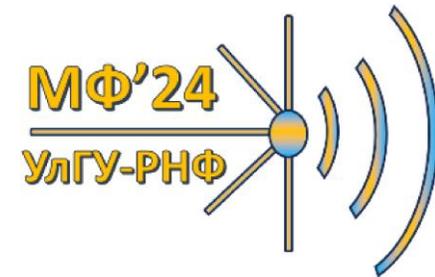


# ГОЛЬМИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

Филатова С.А.\*, Камынин В.А., Цветков В.Б.



Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

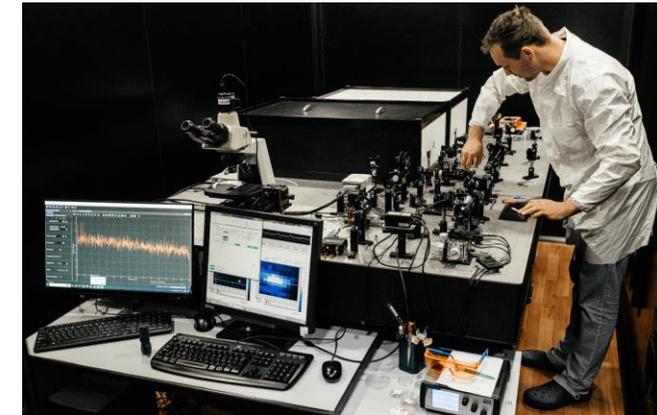




Основан в **1982** году  
**Прохоровым**  
**Александром**  
**Михайловичем**

## Области исследований:

- Разработка и применение лазерных систем и технологий;
- Физика высокотемпературной плазмы и фундаментальные основы плазменных и микроволновых технологий;
- Волоконная оптика, физика волновых пакетов;
- Сильно коррелированные и низкоразмерные электронные системы, квантовые материалы;
- Физические методы в медицине, сельском хозяйстве и экологии;
- Акустика мелкого моря, нелинейная акустическая диагностика, нелинейная динамика волн.



Нобелевская премия по физике «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию генераторов и усилителей на основе принципа мазера — лазера» 1964 г.

г. Москва  
ул. Вавилова, д. 38



- ВВЕДЕНИЕ (ИНТЕРЕС К УКИ И ВЧ УКИ ЛАЗЕРАМ 2 МКМ ДИАПАЗОНА, ПРИМЕНЕНИЕ);
- МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ УКИ;
- ГОЛЬМИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ (КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ГЕОГРАФИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ УКИ ЛАЗЕРОВ);
- ПРИМЕРЫ ГОЛЬМИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ УКИ;
- МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ УКИ (КОРОТКИЕ РЕЗОНАТОРЫ, УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ, ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД);
- ПРИМЕРЫ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД В ГОЛЬМИЕВЫХ ЛАЗЕРАХ;

# ВВЕДЕНИЕ

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННЫХ УКИ ЛАЗЕРОВ 2 МКМ

СПЕКТРОСКОПИЯ

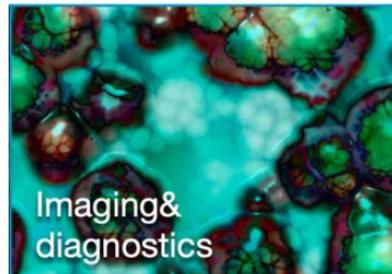
ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

МЕДИЦИНА

БИОДИАГНОСТИКА

СИСТЕМЫ СВЯЗИ

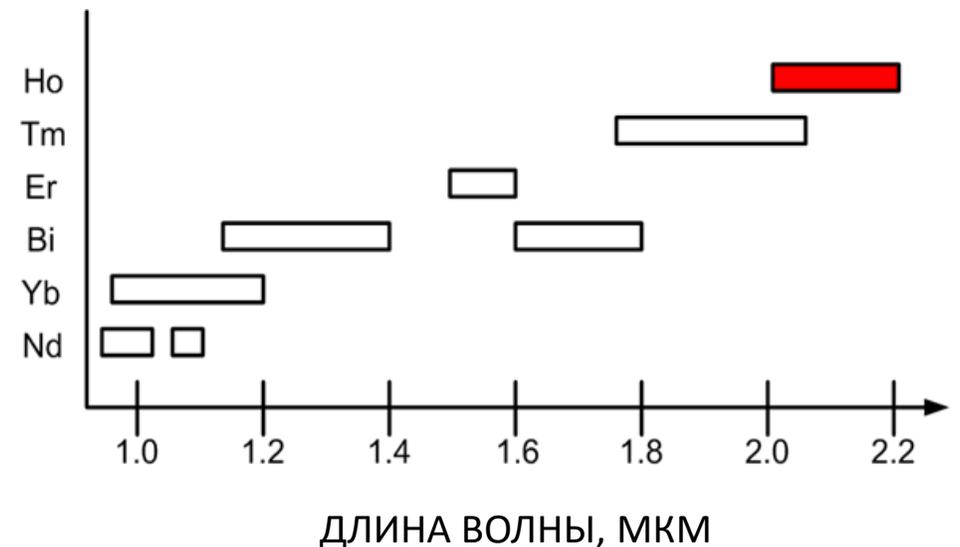
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГАЗОВ



## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ (ВЧ)

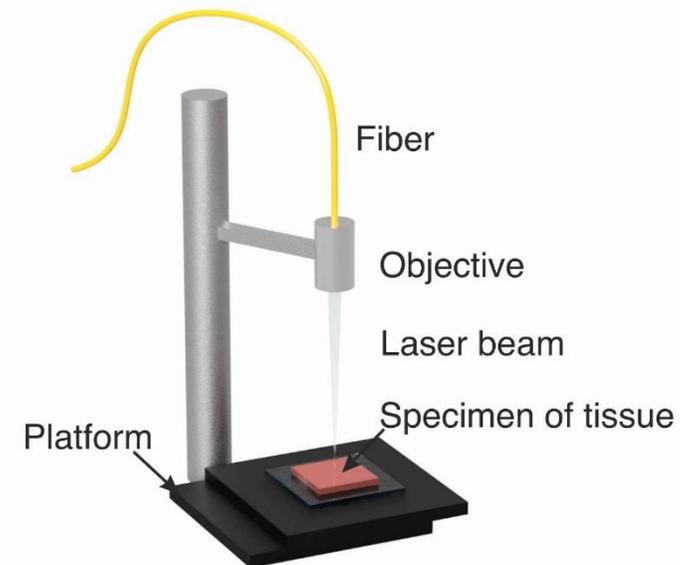
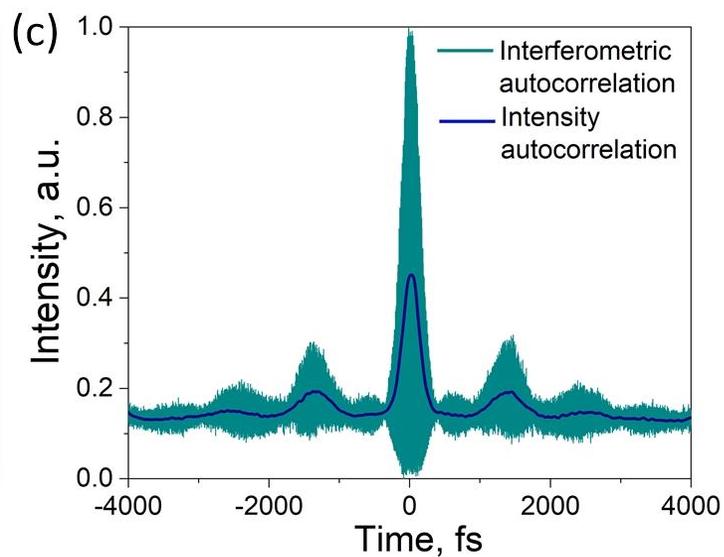
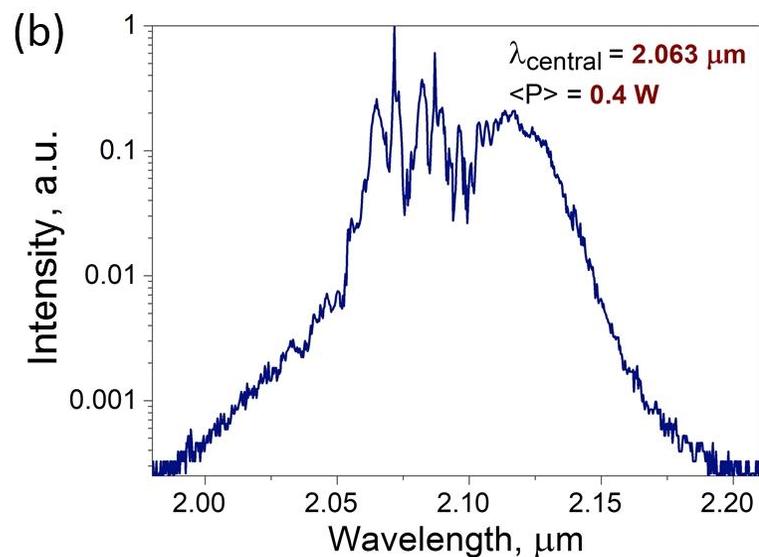
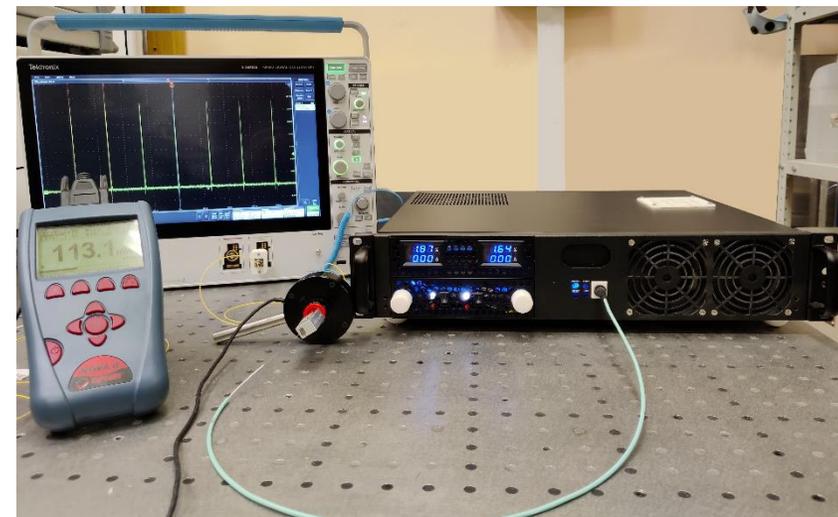
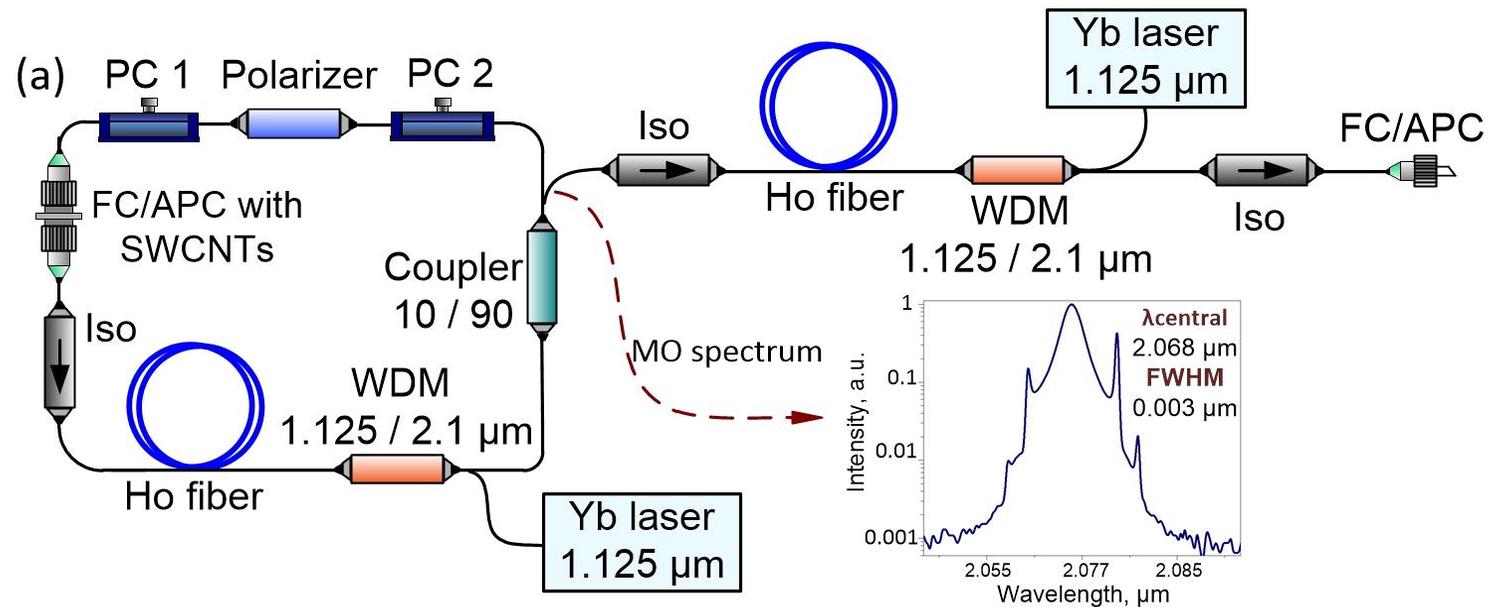
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ  
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ



Kirsch D. C. et al. Short-wave IR ultrafast fiber laser systems: Current challenges and prospective applications // Journal of Applied Physics. - 2020. - Т. 128. - №. 18. - С. 180906.

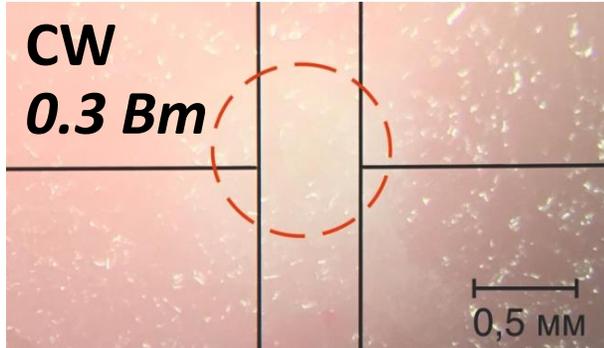
# ПРИМЕНЕНИЕ



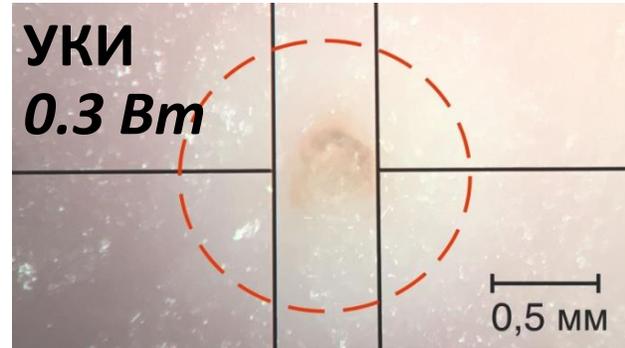
# НЕПРЕРЫВНОЕ vs ИМПУЛЬСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

ВРЕМЯ  
30 С

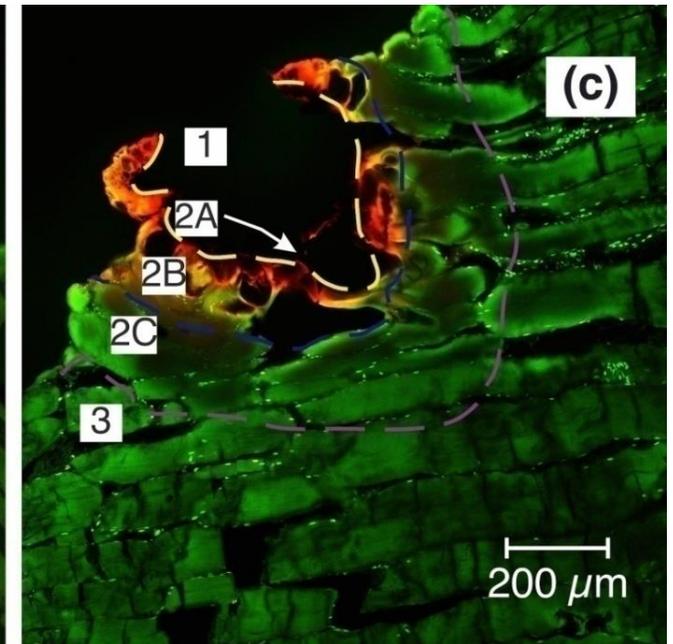
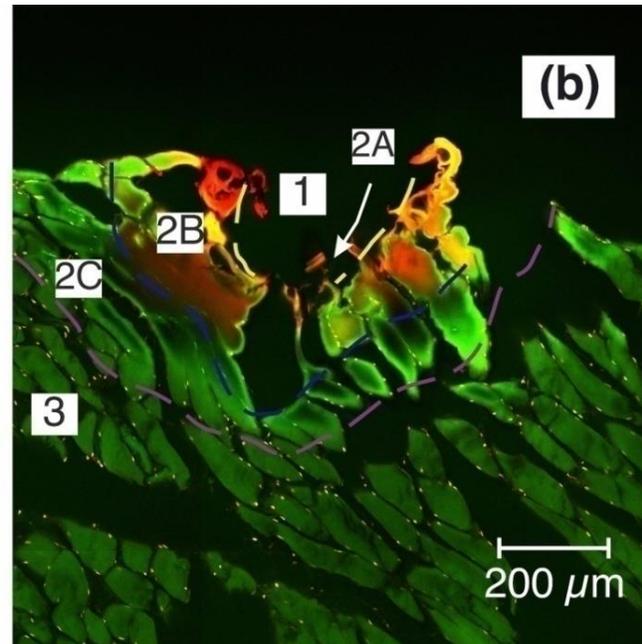
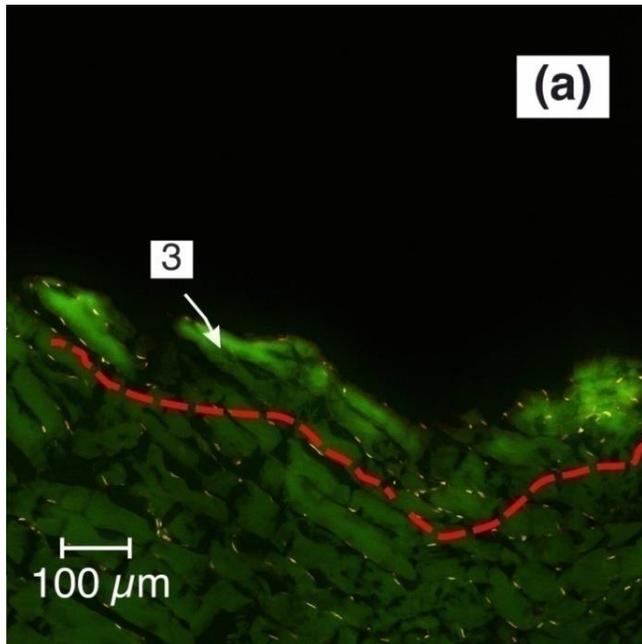
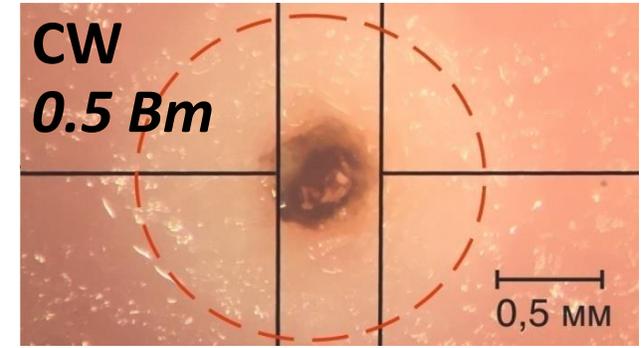
$24 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$



$24 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$



$40 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$



Kopyeva M. S. et al. Ex-Vivo Exposure on Biological Tissues in the 2- $\mu\text{m}$  Spectral Range with an All-Fiber Continuous-Wave Holmium Laser // Photonics. – MDPI, 2021. – T. 9. – №. 1. – С. 20.

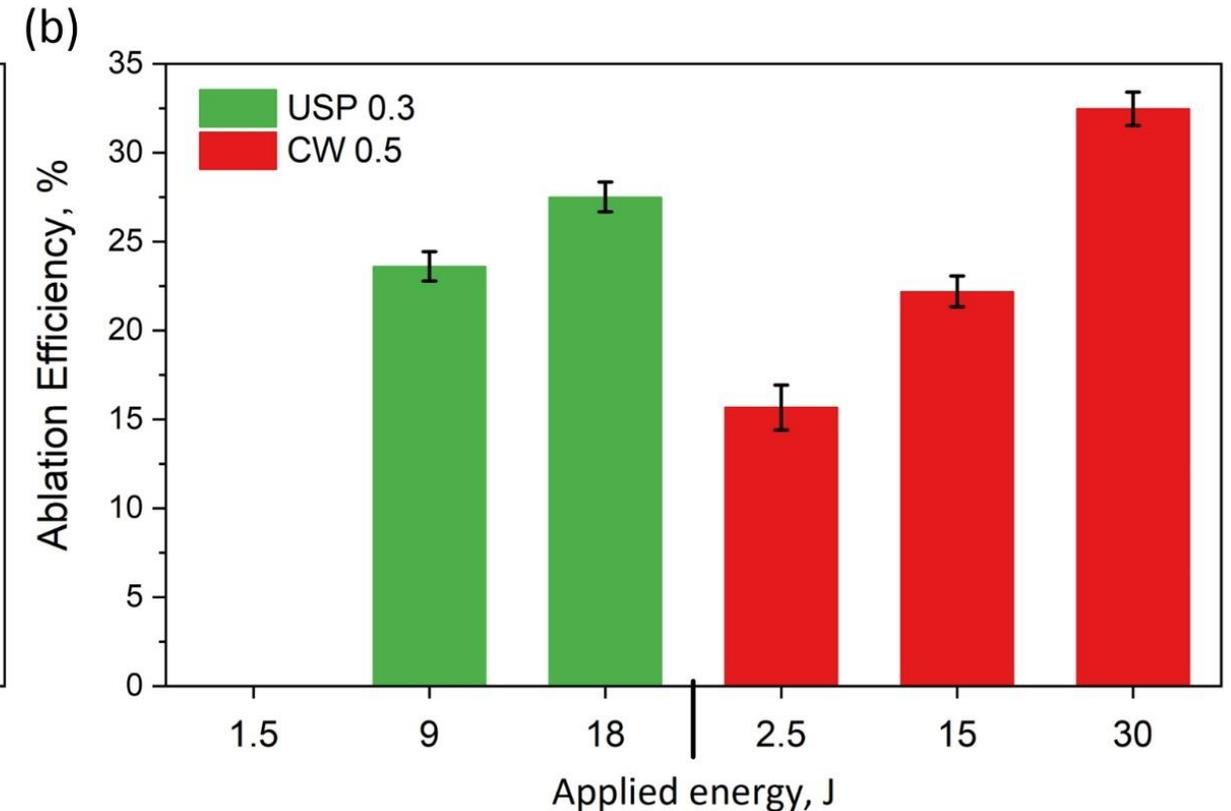
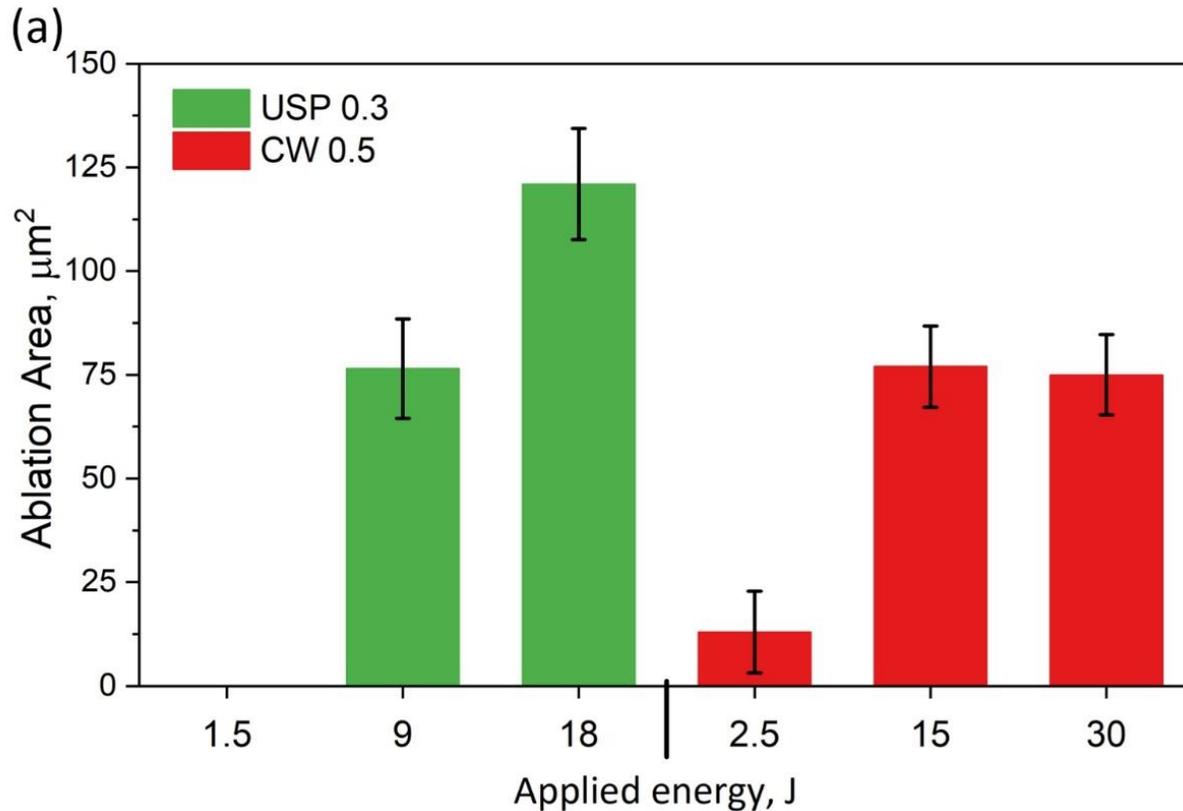
# НЕПРЕРЫВНОЕ vs ИМПУЛЬСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

$$AE, \% = \frac{AA}{AA+CA} \times 100$$

**AE** - Эффективность абляции

**AA** - Площадь абляции

**CA** - Площадь коагуляции



## Optics Letters

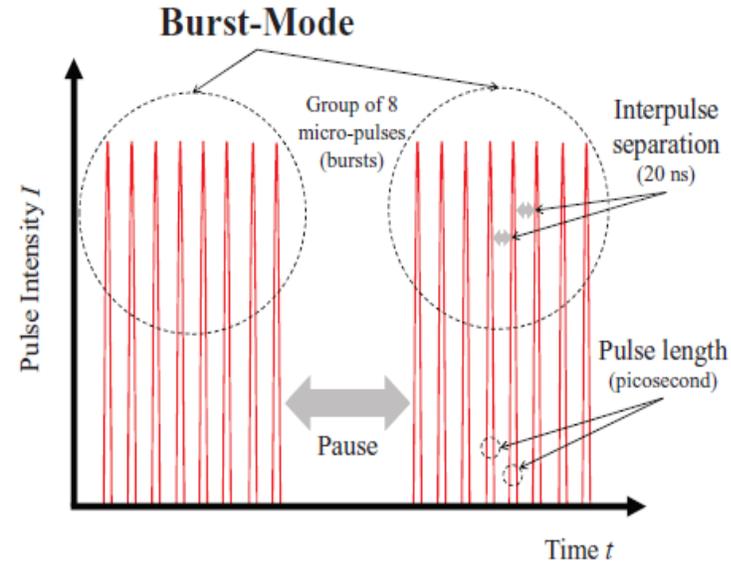
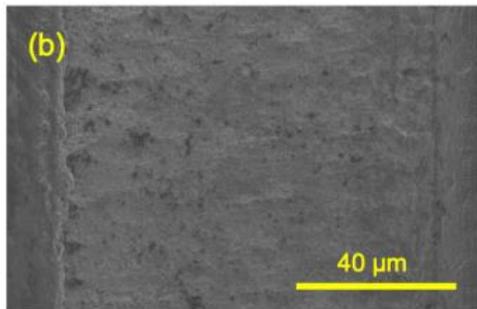
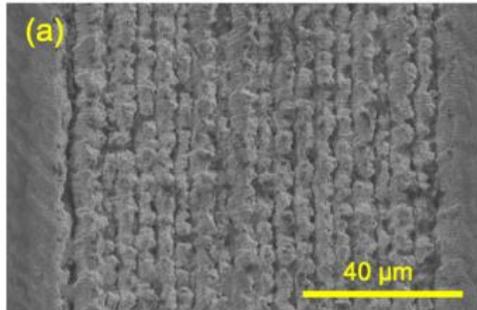
### Burst-mode thulium all-fiber laser delivering femtosecond pulses at a 1 GHz intra-burst repetition rate

PARVIZ ELAHI,<sup>1</sup> HAMIT KALAYCIOĞLU,<sup>1,\*</sup> ÖNDER AKÇAALAN,<sup>1</sup> ÇAĞRI ŞENEL,<sup>2,3</sup> AND F. ÖMER ILDAY<sup>1,4,5</sup>

*JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 16, No. 1, 2021*

### Material Processing at GHz Burst Mode by Femtosecond Laser Ablation

Kotaro Obata, Francesc Caballero-Lucas, and Koji Sugioka

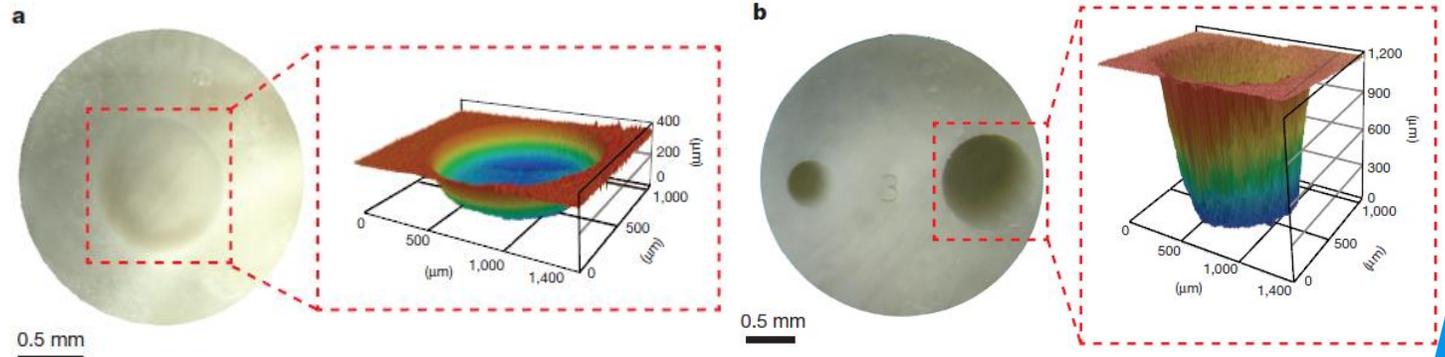


NATURE | VOL 537 | 1 SEPTEMBER 2016

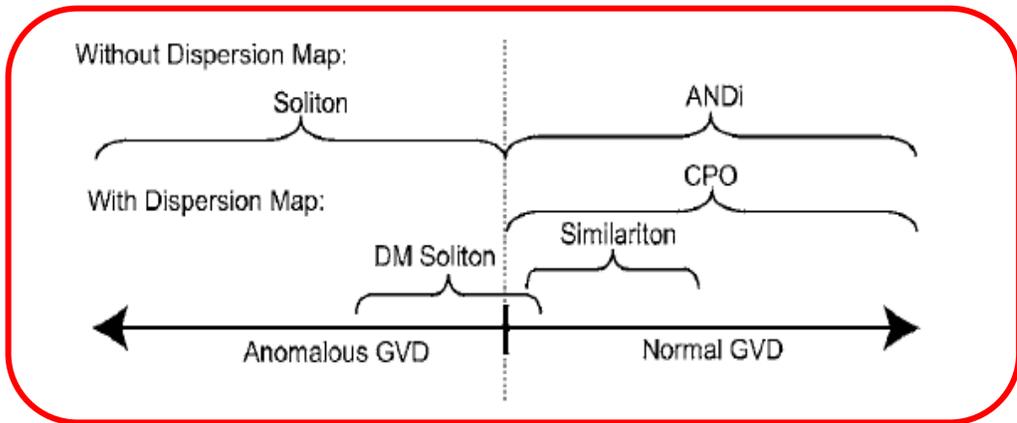
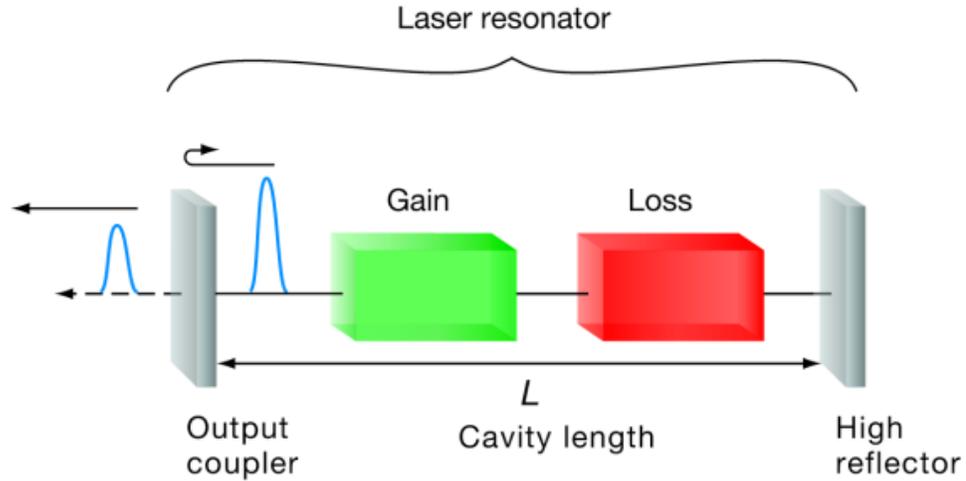
LETTER RESEARCH

### Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses

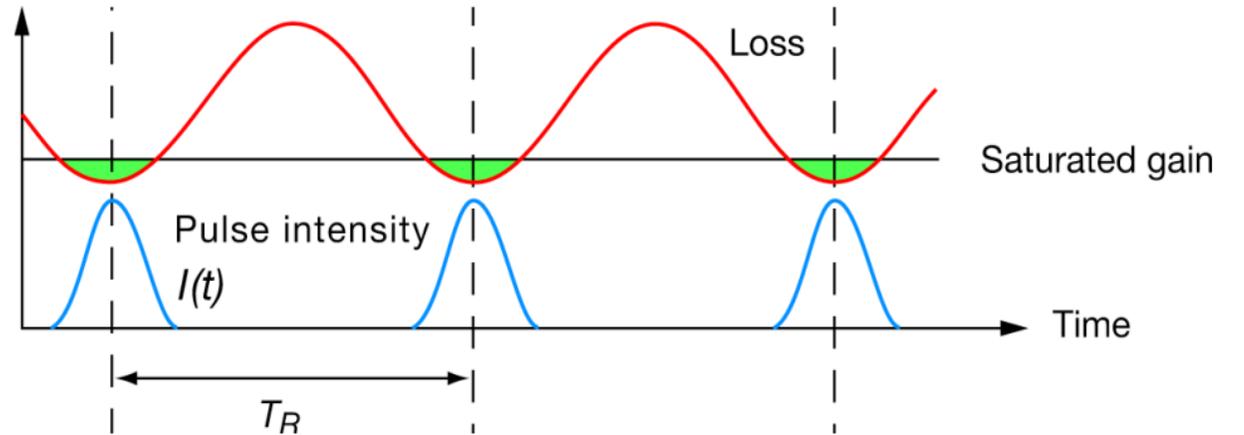
Can Kerse<sup>1</sup>, Hamit Kalaycıoğlu<sup>2</sup>, Parviz Elahi<sup>2</sup>, Barbaros Çetin<sup>3</sup>, Denizhan K. Kesim<sup>1</sup>, Önder Akçaalan<sup>1</sup>, Seydi Yavaş<sup>4</sup>, Mehmet D. Aşık<sup>5</sup>, Bülent Öktem<sup>6</sup>, Heinar Hoogland<sup>7,8</sup>, Ronald Holzwarth<sup>7</sup> & Fatih Ömer Ilday<sup>1,2</sup>



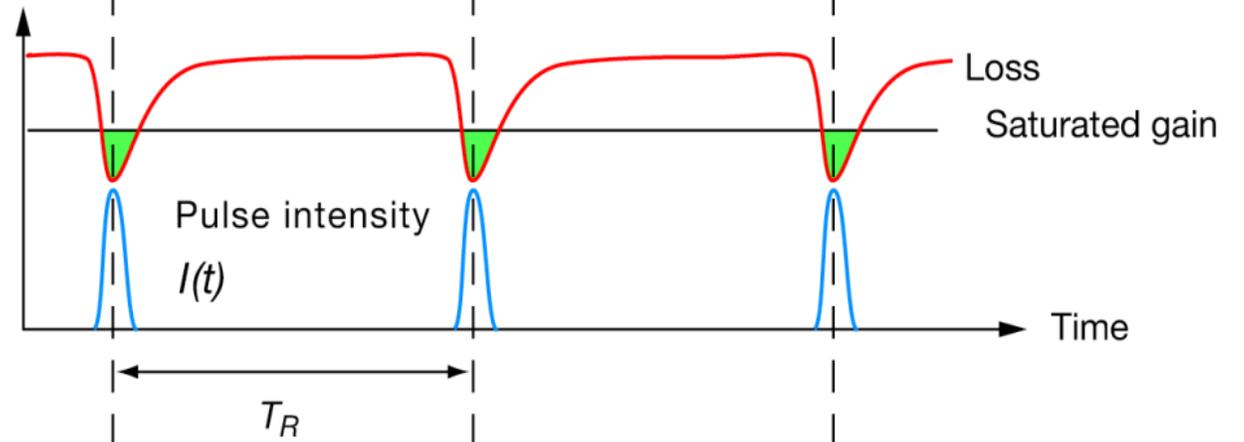
# СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД



## Active modelocking



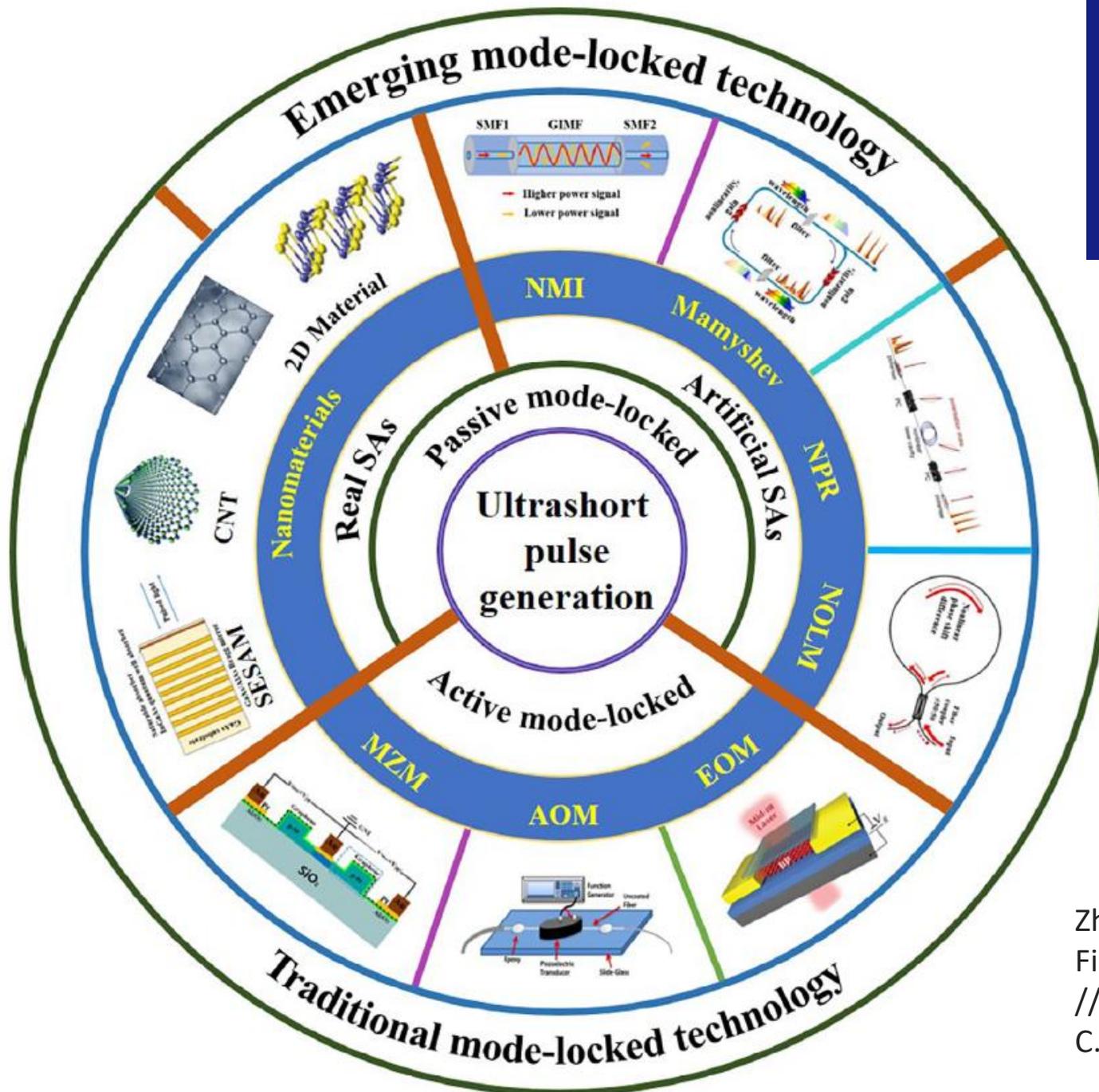
## Passive modelocking



Ursula Keller / Lukas Gallmann

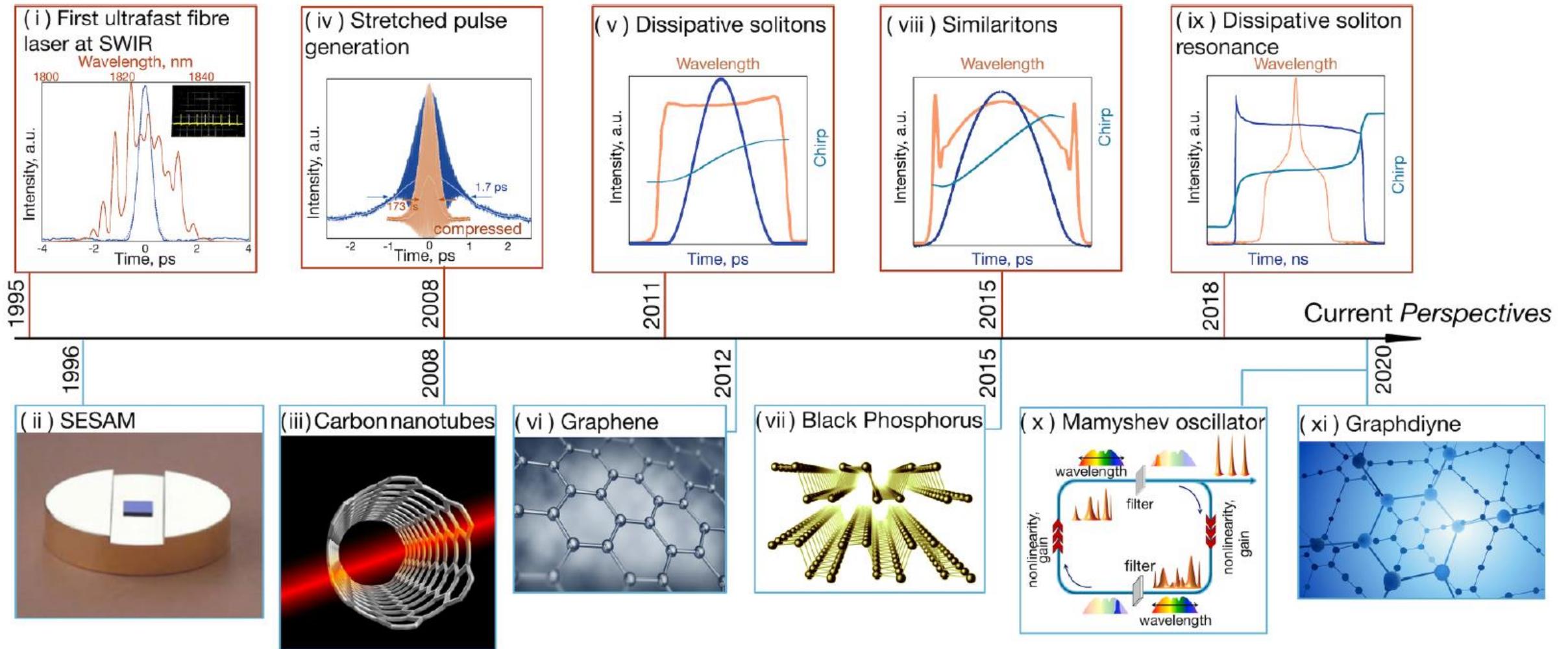
ETH Zurich, Physics Department, Switzerland  
www.ulp.ethz.ch

# КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД



Zhang Y. et al. Advances and Challenges of Ultrafast Fiber Lasers in 2–4  $\mu\text{m}$  Mid-Infrared Spectral Regions //Laser & Photonics Reviews. – 2024. – Т. 18. – №. 3. – С. 2300786.

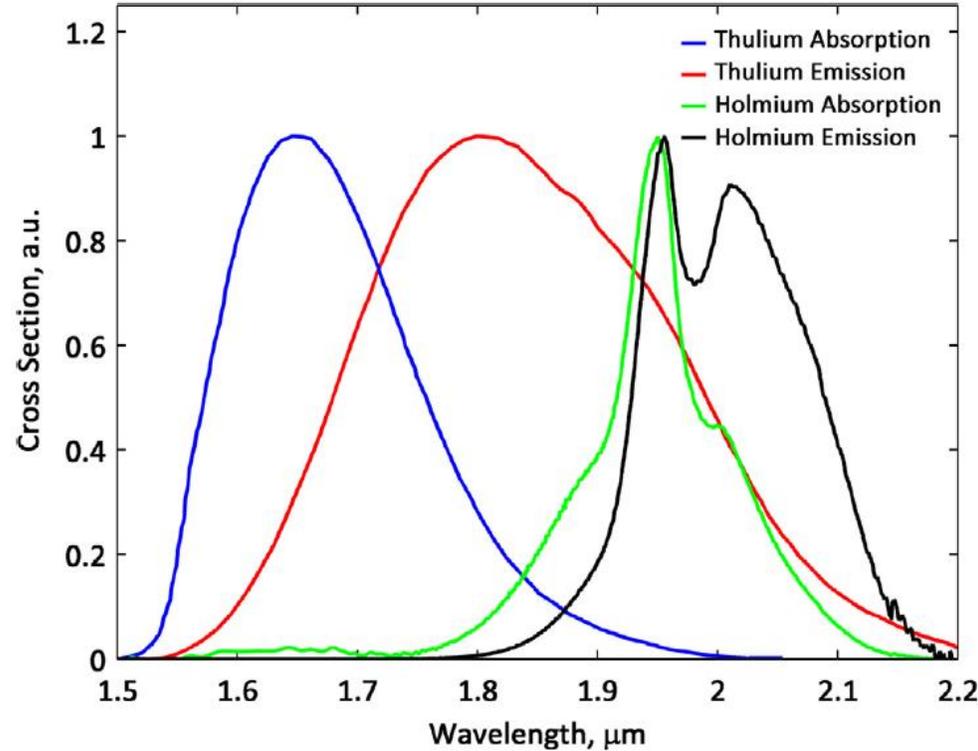
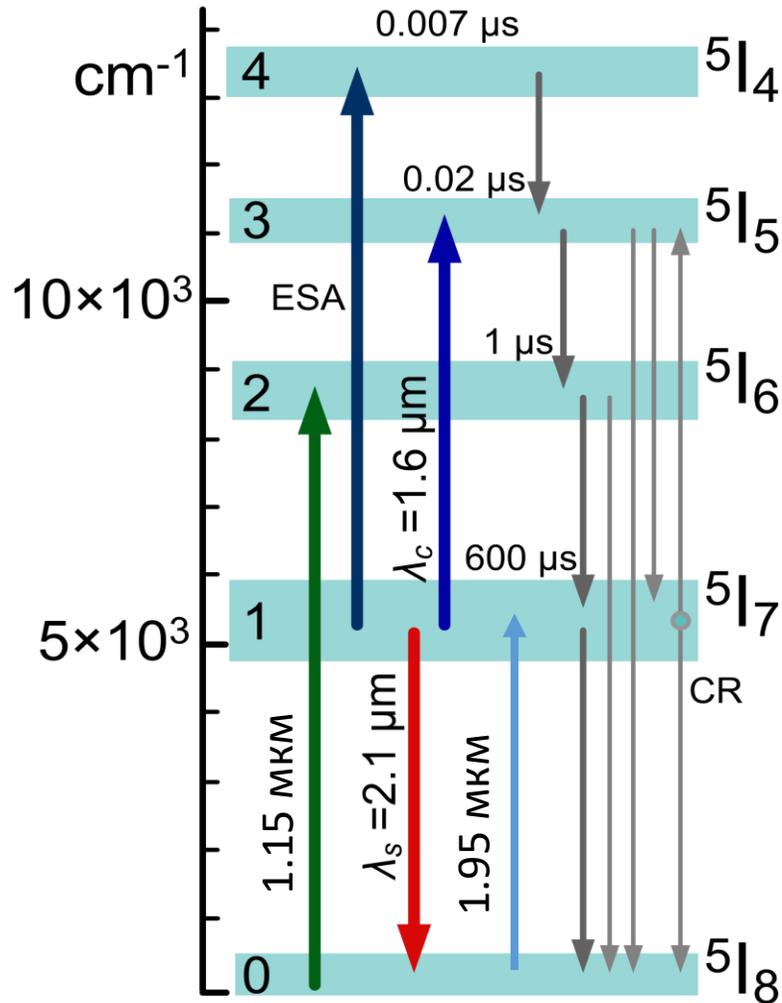
# ХРОНОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРОВ УКИ В 1.6-2.5 МКМ



Kirsch, D. C., Chen, S., Sidharthan, R., Chen, Y., Yoo, S., & Chernysheva, M. (2020).

Short-wave IR ultrafast fiber laser systems: Current challenges and prospective applications. *Journal of Applied Physics*, 128(18).

# ГОЛЬМИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ



## CONTINUOUS-WAVE OSCILLATION OF HOLMIUM-DOPED SILICA FIBRE LASER

Laser emission at  $2.04 \mu\text{m}$  has been observed in a silica fibre doped with  $\text{Ho}^{3+}$ . When pumped with an argon laser at  $457.9 \text{ nm}$  an absorbed threshold power of  $46 \text{ mW}$  and a slope efficiency of  $1.7\%$  were measured.

Hemming, A., et al. A review of recent progress in holmium-doped silica fibre sources. *Optical Fiber Technology*, 20(6), 621-630 (2014).

*Electronics Letters*, 9(25), 593-594 (1989).

**1989 год**

Первый гольмиевый волоконный лазер

# ГЕОГРАФИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОЛЬМИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ УКИ

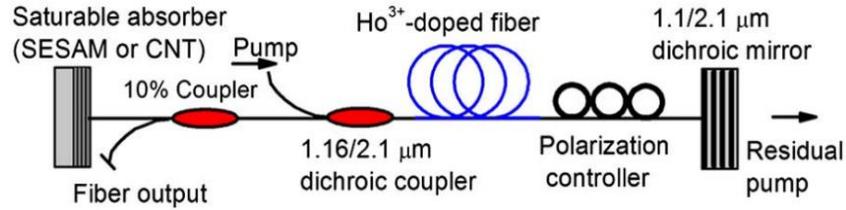
- Shandong University (Цзинань), Harbin Institute of Technology (Харбин), Jiangsu Normal University (Сюйчжоу), **Китай (2019-2024)**
- Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, **Россия (2012, 2016-2024)**
- Wroclaw University of Science and Technology, Вроцлав, **Польша (2016-2021)**
- Institute of Photonics and Electronics CAS, Прага, **Чехия (2016-2021)**
- Norwegian University of Science and Technology, Тронхейм, **Норвегия (2015-2018)**
- Laser Zentrum, Ганновер, **Германия (2017)**
- Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Гамбург, **Германия (2014-2016)**

**Схемы:** линейные, кольцевые и гибридные

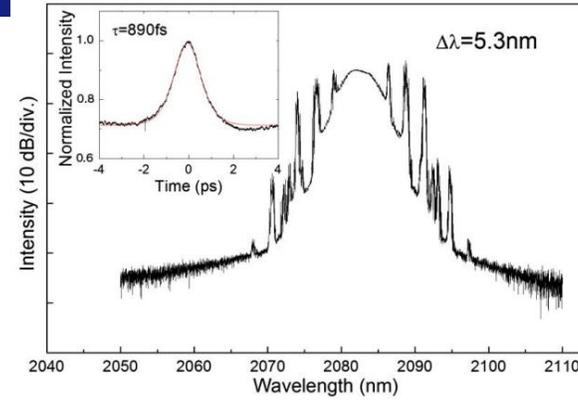
**Импульсы:** солитоны, шумоподобные импульсы, диссипативные солитоны, пачки импульсов

**Поглотители и типы ML:** нанотрубки, SESAM, NPE, графен, металлические нанотрубки, черный фосфор, NALM, polymer-free нанотрубки, гибрид

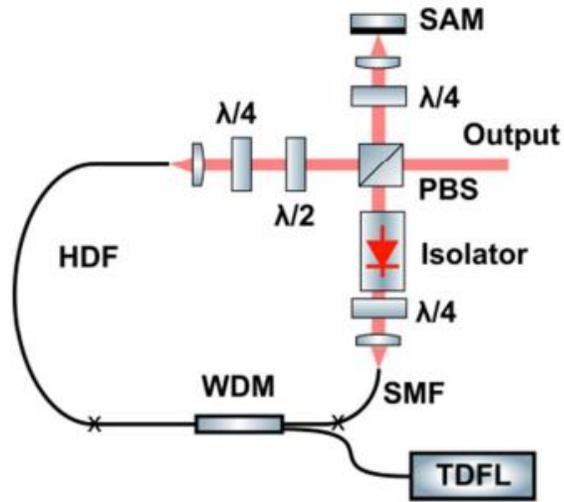
# ГОЛЬМИЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ УКИ



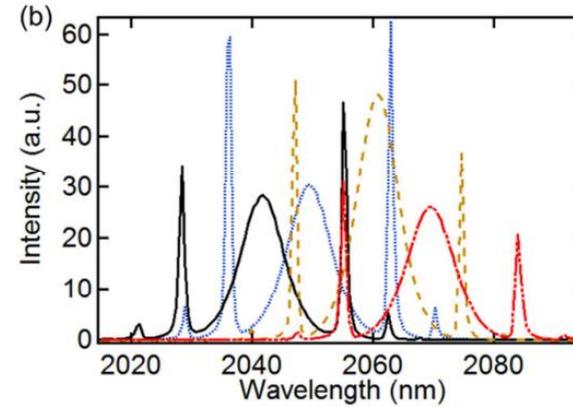
$\lambda = 2085 \text{ nm}$   
 $\tau = 890 \text{ fs}$   
 $P_{\text{out}} \text{ up to } 46 \text{ mW}$   
 $E_p \text{ up to } 2.5 \text{ nJ}$   
 $f_{\text{rep}} = 15.7 \text{ MHz}$



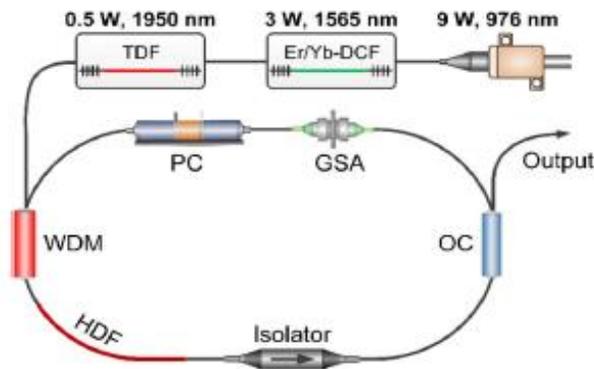
Chamorovskiy, A., et al. Femtosecond mode-locked holmium fiber laser pumped by semiconductor disk laser. Optics letters, 37(9), 1448-1450 (2012).



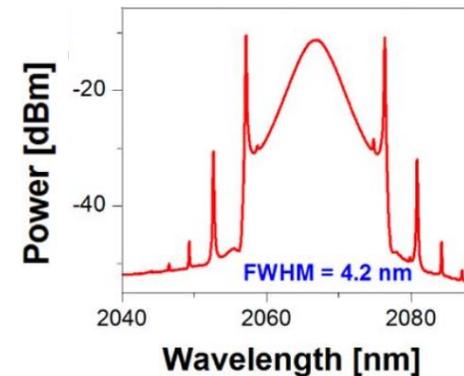
$\lambda = 2040\text{-}2070 \text{ nm}$   
 $\tau = 920 \text{ fs}$   
 $P_{\text{out}} \text{ up to } 60 \text{ mW}$   
 $E_p \text{ up to } 0.8 \text{ nJ}$   
 $f_{\text{rep}} = 65 \text{ MHz}$



Li, P., et al. Low noise, tunable Ho: fiber soliton oscillator for Ho: YLF amplifier seeding. Laser Physics Letters, 13(6), 065104 (2016).

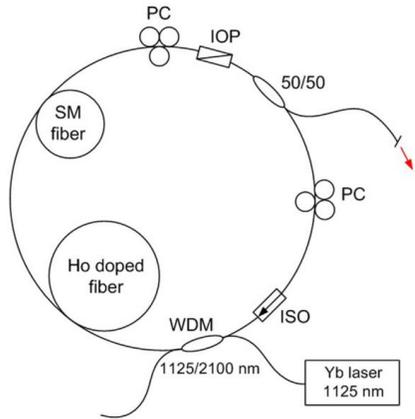


$\lambda = 2067 - 2081 \text{ nm}$   
 $\tau = 811 - 923 \text{ fs}$   
 $P_{\text{out}} \text{ up to } 44 \text{ mW}$   
 $E_p \text{ up to } 1.3 \text{ nJ}$   
 $f_{\text{rep}} = 34 \text{ MHz}$

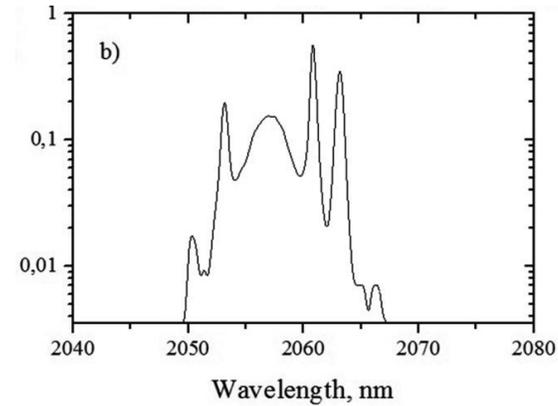


Sotor, Jaroslaw, et al. "All-fiber Ho-doped mode-locked oscillator based on a graphene saturable absorber." Optics letters 41(11), 2592-2595 (2016).

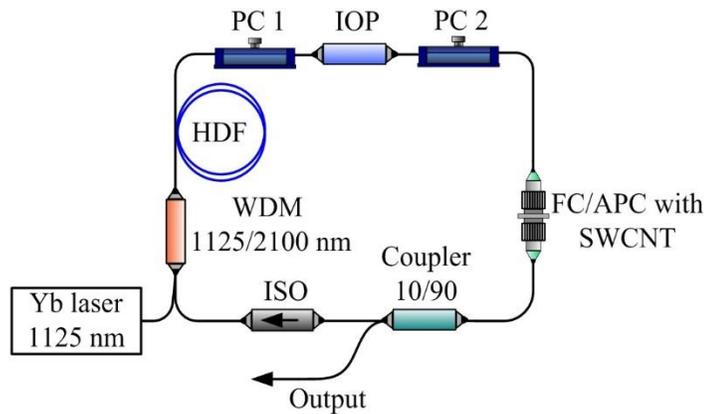
# ГОЛЬМИЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ УКИ



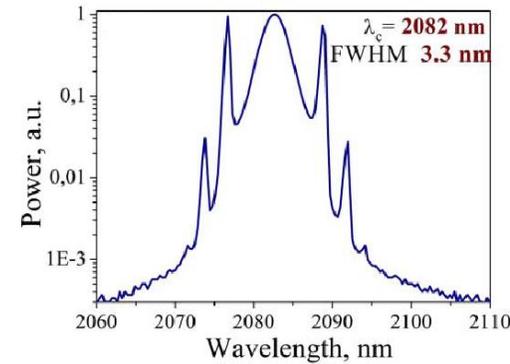
$\lambda = 2057 \text{ nm}$   
 $\tau < 52 \text{ ps}$  (1.3 ps)  
 $P_{\text{out}}$  up to 4.5 mW  
 $E_p$  up to 0.6 nJ  
 $f_{\text{rep}} = 7.5 \text{ MHz}$



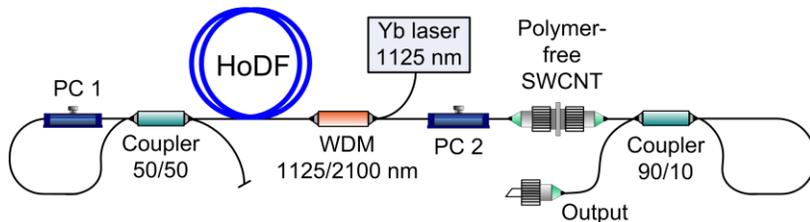
Filatova, S. A., et al. All-fiber passively mode-locked Ho-laser pumped by ytterbium fiber laser. Laser Physics Letters, 13(11), 115103 (2016).



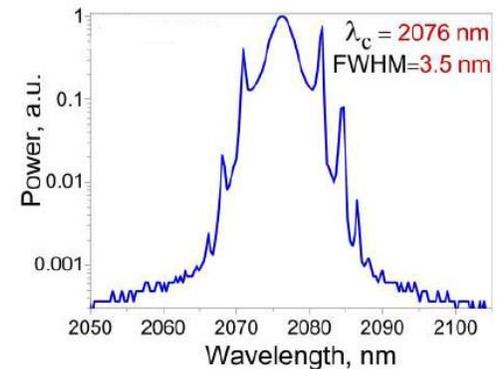
$\lambda = 2082 \text{ nm}$   
 $\tau = 1.4 \text{ ps}$   
 $P_{\text{out}}$  up to 5 mW  
 $E_p$  up to 0.3 nJ  
 $f_{\text{rep}} = 15 \text{ MHz}$



Filatova, S. A., et al. Hybrid mode locking of an all-fiber holmium laser. JOSA B, 35(12), 3122-3125 (2018).

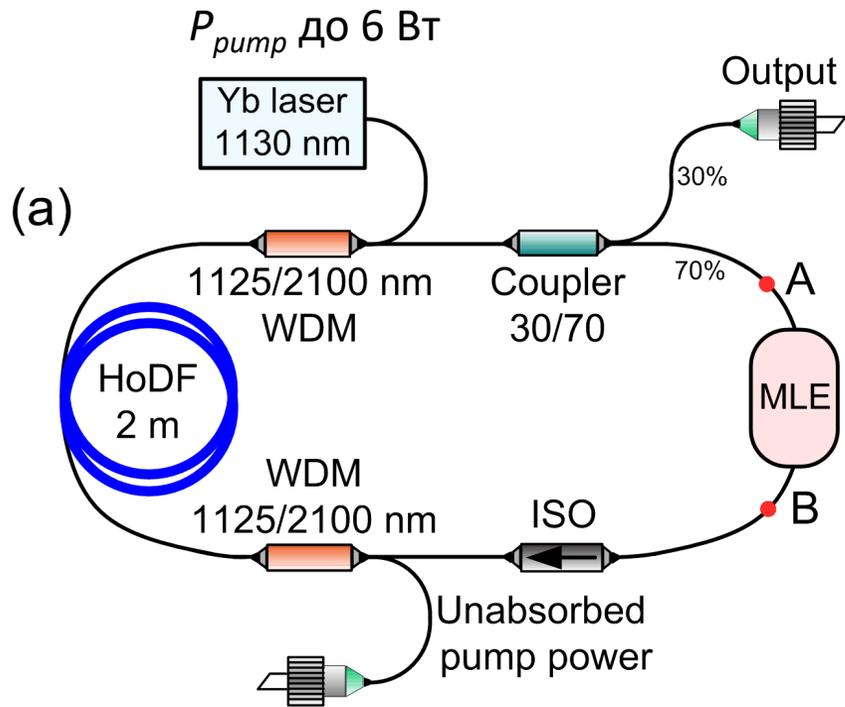


$\lambda = 2076 \text{ nm}$   
 $\tau = 1.3 \text{ ps}$   
 $P_{\text{out}}$  up to 7 mW  
 $E_p$  up to 0.6 nJ  
 $f_{\text{rep}} = 12 \text{ MHz}$

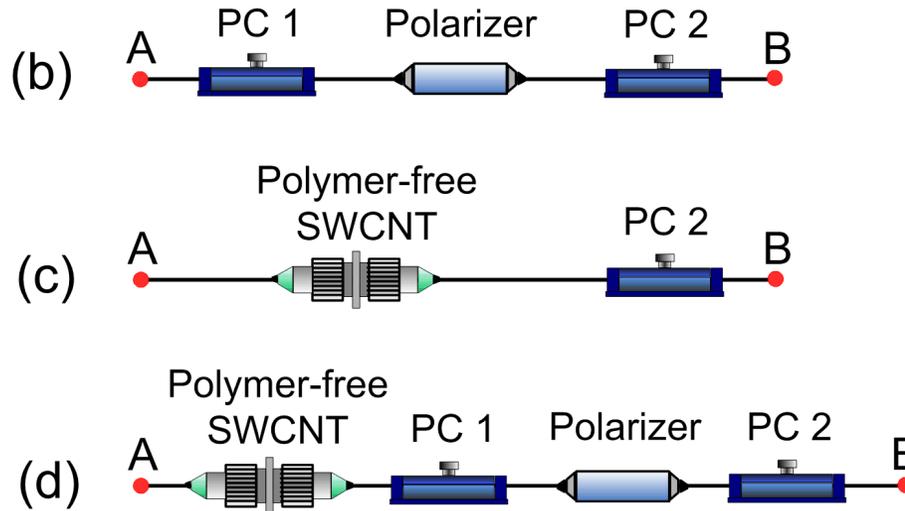


Filatova, S.A., et al. Dumbbell-Shaped Ho-Doped Fiber Laser Mode-Locked by Polymer-Free Single-Walled Carbon Nanotubes Saturable Absorber. Nanomaterials, 13(10), 1581 (2023).

# СРАВНЕНИЕ РАЗНЫХ ТЕХНИК СИНХРОНИЗАЦИИ МОД



Mode-locking elements (MLE):



**Гольмиевое волокно:**

Концентрация  $4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$

$\varnothing = 11/125 \text{ мкм}$

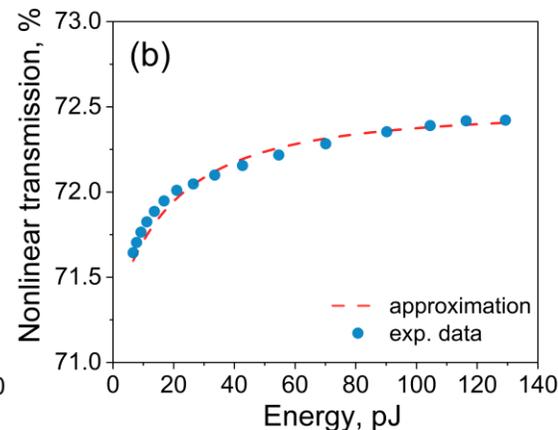
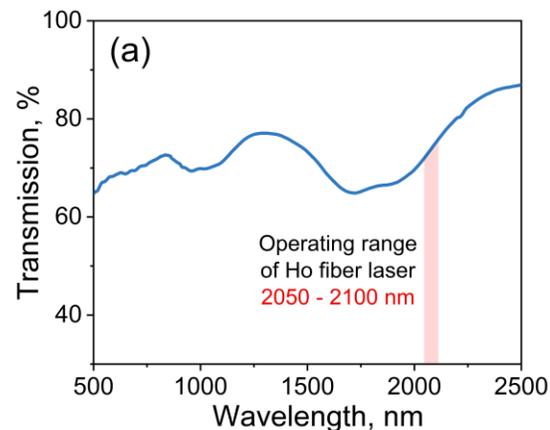
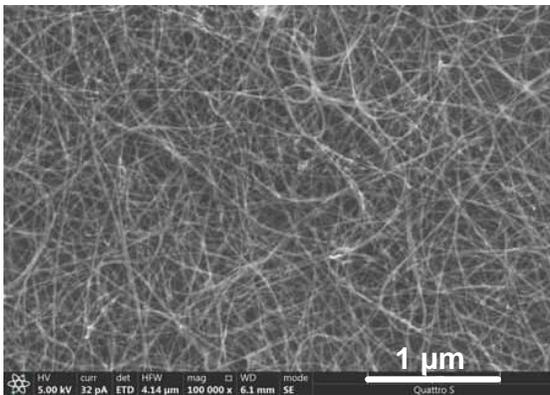
$NA \sim 0.145$

$\beta_2 \approx -0.112 \text{ пс}^2/\text{м}$

Длина резонатора:

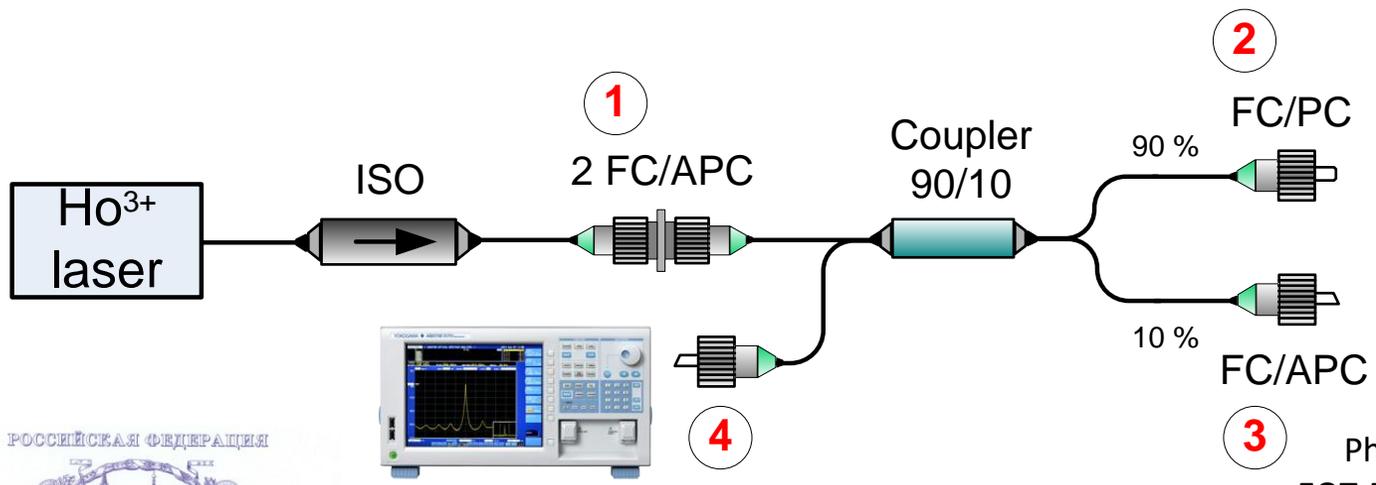
9.5 – 11 м

SMF:  $\beta_2 \approx -0.1 \text{ пс}^2/\text{м}$



Filatova, S., et al. Experimental and numerical study of different mode-locking techniques in holmium fiber laser with a ring cavity. *Optics Express*, 32(13), 22233-22248 (2024).

# ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК



Autocorrelator  
Avesta AA-20DD



Photodetector  
EOT-5000 (12.5 GHz)



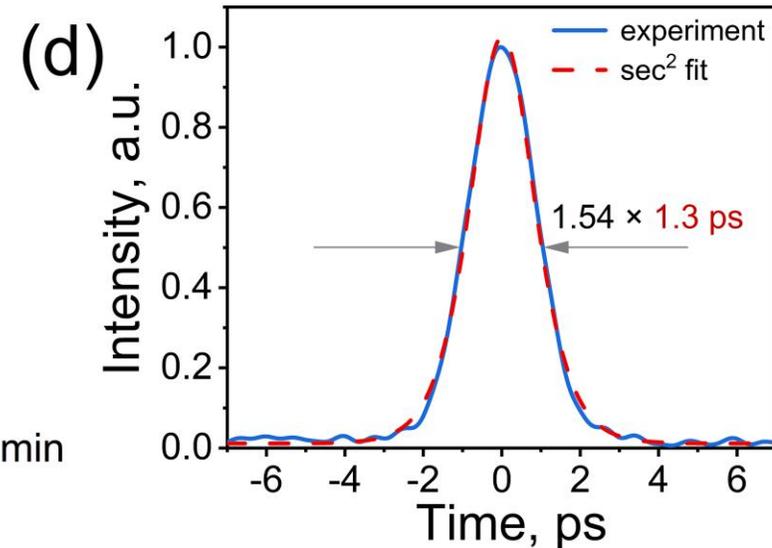
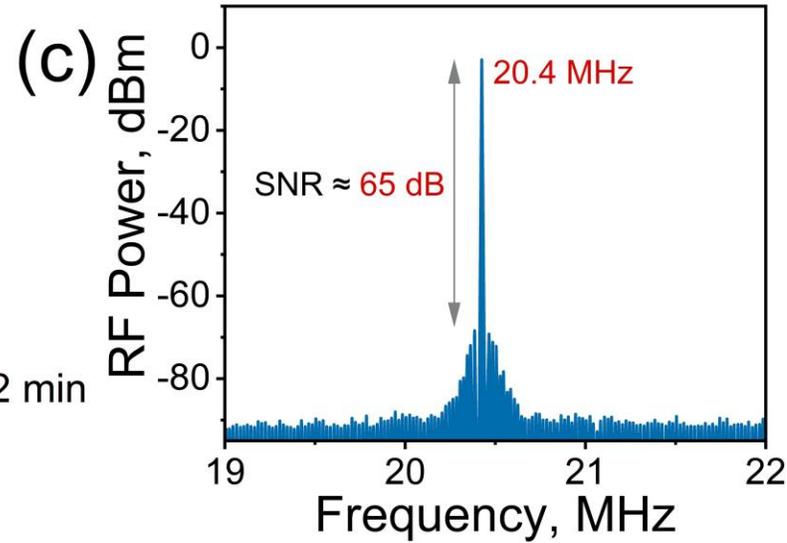
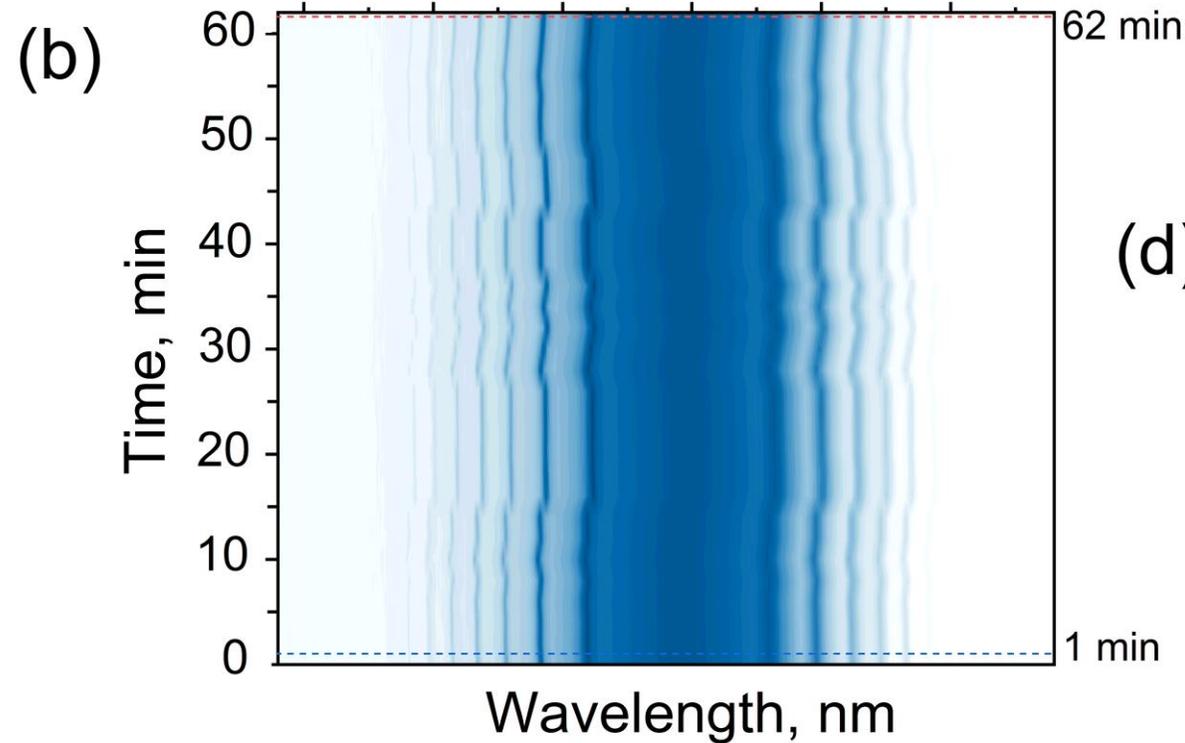
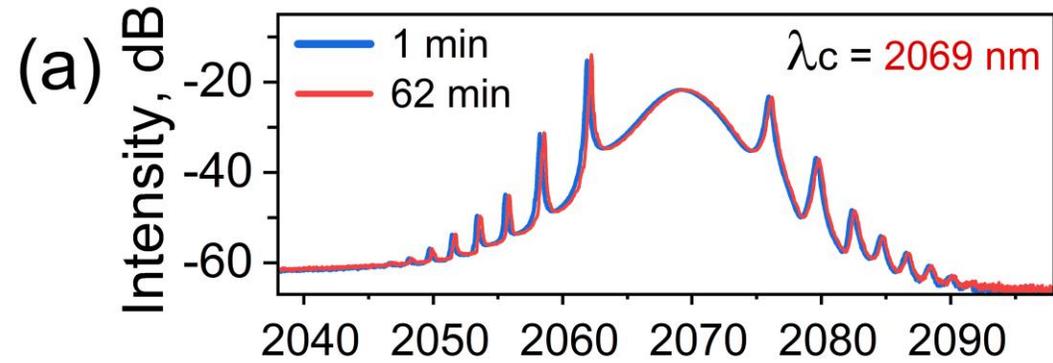
Oscilloscope  
Tektronix MSO 64 (4 GHz)



Signal analyzer  
Keysight mxa n9020b

Spectrum analyzer  
Yokogawa AQ6375B





$L$  (Cavity)  $\approx 10.2$  m  
 $L$  (SMF)  $\approx 8.2$  m  
 $n\text{GVD} \approx -1.08$  ps<sup>2</sup>

ML threshold 0.82 W

**At  $P_{\text{pump}} 0.85$  W:**

$\langle P \rangle = 6$  mW

$\lambda_c = 2069$  nm

FWHM = 4.2 nm

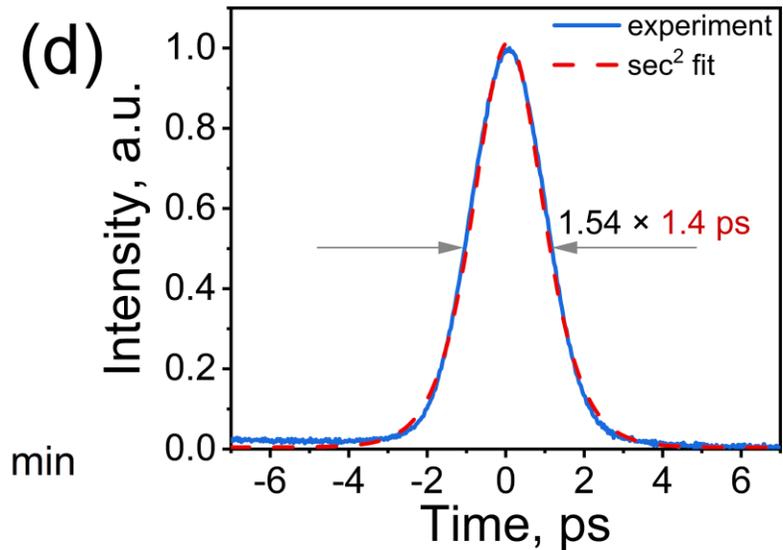
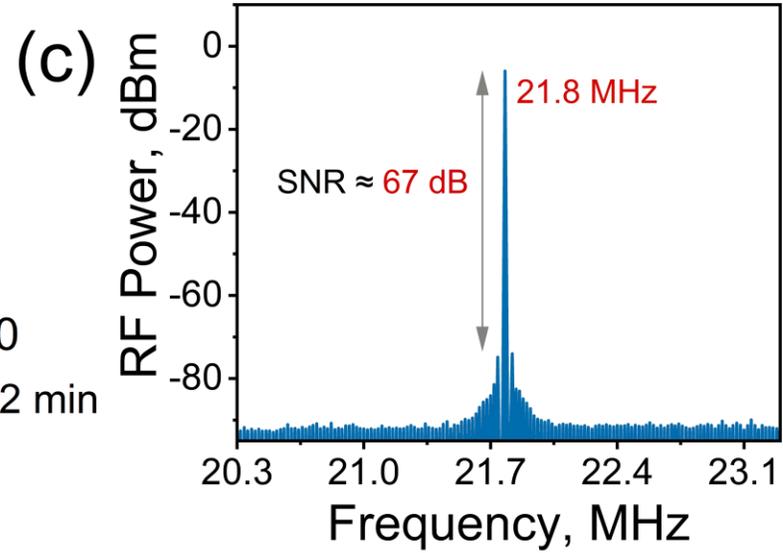
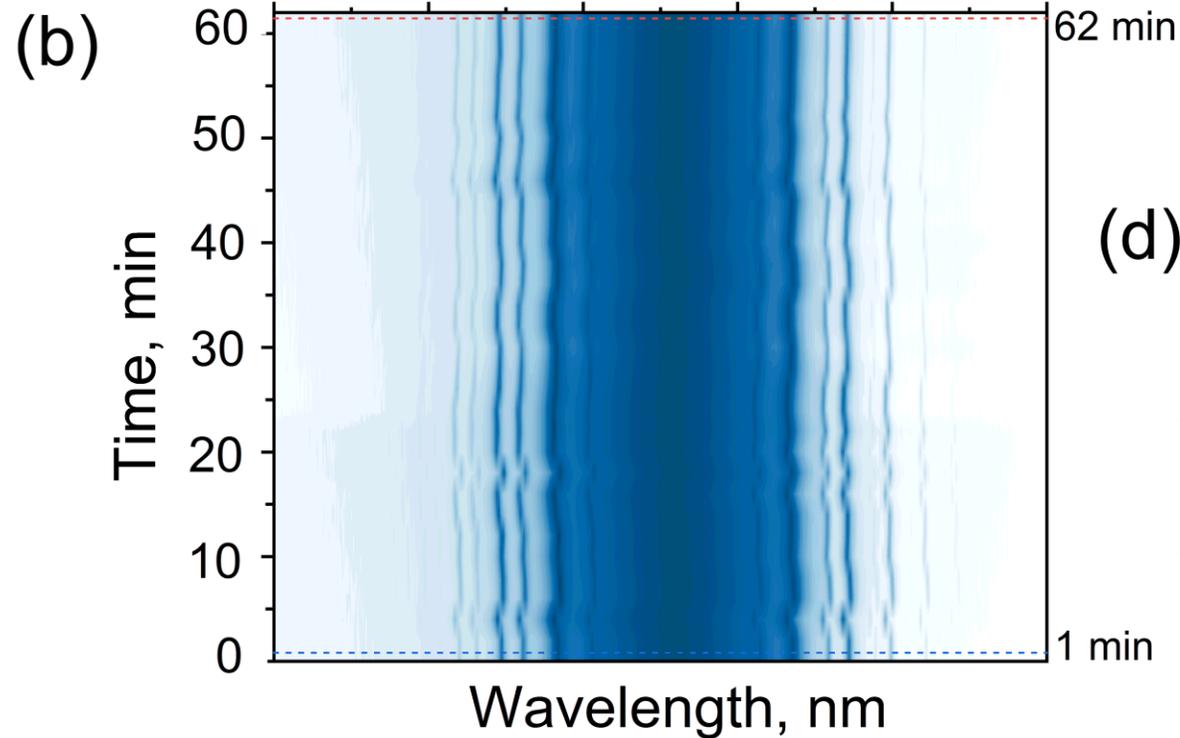
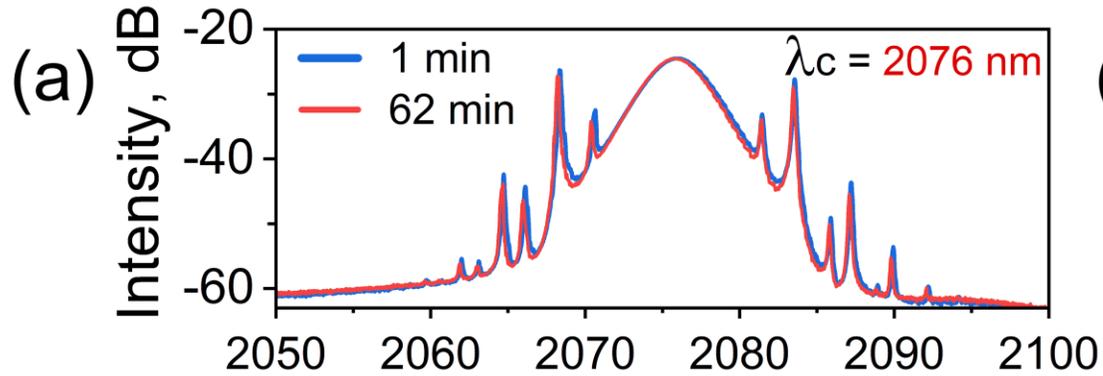
$f_{\text{rep}} = 20.4$  MHz

SNR = 65 dB

$\tau = 1.3$  ps

$E = 0.3$  nJ

# POLYMER-FREE SWCNT



$L$  (Cavity)  $\approx 9.5$  m  
 $L$  (SMF)  $\approx 7.5$  m  
 $n\text{GVD} \approx -1$  ps<sup>2</sup>

ML threshold 0.8 W

**At  $P_{\text{pump}} 0.85$  W:**

$\langle P \rangle = 6.5$  mW

$\lambda_c = 2076$  nm

FWHM = 3.5 nm

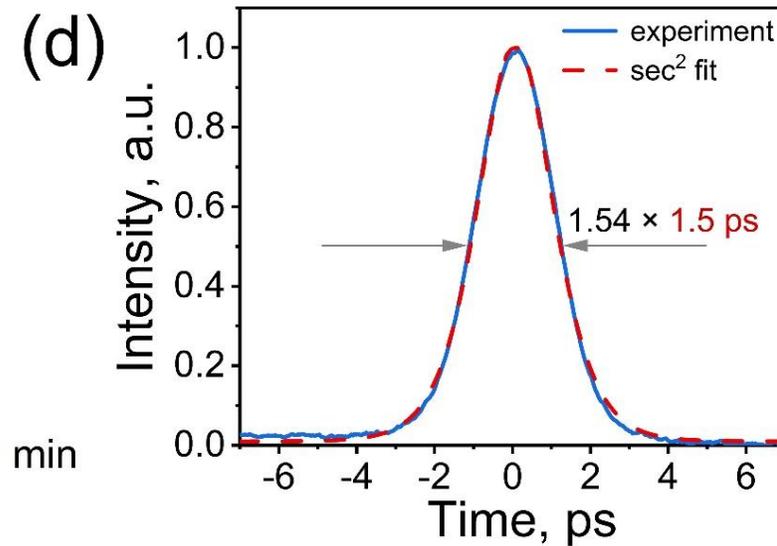
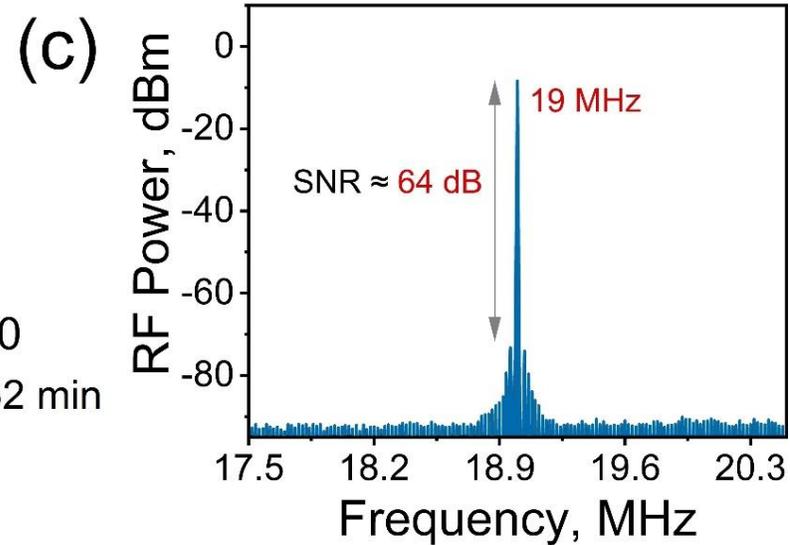
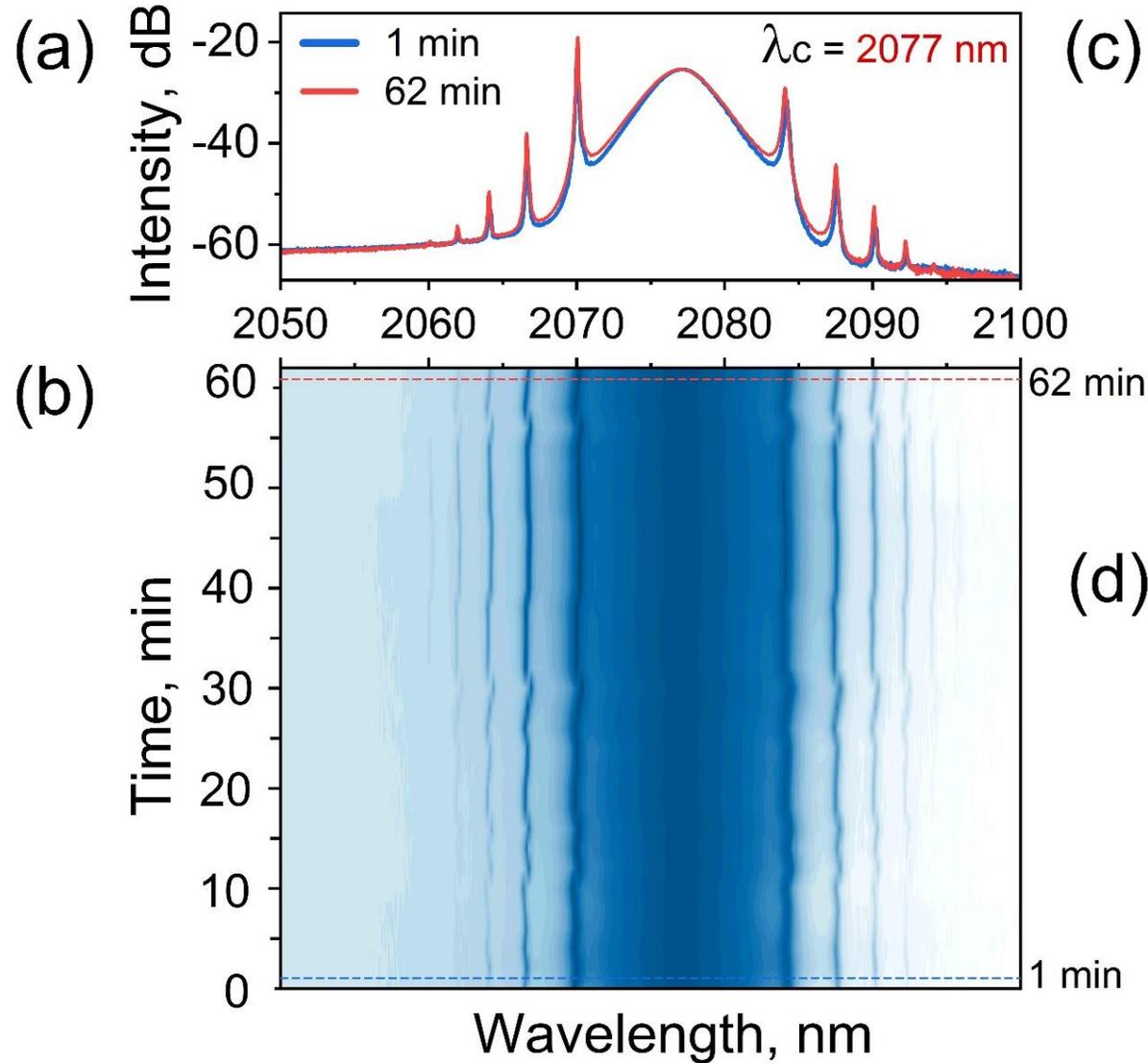
$f_{\text{rep}} = 21.8$  MHz

SNR = 67 dB

$\tau = 1.4$  ps

$E = 0.3$  nJ

# HYBRID MODE-LOCKING (NPE+SWCNT)



$L$  (Cavity)  $\approx 11$  m  
 $L$  (SMF)  $\approx 9$  m  
 $n\text{GVD} \approx -1.17$  ps<sup>2</sup>

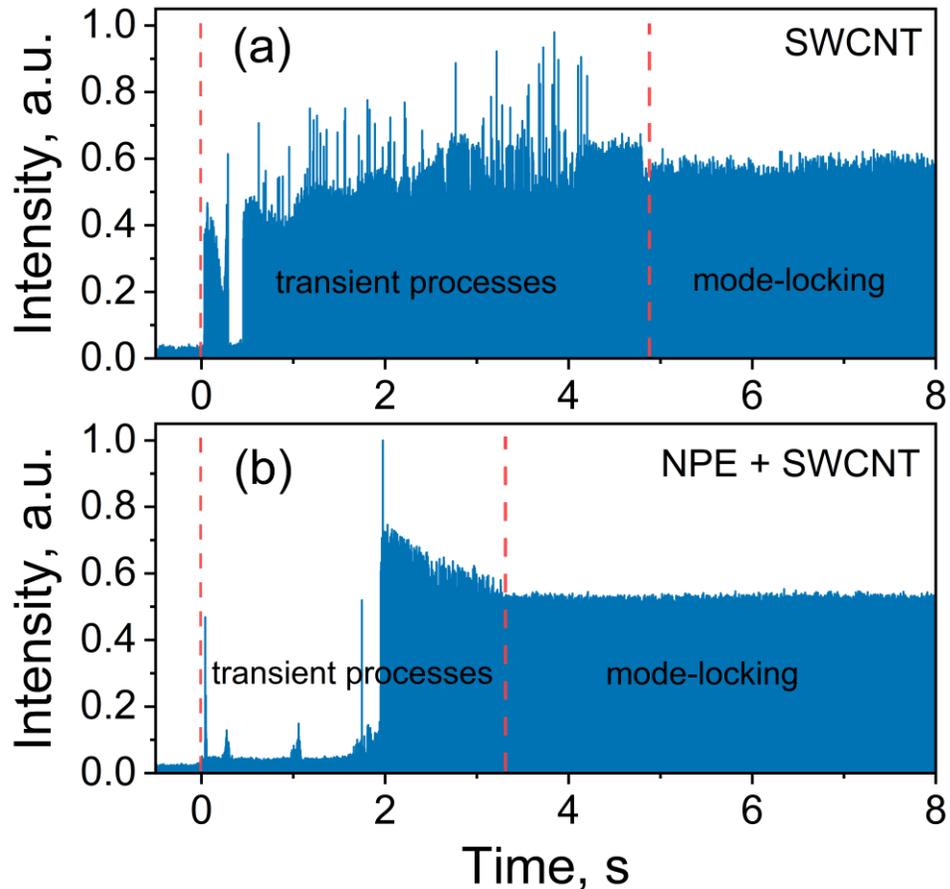
ML threshold 0.84 W

**At  $P_{\text{pump}} 0.85$  W:**

$\langle P \rangle = 4$  mW  
 $\lambda_c = 2077$  nm  
FWHM = 3.6 nm  
 $f_{\text{rep}} = 19$  MHz  
SNR = 64 dB  
 $\tau = 1.5$  ps  
 $E = 0.2$  nJ

# СРАВНЕНИЕ И ЗАПУСК

Выход на ML режим  $\approx 5$  с



Выход на ML режим  $\approx 3$  с

Характеристики лазерного излучения в зависимости от используемого типа синхронизации мод в гольмиевом волоконном лазере при мощности накачки **0.85 Вт**:

ML type	nGVD [ps <sup>2</sup> ]	$\lambda_c$ [nm]	FWHM [nm]	Frep [MHz]	Pavg [mW]	$\tau$ [ps]	E [nJ]	TBP	Self-start
NPE	-1.08	2069	4.2	20.4	6	1.3	0.3	0.382	variably
SWCNT	-1	2076	3.5	21.8	6.5	1.4	0.3	0.341	Yes
Hybrid	-1.17	2077	3.6	19	4	1.5	0.21	0.375	Yes

# МОДЕЛИРОВАНИЕ

Двухкомпонентное нелинейное уравнение Шредингера, учитывающее эффекты двулучепреломления, четырехволнового смешения и спектрально ограниченного усиления:

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} - i \frac{\Delta\beta}{2} A_x + \delta \frac{\partial A_x}{\partial t} - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} - i\gamma \left( |A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2 \right) A_x - \frac{i}{3} \gamma A_x^* A_y^2 = \frac{g A_x}{2} + \frac{g}{2\Omega_g^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2}, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial z} + i \frac{\Delta\beta}{2} A_y - \delta \frac{\partial A_y}{\partial t} - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} - i\gamma \left( |A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2 \right) A_y - \frac{i}{3} \gamma A_y^* A_x^2 = \frac{g A_y}{2} + \frac{g}{2\Omega_g^2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2}, \quad (1b)$$

$A_i$  – амплитуды поляризационных компонент,

$\Delta\beta = 2\pi/L_B$  – разность констант распространения из-за двулучепреломления в волокне,

$L_B$  – длина двулучепреломления,

$\delta = \Delta\beta/2\omega_0$  – разность групповых скоростей поляризационных компонент,

$\beta_2$  – дисперсия групповых скоростей,

$\gamma$  – коэффициент нелинейности волокна,

$g$  – усиление волокна,

$\Omega_g$  – ширина линии усиления.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ

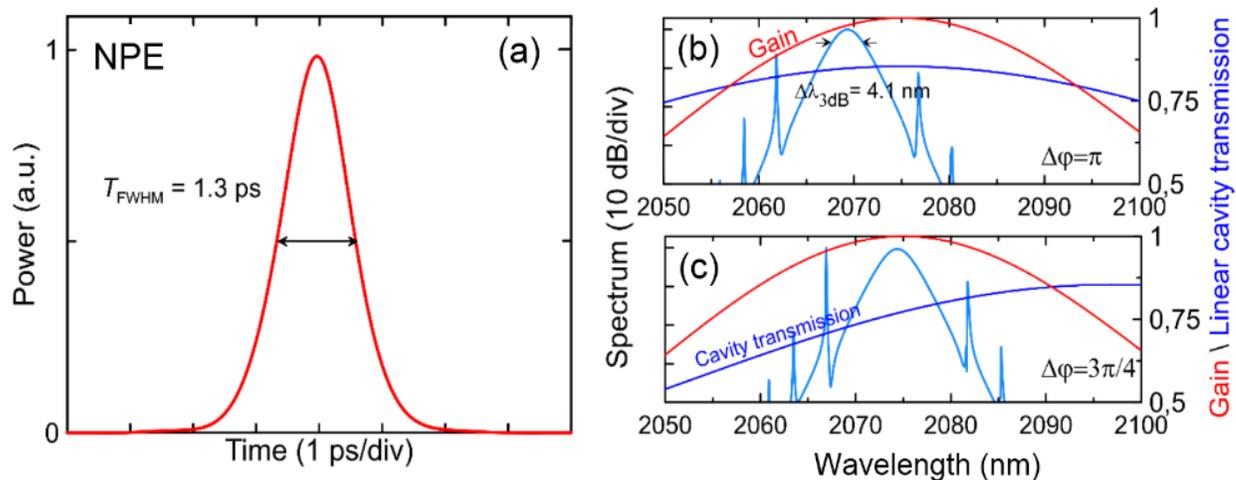
В случае синхронизации мод с использованием SWCNT, его действие описывалось передаточной функцией:

$$A'_i = A_i \sqrt{1 - \alpha_{ns} - \alpha_s},$$

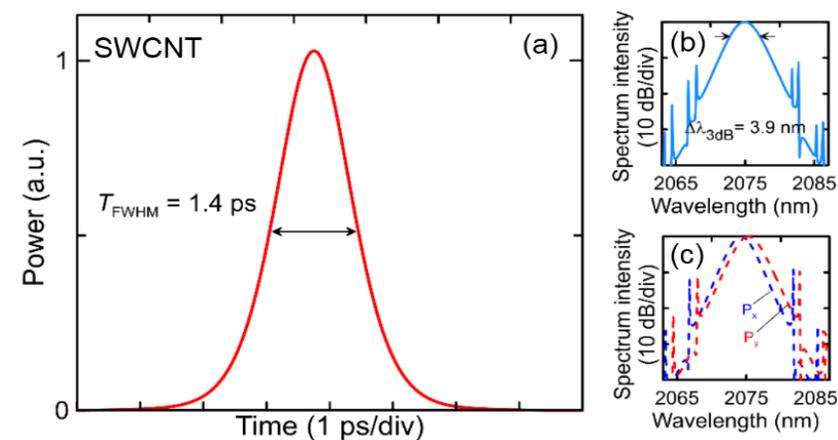
где  $\alpha_s = \alpha_{s0} \exp\left(-\left(|A_x|^2 + |A_y|^2\right)/P_s\right)$  насыщаемые потери SWCNT,  $\alpha_{s0}$  глубина модуляции,  $P_s$  пиковая мощность насыщения,  $\alpha_{ns}$  ненасыщаемые потери

Ho-doped fiber					
$\beta_2$ (ps <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> )	$\gamma$ (W <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	$g_0$ (m <sup>-1</sup> )	$\frac{\Omega_g}{2\pi}$ (THz)	$E_g$ (pJ)	$l_a$ (m)
-0.11	0.0011	2	2.66	180	2
SMF			SWCNT		
$\beta_2$ (ps <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> )	$\gamma$ (W <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	$l_{SMF}$ (m)	$\alpha_{ns}$	$\alpha_{s0}$	$P_s$ (W)
-0.1	0.0011	8	0.28	0.01	70
General parameters					
$L_B$ (m)		$\theta$ (rad)	$\Delta\phi$ (rad)	$\varphi$ (rad)	$\tau_{win}$ (ps)
0.5		0.3	$(\frac{\pi}{2} \dots \pi)$	2.45	404.8

# МОДЕЛИРОВАНИЕ

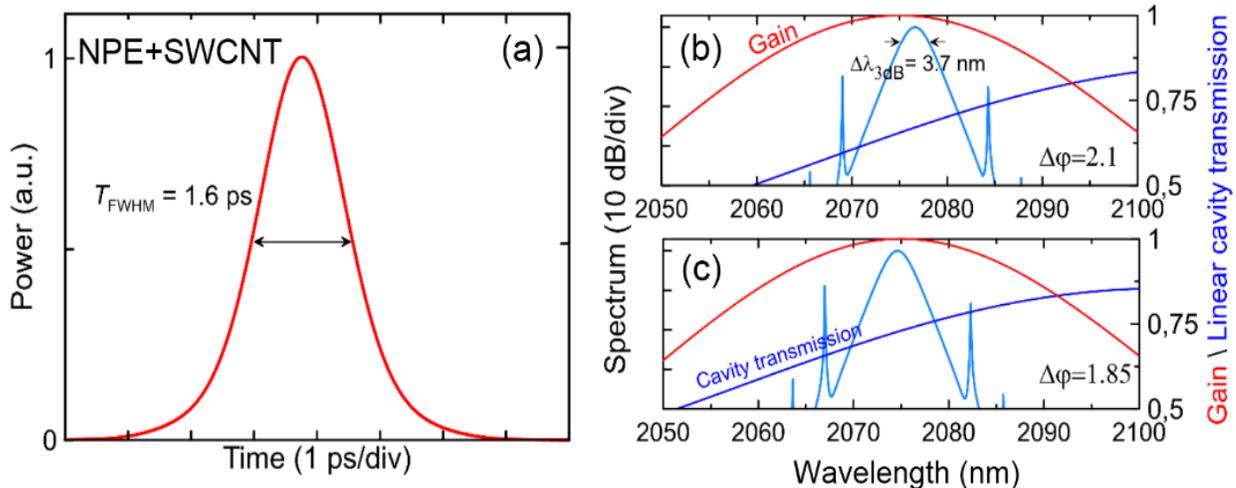


$\lambda_c = 2069-2074$  нм в зависимости от  $\Delta\varphi$  двулучепреломления, вносимого контроллером поляризации



$\lambda_c$  близка к положению максимума усиления в  $\text{No}^{3+}$  волокне (в модели фиксируется на  $\lambda_c = 2075$  нм)

- Импульс - сумму двух ортогонально поляризованных солитонов, которые захватывают друг друга и распространяются как единая векторная солитонная единица.
- Выход на ML режим  $\approx 10^4$  обхода резонатора



$\lambda_c$  варьируется в зависимости от  $\Delta\varphi$

- Выход на ML режим: менее чем за  $1,5 \times 10^3$  обхода резонатора

# ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

## 1. КОРОТКИЙ РЕЗОНАТОР

$$f_{rep} = c/2nL \quad \text{Linear}$$

$$f_{rep} = c/nL \quad \text{Ring}$$

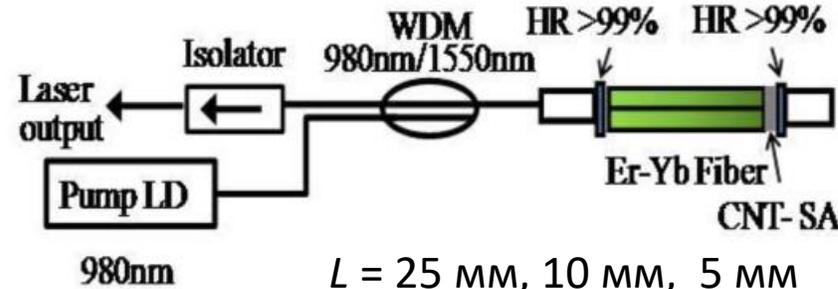
28 March 2011 / Vol. 19, No. 7 / OPTICS EXPRESS 6156

### Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes

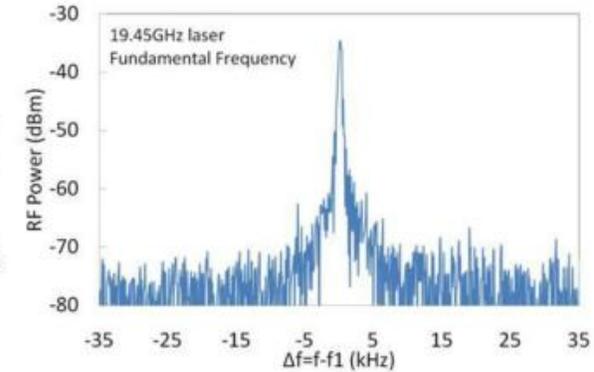
Amos Martinez\* and Shinji Yamashita

Department of Electronic Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan  
\*martinea@sagnac.t.u-tokyo.ac.jp

Soft phosphate glass fiber, core  $\varnothing$  14  $\mu\text{m}$ , low NA of  $\sim 0.08$ ;  
Heavily doped with 1wt.% of  $\text{Er}^{+3}$  and 8wt.% of  $\text{Yb}^{+3}$ ;  
Absorption at  $\lambda=980$  nm is 2.4 dB/mm;  
Timing jitter  $\sim 58 - 372$  fs.



$L = 25$  mm, 10 mm, 5 mm  
 $f_{rep} = 4$  ГГц, 10 ГГц, 20 ГГц

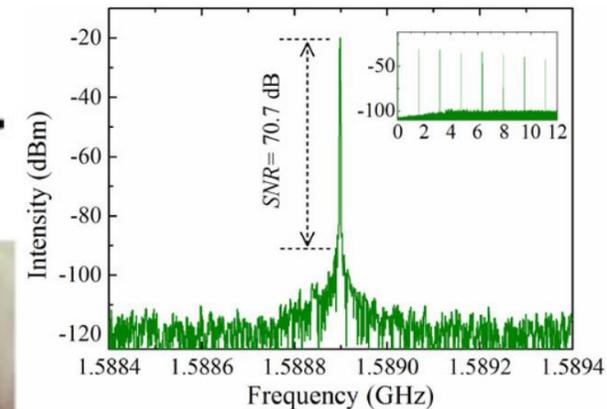
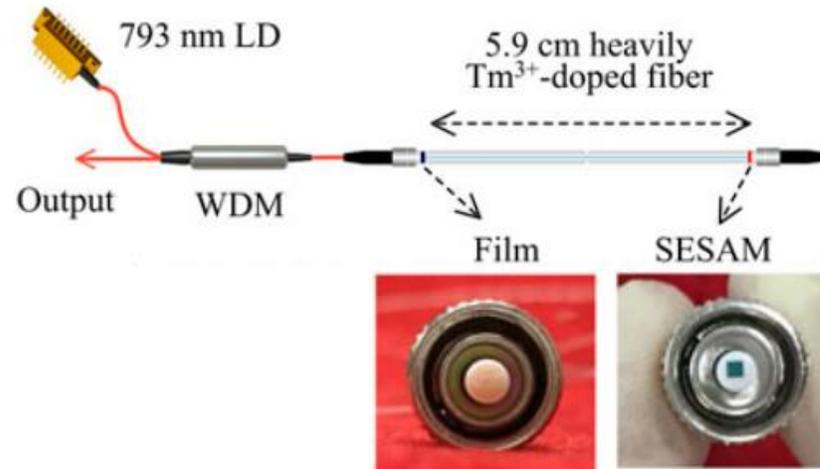


IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS,  
VOL. 24, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2018

### Passively Mode-Locked $\text{Tm}^{3+}$ -Doped Fiber Laser With Gigahertz Fundamental Repetition Rate

Huihui Cheng, Wei Lin, Zhengqian Luo, Senior Member, IEEE, and Zhongmin Yang

$\text{Tm}$ -doped barium gallo-germanate glass fiber;  
Core/cladding  $\varnothing$  8.6/125  $\mu\text{m}$ , NA  $\sim 0.145$   
Gain coefficient at  $\lambda=1950$  nm is 2.3 dB/cm;  
The group velocity dispersion is estimated to be  $\sim -100$  fs<sup>2</sup>/cm;  
Timing jitter  $\sim 1.7$  ps.



# ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

## 2. УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

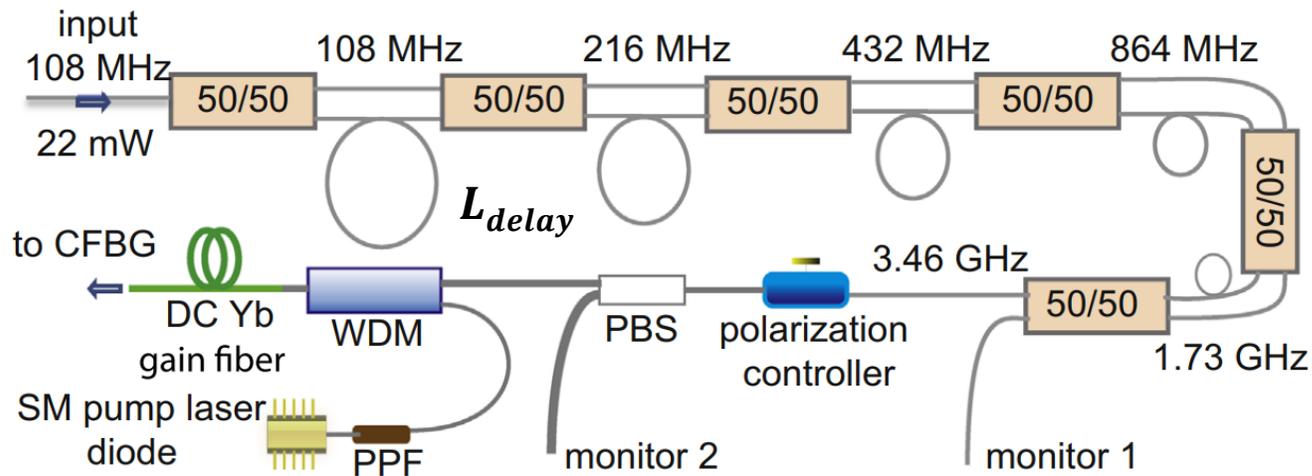
Optics Communications 366 (2016) 404–409

3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser

Can Kerse<sup>a,\*</sup>, Hamit Kalaycıoğlu<sup>b</sup>, Parviz Elahi<sup>b</sup>, Önder Akçaalan<sup>a</sup>, F. Ömer Ilday<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Ankara 06800, Turkey

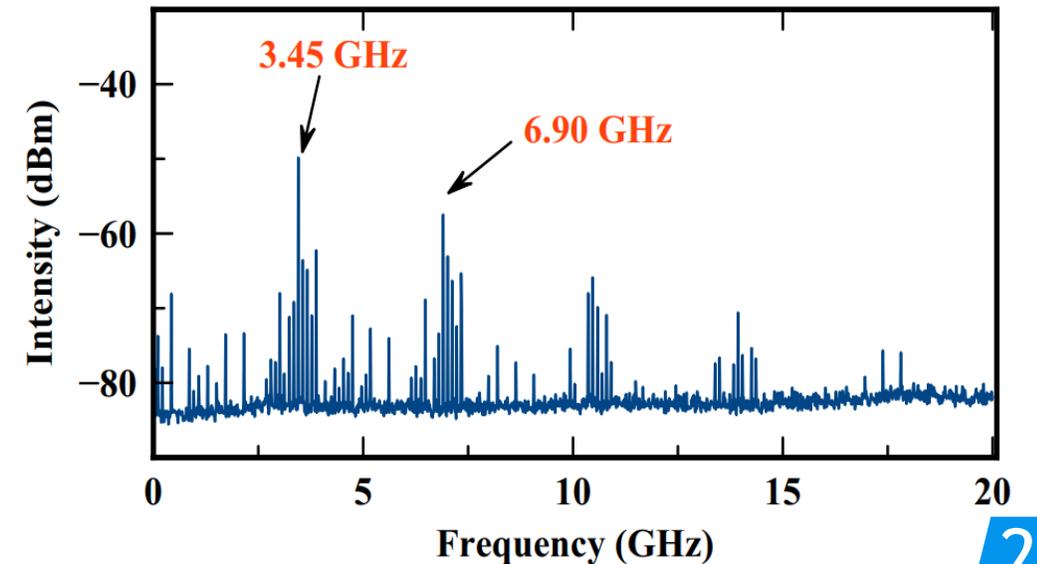
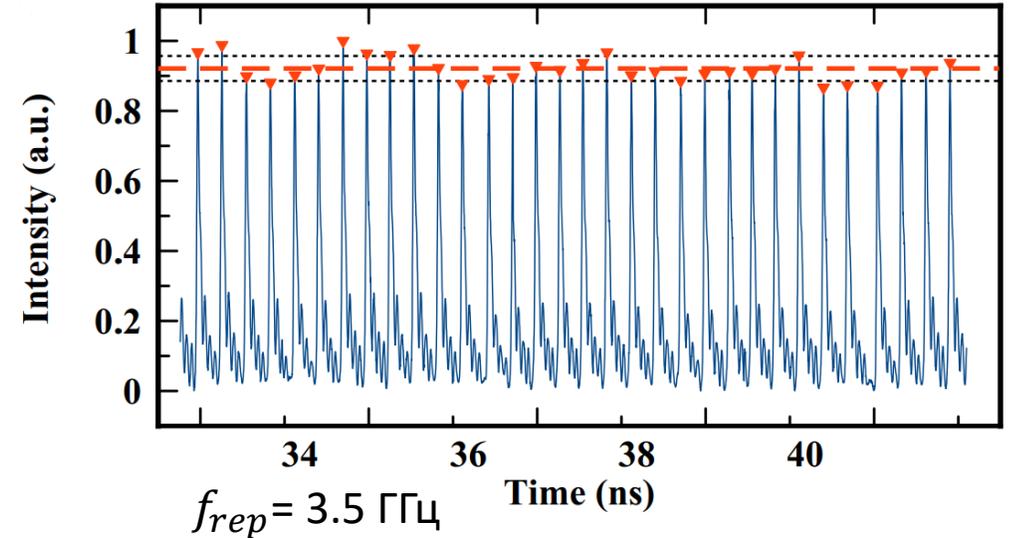
<sup>b</sup> Department of Physics, Bilkent University, Ankara 06800, Turkey



$$f_{rep} = f_{fund} \times 2^{(N-1)}$$

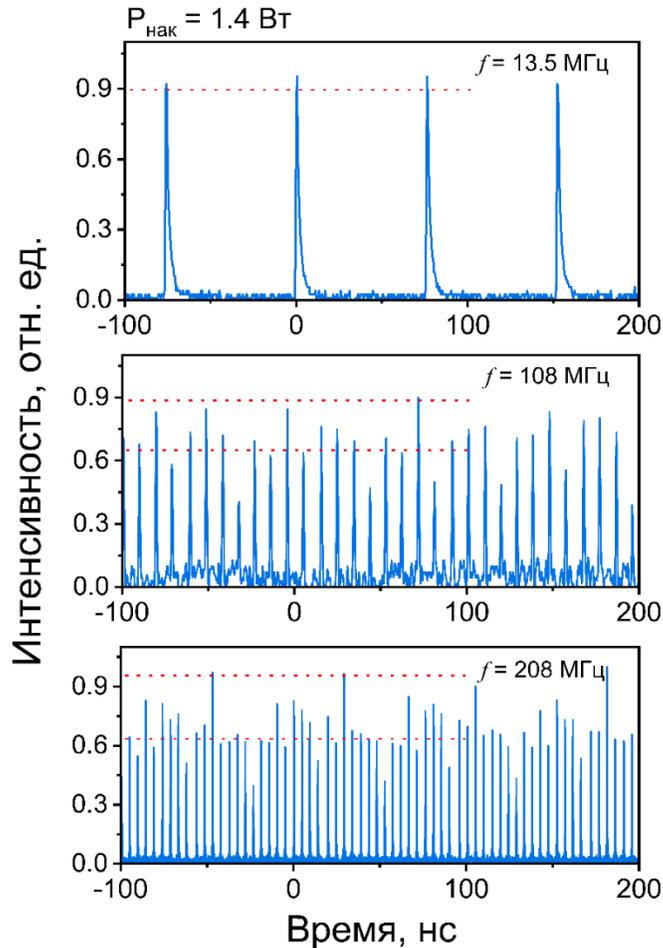
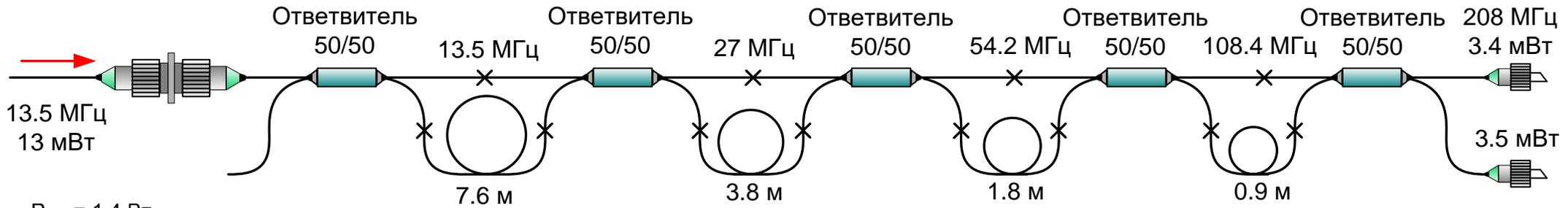
$N$  – количество ответвителей

$$L_{delay} = T/2$$



РЧ спектр, разрешение 100 кГц

# УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ (ГОЛЬМИЙ)



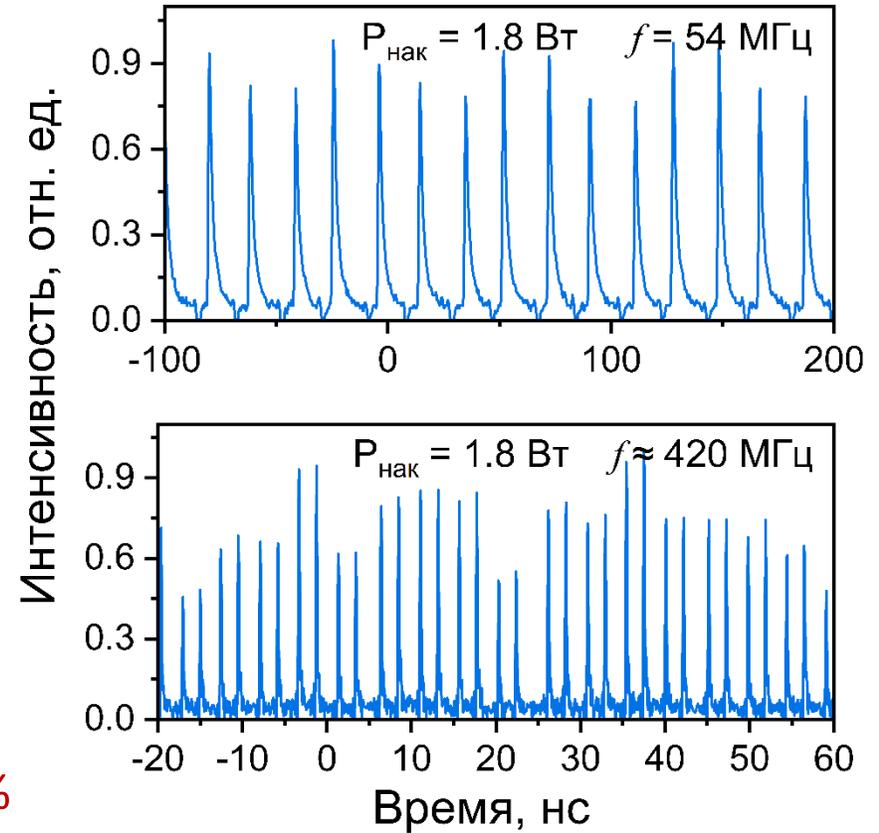
13.5 МГц

27 МГц ГСМ

≈ 208 МГц

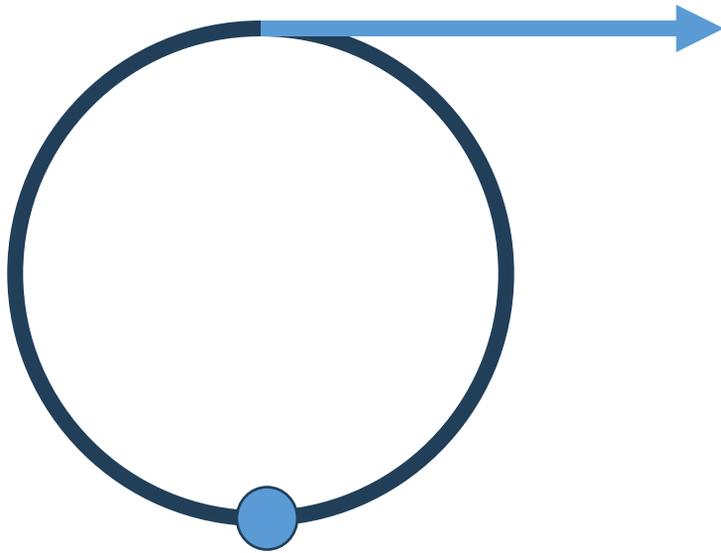
≈ 420 МГц

Вариация амплитуды до 35%  
Временная вариация импульсов

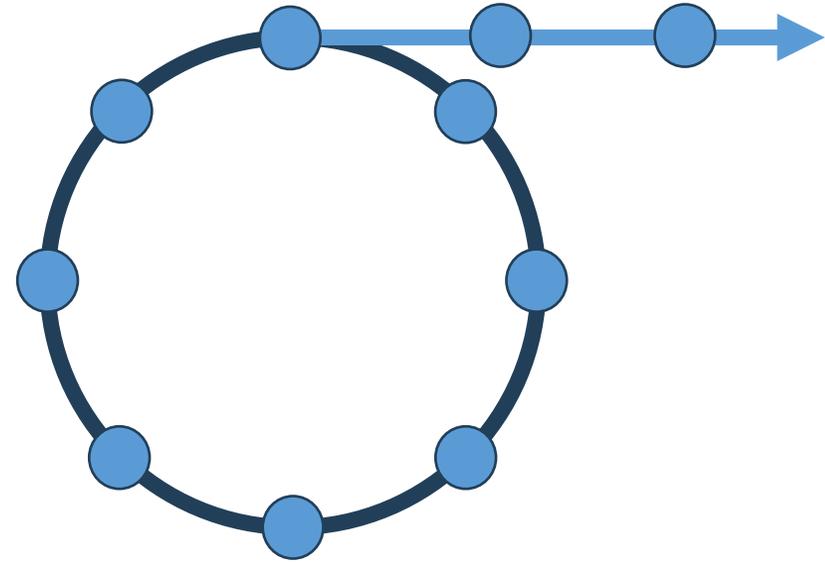


# ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

## 3. ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦЯ МОД (ГСМ)



Повышение мощности накачки



Увеличение количества импульсов в резонаторе,  
Повышение частоты следования импульсов  
кратное фундаментальной частоте

# ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦЯ МОД

J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 16, No. 1/January 1999

## Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking

C. Hönniger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller

Условие устойчивости для синхронизации мод с  $N$  количеством импульсов в резонаторе:

$$NE_P^2 > E_{\text{sat},L} E_{\text{sat},A} \Delta R$$

$E_{\text{sat},L}$  – энергия насыщения усиления

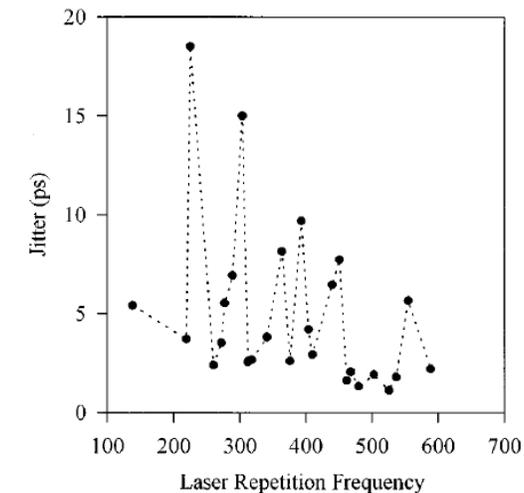
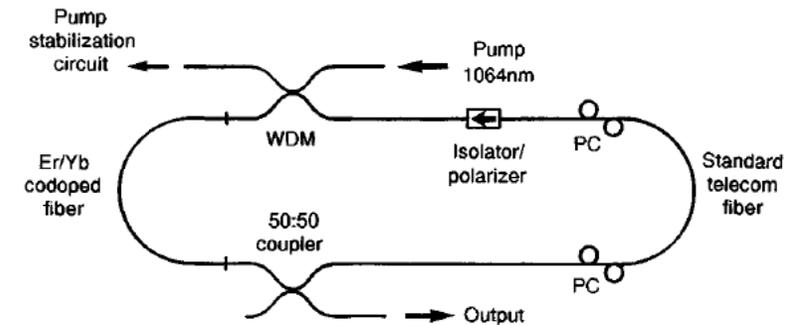
$E_{\text{sat},A}$  – энергия насыщения поглотителя

$\Delta R$  – максимальная глубина модуляции поглотителя

J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 14, No. 1/January 1997

## Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers

A. B. Grudinin and S. Gray



## ФОРМИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ

При взаимодействии на больших расстояниях, на отталкивание и разделение нескольких внутрирезонаторных импульсов влияют:

- Дисперсионная волна (dispersive wave):  $T < 0.4$  нс
- Истощение-восстановление усиления (gain depletion and recovery):  
 $T = 0.4 - 23$  нс
- Акустическая волна (acoustic-wave):  $T > 23$  нс

# ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦЯ МОД

## ORIGINAL PAPER

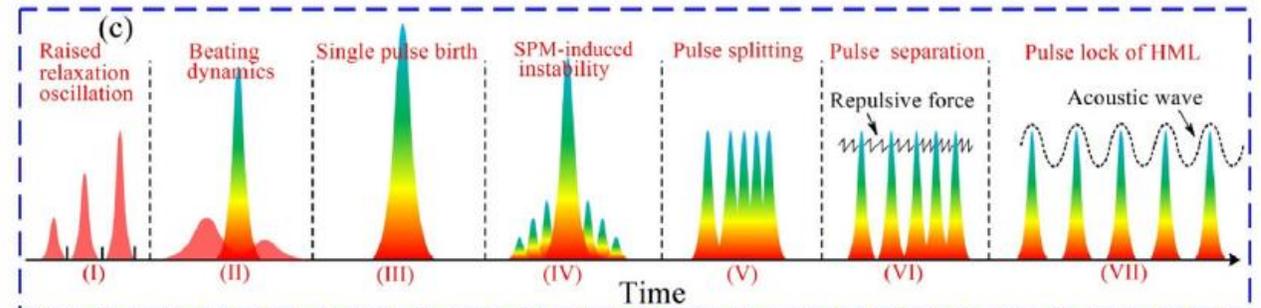
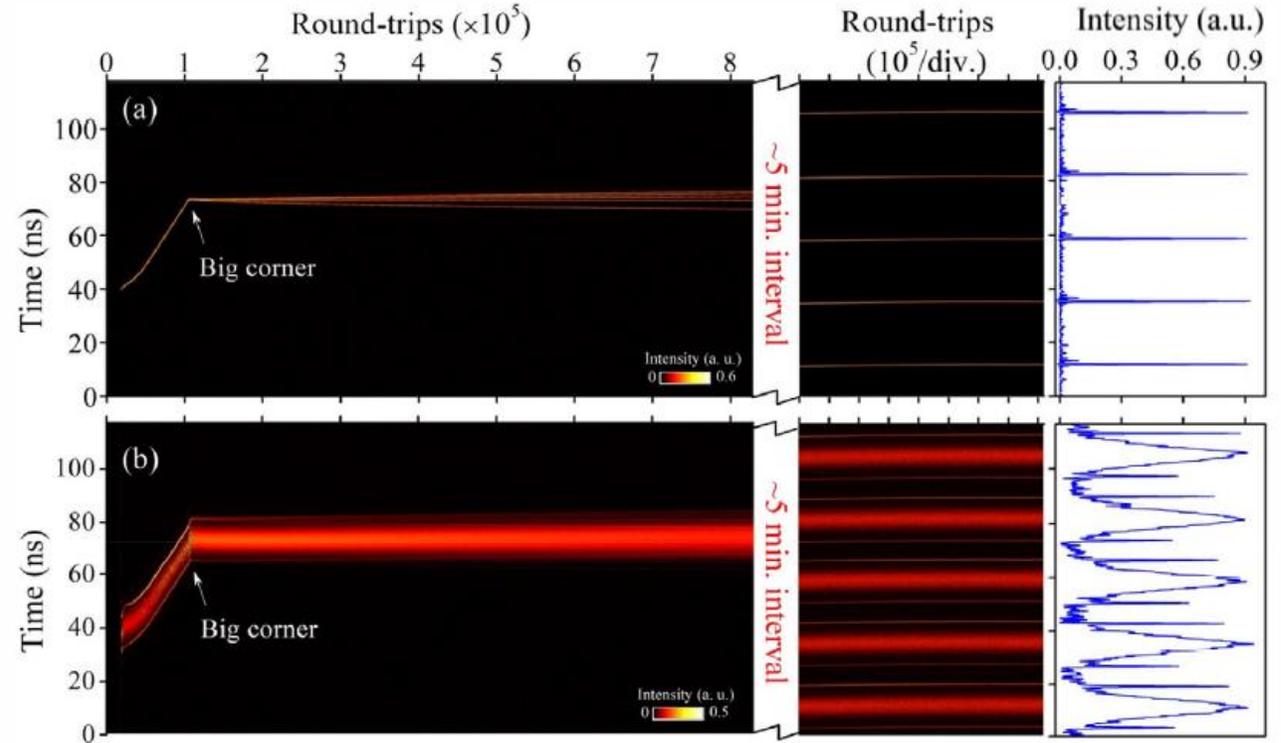
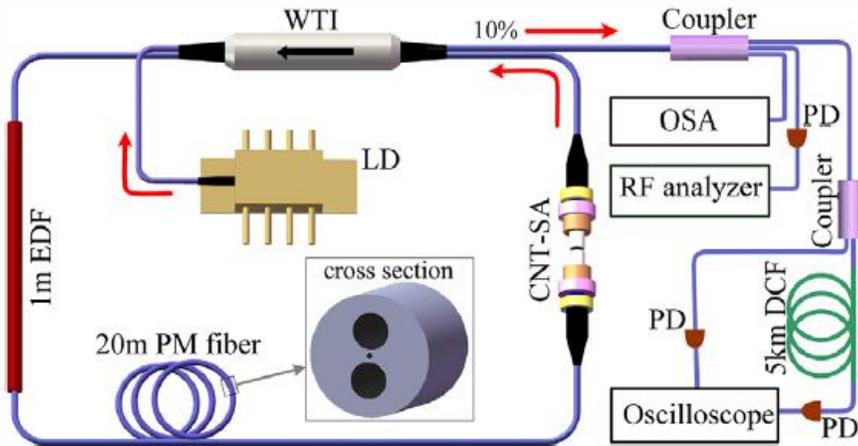
Harmonic Mode-Locking

LASER  
& PHOTONICS  
REVIEWS

www.lpr-journal.org

## Revealing the Buildup Dynamics of Harmonic Mode-Locking States in Ultrafast Lasers

Xueming Liu\* and Meng Pang



Total cavity length is  $\approx 24.3$  m,  
 $f_{\text{fund}} \approx 8.52522$  MHz  
 $T = 117.3$  ns (cavity round-trip [RT] time)

# СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Метод ВЧ УКИ	Стабильность	Энергия	Предельная частота	Простота настройки	Сложность конструкции
Короткий резонатор	Высокая	Низкая	>10 ГГц	Высокая	Средняя
Умножители частоты	Низкая	Низкая	>3 ГГц	Высокая	Высокая
ГСМ	Средняя	Средняя	>10 ГГц	Средняя	Низкая

# ПАССИВНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

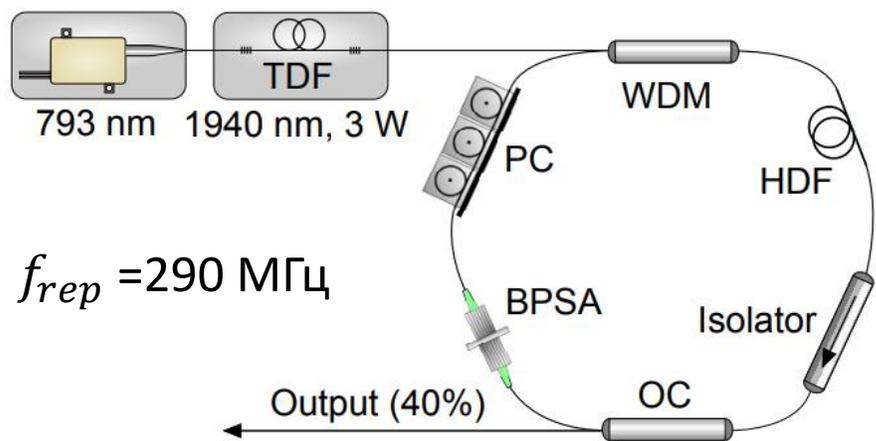
Research Article

Vol. 25, No. 15 | 24 Jul 2017 | OPTICS EXPRESS 16916

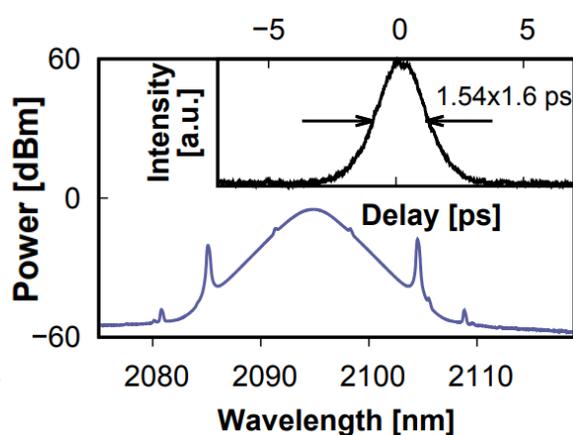
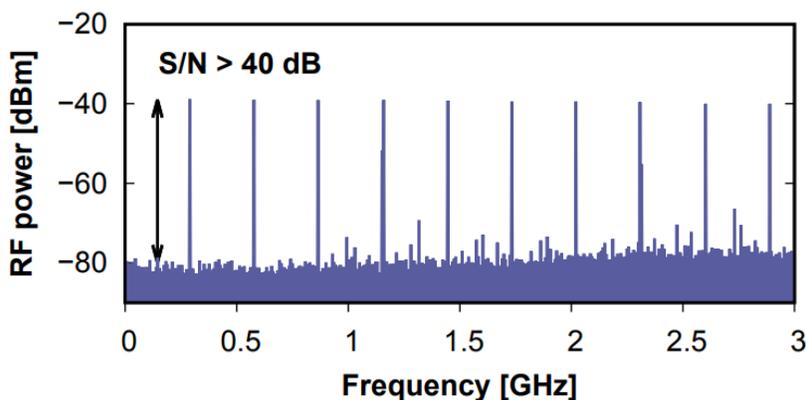
Optics EXPRESS

## Fundamental and harmonic mode-locking at 2.1 $\mu\text{m}$ with black phosphorus saturable absorber

MARIA PAWLISZEWSKA,<sup>1,\*</sup> YANQI GE,<sup>2</sup> ZHONGJUN LI,<sup>2</sup> HAN ZHANG,<sup>2</sup> AND JAROSLAW SOTOR<sup>1</sup>



$$f_{rep} = 290 \text{ МГц}$$



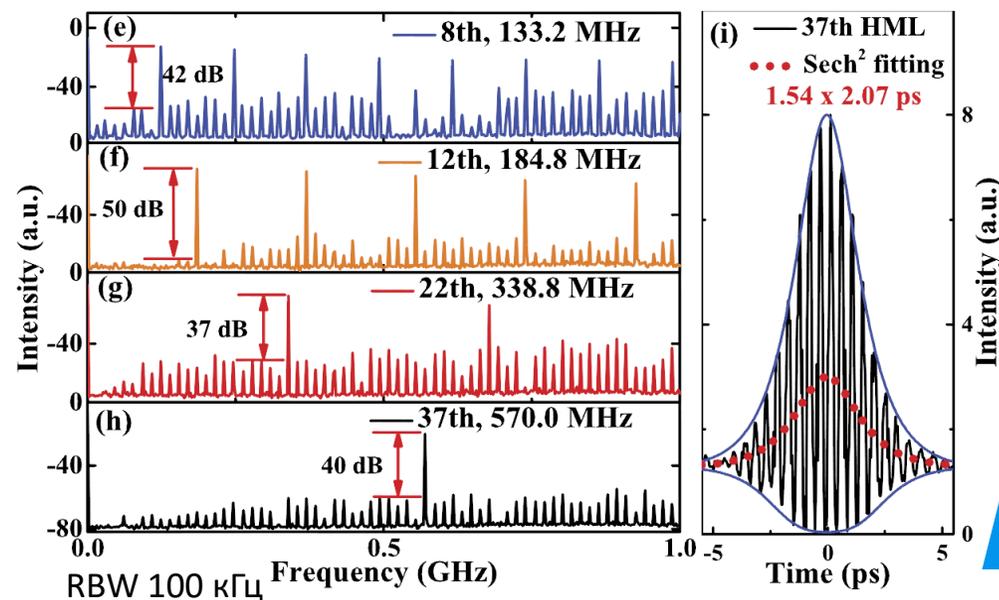
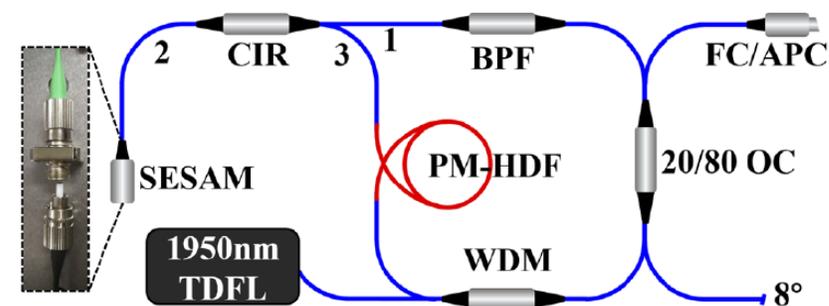
Research Article

Vol. 28, No. 22/26 October 2020 / Optics Express 33028

Optics EXPRESS

## 570 MHz harmonic mode-locking in an all polarization-maintaining Ho-doped fiber laser

CHAO YANG, BAOQUAN YAO,\* YI CHEN, GAOYOU LIU, SHUYI MI, KE YANG, TONGYU DAI, AND XIAOMING DUAN

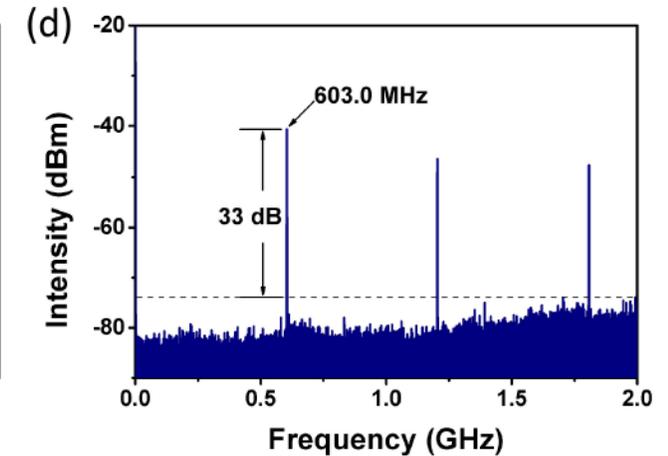
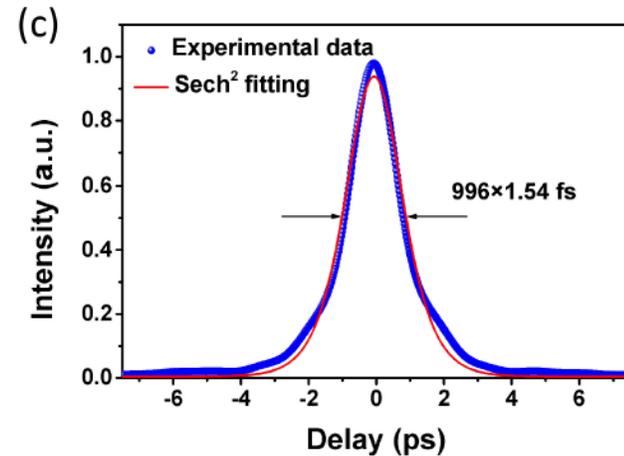
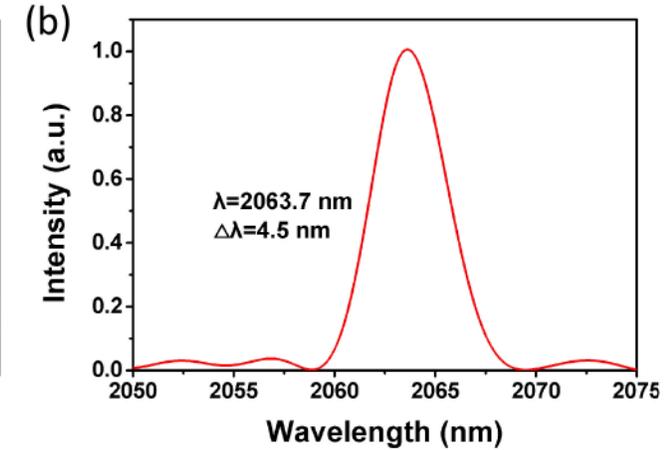
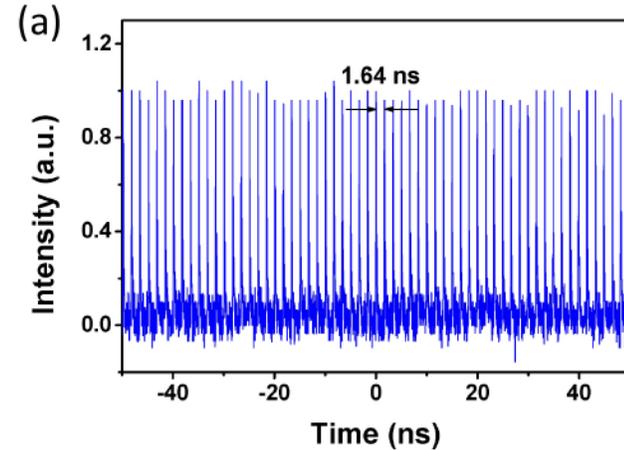
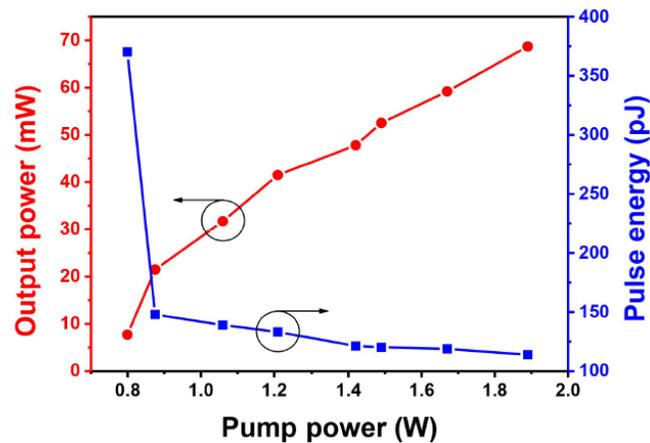
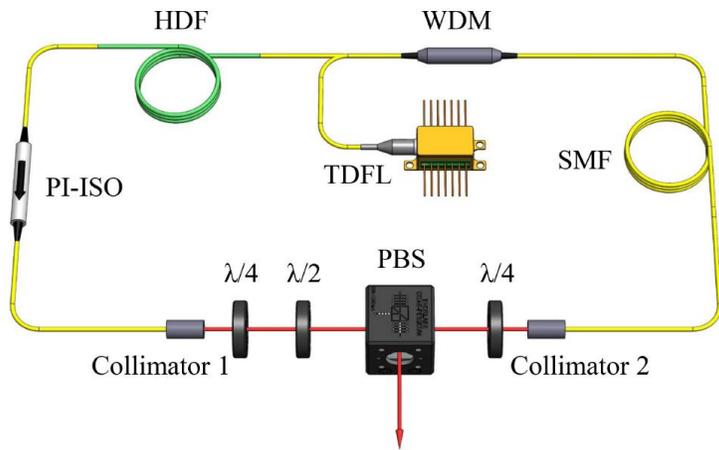


# ПАССИВНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

Journal of Lightwave Technology ( Volume: 42 , Issue: 10, 15 May 2024)

## 603 MHz harmonic mode-locked femtosecond Ho-doped fiber laser

Ping Hu, Jiajia Mao, Xue Zhou, Tianli Feng, Hongkun Nie, Baitao Zhang, Tao Li, Jingliang He, and Kejian Yang



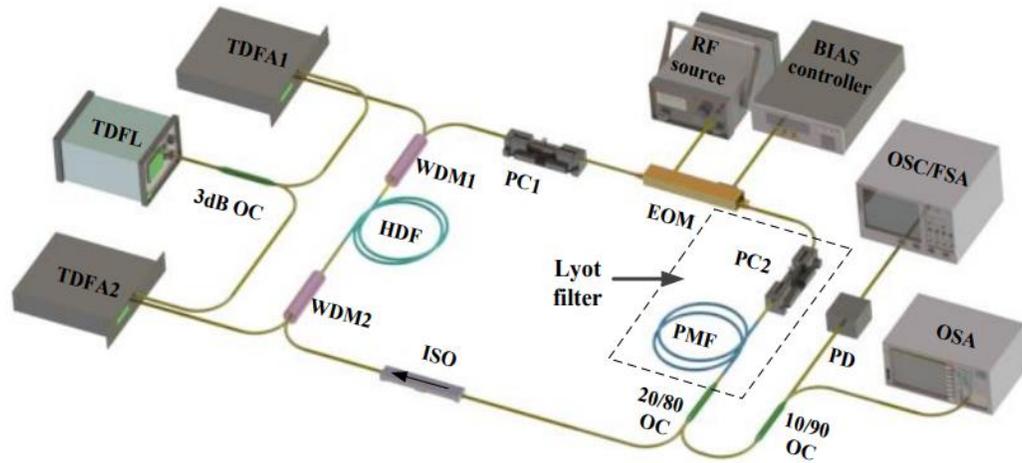
fundamental pulse repetition rate was 20.8 MHz

# АКТИВНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

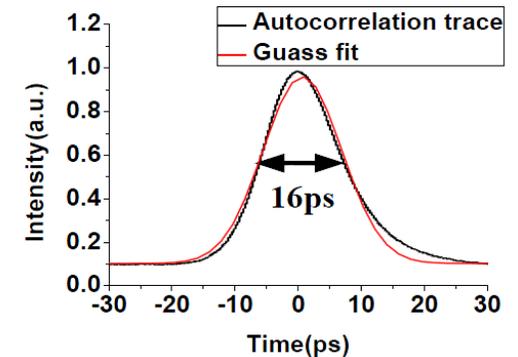
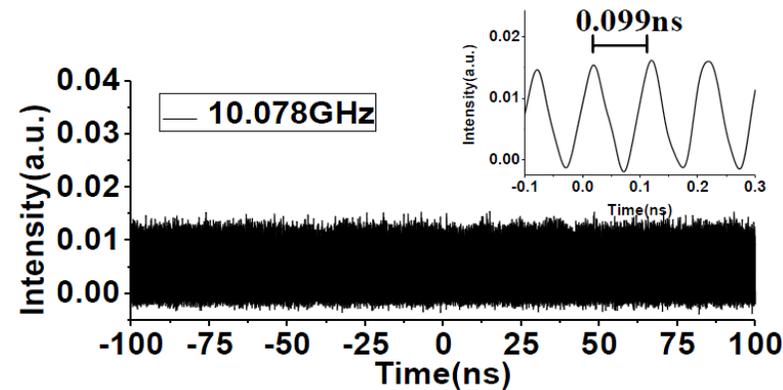
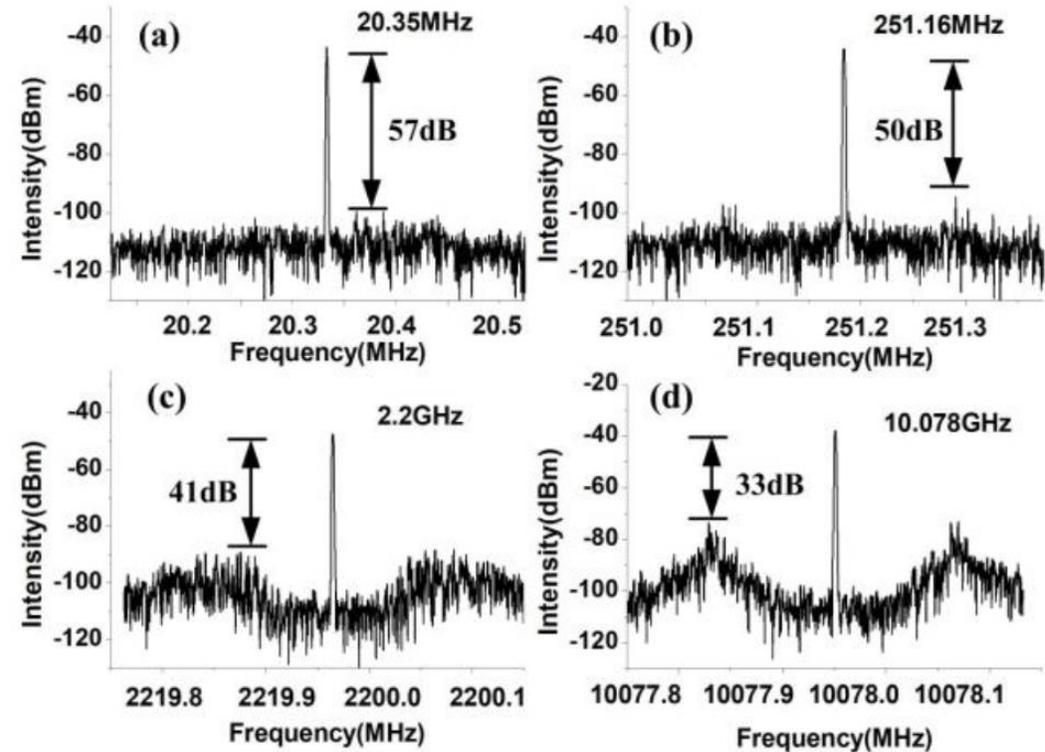
IEEE Photonics Technology Letters ( Volume: 31 , Issue: 3, 01 February 2019)

## 2.07 $\mu\text{m}$ , 10GHz repetition rate, multi-wavelength actively mode-locked fiber laser

Wanzhuo Ma, Tianshu Wang, Member, IEEE, Furen Wang, De Shengzhao, Runmin Liu, Jing Zhang  
Huilin Jiang



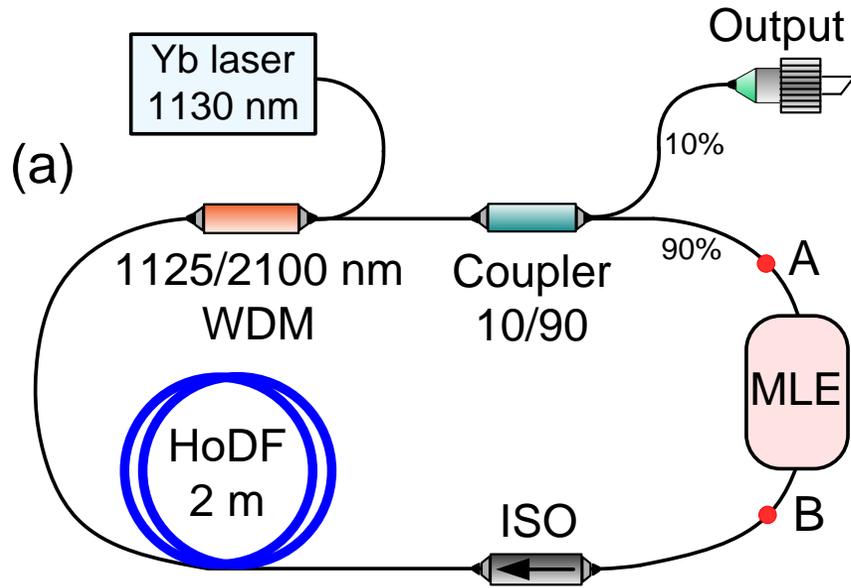
Гольмиевое волокно  
3,5 м (SM-HDF-10/130, NUFERN)



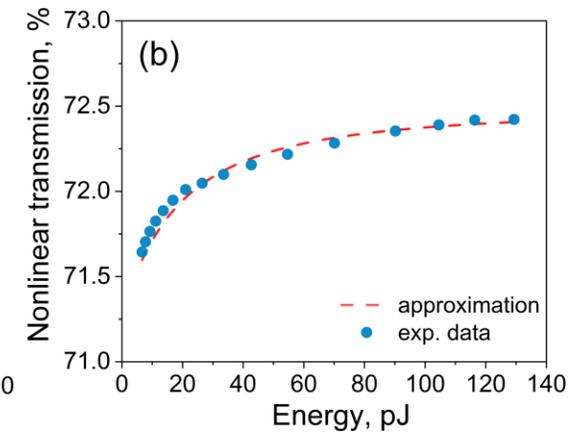
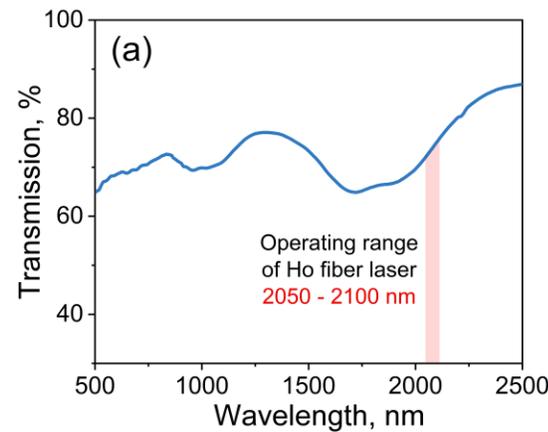
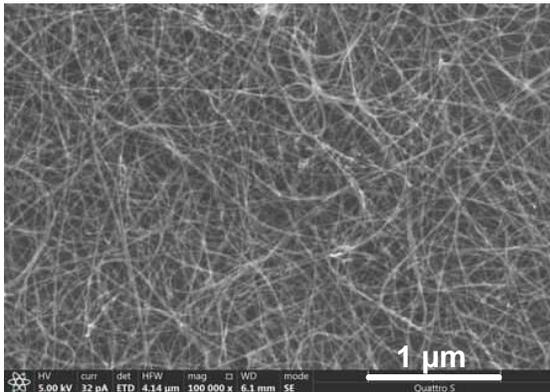
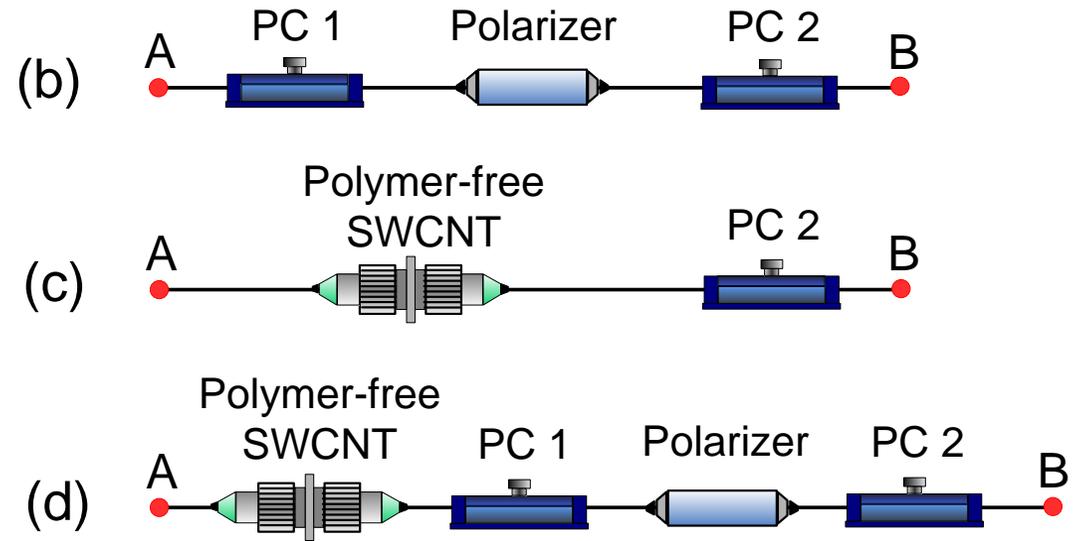
# СРАВНЕНИЕ ГСМ В ГОЛЬМИИ

Работа	Тип модулятора	Макс частота	Длительность импульсов	Год
Fundamental and harmonic mode-locking at 2.1 $\mu\text{m}$ with black phosphorus saturable absorber //Optics Express. – 2017. – Т. 25. – №. 15. – С. 16916-16921.	Черный фосфор	290 МГц	1.6 пс	2017
570 MHz harmonic mode-locking in an all polarization-maintaining Ho-doped fiber laser //Optics Express. – 2020. – Т. 28. – №. 22. – С. 33028-33034.	SESAM	570 МГц	2.07 пс	2020
603 MHz harmonic mode-locked femtosecond Ho-doped fiber laser //Journal of Lightwave Technology. – 2024.	Free-space NPE	603 МГц	996 фс	2024
2.07- $\mu\text{m}$ , 10-GHz Repetition Rate, Multi-Wavelength Actively Mode-Locked Fiber Laser //IEEE Photonics Technology Letters. – 2018. – Т. 31. – №. 3. – С. 242-245.	ЕОМ (активная ГСМ)	10 ГГц	16 пс	2019

# ПАССИВНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

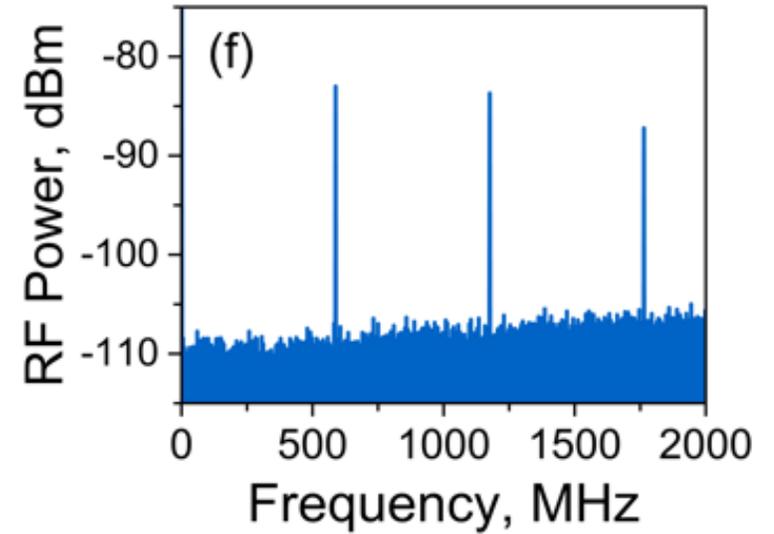
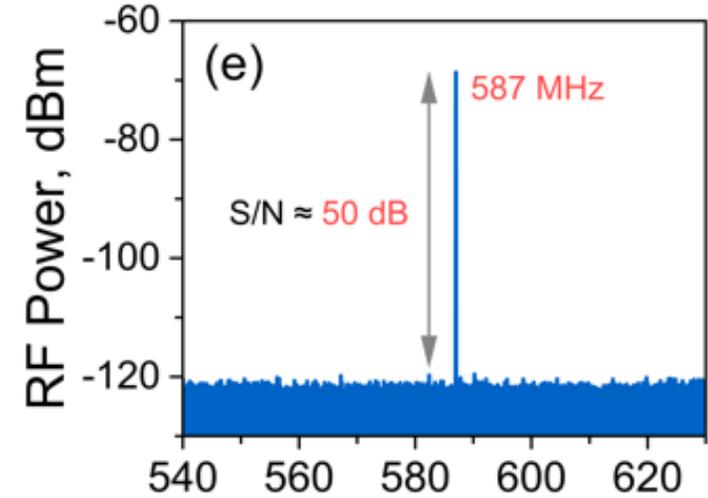
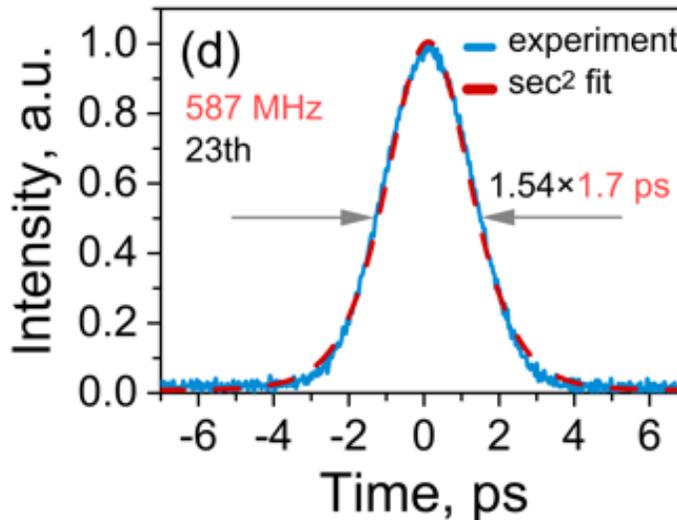
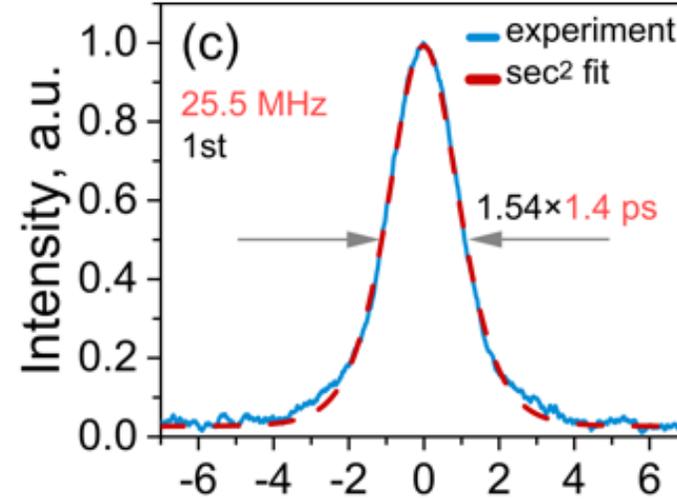
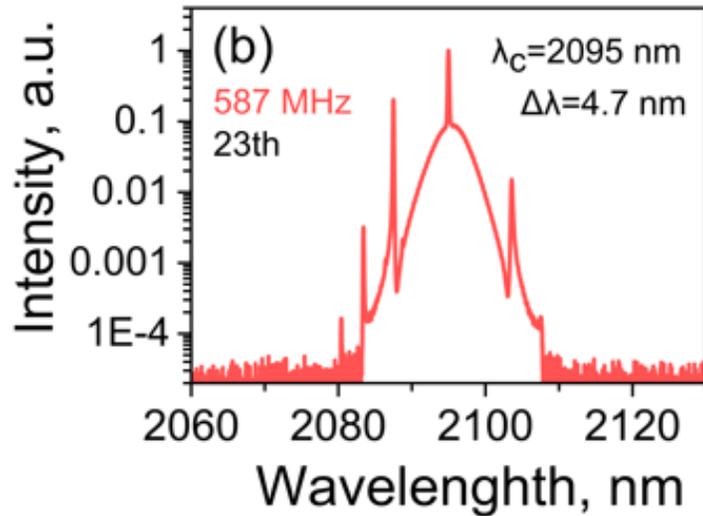
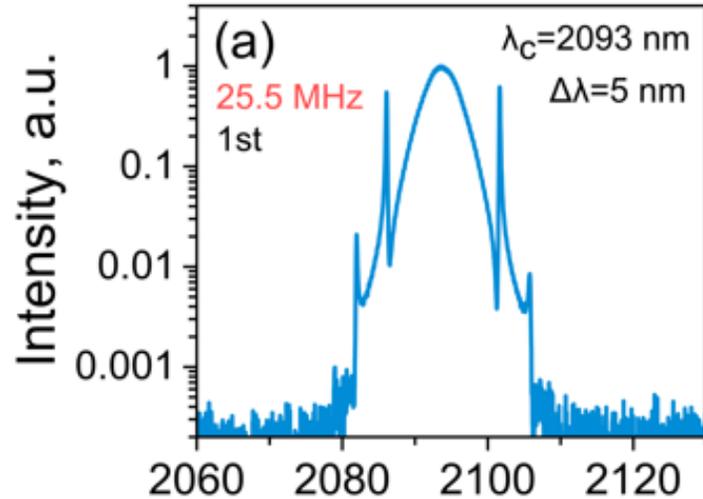


Mode-locking elements (MLE):



# ПАССИВНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

## NPE MODE-LOCKING

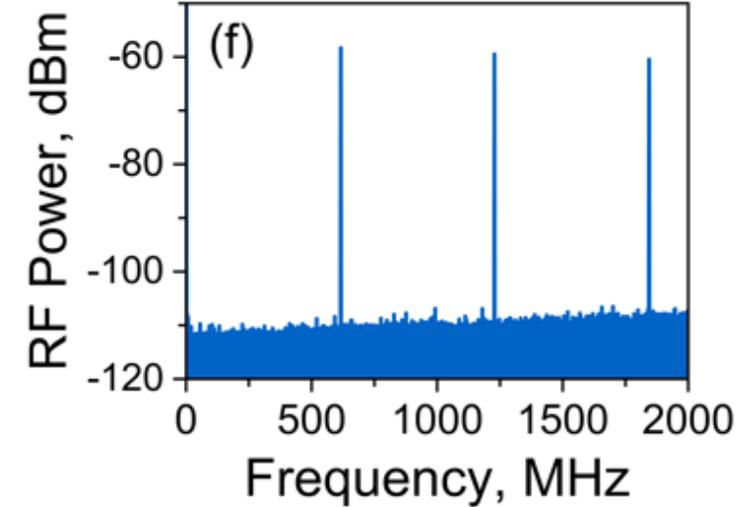
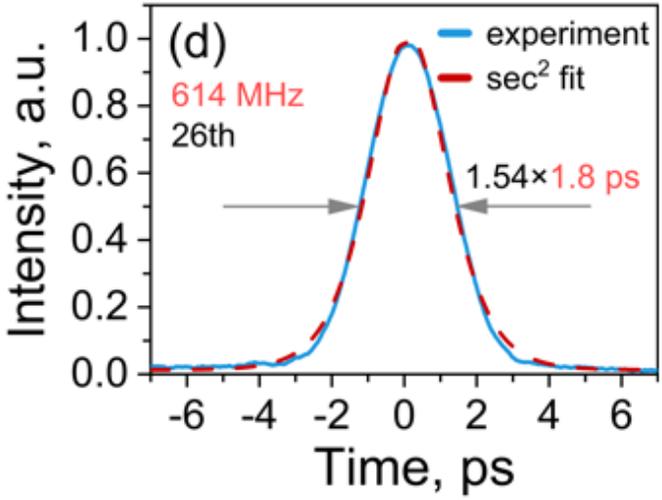
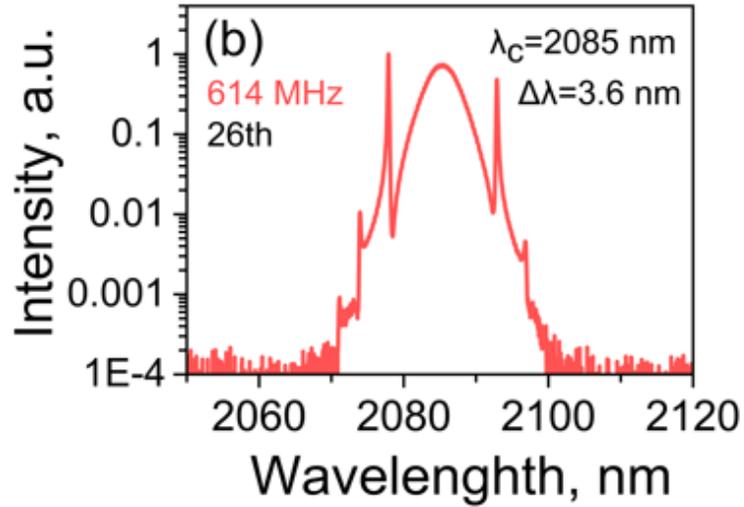
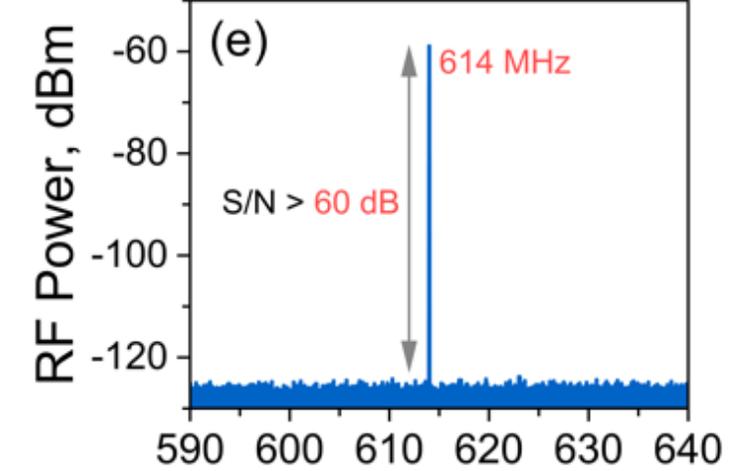
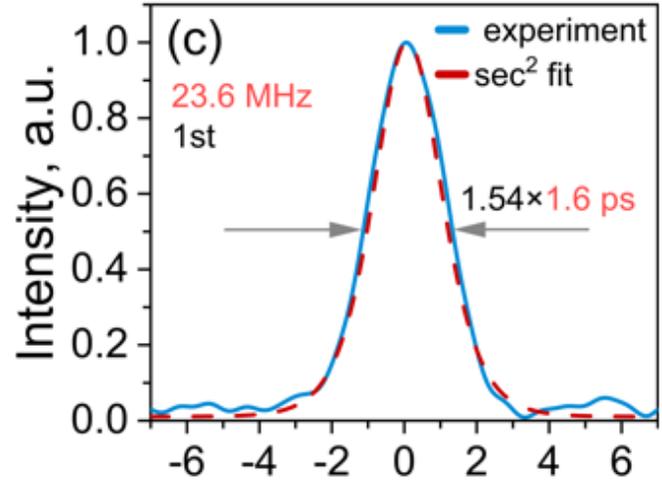
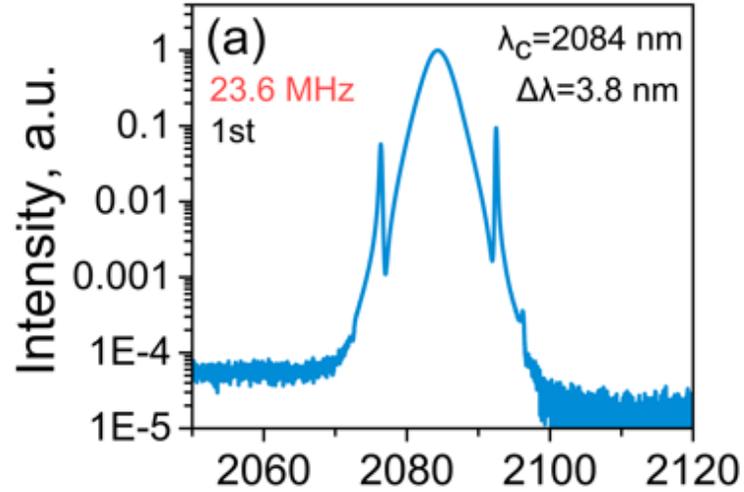


$$f_{fund} = 25.5 \text{ МГц}$$

$$\langle P \rangle = 66 \text{ мВт}$$

# ПАССИВНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

## HYBRID MODE-LOCKING

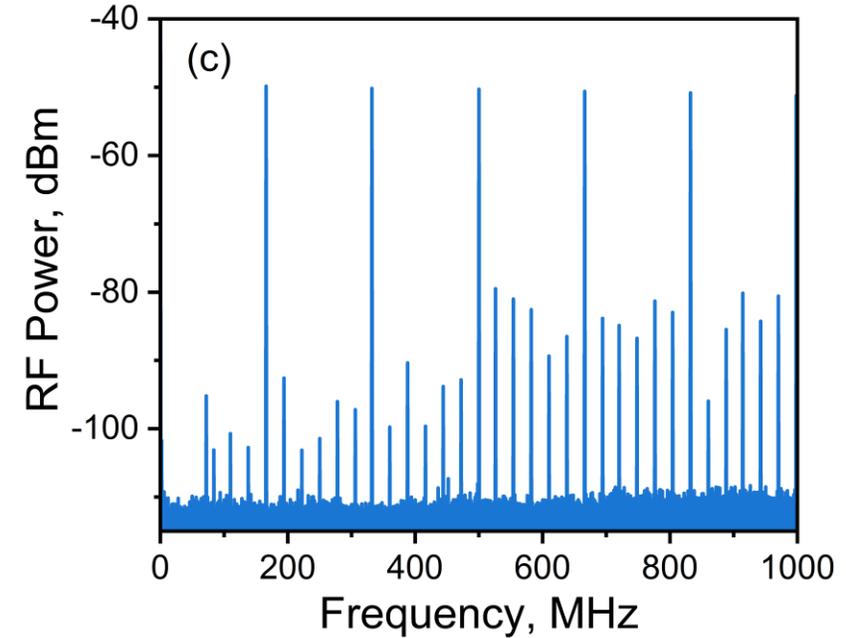
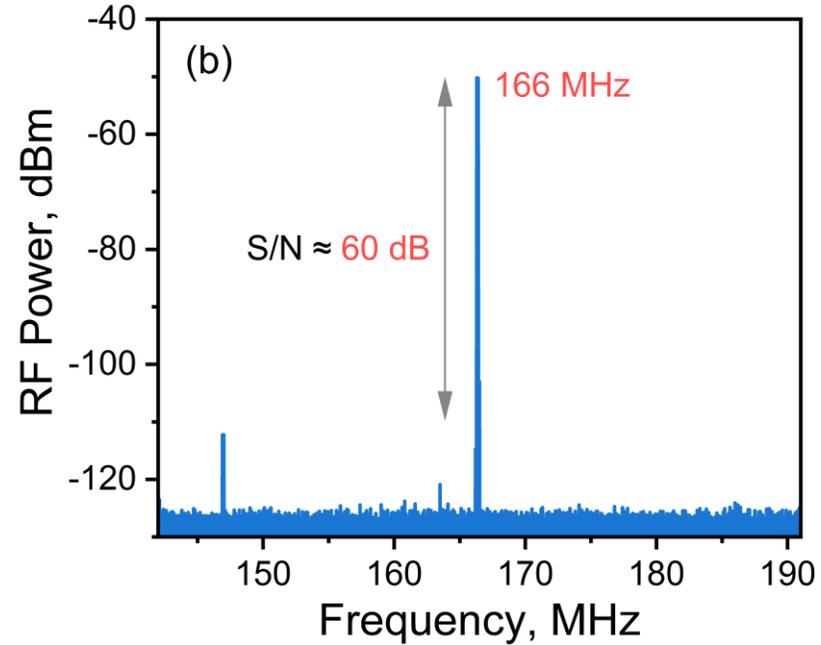
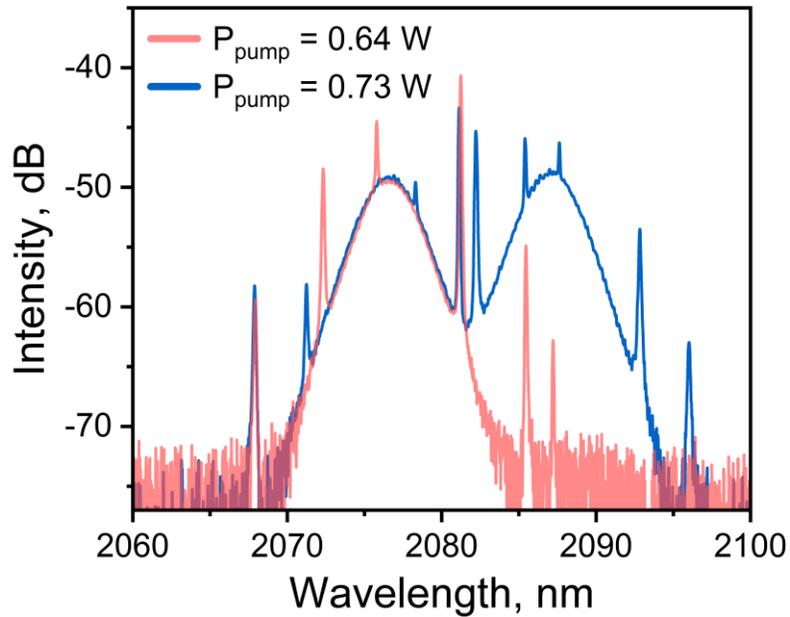


$$f_{fund} = 23.6 \text{ МГц}$$

$$\langle P \rangle = 60 \text{ мВт}$$

# ПАССИВНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

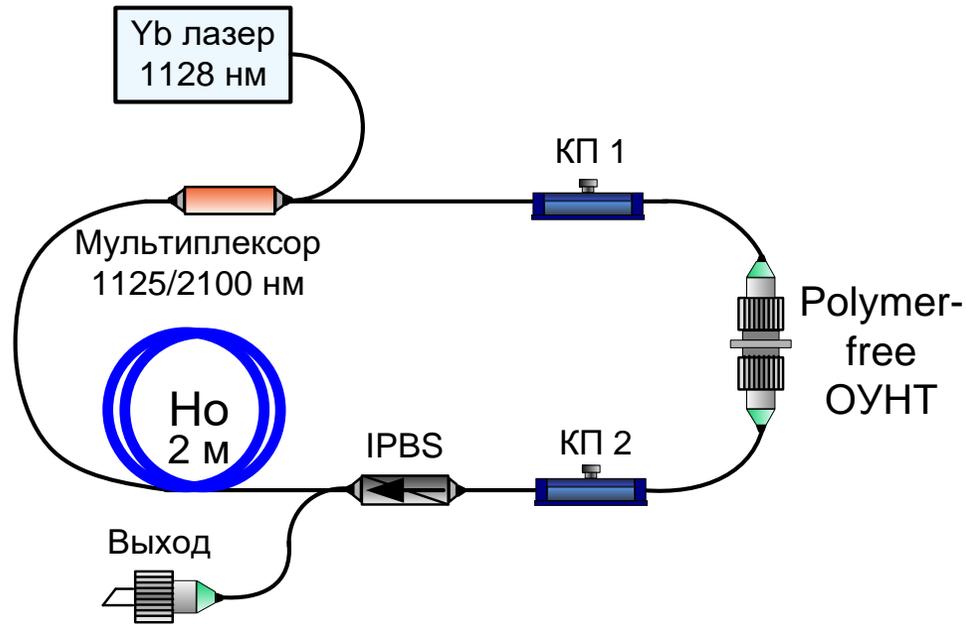
## SWCNT MODE-LOCKING



Мощность накачки **0.64 Вт**  
Фундаментальная частота **27.3 МГц**  
<P> **2.5 мВт**

Нестабильная HML, **166 МГц**  
Мощность накачки **1.34 Вт**  
Мощность излучения **89 мВт**

# УПРОЩЕНИЕ СХЕМЫ РЕЗОНАТОРА



$L$  (Cavity)  $\approx 5.9$  м

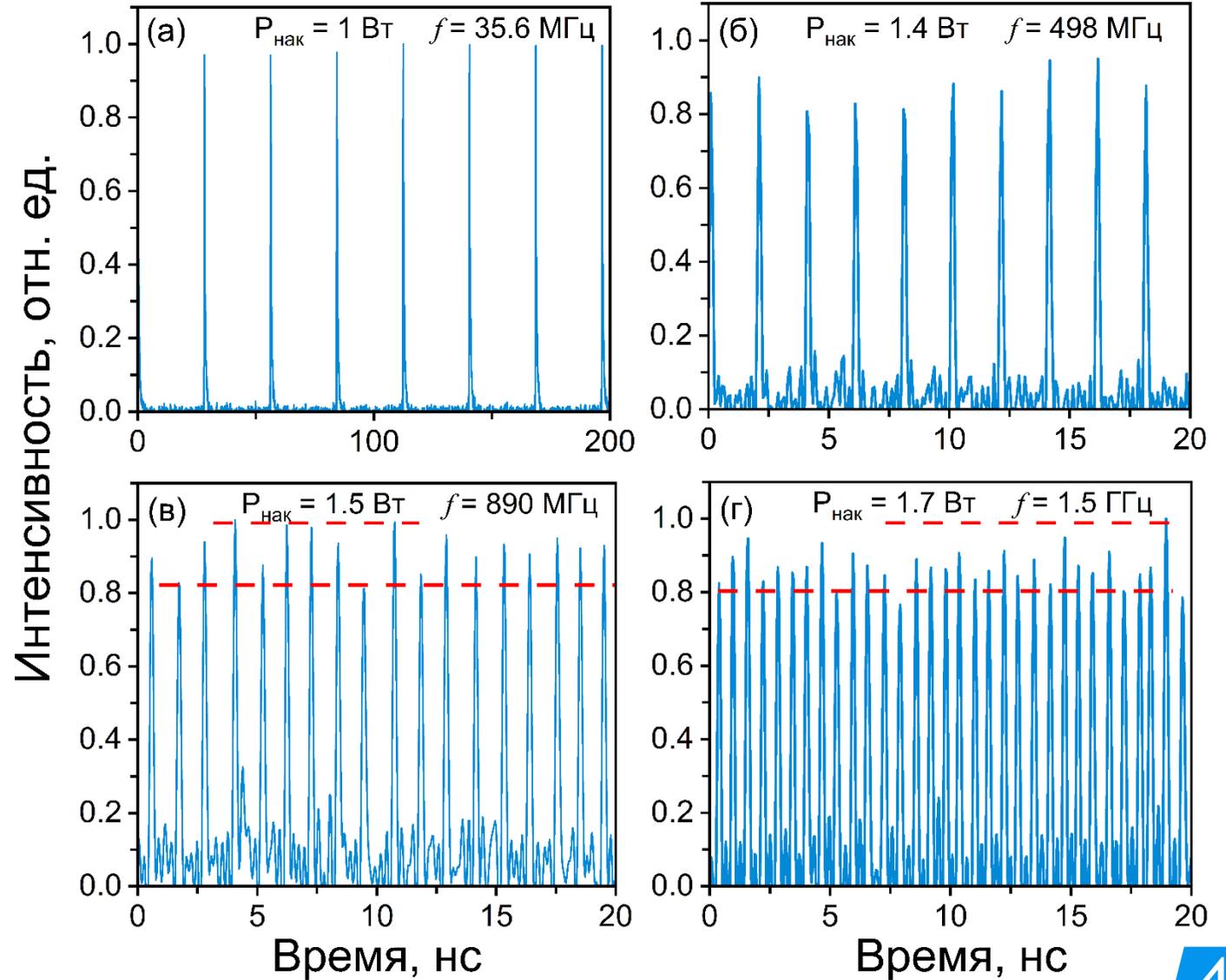
$L$  (SMF)  $\approx 3.9$  м

$nGVD \approx -0.6$  ps<sup>2</sup>

$f_{rep} = 35.6$  MHz

$\lambda_c = 2080$  nm

$\langle P \rangle = 7$  mW  $\rightarrow 25$  mW



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Рассмотрены различные механизмы синхронизации мод в одном резонаторе гольмиевого лазера;
- Проведена оптимизация резонаторов для получения гармонической синхронизации мод.
- Получена частота следования импульсов 614 МГц в резонаторе с гибридной синхронизацией мод.
- Проведено упрощение схемы гольмиевого лазера для повышения частоты следования импульсов.

ЛИТЕРАТУРА ИЗ ДОКЛАДА



# БЛАГОДАРНОСТИ



Трикшев А.И., Жлуктова И.В., Лобанов А.И.,  
Зверев А.Д., Балакин П.В.



Гладуш Ю.Г., Красников Д.В.,  
Насибулин А.Г.



Коробко Д.А., Фотиади А.А.



Грант № 22-72-00126, № 24-72-10120



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

## ГОЛЬМИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

С.А. Филатова\*, В.А. Камынин, В.Б. Цветков

\* [filatova@kapella.gpi.ru](mailto:filatova@kapella.gpi.ru)

