>
7. Spühler G. J., Südmeyer T., Paschotta R., Moser M., Weingarten K. J., Keller U. Passively mode-locked high-power Nd:YAG lasers with multiple laser heads. *Applied Physics B*, 2000, vol. 71, no. 1, pp. 19–25. <https://doi.org/10.1007/pl00021154>
8. Ruffing B., Nebel A., Wallenstein R. All-solid-state cw mode-locked picosecond KTiOAsO<sub>4</sub> (KTA) optical parametric oscillator. *Applied Physics B*, 1998, vol. 67, no. 5, pp. 537–544. <https://doi.org/10.1007/s003400050541>
9. McDonagh L., Wallenstein R., Nebel A. 111 W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> master oscillator power amplifier pumped at 888 nm. *Optics Letters*, 2007, vol. 32, no. 10, pp. 1259–1261. <https://doi.org/10.1364/ol.32.001259>
10. Aleksandrov V., Grigорова T., Iliev H., Trifonov A., Buchvarov I.  $\chi(2)$ -Lens Mode-Locking of a High Average Power Nd:YVO<sub>4</sub> Laser. *CLEO: 2014, OSA Technical Digest (online)*. Optical Society of America, 2014. Paper SM4F.3. [https://doi.org/10.1364/cleo\\_si.2014.sm4f.3](https://doi.org/10.1364/cleo_si.2014.sm4f.3)
11. Rudenkov A., Kisel V., Yasyukevich A., Hovhannesian K., Petrosyan A., Kuleshov N. Spectroscopy and continuous wave laser performance of Yb<sup>3+</sup>:LuAlO<sub>3</sub> crystal. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 24, pp. 5805–5808. <https://doi.org/10.1364/ol.41.005805>

12. Boulon G. Characterization and comparison of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped  $\text{YAlO}_3$  perovskite crystals (Yb:YAP) with  $\text{Yb}^{3+}$ -doped  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  garnet crystals (Yb:YAG) for laser application. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, vol. 25, no. 5, pp. 884–896. <https://doi.org/10.1364/josab.25.000884>

13. Yasyukevich A. S., Sheherbitskii V. G., Kisel V. E., Mandrik A. V., Kuleshov N. V. Integral Method of Reciprocity in the Spectroscopy of Laser Crystals with Impurity Centers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2008, vol. 71, no. 2, pp. 202–208. <https://doi.org/10.1023/b:japs.0000032875.04400.a0>

14. Agrawal G. P. *Nonlinear Fiber Optics*, 4 th. ed. Elsevier, 2007. 529 p.

15. Magni V., Cerullo G., De Silvestri S. ABCD matrix analysis of propagation of gaussian beams through Kerr media. *Optics Communications*, 1993, vol. 96, no. 4–6, pp. 348–355. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(93\)90284-c](https://doi.org/10.1016/0030-4018(93)90284-c)

### Информация об авторах

**Кисель Виктор Эдвардович** – кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательским центром оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vekisel@bntu.by

**Кулешов Николай Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерной техники и технологии, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nkuleshov@bntu.by

**Ясюкевич Анатолий Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: anatol@bntu.by

### Information about the authors

**Viktor E. Kisel** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of Research Center of Optical Materials and Technologies, Belarussian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vekisel@bntu.by

**Nikolay V. Kuleshov** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of Laser Devices and Technology Department, Belarussian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nkuleshov@bntu.by

**Anatoly S. Yasukevich** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher at the Research Center of Optical Materials and Technologies, Belarussian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anatol@bntu.by