

Разработка субпикосекундной лазерной установки с перестраиваемой частотой повторения импульсов для атравматического ремоделирования кожных покровов

В.М. Богомолов^{1*}, М.С. Плитарак¹, А.О. Прудников¹, А. Исмаил^{1,2},
И.А. Смирнов¹, И.О. Орехов¹, С.Г. Сазонкин¹, В.Е. Карасик¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, Россия, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, vasilyb@me.com

² Московский физико-технический институт МФТИ
141701, Москва, Россия, Институтский переулок, 9,

Работа посвящена разработке субпикосекундной лазерной установки с перестраиваемой частотой повторения импульсов для реализации метода атравматического «холодного» ремоделирования кожных покровов. В ходе исследования обоснована актуальность создания лазерной системы, генерирующей импульсы длительностью не более 20 пс в спектральном диапазоне около 1550 нм с перестраиваемой частотой повторения от сотен кГц до десятков МГц и средней выходной мощностью не менее 500 мВт. Разработанная лазерная система включает в себя следующие модули: задающий генератор ультракоротких импульсов (УКИ), два блока предусиления, делитель частоты повторения импульсов и каскад мощного усиления. Задающий генератор был выполнен на базе кольцевого полностью волоконного резонатора с активным волокном, легированным ионами Er^{3+} , в качестве активной среды. Ширина оптического спектра излучения составляла 34 нм по уровню -5 дБ с центральной длиной волны 1548 нм. Длительность импульса была равна 2,7 пс, частота повторения импульсов — 13,3 МГц, средняя мощность излучения — 8,1 мВт. После растягивания импульса в волокне с положительной дисперсией групповых скоростей (ДГС) ($D = -72$ пс/(нм · км)) и усиления в первом каскаде предусилителя длительность импульса увеличилась до 17,8 пс, а средняя мощность выросла до 129 мВт. Далее частота следования импульсов была поделена в 20 раз — от 13,3 МГц до 670 кГц. После прохождения второго каскада предусилителя, каскада мощного усилителя на базе волокна с расширенной модовой областью ($d_{\text{мод.обл.}} = 25$ мкм) и дихроического зеркала (для отсеивания излучения накачки) были получены следующие характеристики выходного излучения: длительность импульса — 19,6 пс, средняя мощность излучения — 512 мВт. Форма оптического спектра и автокорреляционной функции соответствовали виду, характерному для одноимпульсной генерации.

Ключевые слова: атравматическое ремоделирование кожи, лазер, косметология, дерматология, генерация ультракоротких импульсов, субпикосекундный лазер; atraumatic skin remodeling, laser, cosmetology, dermatology, generation of ultrashort pulses, subpicosecond laser.

Введение

В связи с пропагандой идеала красоты в социальных сетях, особенно для молодой аудитории, а также с увеличением количества видеозвонков, люди обращают все большее внимание на эстетические недостатки кожи [1,2]. Помимо этого, важно отметить, что, согласно исследованиям Global Alliance наличие кожных недостатков снижает социальную активность человека и может привести к психологическим проблемам [3]. По этим причинам в последнее время наблюдается рост востребованности процедур по коррекции эстетических недостатков. Так, согласно сложившейся тенденции, объем мирового рынка эстетической медицины с 52,5 млрд. дол. в 2018 г. должен вырасти до 57,2 млрд. долл. в 2026 году (8,9%) [4, 5].

Наиболее перспективными для данных задач, считаются лазерные методы в связи с их высокой точностью и малой инвазивностью воздействия [6, 7]. Наиболее распространенными являются процедуры селективного фототермолиза — лазерное излучение осуществляет локальный прогрев слоев эпидермиса и дермы путем воздействия на целевые хромофоры, что запускает ремоделирование кожи через воспалительный процесс. Эрбиевый неабляционный фракционный миллисекундный лазер, как правило, является наилучшим аппаратом для проведения такого лечения. Однако данным процедурам свойственны недостаточный клинический эффект, а также ряд постпроцедурных осложнений, таких как эритема, отек и сухость [8, 9]. Другим методом лечения эстетических недостатков кожи является абляционная лазерная шлифовка — удаление локальных областей эпидермиса методом абляции с последующей стимуляцией процессов регенерации. Данный тип лечения характеризуется достаточно высоким клиническим эффектом, а также значительной травматичностью, что приводит к длительным срокам реабилитации. Лазеры с короткой длительностью импульса (наносекунды — сотни пикосекунд) позволили снизить повреждающие факторы, однако использованию таких систем все еще сопутствуют существенные постоперационные осложнения, такие как точечные кровотечения, гиперпигментация и др. [10–12]. В 2021 г. был продемонстрирован возможность атравматического «холодного» ремоделирования кожных покровов. Воздействие ультракоротких импульсов на частоте повторения 1 МГц с энергией импульса от 0,2 до 1 мкДж привело к росту числа биологических мар-

кером (ММР9, ММР3), отвечающих за ремоделирование кожных покровов. Длительность импульсов была короче времени всех характерных релаксационных процессов, что гарантировало практически полное отсутствие термических повреждающих процессов [13, 14]. Однако далее данный метод ремоделирования кожи не был достаточно изучен и проработан, в том числе в связи с отсутствием подходящей лазерной системы с требуемой длительностью импульсов и длиной волны, а также с возможностью варьирования энергии импульсов и частоты их следования. Таким образом, целью данной работы было создание лазерной системы, генерирующей последовательность импульсов длительностью не более 20 пс, с частотой следования, перестраиваемой от сотен кГц до десятков МГц, спектром излучения в диапазоне от 1530 до 1580 нм. Максимальная средняя мощность должна быть не менее 500 мВт.

Материалы и методы

Разработанная система состояла из следующих блоков: задающего генератора, двух блоков предусиления, делителя частоты повторения и каскада мощного усиления. Схема системы представлена на рис. 1, а. В качестве задающего генератора УКИ использовался полностью волоконный кольцевой резонатор длиной 15,66 м, схема которого представлена на рис. 1, б. В качестве активной среды использовалось коммерчески доступное волокно, легированное ионами Er^{3+} (HE980, Lucent Technologies) с коэффициентом поглощения 4 ± 1 дБ/м на длине волны 1530 нм. Это волокно накачивалось излучением одномодового диода на длине волны 980 нм мощностью 650 мВт. Суммарная дисперсия групповых скоростей в резонаторе (β_2) составила $0,005 \text{ пс}^2$. Далее генерируемые импульсы растягивались в 48-метровой катушке пассивного волокна с положительной ДГС (HNLF, НЦВО-Фотоника). Дисперсия данного волокна (D) составляла $-72 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$. После этого излучение усиливалось в первом каскаде предусилителя в 5 метрах коммерчески доступного активного волокна, легированного ионами Er^{3+} (I-25, FiberCore) с коэффициентом поглощения 40 ± 5 дБ/м на длине волны 1530 нм. Это волокно накачивалось излучением одномодового диода на длине волны 980 нм мощностью 650 мВт.

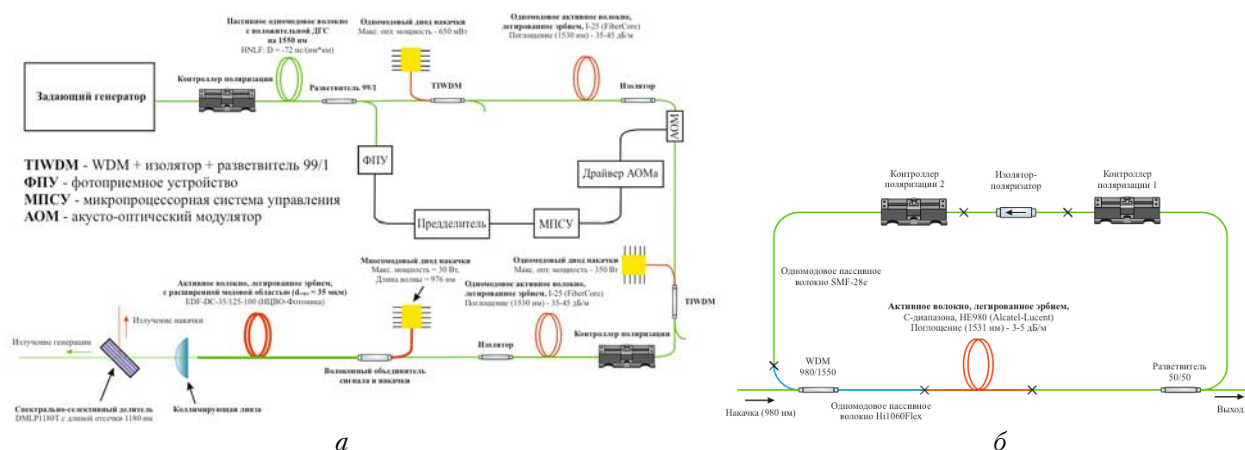


Рис.1. Схема лазерной установки (а) и задающего генератора УКИ (б)

Далее через разветвитель 99/1 в схему включался делитель частоты следования импульсов: 99% излучения поступало на акустооптический модулятор (АОМ), 1% – в электронный канал для управления АОМ. Сначала в электронном канале управления АОМ оптический сигнал преобразовывался в электронный сигнал для делителя и микроконтроллера STM32F429ZI на плате NUCLEO-F429ZI (МПСУ – микропроцессорная система управления), где он делился до требуемой частоты. Плата делителя частоты была выполнена на основе D-триггеров с коэффициентами 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256. Далее управляющий сигнал направлялся на драйвер, который осуществлял управление АОМ. Блок делителя частоты работал с коэффициентом деления 20. Для компенсации потерь, создаваемых делителем частоты, использовался второй каскад предусилителя. В котором 3 м коммерчески доступного активного волокна, легированного ионами Er^{3+} (I-25, FiberCore) с коэффициентом поглощения 40 ± 5 дБ/м на длине волны 1530 нм накачивалось излучением одномодового диода мощностью 350 мВт на длине волны 980 нм. Далее последовательность УКИ поступала в каскад мощного усиления через объединитель сигнала и накачки (DK Photonics) в 7-метровую катушку коммерчески доступного активного волокна, легированное ионами Er^{3+} , с двойной оболочкой с расширенной модовой областью ($d_{\text{мод.обл.}} = 25 \text{ мкм}$) (EDF-DC-35/125-100, НЦВО-Фотоника). Это волокно накачивалось многомодовым диодом излучением мощностью 20 Вт на длине волны 980 нм. На выходном конце волокна был сделан косой скол для предотвращения обратного отражения, после чего он был закреплен на стойке. Выходящий из волокна пучок коллимировался линзой с фокусным расстоянием 20 мм. Не поглотившаяся накачка отсеивалась на коммерчески доступном дихроическом зеркале (DMLP1180T, Thorlabs), уставленном под углом 45° к направлению распространения пучка.

Результаты эксперимента

На выходе задающего генератора была получена стабильная одноимпульсная генерация. Измеренные характеристики режима генерации представлены на рис. 2. Форма оптического спектра и его большая ширина соответствуют симиларитонному режиму генерации, который является наиболее оптимальным режимом для получения высокомоощных импульсов в режиме усиления чирпированных импульсов [15–18]. Ширина спектра составляла 34 нм по уровню –5 дБ. Представленное на рис. 2, б исследование динамики длительности импульса на выходе резонатора при различных длинах волокна с аномальной ДГС (SMF-28) подтвердило наличие положительного чирпа на выходе резонатора, что являлось важным условием для работы в режиме усиления чирпированных импульсов. Для дальнейшей работы была выбрана длина волокна SMF-28 равная 1,7 м, длительность импульса составила 2,7 пс (рис. 2, в). Высокое отношение сигнал/шум (62,2 дБ, рис. 2, г) характеризовало стабильность полученного режима генерации. Мощность излучения на выходе составила 8,1 мВт.

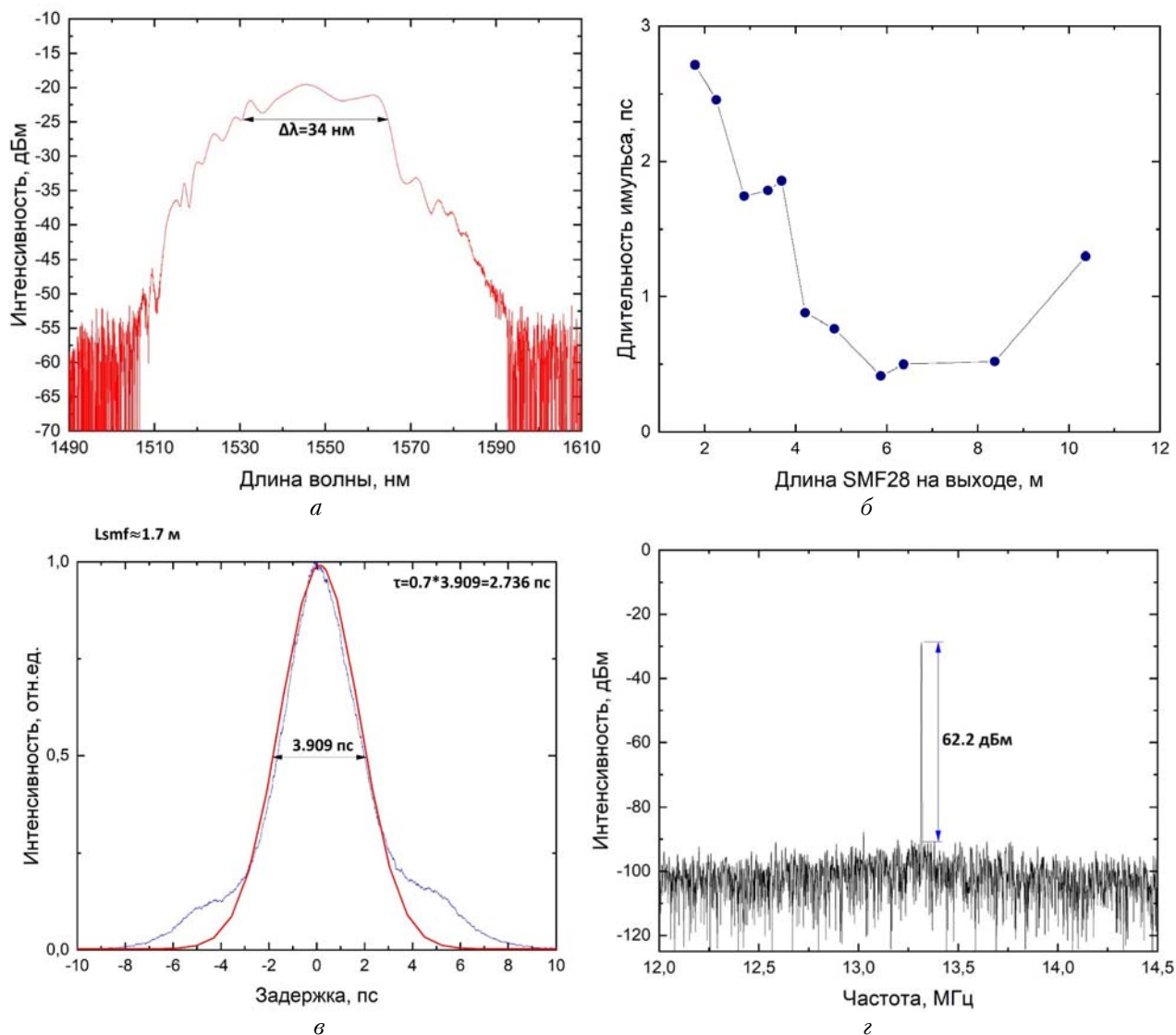


Рис. 2. Характеристики излучения на выходе задающего генератора: оптический спектр излучения (а); исследование динамики длительности импульса в зависимости от длины волокна с аномальной ДГС (SMF-28) (б); автокорреляционный сигнал (в); отношение сигнал/шум на фундаментальной частоте повторения (г)

Характеристики излучения после растягивания в 48-метровом пассивном волокне с положительной ДГС (HNLf, НЦВО-Фотоника) и усиления в первом каскаде предусилителя представлены на рис. 3. Импульс уширился до длительности 17,8 пс, выходная мощность составила 129 мВт. В блоке делителя частоты было осуществлено деление в 20 раз — от 13,3 МГц до 670 кГц. Осциллограммы сигнала до и после прохождения АОМа показаны на рис. 4. Стоит отметить, что интенсивность импульсов, пропущенных акустооптическим модулятором, уменьшилась примерно на 6 дБ, что соответствует его технической документации.

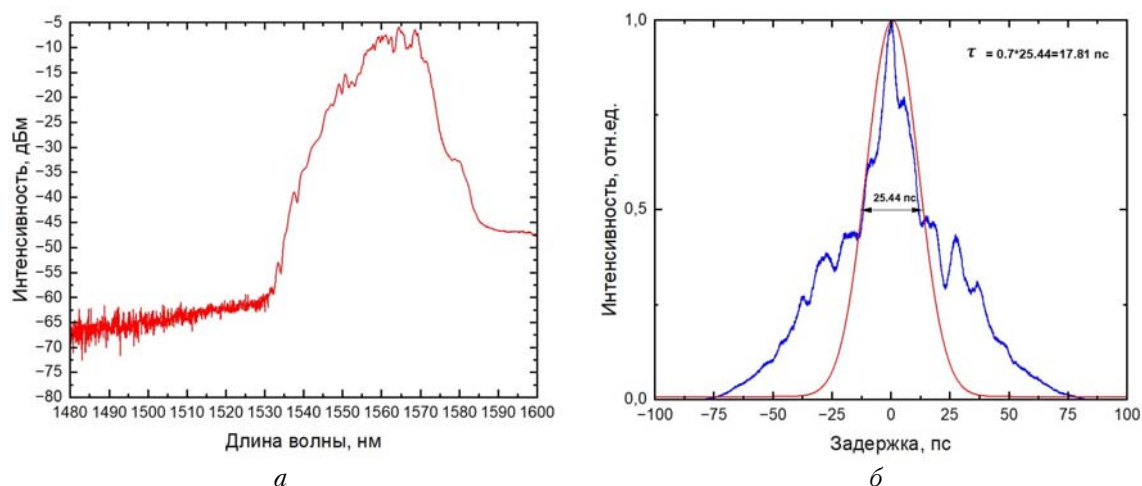


Рис.3. Характеристики излучения после растягивания импульсов и усиления их в первом каскаде предусилителя: оптический спектр излучения (а); автокорреляционный сигнал (б)

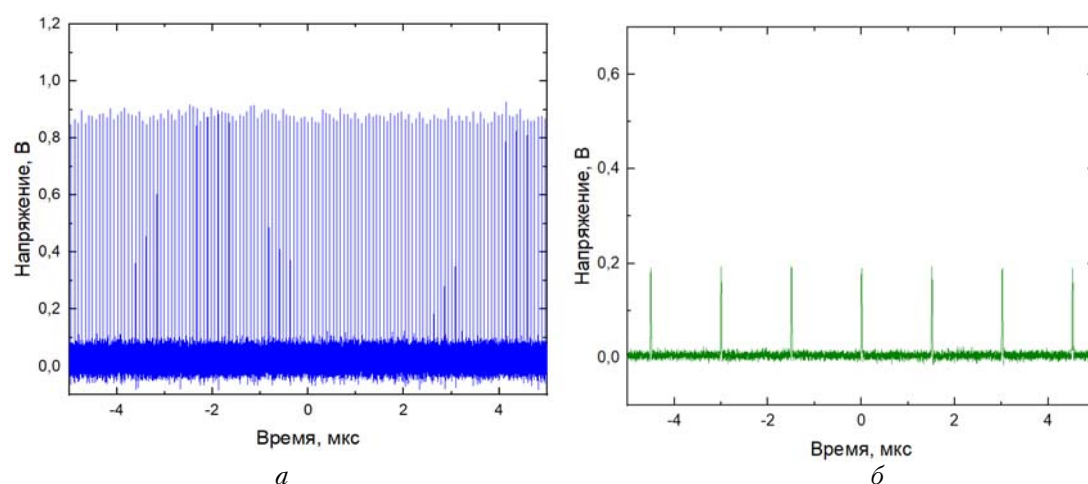


Рис. 4. Осциллограмма сигнала до прохождения АОМа (а) и после прохождения АОМа (б)

Характеристики излучения после усиления в каскаде мощного усилителя и отсеивания излучения накачки дихроническим зеркалом представлены на рис. 5. Форма спектра импульсов практически не претерпела изменений по сравнению с характеристиками на выходе первого каскада предусилителя. Также импульс незначительно уширился до 19,6 пс. Важно отметить, что вид автокорреляционной функции указывает на сохранение одноимпульсной генерации. Измеренная выходная мощность излучения составила 512 мВт.

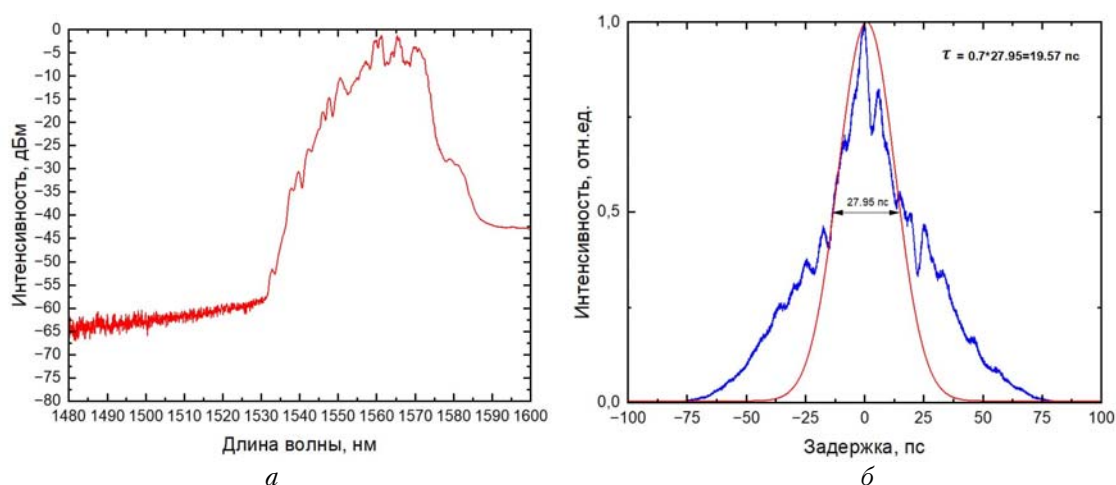


Рис. 5. Характеристики излучения после усиления в каскаде мощного усилителя: оптический спектр (а); автокорреляционный сигнал (б)

Заключение

В результате нам удалось экспериментально продемонстрировать работу лазерной системы УКИ для атравматичного ремоделирования кожных покровов. Спектральный диапазон генерации находился в области 1560 нм, что является наиболее оптимальным диапазоном длин волн для лазерных аппаратов, предназначенных для решения подобных задач в дерматологии и косметологии. Выходная длительность импульсов составила 19,6 пс, что меньше всех времен релаксации тканей кожи. Это позволит минимизировать термическое и акустическое повреждение при воздействии излучения разработанной установки на кожу. Частота повторения импульсов была равна 13,3 МГц, а средняя мощность излучения составляла 512 мВт, что соответствует требованиям для работы в режиме атравматичного «холодного» ремоделирования. Также была продемонстрирована возможность уменьшения частоты следования импульсов с коэффициентом деления от 1 до 20. Данная техническая возможность установки позволит исследовать метод атравматичного «холодного» ремоделирования кожи и подбирать наиболее оптимальные протоколы лечения. Важно отметить, что вся система, за исключением блока вывода излучения была сделана в полностью волоконном исполнении, что является перспективным решением с точки зрения минимизации габаритов и упрощения конструкции.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту государственного задания проект № FSN-2024-0018.

Список литературы

1. Alduosari M. et al. Influence of social media on cosmetic facial surgeries among individuals in Kuwait: employing the theory of planned behavior // Front Digit Health. Frontiers Media SA, 2025. V. 7.
2. Chen J. et al. The Zoom Boom: How Video Calling Impacts Attitudes towards Aesthetic Surgery in the COVID-19 Era // Aesthet Surg J. Oxford University Press, 2021. V. 41, N 12. P. NP2086–NP2093.
3. Thiboutot D, Gollnick H, Bettoli V. et al. New insights into the management of acne: an update from the Global Alliance to Improve Outcomes in Acne group. // J Am Acad Dermatol. 2009. V. 60, N 5. P. 1–50.
4. Tsvetkova A.B. Current trends in the preferences of russian and foreign consumers in aesthetic medicine // International Trade and Trade Policy. Plekhanov Russian University of Economics (PRUE), 2020. N 1. P. 107–124.
5. Aesthetic Medicine Market Size: Share and Trends Analysis Report By Procedure Type (Invasive Procedures, Non-invasive Procedures), by Region (North America, Europe, APAC, MEA, LATAM), and Segment Forecasts, 2019–2026. 2019.
6. Riedemann H.I. et al. Biological effect of laser-assisted scar healing (LASH) on standardized human three-dimensional wound healing skin models using fractional non-ablative 1540 nm Er:Glass or 1550 nm diode lasers // Lasers Surg Med. John Wiley and Sons Inc, 2024. V. 56, N 1. P. 100–106.
7. Bintanjoyo L., Indramaya D.M. Application of Picosecond Laser in Dermatology // Berkala Ilmu Kesehatan Kulit dan Kelamin. 2023. V. 35, N 2. P. 158–162.
8. Tao J. et al. Treatment of burn scars in Fitzpatrick phototype III patients with a combination of pulsed dye laser and non-ablative fractional resurfacing 1550 nm erbium:glass/1927 nm thulium laser devices // Scars Burn Heal. SAGE Publications, 2018. V. 4. P. 205951311875851.
9. Knight J.M., Kautz G. Sequential facial skin rejuvenation with intense pulsed light and non-ablative fractionated laser resurfacing in fitzpatrick skin type II–IV patients: A prospective multicenter analysis // Lasers Surg Med. John Wiley and Sons Inc, 2019. V. 51, N 2. P. 141–149.
10. Chen S.X., Cheng J., Watchmaker J., Dover J.S., Chung H.J. Review of Lasers and Energy-Based Devices for Skin Rejuvenation and Scar Treatment With Histologic Correlations // Dermatol Surg. 2022. V. 48, N 4. P. 441–448.
11. Chayavichitsilp P. et al. Comparison of fractional neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd:YAG) 1064-nm picosecond laser and fractional 1550-nm erbium fiber laser in facial acne scar treatment // Lasers Med Sci. Springer, 2020. V. 35, N 3. P. 695–700.
12. Kwon H.H. et al. Comparison of a 1064-nm neodymium-doped yttrium aluminum garnet picosecond laser using a diffractive optical element vs. a nonablative 1550-nm erbium-glass laser for the treatment of facial acne scarring in Asian patients: a 17-week prospective, randomized, split-face, controlled trial // Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology. Blackwell Publishing Ltd, 2020. V. 34, N 12. P. 2907–2913.
13. Wang Y. et al. Molecular Response of Skin to Micromachining by Femtosecond Laser // Front Phys. Frontiers Media S.A., 2021. V. 9.
14. Vogel A. et al. Mechanisms of femtosecond laser nanosurgery of cells and tissues // Applied Physics B: Lasers and Optics. 2005. V. 81, N 8. P. 1015–1047.
15. Ismaeel A., Krylov A. 17 fs environmentally stable erbium-doped all-fiber 23.76 MHz oscillator with extra-cavity nonlinearity and dispersion management // Opt Lett. 2024. V. 49, N 20. P. 5977.
16. Fedorenko A.Y. et al. Similariton-like Pulse Evolution in an Er-Doped Fiber Laser with Hybrid Mode Locking // Photonics. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024. V. 11, N 4.
17. Sazonkin S.G. et al. Analysis of the Passive Stabilization Methods of Optical Frequency Comb in Ultrashort-Pulse Erbium-Doped Fiber Lasers // Fibers. MDPI, 2022. V. 10, N 10.
18. Krylov A. et al. 10-μJ-level femtosecond pulse generation in the erbium CPA fiber source with microstructured hollow-core fiber assisted delivery and nonlinear frequency conversion // Appl Opt. Optica Publishing Group, 2023. V. 62, N 21. P. 5745.

V.M. Bogomolov, M.S. Plitarak, A.O. Prudnikov, A. Ismaeel, I.A. Smirnov, I.O. Orekhov, S.G. Sazonkin, V.E. Karasik. Development of a sub-picosecond laser system with a tunable pulse repetition rate for the atraumatic skin remodeling.

Today, the presence of skin pathologies and defects of varying degrees of intensity is considered as a source of serious psychological problems and social consequences for people. Lasers have proven to be an

effective tool for the treatment of atrophic and hypertrophic scars, as well as for the correction of other aesthetic imperfections, improving skin turgor, density, texture and pigmentation. One of the most effective laser sources for these purposes today is a non-ablative millisecond laser, which produces radiation at a wavelength of 1550 nm. Its action allows intensive skin remodelling by accelerating the regeneration of characteristic biological markers such as matrix metalloproteinases and interleukins. A major disadvantage of such a source is the thermal damage to the treated tissue, which leads to visual complications (erythema, oedema, etc.) and increased rehabilitation time. The use of laser pulses with a duration shorter than all the characteristic relaxation times in tissues (> 20 ps) makes it possible to eliminate the thermal effects on the tissue and, at the same time, to stimulate the growth of biological markers of remodeling. Therefore, the aim of this work was to study methods of obtaining a compact laser source of simple configuration with a pulse duration not exceeding 20 ps, a radiation spectrum in the range from 1530 to 1580 nm with a variable pulse repetition rate in the range from hundreds of kHz to units of MHz (so as to exceed the ablation threshold) and an average power of not less than 500 mW.

The reference oscillator was designed based on a 15.66 m long circular erbium fiber resonator with a total group velocity dispersion (GVD) of 0.005 ps^2 , producing a stable sequence of pulses in the similariton mode at a repetition rate of 13.3 MHz. The output pulse duration was 2.5 ps, the emission spectrum was 42 nm wide at -5 dB level with $\lambda_{\text{center}} = 1541$ nm, and the average emission power was 8.1 mW. The pulses were then stretched in a 48 m passive fiber loop with positive GVD ($D = -72 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$) at a wavelength of 1550 nm to a duration of 30 ps, which was necessary to control the peak radiation power in the fibers.

The radiation was then amplified in the first stage of the preamplifier, which consisted of 5 meters of active erbium-doped I-25 single-mode fiber with an absorption coefficient of 40 dB/m. This fiber was pumped by continuous emission from a pump diode at a wavelength of 980 nm with a power of 650 mW. The amplified pulse sequence was then thinned by an acousto-optic modulator (AOM) with a division factor ranging from 2 to 20. The second preamplifier stage, consisting of 3 m of I-25 active fiber pumped by continuous emission from a pump diode at a wavelength of 980 nm with a power of 350 mW, compensated for the losses caused by the AOM. The pulse sequence was then amplified in a 7 m loop of a large mode area erbium-doped active fiber ($d_{\text{mod.area}} = 25 \text{ }\mu\text{m}$) pumped by continuous emission from a pump diode at a wavelength of 980 nm with a power of 30 W. As a result, a sequence of pulses with a duration of 20 ps was obtained at a repetition rate of 0.67...13.3 MHz, and the average radiant power reached 512 mW.