

УДК 535.1

## ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ ЭРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАХА–ЦЕНДЕРА

А. Д. Зверев<sup>1,2</sup>, В. А. Камынин<sup>2</sup>, В. Г. Воронин<sup>1</sup>, В. Б. Цветков<sup>2</sup>

*Реализован полностью волоконный импульсный эрбиевый лазер с внутрирезонаторным модулятором Маха–Цендера, работающий в режиме модуляции добротности. Продемонстрированы стабильные режимы импульсной генерации на длине волны 1551 нм. Частота следования импульсов варьировалась в диапазоне от 9.2 до 27.6 кГц. Длительности импульсов изменялись в диапазоне от 0.66 мкс до 1.76 мкс. Пиковые мощности изменялись в диапазоне от 2.28 Вт до 0.76 Вт.*

**Ключевые слова:** эрбий, волоконный лазер, модуляция добротности, интерферометр Маха–Цендера.

*Введение.* Импульсные волоконные лазеры, работающие в спектральном диапазоне около 1.5 мкм, имеют ряд текущих и потенциальных применений. Источники микросекундного и субмикросекундного диапазонов могут быть использованы в ЛИДАРах, так как безопасны для зрения и попадают в локальный минимум поглощения атмосферы [1, 2]. Кроме того, подобные лазеры применяются в медицине и спектроскопии [3, 4].

Существует ряд способов осуществления активной модуляции добротности в эрбиевом волоконном лазере. В работе [5] такой режим был получен с помощью акустооптического модулятора. Генерировались импульсы с пиковой мощностью более 2 кВт и длительностью 25 нс при частоте повторения 500 Гц [5]. В работе [6] был продемонстрирован эффект пассивной модуляции добротности в эрбиевом волоконном лазере, обусловленный совместным действием рэлеевского рассеяния света и вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в волоконном резонаторе лазера. Лазер генерировал импульсы с длительностью менее 15 нс и пиковой мощностью, достигающей 200 Вт, период следования импульсов составлял 300–500 мкс [6].

<sup>1</sup> МГУ имени М. В. Ломоносова, физический факультет, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2; e-mail: izverevad@gmail.com.

<sup>2</sup> ИОФРАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38.

В работе [7] представлен полностью волоконный лазер с активной модуляцией добротности. Особенностью этой работы является использование в качестве модулятора волоконного внутрирезонаторного интерферометра Маха–Цендера. В активном плече интерферометра волокно было намотано на пьезокерамический цилиндр, подавая на него напряжение, можно было менять оптическую длину пути активного плеча и, соответственно, фазу выходящего света. В зависимости от разности фаз света, прошедшего активное и пассивное плечо, изменялась пропускная способность интерферометра. Это позволяло модулировать добротность резонатора лазера. Таким образом, данный метод позволяет реализовать активную модуляцию добротности лазера, сохраняя полностью волоконное исполнение схемы. Данный метод модуляции добротности используется в нашей работе для создания полностью волоконного импульсного эрбиевого лазера.

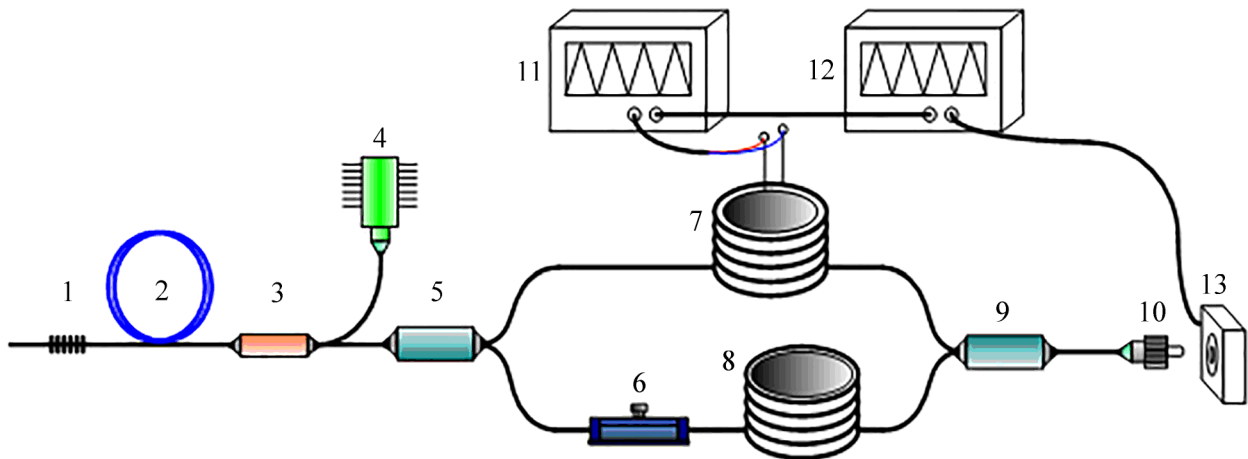


Рис. 1: Схема импульсного волоконного эрбиевого лазера. 1 – волоконная брэгговская решетка; 2 – волокно, легированное ионами эрбия; 3 – мультиплексор; 4 – лазер накачки 976 нм; 5, 9 – ответвители 50/50; 6 – контроллер поляризации; 7 – пьезоэлектрический элемент; 8 – пассивное волокно; 10 – разъем с прямым сколом; 11 – генератор напряжения; 12 – осциллограф; 13 – приемник.

*Экспериментальная часть.* Схема полностью волоконного эрбиевого лазера, работающего в режиме модуляции добротности, приведена на рис. 1. Установка была реализована на базе непрерывного волоконного лазера, в котором роль активной среды выполняло одномодовое волокно длиной 4 метра, легированное ионами эрбия. Накачка осуществлялась полупроводниковым лазерным диодом на длине волны 976 нм, генерация была получена на длине волны 1551 нм. Уникальность установки состояла в использовании волоконного интерферометра Маха–Цендера в качестве оптического затвора,

помещенного в резонатор. Функцию одного из зеркал выполняла брэгговская решетка с длиной волны отражения 1551 нм, в качестве выходного зеркала использовался прямой скол с коэффициентом отражения 4%. Интерферометр состоял из двух разветвителей и двух плеч одинаковой длины. В одном из плеч волокно было намотано на пьезокерамический цилиндр. При подаче электрического сигнала на цилиндр возникало механическое воздействие на намотанное волокно и менялась пропускная способность интерферометра [7]. Длины резонатора, активного волокна и плеч интерферометра (разность длин плеч 360 мкм) оказались равными 15 м, 4 м и 8.5 м соответственно.

Зависимость мощности лазера без модуляции добротности от мощности накачки являлась линейной в диапазоне от 1 до 114 мВт при изменении накачки от 20 до 400 мВт.

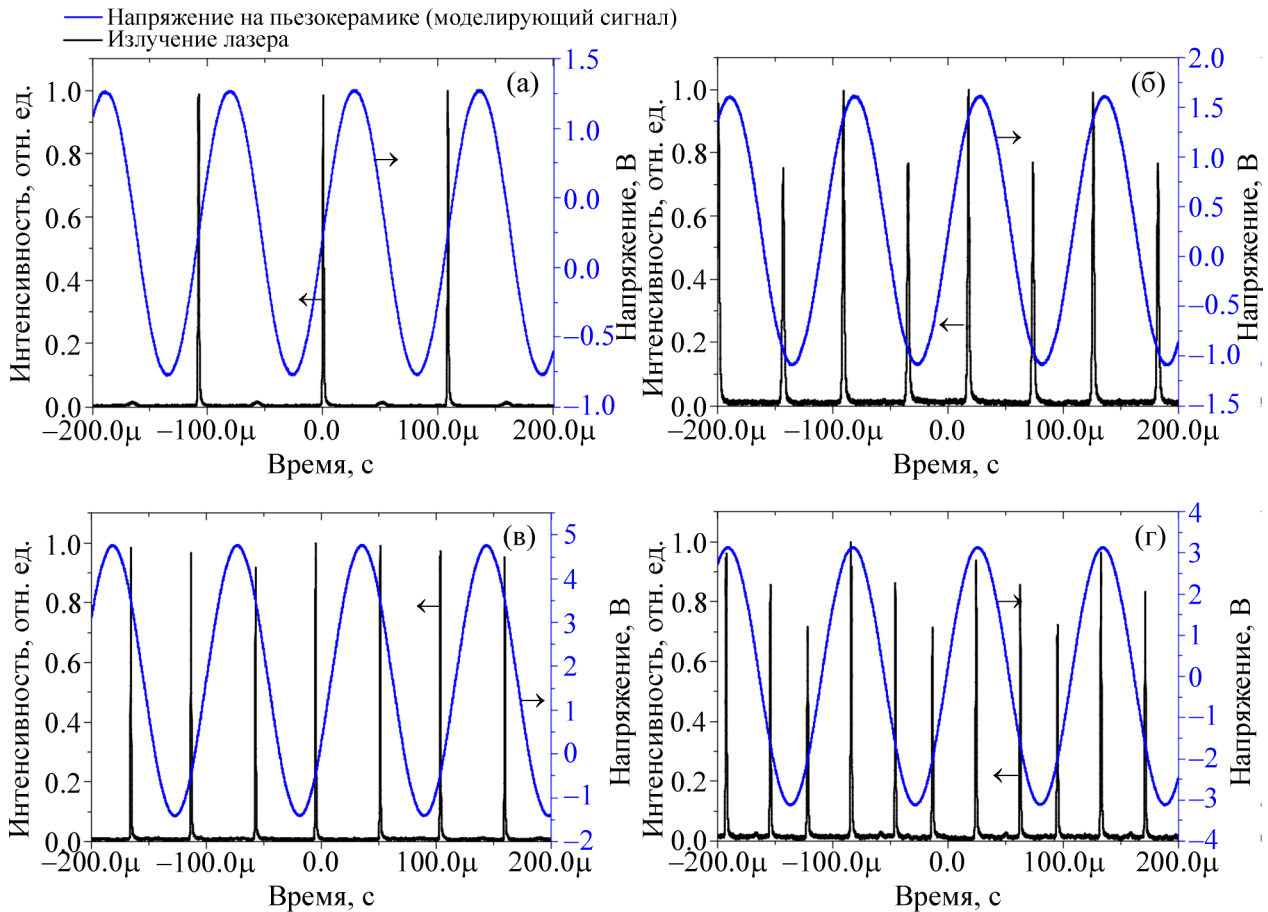


Рис. 2: (а) Зависимость мощности на выходе из лазера при мощности накачки  $P_{\text{pump}} = 60$  мВт и амплитуде напряжения на пьезокерамике  $U_{\text{pc}} = 2$  В; (б)  $P_{\text{pump}} = 60$  мВт,  $U_{\text{pc}} = 2.8$  В; (в)  $P_{\text{pump}} = 150$  мВт,  $U_{\text{pc}} = 3.08$  В; (г)  $P_{\text{pump}} = 150$  мВт,  $U_{\text{pc}} = 3.15$  В.

*Результаты и их обсуждение.* При превышении порогового значения мощности накачки (20 мВт) и подаче периодического напряжения на пьезокерамический цилиндр, наблюдалась импульсная генерация, что свидетельствовало о модуляции добротности лазера. Стабильность генерации поддерживалась контролем поляризации и изменением постоянной составляющей напряжения на пьезокерамике. На рис. 2 представлены осциллограммы сигналов импульсного лазера. На пьезокерамику подавалось синусоидальное напряжение (модулирующий сигнал) с частотой 9.2 кГц и амплитудами 1 В (рис. 2(а)) и 1.4 В (рис. 2(б)). Средняя мощность выходного излучения в обоих случаях составляла 14 мВт при мощности накачки  $P_{\text{pum}} = 60$  мВт. Длительность импульса на полувысоте и пиковая мощность в первом случае (а) составляли 0.9 мкс и 1.7 Вт, соответственно. Частота следования импульсов совпадала с частотой модуляции. При увеличении амплитуды напряжения на пьезокерамике  $U_{\text{pc}}$  до 1.4 В происходило удвоение частоты генерации (рис. 2(б)). Пиковые мощности и длительности на полувысоте основного и промежуточного импульсов составляли 0.94 Вт, 0.76 Вт и 1.56 мкс, 1.76 мкс соответственно.

При увеличении мощности накачки до 150 мВт и амплитуде напряжения на пьезокерамике  $U_{\text{pc}} = 3.1$  В (рис. 2(в)) наблюдался режим генерации с выровненными по амплитуде импульсами и частотой, удвоенной относительно первого режима (рис. 2(а)). Длительность импульса на полувысоте и пиковая мощность в этом случае (в) были 0.66 мкс и 2.28 Вт соответственно (рис. 2(в)). При увеличении  $U_{\text{pc}}$  до 3.15 В, при том же значении мощности накачки, наблюдалось появление еще одного промежуточного импульса (рис. 2(г)). В данном режиме пиковые мощности и длительности импульсов на полувысоте были равны 1.4 Вт, 1.3 Вт, 1 Вт и 1 мкс, 0.9 мкс, 1 мкс соответственно. В обоих случаях (рис. 2(в), (г)) мощность генерируемого излучения составляла 32 мВт.

На рис. 3 представлены графики одиночных импульсов в режимах с выровненными амплитудами импульсов.

В результате проделанной работы были выявлены характерные особенности импульсных режимов в исследуемом лазере. Генерация импульсов происходит, когда достигнуто заметное превышение инверсной населенности над порогом генерации и когда потери на этом отрезке времени поддерживаются достаточно малыми. Удвоение частоты следования импульсов при повышении амплитуды напряжения на катушке, изображенное на рис. 2((а), (б)), объясняется переходом в нелинейный режим модуляции пропускной способности интерферометра, и как следствие в течение одного периода модулирующего сигнала появляется несколько временных моментов, в которые доб-

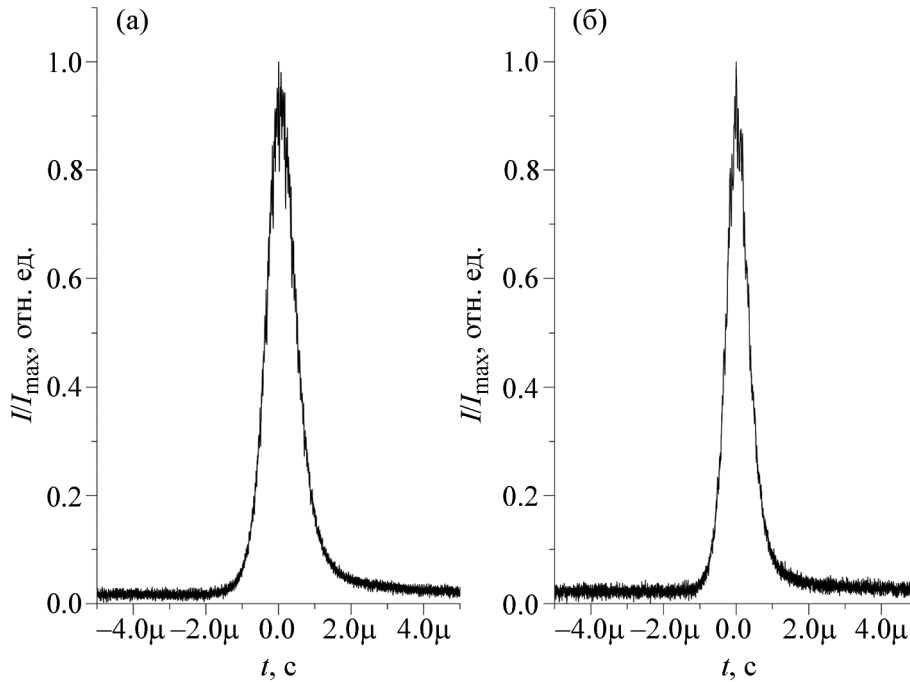


Рис. 3: (а) Одиночный импульс при  $P_{\text{pum}} = 60 \text{ мВт}$ ,  $U_{\text{pc}} = 2 \text{ В}$ ; (б)  $P_{\text{pum}} = 150 \text{ мВт}$ ,  $U_{\text{pc}} = 3.1 \text{ В}$ .

ротность резонатора достигает своих пиковых значений. Наличие различий в пиковой мощности у следующих друг за другом импульсов происходит из-за разности времени накачки между нахождениями резонатора в высокодобротном состоянии. Аналогичным образом осуществляется утроение частоты, изображенное на рис. 2(г). При увеличении мощности накачки и увеличении амплитуды модулирующего напряжения, получается осуществление режима генерации с удвоением частоты импульсов. То есть за один период модулирующего сигнала инверсная заселенность дважды достигает своего максимального значения в промежутки времени, когда добротность резонатора лазера является высокой (рис. 2(а), рис. 2(в)), в данном случае при увеличении амплитуды напряжения также заметно изменение длительности импульса, связанное с увеличением скорости изменения добротности. Суммируя все вышеизложенное, можно сделать предположение о возможности генерации импульсов с более высокими значениями пиковой мощности при выборе более оптимальной формы импульса модулирующего сигнала. Существенное ограничение для оптимизации лазера в данном случае будет обусловлено неконтролируемыми флуктуациями показателя преломления в волокне (термические и акустические случайные флуктуации).

*Заключение.* В работе был реализован полностью волоконный импульсный эрбиевый лазер с внутривибраторным модулятором Маха–Цендера, работающий в режиме модуляции добротности.

Исследованы характеристики данного лазера. Получены стабильные режимы импульсной генерации на длине волны 1551 нм. Частота следования импульсов варьировалась в диапазоне от 9.2 до 27.6 кГц. Длительности импульсов и пиковые мощности изменялись в диапазоне от 0.66 мкс до 1.76 мкс и от 2.28 Вт до 0.76 Вт соответственно.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. Андреев, Д. Н. Васильев, М. С. Пенкин и др., Журнал Фотоника (6), 48 (2014).
- [2] Y. Chen, C. Zhao, S. Chen, et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **20**(5), 315 (2013). DOI: 10.1109/jstqe.2013.2295196.
- [3] J. Waibel, A. J. Wulkan, M. Lupo, et al., Lasers in surgery and medicine **44**(6), 441 (2012). DOI: 10.1002/ism.22038.
- [4] N. A. Russo, R. Duchowicz, J. Mora, et al., Optics Communications **210**, 361 (2002). DOI: 10.10016/s0030-4018(02)01815-1.
- [5] G. P. Lees, D. Taverner, D. J. Richardson, et al., Advanced Solid State Lasers 27 (1997).
- [6] А. А. Фотиади, Р. В. Киян, О. В. Шакин, Письма в ЖТФ **27**(10), (2001). DOI: 10.1117/12.418818.
- [7] В. Г. Воронин, В. А. Камынин, Прикладная фотоника **2**(2), 135 (2015).
- [8] И. В. Жлуктова, В. А. Камынин, В. Г. Воронин и др., Квантовая электроника **48**(6), 506 (2018). DOI: 10.1070/QEL16577.
- [9] В. М. Афанасьев, Прикладная фотоника **3**(4), 341 (2016).

Поступила в редакцию 12 марта 2020 г.

После доработки 18 июля 2020 г.

Принята к публикации 21 июля 2020 г.