

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.12>

УДК: 535.015

СМЕНА РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ В ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ

А.М. Смирнов, А.В. Дорофеенко, О.В. Бутов

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2023

Аннотация. Впервые экспериментально установлены особенности генерации эрбиевых волоконных лазеров с короткими резонаторами вблизи двух фазовых переходов. Выявлено степенное поведение параметров системы в окрестности критической точки, в широком диапазоне значений мощностей накачки. Исследована зависимость параметров и режимов генерации от длины резонатора и мощности накачки, а именно переход от импульсной к непрерывной генерации. Были определены зависимости длительности и частоты следования импульсов при варьировании длины резонатора, из которых экспериментально выявлена универсальная зависимость этих параметров от мощности генерации в волоконных эрбиевых лазерах с пассивной модуляцией добротности. Из экспериментальных данных определены критические индексы для импульсной генерации эрбиевых волоконных лазеров, слабо зависящие от параметров резонаторов. Результаты работы могут быть использованы при проектировании высококогерентных волоконных лазерных источников.

Ключевые слова: эрбиевые волоконные лазеры, пассивная модуляция добротности, критические индексы.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН.

Автор для переписки: Смирнов Александр Михайлович, alsmir1988@mail.ru

Введение

Значительное развитие получила технология производства активных волоконных световодов, сердцевина которых легировалась различными редкоземельными элементами. Лазеры и усилители на основе волокон, легированных ионами эрбия, люминесценция которых лежит в основном в телекоммуникационном диапазоне 1,55 мкм, стали неотъемлемыми элементами современных волоконных линий связи со спектральным уплотнением каналов [1-13]. Эрбиевые лазерные источники широко используются и в волоконной сенсорике [14-24].

В классических волоконных лазерах используются, как правило, волокна с относительно низким уровнем легирования сердцевины, а длина резонатора лазера может достигать нескольких десятков метров. В лазерах с длинным резонатором эффективно возбуждается большое количество продольных мод. Как следствие спектр излучения таких лазеров довольно широк и определяется эффективной спектральной шириной брэгговских зеркал. Уменьшение длины резонатора приводит к сокращению продольных мод вплоть до достижения одночастотного режима генерации, что является актуальным для уже вышеупомянутого спектра задач, таких как телекоммуникация, волоконно-оптическая метрология, спектроскопия. Однако создание коротких волоконных лазеров требует повышения концентрации легирующих элементов в сердцевине световода для обеспечения достаточного уровня поглощения накачки и величины усиления на единицу длины. При этом, возникает проблема кластеризации редкоземельных элементов, что губительно сказывается на усилительных свойствах световода [25, 26].

Режимы работы лазера на основе высоколегированного эрбием волокна имеют свои особенности. Эффект кластеризации эрбия в материале сердцевины световода обуславливает возникновение импульсного режима работы эрбиевых волоконных лазеров. В работах [27-29] было показано, что пульсации возникают из-за наличия в системе пар ионов Er^{3+} , и предложена динамическая модель лазера, описывающая импульсный и стационарный режимы при наличии

в системе ионных пар. Позже в работах [30-32] было экспериментально обнаружено переключение между режимами импульсной и постоянной генерации при уменьшении температуры эрбиевого волоконного лазера, резонатор которого сформирован на участке высоколегированного волокна. Показано, что данный эффект обусловлен неточным соответствием энергий уровней при ап-конверсионных эффектах на ионных парах, что приводит к существенной роли температуры в вероятности ее возникновения. Таким образом режимы работы лазера существенно зависят как от уровня кластеризации эрбия, так и от температуры резонатора и мощности вводимой в световод накачки.

Изучение особенностей генерации одночастотных эрбиевых волоконных лазеров работающих в диапазоне 1,5 мкм с узкой полосой генерации [10, 33-37] необходимо для контроля и уменьшения ширины лазерной линии. Лазеры с узкой шириной линии и низким уровнем шума является одним из ключевых компонентов во многих областях применения современной волоконной оптики [8, 38, 39], таких как когерентная оптическая связь [40-42], высокочувствительные волоконные датчики и сенсоры [40, 43-48] и спектроскопия высокого разрешения [49]. Среди различных лазеров наиболее привлекательными источниками являются диодные лазеры [50-52], волоконные лазеры, включая волоконные лазеры с распределенной обратной связью [48, 53-55].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей генерации эрбиевых волоконных лазеров с короткими резонаторами вблизи двух фазовых переходов. Изучено степенное поведение параметров системы в окрестности критической точки, в широком диапазоне значений темпа накачки. Исследована зависимость параметров и режимов генерации от длины резонатора и мощности накачки, а именно переход от импульсной к непрерывной генерации.

1. Описание эксперимента

Используемое в работе активное волокно было изготовлено из преформы с умеренной концентрацией эрбия в сердцевине $\approx 0,03$ моль. % Er_2O_3) с минимальным уровнем серых потерь, обусловленных в том числе низким уровнем кластеризации [54, 56]. Спектр поглощения световодов приведены на Рисунке 1. Величина поглощения на длине волны 1530 составляла 17.4 дБ. Сердцевина световода была со-легированы германием для повышения фоточувствительности и алюминием, что дополнительно повышает растворимость ионов эрбия в кварцевом стекле [26, 57-59]. Разница показателя преломления сердцевины и оболочки составляла величину $\Delta n = 0,02$, длина волны остечки $\lambda_{\text{отсеч}} = 870$ нм, диаметр сердцевины $D_{\text{сердц}} = 4,5$ мкм.

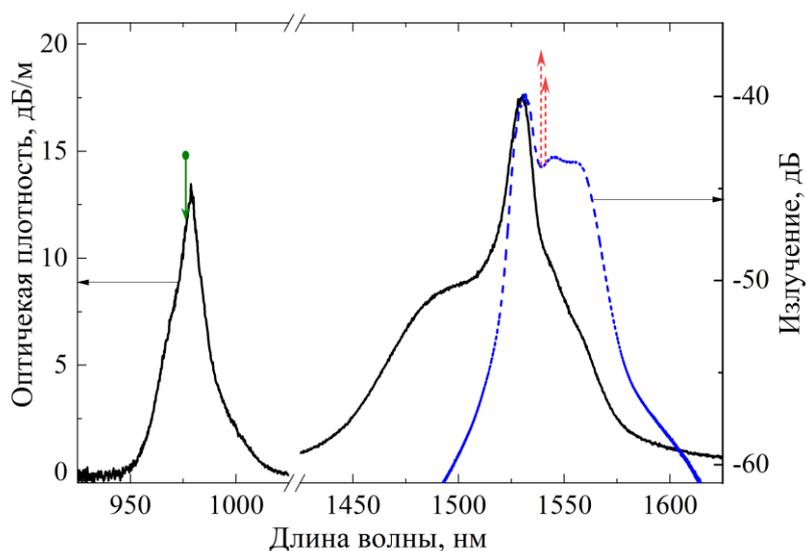


Рис. 1. Спектр поглощения (сплошная линия, левая ось) и спектр спонтанного излучения (пунктирная линия, правая ось) эрбиевого световода. Сплошной стрелкой указана длина волны накачки 976 нм. Пунктирными стрелками указаны длины волн генерации 1539 и 1541 нм.

В данной работе на основе световода были изготовлены два эрбиевых лазера по классической схеме Фабри-Перо с двумя волоконными брэгговскими решетками (Образец №1 с длиной резонатора 60 мм и Образец №2 с длиной резонатора 170 мм). Коэффициенты отражения глухой и выходной решеток для обоих лазеров составляли значения 18 дБ и 10 дБ, соответственно. Структуры

резонаторов всех лазеров были записаны непосредственно в сердцевине активного световода. Решетки лазеров с располагались на краях участка активного волоконного световода. Брэгговские решетки записывались излучением ArF-эксимерного лазера с использованием фазовых масок. Накачка лазеров осуществлялась непосредственно в сердцевину активного волокна, на длине волны 976 нм (Рис. 2) [60], с контролем мощности вводимого в активный световод излучения. Резонаторы лазеров охлаждались до комнатной температуры посредством пассивного радиатора. Для измерения оптического спектра и мощности генерации использовались оптический анализатор спектра (Yokogawa AQ6370D) и измеритель мощности (JDSU OLP-85-1), соответственно. Временные характеристики лазерного излучения измерялись с помощью осциллографа (Tectronix DPO4102B), совмещенного с фотодиод Thorlabs DET08CFC.

2. Результаты и обсуждение

Длина волны генерации волоконных лазеров определялась периодом брэгговских решеток и составляла 1541 нм (Образец №1) и 1539 (Образец №2) (Рис. 2).

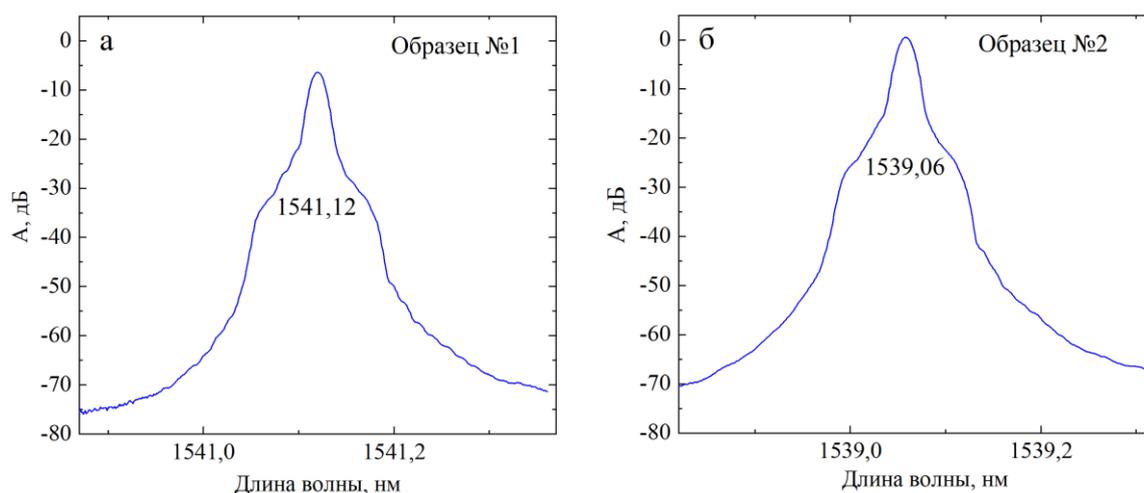


Рис. 2. Оптические спектры генерации исследуемых лазеров.

Эффективность генерации исследуемых лазеров относительно невысока и, очевидно, зависит от длины резонатора (Рис. 3). Однако, увеличение длины резонатора приводит к потере одномодового режима генерации.

Первоначально рассмотрим зависимость средней интенсивности генерации $P_{\text{лаз}}$ от мощности накачки $P_{\text{нак}}$. Хорошо известно, что данная зависимость линейна, $P_{\text{лаз}} = a(P_{\text{нак}} - P_{\text{порог}})$, где $P_{\text{порог}}$ – порог генерации. Получаем типичное поведение системы около критической точки (фазового перехода):

$$P_{\text{лаз}} = a(P_p - P_{\text{порог}})^\alpha, \quad (1)$$

где $\alpha = 1$, a – коэффициент наклона. На Рисунке 3а представлены измеренные зависимости мощности лазерной генерации от мощности накачки. Из (1) следуют линейные зависимости в двойном логарифмическом масштабе:

$$\log P_{\text{лаз}} = A + \log(P_{\text{нак}} - P_{\text{порог}}), \quad (2)$$

где обозначено $A = \log a$. При аппроксимации экспериментальных данных с использованием выражения (2) определяется значение: $\alpha \approx 1$ (Рис. 3б).

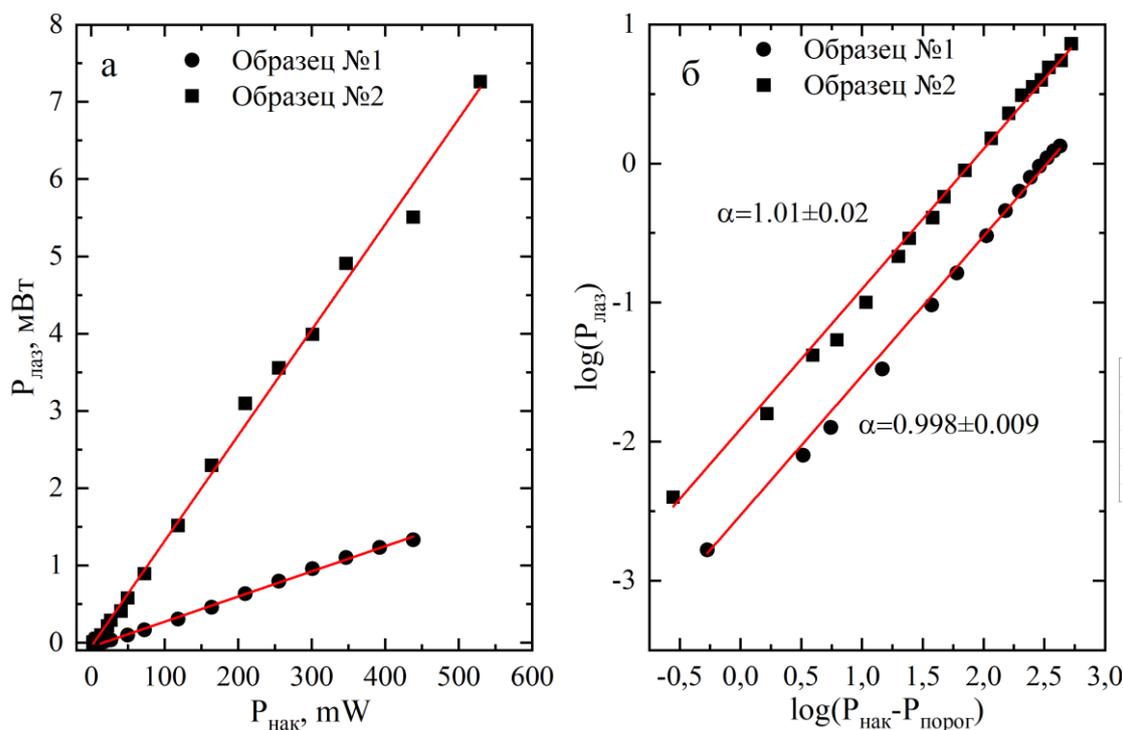


Рис. 3. а) Зависимость мощности лазерной генерации от мощности накачки. б) Зависимость логарифма мощности лазерной генерации от логарифма разницы мощности накачки и пороговой мощности.

Уровень легирования световода и параметры резонаторов исследуемых лазеров позволяют наблюдать различные режимы их работы при комнатной температуре. При низкой мощности накачки наблюдается режим пассивной модуляции добротности – импульсная генерация (Рис. 4а). При повышении мощности накачки генерация становится непрерывной с синусоидальной модуляцией – наблюдается второй фазовый переход (Рис. 4б). Формирование импульсного режима генерации характерно для эрбиевых высоколегированных лазеров из-за ускоренной депопуляции возбужденного уровня эрбия ввиду ап-конверсии на длине волны генерации ввиду образования пар ионов эрбия (мини-кластеров), приводящих к эффекту поглощения, зависящего от населенностей уровней в ионной паре [27, 30-32, 61]. В работах [27, 28, 62] этот эффект интерпретирован как насыщающееся поглощение. В классических лазерных схемах насыщающийся поглотитель (пассивный затвор), как известно [63, 64] приводит к режиму пассивной модуляции добротности и импульсной генерации. Однако, в работе [31] было показано, что в эрбиевых высоколегированных лазерах пассивная модуляция добротности реализована за счет эффекта, обратного насыщающемуся поглощению. В отличие от лазеров на основе высоколегированных эрбиевых волокон [30-32] переключение от импульсного режима к непрерывному в данной работе удалось осуществить при комнатной температуре при увеличении мощности накачки (Рис. 4), теоретическая возможность чего была предсказана в [31]. Достижение перехода от импульсного к непрерывному режиму генерации при комнатной температуре реализовано снижением уровня легирования активного волокна, что привело к уменьшению уровня кластеризации эрбия, и увеличением мощности накачки, что в совокупности снижает долю ап-конверсии в процессе опустошения возбужденного уровня эрбия [31].

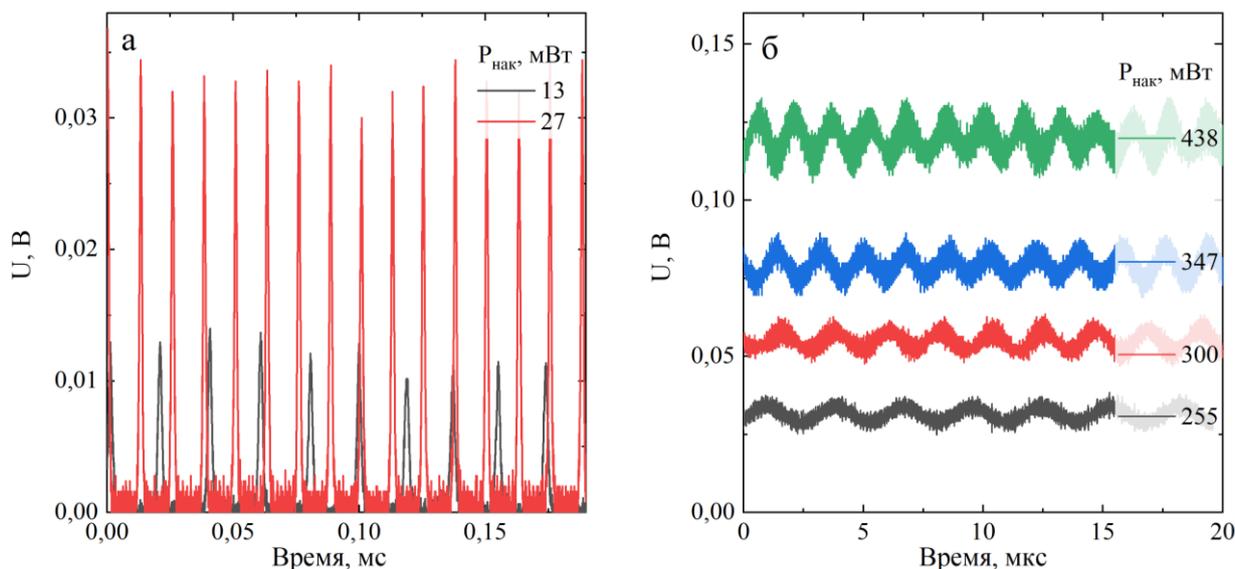


Рис. 4. Временные зависимости интенсивности генерации лазера (Образец №1) в режиме пассивной модуляции добротности (а) и непрерывном режиме с синусовой модуляцией (б).

В зависимости от конфигурации и длины резонаторов лазеров, исследуемых в данной работе, переключение между импульсным режимом и непрерывным режимом с синусовой модуляцией аналогичен вышеописанному, однако осуществляется при различной отстройке от пороговой мощности $P_{\text{порог}}$ (Рис. 5). При этом установлена характерная для исследуемых лазеров зависимость частоты импульсов и частоты синусовой модуляции в зависимости от мощности генерации при комнатной температуре.

Так как возникновение импульсов обусловлено самим процессом генерации и частота следования импульсов (ν), а также их длительность (τ) и амплитуда ($P_{\text{макс}}$) в первую очередь зависят от мощности генерации [30-32], рассмотрим подробнее значения данных величин. Для определения характерных особенностей изменения частоты модуляции при развитии генерации, были построены зависимости частоты ν в логарифмическом масштабе, причем по горизонтальной оси откладывался логарифм мощности лазерной генерации $\log(P_{\text{лаз}})$ (Рис. 5). Из экспериментальных данных были рассчитаны зависимости логарифма частоты импульсов и синусовой модуляции от логарифма мощности генерации обоих исследуемых образцов. В двойном логарифмическом масштабе – зависимости линейные для двух участков, соответствующих

импульсной и непрерывной синусовой генерации. По данным измеренным зависимостям были обнаружены следующие особенности характерные для исследуемых лазеров. Во-первых, при низких уровнях возбуждения в области режима пассивной модуляции добротности, наклон в двойном логарифмическом масштабе характеризуется значением критического параметра $\beta \approx 0,4-0,44$ (значение критического параметра β с погрешностью измерения для каждого исследуемого лазера указана на Рисунке 5). Найденные величины критического индекса фиксированы в достаточно узком диапазоне значений для эрбиевых лазеров, и является следствием природы импульсной модуляции, возникающей при росте поглощения на переходах связанных с парами ионов эрбия (мини кластерами) с увеличением интенсивности генерации [31].

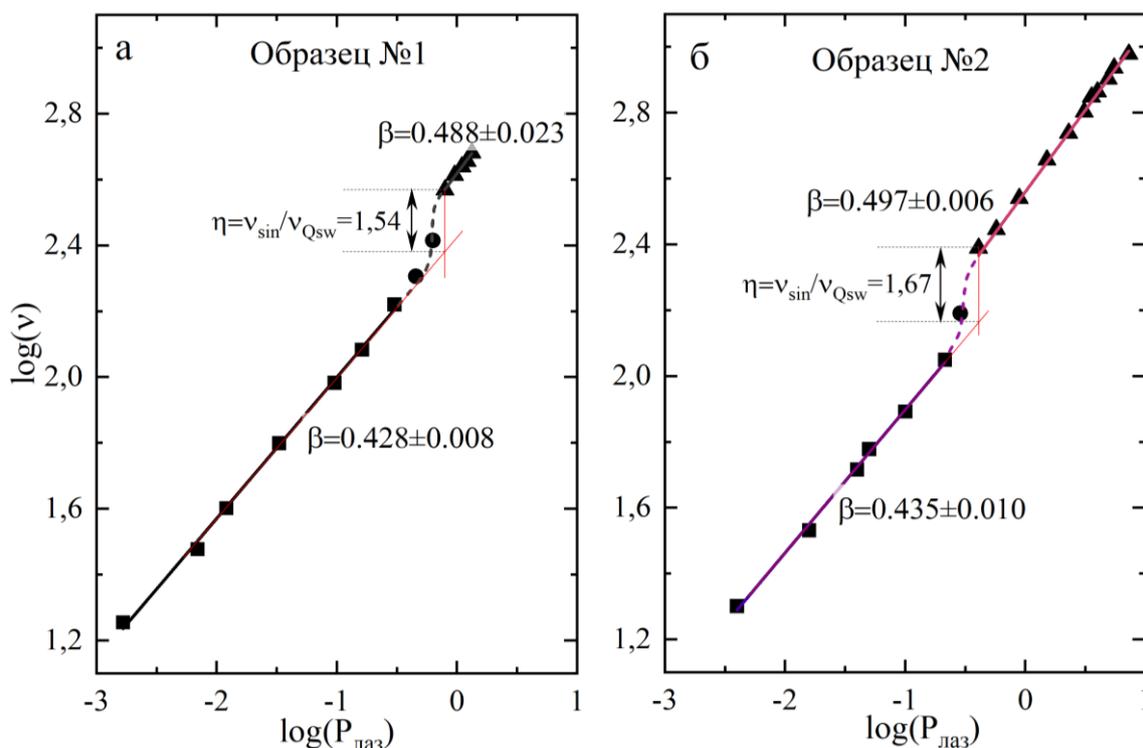


Рис. 5. Зависимость логарифма частоты импульсов и синусовой модуляции от логарифма мощности генерации лазеров с резонаторами длиной 60 мм (а) и 170мм (б).

Второе, $\beta \approx 0,5$ для зависимостей логарифмов частоты синусовой модуляции от логарифма мощности генерации, что прямо указывает на природу данной модуляции – релаксационные колебания. Ранее было отмечено, что для малых релаксационных колебаний зависимость частоты ν

от $(P_{\text{нак}} - P_{\text{порог}})$ характеризуется корневой зависимостью [65-67]. Третья обнаруженная особенность заключается в скачкообразном изменении частоты при втором фазовом переходе от импульсной модуляции к непрерывной с синусовой модуляцией: $\eta = \nu_{\text{sin}}/\nu_{Q\text{sw}}$. Для созданных лазеров величина данного скачка составила значения $\eta \approx 1,54$ и $\eta \approx 1,67$ (Рис. 5).

Так как генерация лазеров, основанных на умеренно легированном волокне, характеризуется начальным участком с импульсной генерацией, а при увеличении мощности накачки лазеры переходят в непрерывный модулированный режим, зависимости длительности и амплитуды импульсов построены до мощностей накачки, при которых происходит переключение с импульсного режима на непрерывный режим с модуляцией (второй фазовый переход). Рассчитанные из экспериментальной зависимости логарифмов длительности импульсов от логарифма мощности генерации аппроксимированы линейными зависимостями (Рис. 6а). Кроме этого, по измеренным зависимостям амплитуды импульсов от мощности накачки рассчитаны логарифмы амплитуд импульсов от логарифма мощности генерации и аппроксимированы линейными зависимостями (Рис. 6б). Значения критических индексов связанных с длительностью импульсов составили $\delta \approx -0,55$ — $-0,56$. При рассмотрении зависимостей логарифмов величин амплитуды от мощности генерации установлено немного отличающееся от единицы значение критических индексов, ответственных за длительность импульсов, которые составили $\chi \approx 1,12$ - $1,16$.

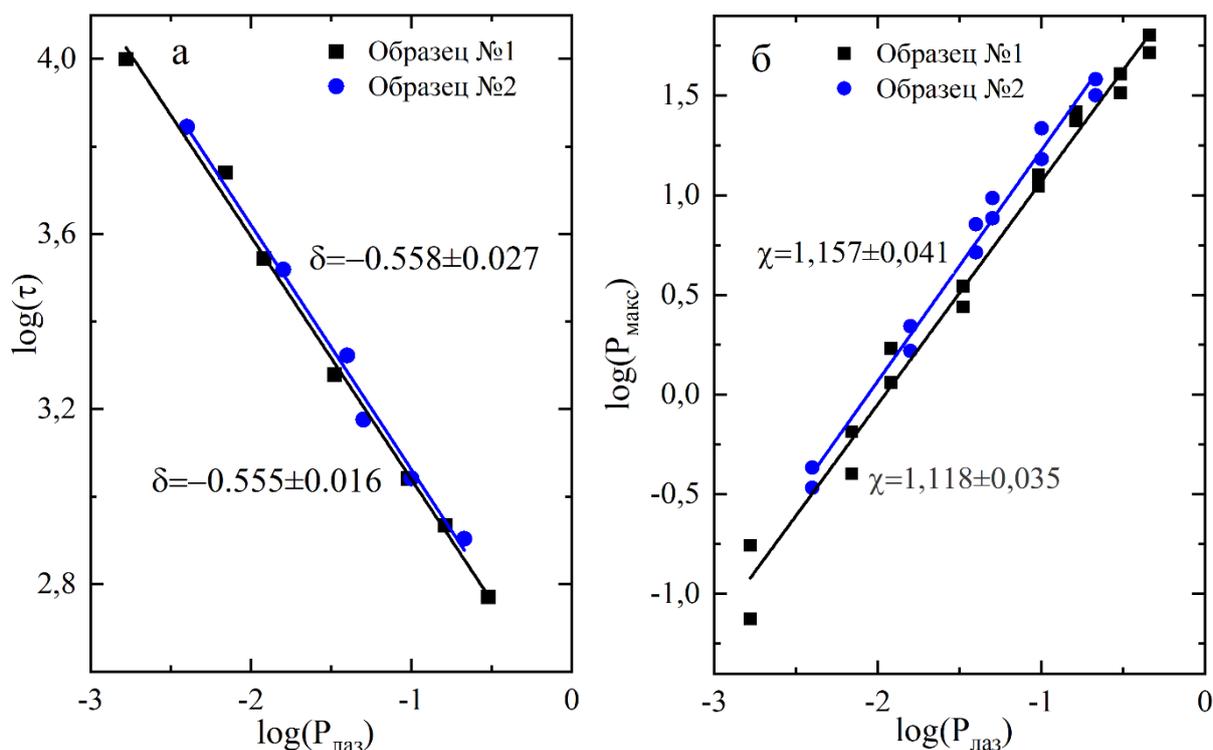


Рис. 6. а) Зависимость логарифма длительности импульсов от логарифма мощности генерации. б) Зависимость логарифма амплитуды импульсов от логарифма мощности генерации.

Таким образом, при рассмотрении логарифмов частоты, длительности и амплитуды импульсов от логарифма мощности лазерной генерации, зависимости приобретают универсальный вид и получают привязку к критическим параметрам.

Учитывая, что порог генерации лазера является фазовым переходом [68, 69] представим описание лазеров через критические индексы, для этого запишем:

$$\nu = b(P_{\text{нак}} - P_{\text{порог}})^{\beta}, \quad (3)$$

$$\tau = d(P_{\text{нак}} - P_{\text{порог}})^{\delta}, \quad (4)$$

$$P_{\text{max}} = c(P_{\text{нак}} - P_{\text{порог}})^{\chi}, \quad (5)$$

где β , δ и χ , а также α из уравнения (1) – критические индексы. b d c – константы. При этом, как и в теории фазовых переходов будем обращать внимание именно на показатели степени, а обсуждения множителей, в данном рассмотрении не столь важно. И универсальность будем приписывать именно индексам

(показателям степени), а множители как раз содержат информацию о конкретной реализации физической системы.

После логарифмирования зависимостей (3)-(5) и используя уравнение (2), исключаем $\log(P_{нак} - P_{порог})$, окончательно получаем:

$$\log v = \beta \log \langle P_{лаз} \rangle + B - \beta A, \tag{6}$$

$$\log \tau = \delta \log \langle P_{лаз} \rangle + D - \delta A, \tag{7}$$

$$\log P_{max} = \chi \log \langle P_{лаз} \rangle + C - \chi A. \tag{8}$$

где обозначено $B = \log b$, $D = \log d$, $C = \log c$. Таким образом, линейные зависимости в двойном логарифмическом масштабе являются прямым следствием критического поведения системы в окрестности порога генерации.

Далее проверяем корректность найденных критических индексов, используя соотношение:

$$P_{лаз} = P_{макс} v \tau. \tag{9}$$

Логарифмируя, получаем интерпретацию поведения лазерной системы через критические индексы β , δ и χ , связанные с критическим индексом α , соответствующим лазерной кривой из соотношения (1):

$$\alpha = \chi + \beta + \delta. \tag{10}$$

Найденные из экспериментальных данных критические индексы для умеренно легированных эрбиевых волоконных лазеров с линейными резонаторами удовлетворяют соотношению (10) (представлены в Таблице 1)

Таблица 1. Измеренные критические индексы исследуемых эрбиевых волоконных лазеров.

	β	δ	χ	$\chi + \beta + \delta$	α
Образец №1	0.44 ± 0.01	-0.56 ± 0.03	1.16 ± 0.04	$0.99 \pm 0,06$	$1.003 \pm 0,008$
Образец №2	0.43 ± 0.01	-0.56 ± 0.02	1.12 ± 0.04	$1.03 \pm 0,07$	$1.007 \pm 0,009$

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей генерации эрбиевых волоконных лазеров с короткими резонаторами. Изучены режимы генерации в случае непрерывной накачки на длине волны 976 нм. Исследована зависимость параметров и режимов генерации от длины резонатора и мощности накачки, а именно переход от импульсной к непрерывной генерации. Были построены зависимости длительности и частоты импульсов при варьировании длины резонатора, из которых экспериментально обнаружена и теоретически подтверждена универсальная зависимость частоты и длительности импульсов (одинаковый угол наклона) от мощности генерации в волоконных умеренно легированных эрбиевых лазерах с пассивной модуляцией добротности, а именно при рассмотрении логарифмов частоты, длительности и амплитуды импульсов от логарифма мощности лазерной генерации, зависимости приобретают универсальный вид и получают привязку к критическим параметрам. Из экспериментальных данных определены критические индексы импульсной генерации эрбиевых волоконных лазеров, слабо зависящие от параметров резонаторов. Кроме этого, экспериментально установлено универсальное соотношение между критическими индексами, которые позволяют предсказывать поведение лазерных систем на основе эрбиевых активных элементов.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН.

Литература

1. Wang H., Zhou J., Xing Z., Feng Q., Zhang K., Zheng K., Chen X., Gui T., Li L., Zeng J. Fast-Convergence Digital Signal Processing for Coherent PON using Digital SCM // Journal of Lightwave Technology. – 2023.
2. Berti N., Coen S., Erkintalo M., Fatome J. Extreme waveform compression with a nonlinear temporal focusing mirror // Nature Photonics. – 2022. – Т. 16, № 12. – С. 822-827.

3. van Veen D., Houtsma V. Strategies for economical next-generation 50G and 100G passive optical networks // *Journal of Optical Communications and Networking*. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. A95-A103.
4. Zhou J., Sui Q., Li Z. Non-orthogonal discrete multi-tone: toward higher spectral efficiency for optical networks // *IEEE Communications Magazine*. – 2021. – Т. 59, № 10. – С. 70-75.
5. Liu X. Evolution of fiber-optic transmission and networking toward the 5G era // *Iscience*. – 2019. – Т. 22. – С. 489-506.
6. Zhao Q., Pei L., Zheng J., Tang M., Xie Y., Li J., Ning T. Tunable and interval-adjustable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on cascaded filters with the assistance of NPR // *Optics & Laser Technology*. – 2020. – Т. 131. – С. 106387.
7. Mizrahi V., DiGiovanni D. J., Atkins R. M., Grubb S. G., Park Y.-K., Delavaux J.-M. Stable single-mode erbium fiber-grating laser for digital communication // *Journal of Lightwave technology*. – 1993. – Т. 11, № 12. – С. 2021-2025.
8. Bellemare A. Continuous-wave silica-based erbium-doped fibre lasers // *Progress in Quantum Electronics*. – 2003. – Т. 27, № 4. – С. 211-266.
9. Bradley J. D. B., Pollnau M. Erbium-doped integrated waveguide amplifiers and lasers // *Laser & Photonics Reviews*. – 2011. – Т. 5, № 3. – С. 368-403.
10. Brida D., Krauss G., Sell A., Leitenstorfer A. Ultrabroadband Er: fiber lasers // *Laser & Photonics Reviews*. – 2014. – Т. 8, № 3. – С. 409-428.
11. Kringlebotn J. T., Archambault J.-L., Reekie L., Townsend J. E., Vienne G. G., Payne D. N. Highly-efficient, low-noise grating-feedback Er/sup 3+: Yb/sup 3+/codoped fibre laser // *Electronics Letters*. – 1994. – Т. 30, № 12. – С. 972-973.
12. Weber J. K. R., Felten J. J., Cho B., Nordine P. C. Glass fibres of pure and erbium- or neodymium-doped yttria–alumina compositions // *Nature*. – 1998. – Т. 393, № 6687. – С. 769-771.
13. Park N., Dawson J. W., Vahala K. J. Multiple wavelength operation of an erbium-doped fiber laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1992. – Т. 4, № 6. – С. 540-541.
14. Van Putten L. D., Masoudi A., Brambilla G. 100-km-sensing-range single-ended distributed vibration sensor based on remotely pumped Erbium-doped fiber amplifier // *Optics Letters*. – 2019. – Т. 44, № 24. – С. 5925-5928.
15. Jin R., Yuan Z., Wu Y., Wang C. Study on Dual-wavelength Wide-spectrum Erbium-doped Fiber Ring Laser for Optical Fiber Interferometric Sensing System // *Journal of Lightwave Technology*. – 2023.
16. Wang Y., Wang Y., He C., Liu X., Bai Q., Jin B. 190km Φ -OTDR with bidirectional Raman and relay erbium-doped fiber hybrid amplification // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2023. – Т. 166. – С. 107569.
17. Lin W., Zhao F., Shao L.-Y., Vai M. I., Shum P. P., Sun S. Temperature sensor based on Er-doped cascaded-peanut taper structure in-line interferometer in fiber ring laser // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Т. 21, № 19. – С. 21594-21599.

18. Mađry M., Alwis L., Binetti L., Pajewski Ł., Bereś-Pawlik E. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity using a dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser sensor // *IEEE Sensors Journal*. – 2019. – Т. 19, № 20. – С. 9215-9220.
19. Ames G. H., Maguire J. M. Erbium fiber laser accelerometer // *IEEE Sensors Journal*. – 2007. – Т. 7, № 4. – С. 557-561.
20. Melle S. M., Alavie A. T., Karr S., Coroy T., Liu K., Measures R. M. A Bragg grating-tuned fiber laser strain sensor system // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1993. – Т. 5, № 2. – С. 263-266.
21. Foster S., Tikhomirov A., Milnes M., Van Velzen J., Hardy G. A fiber laser hydrophone // *17th International Conference on Optical Fibre Sensors*. – Т. 5855 – International Society for Optics and Photonics, 2005. – С. 627-630.
22. Hill D. J., Nash P. J., Jackson D. A., Webb D. J., O'Neill S., Bennion I., Zhang L. Fiber laser hydrophone array // *Fiber Optic Sensor Technology and Applications*. – Т. 3860 – International Society for Optics and Photonics, 1999. – С. 55-66.
23. Khaleel W. A., Al-Janabi A. H. M. High-sensitivity sucrose erbium-doped fiber ring laser sensor // *Optical Engineering*. – 2017. – Т. 56, № 2. – С. 026116.
24. Buis E. J., Doppenberg E. J. J., Nieuwland R. A., Toet P. M. Fibre laser hydrophones for cosmic ray particle detection // *Journal of Instrumentation*. – 2014. – Т. 9, № 03. – С. C03051.
25. Likhachev M. E., Bubnov M. M., Zotov K. V., Lipatov D. S., Yashkov M. V., Guryanov A. N. Effect of the AlPO₄ join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers // *Optics letters*. – 2009. – Т. 34, № 21. – С. 3355-3357.
26. Paul M., Kir'Yanov A., Barmenkov Y., Pal M., Youngman R., Dhar A., Das S. Phase-separated alumina-silica glass-based erbium-doped fibers for optical amplifier: material and optical characterization along with amplification properties // *Fibers*. – 2018. – Т. 6, № 3. – С. 67.
27. Sanchez F., Le Boudec P., François P.-L., Stephan G. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers // *Physical Review A*. – 1993. – Т. 48, № 3. – С. 2220.
28. Sanchez F., Stephan G. General analysis of instabilities in erbium-doped fiber lasers // *Physical Review E*. – 1996. – Т. 53, № 3. – С. 2110.
29. Le Boudec P., Francois P. L., Delevaque E., Bayon J.-F., Sanchez F., Stephan G. M. Influence of ion pairs on the dynamical behaviour of Er³⁺-doped fibre lasers // *Optical and quantum electronics*. – 1993. – Т. 25, № 8. – С. 501-507.
30. Smirnov A. M., Butov O. V. Pump and thermal impact on heavily erbium-doped fiber laser generation // *Optics Letters*. – 2021. – Т. 46, № 1. – С. 86-89.
31. Smirnov A. M., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Butov O. V. Thermal switching of lasing regimes in heavily doped Er³⁺ fiber lasers // *ACS Photonics*. – 2018. – Т. 5, № 12. – С. 5038-5046.
32. Smirnov A. M., Bazakutsa A. P., Butov O. V. Temperature and Pump Dependent Operation of Short-cavity Erbium-doped Fiber Laser // *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring) –IEEE, 2019*. – С. 741-744.

33. Feng T., Wang M., Wang X., Yan F., Suo Y., Yao X. S. Switchable 0.612-nm-spaced dual-wavelength fiber laser with sub-kHz linewidth, ultra-high OSNR, ultra-low RIN, and orthogonal polarization outputs // *Journal of Lightwave Technology*. – 2019. – Т. 37, № 13. – С. 3173-3182.
34. Iwatsuki K., Okamura H., Saruwatari M. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fibre ring-laser with 1.4 kHz linewidth // *Electronics Letters*. – 1990. – Т. 24, № 26. – С. 2033-2035.
35. Pan Z., Ye Q., Cai H., Qu R., Fang Z. Fiber ring with long delay used as a cavity mirror for narrowing fiber laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2014. – Т. 26, № 16. – С. 1621-1624.
36. Fu S., Shi W., Feng Y., Zhang L., Yang Z., Xu S., Zhu X., Norwood R., Peyghambarian N. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers // *JOSA B*. – 2017. – Т. 34, № 3. – С. A49-A62.
37. Rybaltovsky A., Sverchkov S., Vel'miskin V., Przhiiialkovskii D., Bazakutsa A., Galagan B., Denker B., Butov O. Single-frequency continuous-wave laser based on the novel Er/Yb-doped composite phosphosilicate fiber // *Optics & Laser Technology*. – 2022. – Т. 151. – С. 108049.
38. Bradley J. D., Pollnau M. Erbium-doped integrated waveguide amplifiers and lasers // *Laser & Photonics Reviews*. – 2011. – Т. 5, № 3. – С. 368-403.
39. Weber J. R., Felten J. J., Cho B., Nordine P. C. Glass fibres of pure and erbium-or neodymium-doped yttria–alumina compositions // *Nature*. – 1998. – Т. 393, № 6687. – С. 769-771.
40. Huang M.-F., Salemi M., Chen Y., Zhao J., Xia T. J., Wellbrock G. A., Huang Y.-K., Milione G., Ip E., Ji P. First field trial of distributed fiber optical sensing and high-speed communication over an operational telecom network // *Journal of Lightwave Technology*. – 2019. – Т. 38, № 1. – С. 75-81.
41. Pérez-Herrera R. A., Quintela M. A., Fernández-Vallejo M., Quintela A., López-Amo M., López-Higuera J. M. Stability comparison of two ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using highly doped Er-fibers // *Journal of Lightwave Technology*. – 2009. – Т. 27, № 14. – С. 2563-2569.
42. Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers // *nature*. – 2003. – Т. 424, № 6950. – С. 831-838.
43. Yatseev V., Zotov A., Butov O. Combined frequency and phase domain time-gated reflectometry based on a fiber with reflection points for absolute measurements // *Results in Physics*. – 2020. – Т. 19. – С. 103485.
44. Stepanov K. V., Zhirnov A. A., Chernutsky A. O., Koshelev K. I., Pnev A. B., Lopunov A. I., Butov O. V. The sensitivity improvement characterization of distributed strain sensors due to weak fiber Bragg gratings // *Sensors*. – 2020. – Т. 20, № 22. – С. 6431.
45. Butov O. V., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Fedorov A. N., Shevtsov I. A. All-fiber highly sensitive Bragg grating bend sensor // *Sensors*. – 2019. – Т. 19, № 19. – С. 4228.
46. Tomyshev K., Manuilovich E., Tazhetdinova D., Dolzhenko E., Butov O. V. High-precision data analysis for TFBG-assisted refractometer // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2020. – Т. 308. – С. 112016.

47. Tomyshev K. A., Tazhetdinova D. K., Manuilovich E. S., Butov O. V. High-resolution fiber optic surface plasmon resonance sensor for biomedical applications // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – Т. 124, № 11. – С. 113106.
48. Cranch G. A., Flockhart G. M., Kirkendall C. K. Distributed feedback fiber laser strain sensors // *IEEE Sensors Journal*. – 2008. – Т. 8, № 7. – С. 1161-1172.
49. Ideguchi T., Poisson A., Guelachvili G., Picqué N., Hänsch T. W. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy // *Nature communications*. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 3375.
50. Dahmani B., Hollberg L., Drullinger R. Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback // *Optics letters*. – 1987. – Т. 12, № 11. – С. 876-878.
51. Laurent P., Clairon A., Breant C. Frequency noise analysis of optically self-locked diode lasers // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1989. – Т. 25, № 6. – С. 1131-1142.
52. Alnis J., Matveev A., Kolachevsky N., Udem T., Hänsch T. Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities // *Physical Review A*. – 2008. – Т. 77, № 5. – С. 053809.
53. Yla-Jarkko K., Grudin A. Performance limitations of high-power DFB fiber lasers // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2003. – Т. 15, № 2. – С. 191-193.
54. Butov O. V., Rybaltovsky A. A., Bazakutsa A. P., Golant K. M., Vyatkin M. Y., Popov S. M., Chamorovskiy Y. K. 1030 nm Yb 3+ distributed feedback short cavity silica-based fiber laser // *JOSA B*. – 2017. – Т. 34, № 3. – С. A43-A48.
55. Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Butov O. V. Optimal defect position in a DFB fiber laser // *Optics Express*. – 2021. – Т. 29, № 9. – С. 13657-13668.
56. Golant K. Surface plasma chemical vapor deposition: 20 years of application in glass synthesis for lightguides (a review) // *XXI International Congress on Glass* – , 2007. –
57. Lægsgaard J. Dissolution of rare-earth clusters in SiO₂ by Al codoping: a microscopic model // *Physical Review B*. – 2002. – Т. 65, № 17. – С. 174114.
58. Monteil A., Chaussedent S., Alombert-Goget G., Gaumer N., Obriot J., Ribeiro S. J., Messaddeq Y., Chiasera A., Ferrari M. Clustering of rare earth in glasses, aluminum effect: experiments and modeling // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2004. – Т. 348. – С. 44-50.
59. Dardaillon R., Palermo C., Lancry M., Myara M., Kribich R. K., Signoret P. Accurate modeling of radiation-induced absorption in Er-Al-doped silica fibers exposed to high-energy ionizing radiations // *Optics Express*. – 2020. – Т. 28, № 4. – С. 4694-4707.
60. Zyskind J. L., Mizrahi V., DiGiovanni D. J., Sulhoff J. W. Short single frequency erbium-doped fibre laser // *Electronics Letters*. – 1992. – Т. 28, № 15. – С. 1385-1387.
61. Loh W. Suppression of self-pulsing behavior in erbium-doped fiber lasers with resonant pumping // *Optics Letters*. – 1996. – Т. 21, № 10. – С. 734-736.

62. Le Boudec P., Francois P., Delevaque E., Bayon J.-F., Sanchez F., Stephan G. Influence of ion pairs on the dynamical behaviour of Er 3+-doped fibre lasers // Optical and Quantum Electronics. – 1993. – Т. 25, № 8. – С. 501-507.
63. Siegman A. E. Lasers. Mill Valley, CA: Univ // Science. – 1986. – С. 298-301.
64. Principles of lasers. / Svelto O., Hanna D. C.: Springer, 1998.
65. Okhotnikov O., Salcedo J. Stable relaxation-oscillation Er/sup 3+/-doped fiber laser // IEEE photonics technology letters. – 1994. – Т. 6, № 3. – С. 369-371.
66. Jhon Y.-M., Kim B.-K., Kim D.-H., Kim M.-W., Kim S.-K., Choi S.-S. In situ cavity loss measurements of a mode-locked erbium-doped fiber ring laser by the relaxation oscillation frequency method // Journal of the Optical Society of Korea. – 2000. – Т. 4, № 1. – С. 11-13.
67. Shinya T. M., Gupta S. G. S., Shimomura T. S. T. Relaxation oscillations in fiber-grating-tuned erbium-doped fiber lasers // Japanese journal of applied physics. – 1997. – Т. 36, № 12R. – С. 7207.
68. Laser light dynamics. / Haken H.: North-Holland Amsterdam, 1985.
69. Scott J., Sargent III M., Cantrell C. Laser-phase transition analogy: Application to first-order transitions // Optics Communications. – 1975. – Т. 15, № 1. – С. 13-16.

Для цитирования:

Смирнов А.М., Дорофеев А.В., Бутов О.В. Смена режимов генерации в эрбиевых волоконных лазерах. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.12>.