

Измерение шумов интенсивности и стабильности частоты повторения импульсов Cr:ZnSe-лазера с пассивной синхронизацией мод

© С.О. Леонов^{1,2}, М.П. Фролов¹, Ю.В. Коростелин¹, Я.К. Скасырский¹, П.Ю. Федоров^{1,3},
А.С. Шелковников¹, В.И. Козловский¹, А.Н. Киреев¹, М.А. Губин¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

³ Институт горения и газовой динамики, Университет Дуйсбурга-Эссена,
47057 Дуйсбург, Германия

e-mail: leonov.sto@gmail.com

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.

В окончательной редакции 20.12.2021 г.

Принята к публикации 30.12.2021 г.

Представлены результаты измерения шумов интенсивности и стабильности частоты повторения для Cr:ZnSe-лазера с пассивной синхронизацией мод и накачкой тулиевым волоконным лазером на длине волны $1.94 \mu\text{m}$. Проведено сравнение параметров стабильности и шумов интенсивности Cr:ZnSe-лазера для трех различных режимов генерации. Лазер работал с частотой повторения импульсов 129.5 MHz и центральной длиной волны $2.45 \mu\text{m}$.

Ключевые слова: гребенка оптических частот, синхронизация мод, шумы интенсивности, стабильность частоты повторения.

DOI: 10.21883/OS.2022.04.52274.51-21

Введение

Компактные стабильные синтезаторы радиочастоты, основанные на оптическом стандарте частоты (ОСЧ), доказали свою востребованность для задач метрологии времени и частоты, навигации [1]. Кроме того, такие синтезаторы радиочастоты на основе ОСЧ могут использоваться в качестве простых лабораторных инструментов, обеспечивающих стабильную частоту в радиодиапазоне. Уже продемонстрировано несколько реализаций систем синтеза радиочастоты на основе оптического стандарта, сущность которых заключается в использовании лазера с синхронизацией мод и сверхстабильного лазера непрерывного действия с относительной нестабильностью частоты в диапазоне от 10^{-14} до 10^{-18} [2,3]. В зависимости от способа проектирования оба ключевых элемента систем синтеза стабильной радиочастоты (стабильный непрерывный лазер и лазер с синхронизацией мод) будут обладать преимуществами и недостатками [4].

Одна из концепций создания непрерывного лазера со стабилизированной частотой основана на привязке частоты лазера к узким линиям поглощения газов [5], но в этом случае система формирует сигнал стабильной частоты в диапазоне 10^{14} Hz. Для получения стабильной частоты в диапазоне 10^6 – 10^9 Hz к стабилизированному непрерывному лазеру оптически привязывают фемтосекундный лазер, что позволяет стабилизировать частоту повторения импульсов на выходе фемтосекундного лазера f_{rep} по опорной частоте непрерывного лазера [6].

Необходимо отметить, что основным фактором, ограничивающим итоговую стабильность частоты повторения, является стабильность оптического стандарта частоты, зависящая от параметров линии поглощения газа. Одним из способов повышения стабильности ОСЧ, использованного в [6], может быть переход на другие линии поглощения метана. Так, например, несколько перспективных линий метана расположены на длине волны $2.36 \mu\text{m}$, а преимущество использования этих линий продемонстрировано в работе [7], где было проведено измерение ширины линии метана с помощью двухмодового непрерывного лазера на селениде цинка, легированного хромом. С другой стороны, тот же активный кристалл возможно эффективно использовать для создания лазеров с синхронизацией мод [8], которые могут быть легко оптически привязаны к стабильному непрерывному лазеру Cr:ZnSe за счет перекрытия их спектров генерации. Для ряда применений фемтосекундный лазер используется как отдельный элемент без привязки к оптическому стандарту частоты, а основное внимание уделяется таким параметрам как шумы интенсивности и стабильность частоты повторения. На данный момент исследования таких параметров для фемтосекундных лазеров на основе твердотельного кристалла Cr:ZnSe проведены лишь частично. В работе [9] представлены измерения шумов интенсивности для фемтосекундного лазера на кристалле Cr:ZnSe с накачкой Er-волоконным лазером на длине волны $1.55 \mu\text{m}$. Лазер работал с частотой повторения импульсов 300 MHz, длительно-

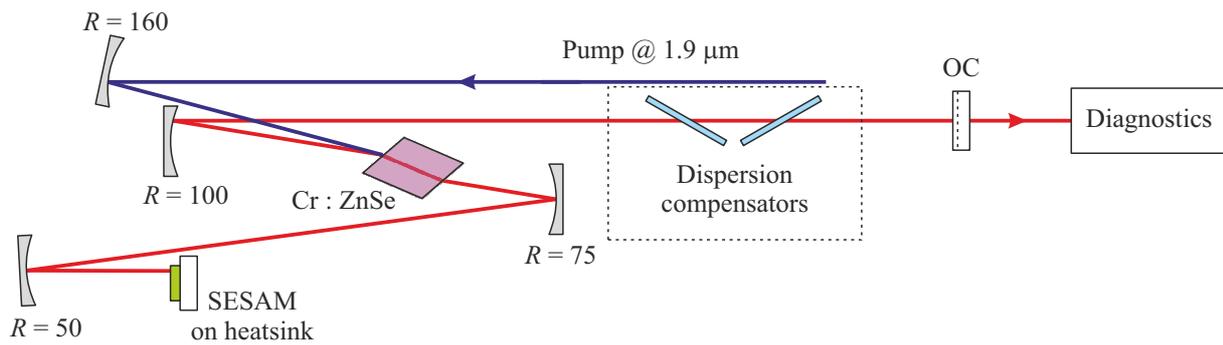


Рис. 1. Схема Cr:ZnSe-лазера с пассивной синхронизацией мод.

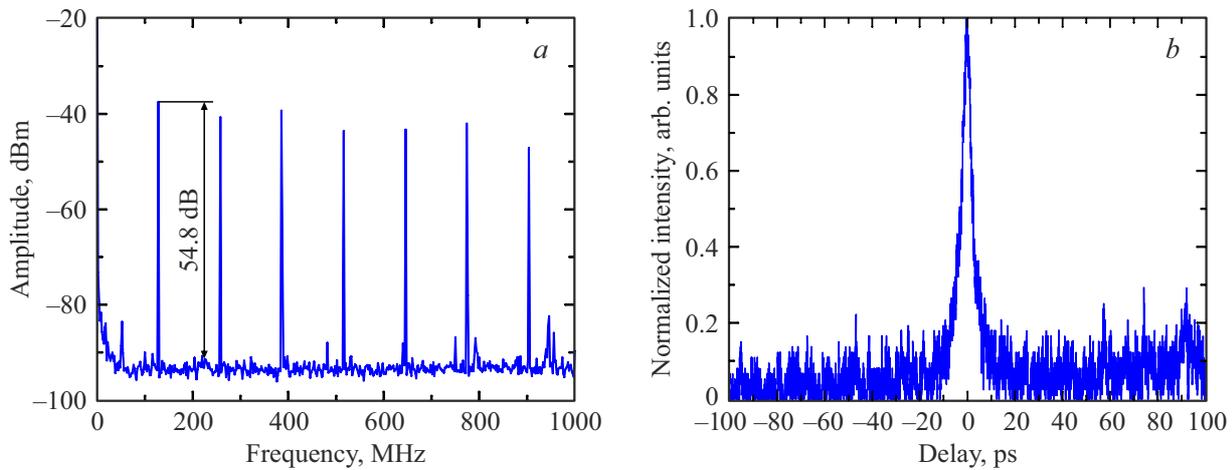


Рис. 2. Радиочастотный спектр (a) и автокорреляция по интенсивности (b) для режима одиночного импульса (пропускание выходного зеркала резонатора 2%).

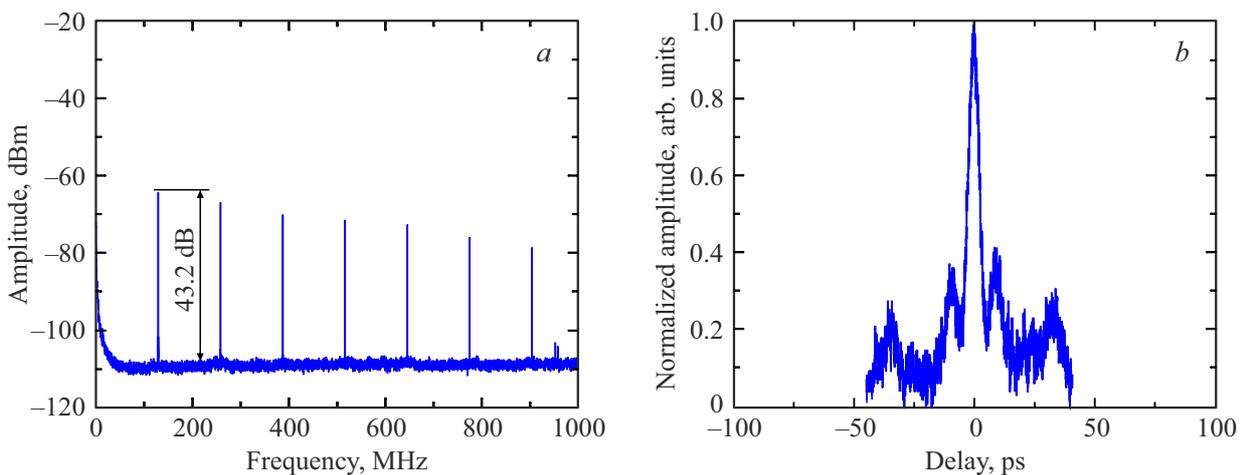


Рис. 3. Радиочастотный спектр (a) и автокорреляция по интенсивности (b) для режима одиночного импульса (пропускание выходного зеркала резонатора 5%).

стью импульса 47 fs, выходной мощностью 250 mW и интегральным значением шума интенсивности порядка 1 mrad в диапазоне частот от 100 Hz до 10 MHz, что соответствует абсолютному временному джиттеру 530 fs. Одним из недостатков данного лазера является

наличие остаточных релаксационных шумов источника накачки. Авторы работы [10] использовали в качестве источника накачки лазерные диоды на длине волны 1.65 μm, что позволило устранить влияние релаксационных шумов волоконной накачки, хотя интегральные

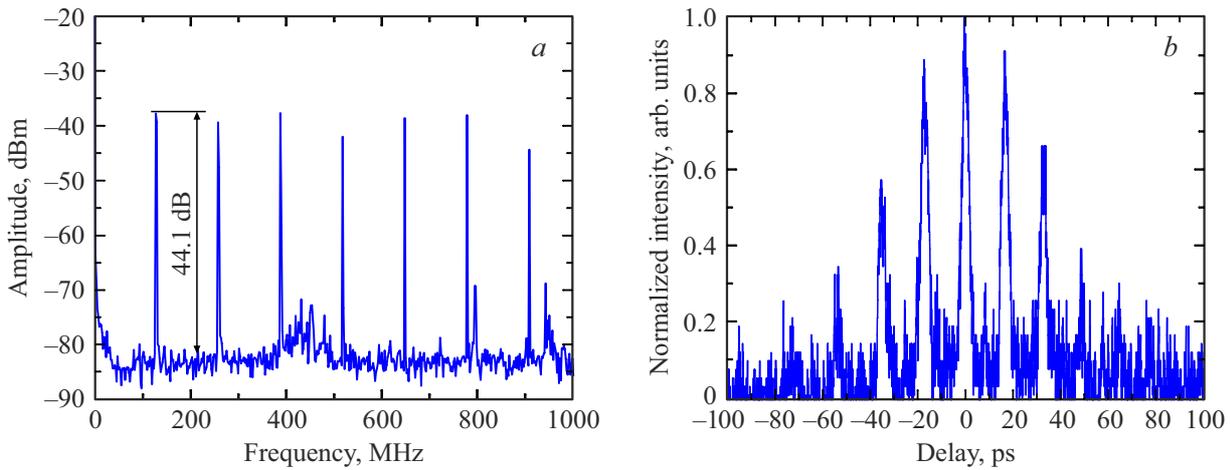


Рис. 4. Радиочастотный спектр (а) и автокорреляция по интенсивности (b) для режима связанных импульсов (пропускание выходного зеркала резонатора 2%).

шумы интенсивности составили 6.8 mrad (в диапазоне от 10 Hz до 1 MHz).

В настоящей работе проводится измерение шумов интенсивности и стабильности частоты повторения для Cr:ZnSe-лазера с пассивной синхронизацией мод и накачкой тулиевым волоконным лазером на длине волны 1.94 μm для трех режимов работы.



Рис. 5. Схема измерения шумов интенсивности и стабильности частоты повторения Cr:ZnSe-лазера.

Описание экспериментальной установки

В качестве активного элемента использовался монокристалл селенида цинка, легированный ионами хрома. Кристалл был выращен из газовой фазы на подложку, с одновременным легированием ионами хрома, в Троицком обособленном подразделении Физического института им. П.Н. Лебедева РАН [11]. Схема Cr:ZnSe-лазера с пассивной синхронизацией мод представлена на рис. 1.

Активный элемент толщиной 2.2 mm был закреплен в медной оправе с водяным охлаждением и размещался в Z-образном резонаторе между двумя сферическими зеркалами с радиусами 100 и 75 mm. Для синхронизации мод использовалось полупроводниковое зеркало с насыщающимся поглотителем (SESAM). В качестве источника накачки использовался непрерывный тулиевый волоконный лазер, работающий на длине волны 1940 nm. Для компенсации суммарной дисперсии в резонаторе использовались плоскопараллельные пластинки из фторида магния и сапфира. С пластинками из фторида магния лазер работал в режиме одиночного импульса, а с сапфировыми пластинками режим работы менялся на генерацию связанных импульсов. С подробным описанием схемы лазера и его режимов работы можно ознакомиться в работе [12].

Результаты измерений

Исследования шумов интенсивности и стабильности частоты повторения для Cr:ZnSe-лазера были проведены для нескольких конфигураций и режимов работы. Первый режим работы был реализован с компенсационными пластинками из фторида магния и выходным зеркалом лазерного резонатора с пропусканием 2%. В такой конфигурации лазер работал в режиме одиночных импульсов с выходной мощностью 15 mW, частотой повторения 129.5 MHz, отношением сигнал/шум для режима синхронизации мод 54.8 dB на первой гармонике радиочастотного спектра и длительностью импульса 3 ps. Центральная длина волны лазерной генерации составляла 2.453 μm, а ширина спектра 4 nm. Измеренная автокорреляция интенсивности на выходе лазера и радиочастотный спектр на выходе фотоприемника приведены на рис. 2.

Второй режим был реализован с компенсационными пластинками из фторида магния и выходным зеркалом резонатора 5%. В такой конфигурации лазер работал в режиме одиночных импульсов с выходной мощностью 45 mW, частотой повторения 129.5 MHz, отношением сигнал/шум 43.2 dB и длительностью импульса 3.6 ps. Центральная длина волны лазерной генерации составляла 2.45 μm, а ширина спектра 3 nm. Измеренная автокорреляция интенсивности и радиочастотный электрический спектр на выходе лазера приведены на рис. 3.

Третий режим был реализован с компенсационными пластинками из сапфира и выходным зеркалом резонатора 2%. В такой конфигурации лазер работал в режиме связанных импульсов с выходной мощностью 18 mW, частотой повторения 129.5 MHz, отношением сигнал/шум 44.1 dB и длительностью одиночного импульса 2.3 ps и временным интервалом между соседними импульсами в пачке 16.7 ps. Центральная длина волны лазерной генерации составляла $2.457 \mu\text{m}$, а ширина спектра 5 nm. Измеренная автокорреляция интенсивности и радиочастотный электрический спектр на выходе лазера приведены на рис. 4.

Схема измерения шумов и стабильности частоты повторения приведена на рис. 5. Излучение лазера подавалось на быстродействующий высокочастотный приемник излучения (PD24-01-HS, IBSG Co., Ltd.), а сигнал с приемника излучения регистрировался 100 kHz-анализатором радиочастотного спектра (SR760, Stanford Research) и универсальным 350 MHz-частотомером (53230A, Keysight).

Результаты измерения шумов интенсивности для трех реализованных режимов генерации приведены на рис. 6.

Относительная девиация Аллана была измерена на различных временах усреднения, а полученные результаты представлены на рис. 7. Кроме того, на этом же рисунке изображена кривая стабильности эрбиевого волоконного лазера, представленная в работе [13].

Обсуждение результатов

Все три режима генерации обладают достаточно высоким отношением сигнал/шум, что указывает на качество синхронизации мод, при этом наибольшее значение 54.8 dB реализуется для режима одиночного импульса, когда в резонаторе установлены пластинки из фторида магния и выходное зеркало с пропусканием 2%. Данный режим обладает максимальным значением относительной девиации Аллана $\sigma_y = 5.64 \cdot 10^{-8}$ для времени усреднения 1 s, по сравнению с режимами работы, когда реализуется генерация связанных импульсов. Необходимо отметить, что изменение (с 2 до 5%) пропускания выходного зеркала резонатора позволяет не только увеличить выходную мощность Cr:ZnSe-лазера

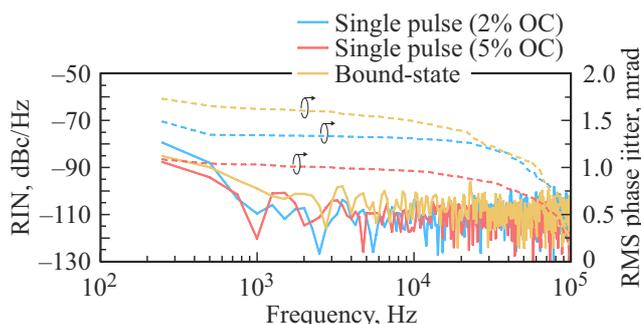


Рис. 6. Измерения шумов интенсивности для Cr:ZnSe-лазера.

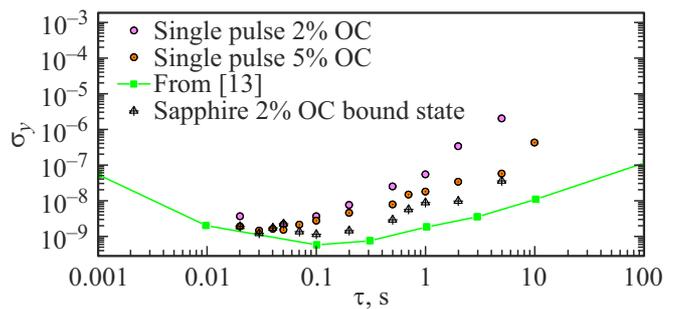


Рис. 7. Относительная девиация Аллана.

с 15 до 45 mW (при фиксированной мощности накачки и незначительном увеличении длительности импульса), а также улучшить стабильность частоты повторения до значения $\sigma_y = 1.83 \cdot 10^{-8}$ для времени усреднения, равного 1 s. Полученные результаты стабильности частоты повторения твердотельного лазера на кристалле Cr:ZnSe показывают сопоставимость с результатами для волоконного лазера, представленными в работе [13]. Однако следует отметить, что при выполнении измерений в лаборатории не осуществлялся контроль таких параметров как температура и влажность, резонатор лазера не был изолирован специальным кожухом, а также не реализовывалась продувка азотом для уменьшения влияния поглощения на парах воды, которые содержатся в воздухе лаборатории. Таким образом, данная работа демонстрирует возможность реализации лазера на кристалле Cr:ZnSe с пассивной синхронизацией мод в естественных условиях, что является значительным преимуществом, создающим возможность широкого применения данной технологии.

Заключение

В настоящей работе проведены измерения шумов интенсивности и стабильности частоты повторения для трех конфигураций твердотельного лазера на кристалле Cr:ZnSe с пассивной синхронизацией мод. Наименьшее значение интегрального временного джиттера (1.5 mrad) получено для режима одиночных импульсов, когда в качестве компенсатора дисперсии используются две пластинки из фторида магния и выходное зеркало с пропусканием 2%. Лучшая стабильность частоты повторения на уровне $9.1 \cdot 10^{-9}$ для времени усреднения 1 s реализуется для режима связанных импульсов, когда в качестве компенсатора дисперсии используются две сапфировых пластинки. Полученные результаты показывают, что по параметрам стабильности твердотельный и волоконный лазеры могут быть сопоставимы. Таким образом, твердотельный лазер перспективен для использования в качестве делителя оптической частоты.

Финансирование работы

Работа выполнена за счёт средств Российского научного фонда, проект № 20-79-00155.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Riehle, P. Gill, F. Arias, L. Robertsson. *Metrologia*, **55** (2), 188–200 (2018). DOI: 10.1088/1681-7575/aaa302
- [2] X. Xie, R. Bouchand, D. Nicolodi, M. Giunta, W. Hänsel, M. Lezius, A. Joshi, S. Datta, C. Alexandre, M. Lours, P.-A. Tremblin, G. Santarelli, R. Holzwarth, Y.L. Coq. *Nature Photon*, **11**, 44–47 (2017). DOI: 10.1038/nphoton.2016.215
- [3] А.С. Шелковников, А.И. Бойко, А.Н. Киреев, А.В. Таусенев, Д.А. Тюрников, Д.В. Шепелев, А.В. Конященко, М.А. Губин. *Квантовая электроника*, **49** (3), 272–277 (2019). DOI: 10.1070/QEL16909 [A.S. Shelkovnikov, A.I. Boiko, A.N. Kireev, A.V. Tausenev, D.A. Tyurikov, D.V. Shepelev, A.V. Konyashchenko, M.A. Gubin. *Quantum Electronics*, **49** (3), 272–277 (2020). DOI: 10.1070/QEL16909].
- [4] F. Riehle. *Frequency standards: basics and applications* (John Wiley & Sons, 2006).
- [5] V.L. Velichansky, M.A. Gubin. *Physics-Uspekhi*, **52** (11), 11531158 (2009). DOI: 10.3367/UFNe.0179.200911h.1219
- [6] М.А. Губин, А.Н. Киреев, А.В. Конященко, П.Г. Крюков, А.В. Таусенев, Д.А. Тюрников, А.С. Шелковников. *Квантовая электроника*, **38** (7), 613–614 (2008). DOI: 10.1070/QE2008v038n07ABEH013914 [M.A. Gubin, A.M. Kireev, A.V. Konyashchenko, P.G. Kryukov, A.V. Tausenev, D.A. Tyurikov, A.S. Shelkovnikov. *Quantum Electronics*, **38** (7), 613–614 (2008). DOI: 10.1070/QE2008v038n07ABEH013914].
- [7] M. Gubin et al. *2012 European Frequency and Time Forum*, (IEEE 2012), pp. 459–461. DOI: 10.1109/EFTF.2012.6502425
- [8] I.T. Sorokina, E. Sorokin. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 1, pp. 273–291 (2015), Art no. 1601519. DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2341589
- [9] Y. Wang, T.T. Fernandez, N. Coluccelli, A. Gambetta, P. Laporta, G. Galzerano. *Opt. Express*, **25**, 25193–25200 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.025193
- [10] N. Nagl, S. Gröbmeyer, V. Pervak, F. Krausz, O. Pronin, K.F. Mak. *Opt. Express*, **27**, 24445–24454 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.024445
- [11] V.A. Akimov, M.P. Frolov, Y.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, A.I. Landman, Y.P. Podmar'kov, A.A. Voronov. *Phys. Stat. Sol. C*, **3** (4), 1213–1216 (2006). DOI: 10.1002/pssc.200564723
- [12] S.O. Leonov, M.P. Frolov, Y.V. Korostelin, et al. *Appl. Phys. B*, **127**, 56 (2021). DOI: 10.1007/s00340-021-07604-x
- [13] М.А. Губин, А.Н. Киреев, А.В. Таусенев, А.В. Конященко, П.Г. Крюков, Д.А. Тюрников, А.С. Шелковников. *Laser Phys.*, **17** (11), 1286–1291 (2007). DOI: 10.1134/S1054660X07110023