

09.2

Стабилизация одночастотного режима генерации импульсного твердотельного лазера с инжекцией излучения

© А.В. Михайлюк, К.Л. Губский, Т.В. Казиева, А.П. Кузнецов

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия
E-mail: glizerogen@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 13 апреля 2022 г.

Принято к публикации 13 апреля 2022 г.

Представлены результаты разработки одночастотной импульсной лазерной системы Nd:YAG на длине волны 660 nm с длительностью импульсов 50 ns и частотой повторения импульсов 1–10 Hz, работающей в режиме модулированной добротности с инжекцией внешнего излучения. Рассмотрены различные схемы формирования системы обратной связи для управления спектральным составом лазерной системы. Показано, что метод привязки частоты задающего генератора к моде резонатора импульсного лазера обладает преимуществами по сравнению с методом стабилизации длины резонатора.

Ключевые слова: твердотельный лазер, модуляция добротности, инжекция излучения.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52609.19168

Высокомощные одночастотные твердотельные лазеры, работающие в импульсном режиме, находят применение в лазерной интерферометрии, лазерной спектроскопии высокого разрешения, голографии и т.д. [1,2]. Такие лазеры позволяют получить видимые или инфракрасные импульсы длительностью 10–100 ns с энергиями уровня порядка миллиджоулей, которые впоследствии можно усилить вплоть до килоджоульного уровня.

Возможность получить одночастотные импульсы значительно расширяет область применения импульсных лазеров в интерферометрии. В частности, излучение лазеров, работающих в одночастотных режимах, имеет заметно большую длину когерентности по сравнению со случаем многочастотного режима. Это позволяет использовать одночастотные источники излучения для построения неравноплечных интерферометров. Такие интерферометры применяются в качестве измерительных систем в экспериментах по исследованию воздействия ударных волн мегабарного уровня на вещество в физике высоких плотностей энергии [3–6]. При этом малая длительность исследуемых процессов (~ 10 ns) требует использования в качестве источника излучения только импульсных лазеров, так как только они могут обеспечить достаточную для регистрации освещенность мишени.

Разработанный лазер предназначен для использования в качестве источника зондирующего излучения при исследовании взаимодействия лазерного излучения килоджоульного уровня энергии с веществом в составе измерительного комплекса LIV (Line imaging velocimetry) [7]. LIV является системой из двух неравноплечных интерферометров с визуализацией поля для экспериментов на лазерной установке килоджоульного уровня энергии „Луч“ (Саров, Россия) [8]. Для предотвращения засветки измерительного тракта силовым излучением длина

волны излучения подсветки должна быть удалена от гармоник установки „Луч“. Лазерная установка „Луч“, в которую интегрирован комплекс LIV, использует для генерации переход ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ионов Nd^{3+} (1.06 μm). Поэтому в качестве рабочего перехода для зондирующего лазера был выбран переход ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ Nd^{3+} с длиной волны 1319 nm в матрице YAG. Сечение данного перехода на порядок меньше, чем для перехода 1064 nm ($8.7 \cdot 10^{-20}$ и $4 \cdot 10^{-19}$ cm^2 соответственно).

На рис. 1 показана схема лазерной системы.

Резонатор импульсного лазера 1 имеет длину 850 mm. Он ограничен глухим зеркалом M1 и зеркалом M3 с коэффициентом отражения 70% и включает в себя квантрон с двумя 5-миллиметровыми кристаллами $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, зеркало с поляризационным покрытием M2, служащее для инжекции излучения в резонатор, и ячейку Поккельса PC1. Ячейка и поляризатор образуют четвертьволновой затвор для излучения с длиной волны 1319 nm. Для селекции поперечных мод используется диафрагма D.

В усилителе используется такой же квантрон с двумя 5-миллиметровыми кристаллами $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$. После двухпроходного усиления производится удвоение частоты с помощью кристалла KTiOPO_4 (КТР). Полученное излучение спектрально достаточно удалено от гармоник силового излучения установки „Луч“ (1054 и 527 nm) и в то же время воспринимается человеческим глазом, что упрощает работу с лазером.

Без принятия дополнительных мер для сужения спектра лазер работает в многомодовом режиме, генерируя импульсы длительностью 50 ns. Ширина спектра при этом составляет > 120 GHz, что почти на три порядка превышает межмодовый интервал и соответствует длине когерентности < 0.2 mm. Этой длины недостаточно для работы неравноплечного интерферометра LIV, так как в

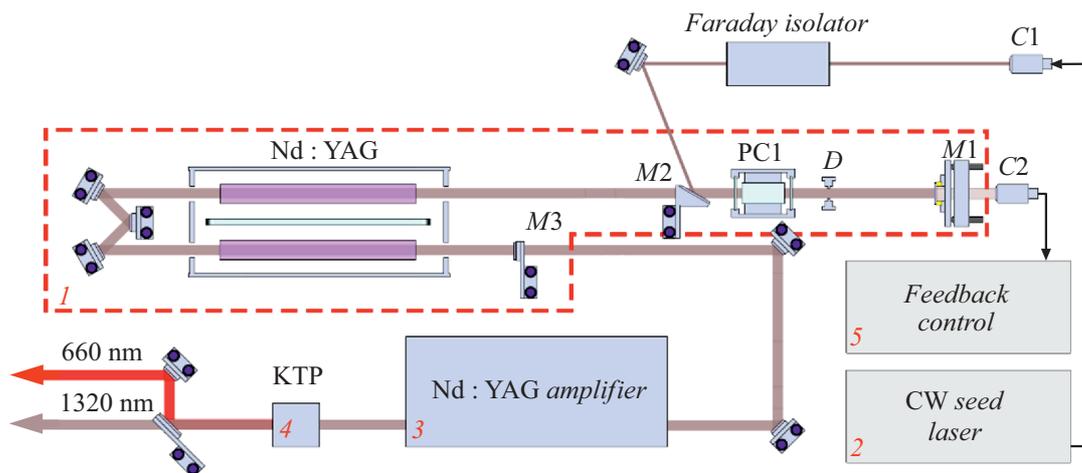


Рис. 1. Лазерная система. 1 — импульсный лазер Nd:YAG с модулированной добротностью, 2 — полупроводниковый инжектирующий лазер, 3 — двухпроходный усилитель, 4 — преобразователь во вторую гармонику, 5 — система стабилизации, $M1$ – $M3$ — зеркала, $C1$, $C2$ — коллиматоры, D — диафрагма, PC1 — ячейка Погкельса.

его конструкции используются линии задержки большей величины.

Есть несколько способов достичь одночастотного режима. В непрерывных лазерах применяется внутррезонаторная фильтрация с использованием эталона Фабри–Перо [9]. В режиме активной модуляции добротности используется система задающий генератор–усилитель. Возможны два метода реализации системы задающий генератор–усилитель: инжекция одночастотного непрерывного излучения в резонатор импульсного лазера [10,11] и усиление излучения непрерывного лазера в последовательности квантовых усилителей [3,4].

В описываемой лазерной системе в качестве задающего генератора выступал одночастотный полупроводниковый лазер мощностью 20 mW. Центральная длина волны его рабочего диапазона равна 1310 nm. При этом возможна ее отстройка на 20 nm как в коротковолновую, так и в длинноволновую сторону. Излучение данного лазера инжектировалось в резонатор импульсного лазера. По сравнению с использованием цепочки усилителей такая система существенно компактнее, дешевле, она менее требовательна к качеству волнового фронта и максимальной мощности задающего генератора. Излучение полупроводникового лазера имеет интенсивность, на несколько порядков превышающую интенсивность спонтанного шума, что позволяет инициировать мощный одночастотный импульс. Реализовать данный режим можно только в том случае, если частота полупроводникового лазера попадает в одну из продольных мод резонатора импульсного лазера. Проблема совмещения мод задающего генератора и импульсного лазера обычно не рассматривается [11], хотя именно она является определяющей в вопросе использования таких лазерных систем в качестве стабильного источника одночастотного мощного излучения.

Для получения одночастотной генерации необходимо стабилизировать относительно друг друга частоты импульсного лазера и задающего генератора. Для компенсации расхождений между ними, вызванных влиянием температурных и вибрационных помех, была применена система автоподстройки.

В основе системы автоподстройки лежит синхронное детектирование модулированного отклика оптической системы, который посредством подобранных коэффициентов усиления пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора преобразуется в управляющий сигнал. Модуляция осуществляется посредством перемещения зеркала $M1$ с частотой 20 kHz, закрепленного на пьезоэлементе ПП-12. Задача системы обратной связи — непрерывно отслеживать форму функции производной отклика оптической системы и формировать управляющий сигнал, сводящий сигнал ошибки к нулю. Сигнал обратной связи формируется на основе интерференционного сигнала от резонатора, источником излучения для которого является задающий генератор. Поиск интерференционного максимума происходит между импульсами накачки. Инжектируемое излучение отражается от зеркала $M1$, проходит через все внутррезонаторные оптические элементы, отражается от выходного зеркала $M3$ и возвращается обратно к глухому зеркалу $M1$ (рис. 1). Небольшая часть излучения задающего генератора, являющаяся результатом интерференции излучения на первом и втором проходах резонатора $M1$ – $M3$, проходит через зеркало $M1$ и попадает в фотоприемник $C2$. Она и служит источником сигнала ошибки.

Было реализовано два варианта подстройки частоты задающего генератора и резонатора. В первом варианте длина резонатора импульсного лазера подстраивается под частоту задающего генератора посредством линейного перемещения глухого зеркала пьезоэлементом

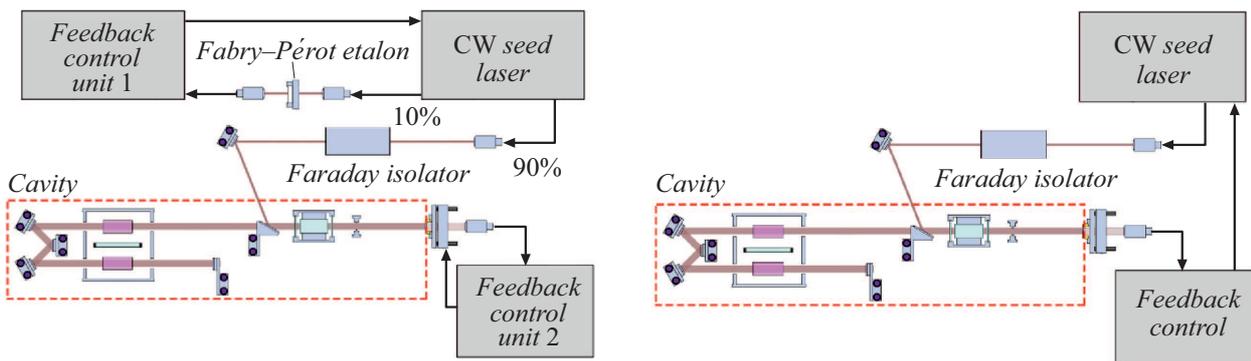


Рис. 2. Схемы привязки резонатора к стабилизированному излучению задающего генератора (слева) и привязки частоты задающего генератора к продольным модам резонатора импульсного лазера (справа).

ПП-12 с диапазоном перемещения до $2.4\ \mu\text{m}$ (левая схема на рис. 2). В этой схеме задающий генератор дополнительно был оснащен системой стабилизации частоты к полосе пропускания термостабилизированного эталона Фабри–Перо, что позволило исключить дрейф частоты задающего генератора за пределы диапазона перестройки длины резонатора импульсного лазера.

Во втором варианте системы автоподстройки достижение одномодового режима генерации осуществлялось за счет коррекции частоты задающего генератора под изменение длины нестабилизированного резонатора (правая схема на рис. 2). Частота задающего генератора могла регулироваться током накачки в диапазоне шириной $15\ \text{GHz}$. Межмодовый интервал импульсного лазера составляет соответственно $176\ \text{MHz}$, такой диапазон спектральной подстройки задающего генератора соответствует возможности непрерывного отслеживания положения моды при изменении длины резонатора в пределах $56\ \mu\text{m}$. Это с запасом больше реально присутствующих в ходе работы лазерной системы тепловых и вибрационных помех (при прогревом резонатора).

Для оценки стабильности получаемого одночастотного режима было проведено сравнение временного профиля лазерного импульса и его повторяемости для режима работы многочастотной и одночастотной генерации с двумя режимами стабилизации. Генерация в многочастотном режиме из-за интерференции мод имела вид, представленный на рис. 3, *a*. Полоса используемого фотоприемника HFBR-2416 составляла $125\ \text{MHz}$, что ограничивало количество наблюдаемых мод, участвующих в биениях. Сигнал в случае одночастотной генерации представляет собой гладкий импульс длительностью $\sim 50\ \text{ns}$ с частотой повторения от 1 до $10\ \text{Hz}$. На рис. 3, *b* показан его вид. После усилителя и преобразователя во вторую гармонику формируется импульс с энергией до $30\ \text{mJ}$. Видно, что в одночастотном режиме с инжекцией излучения генерация импульса происходит приблизительно на $100\ \text{ns}$ быстрее относительно времени начала многочастотной генерации. Это связано с ускоренным развитием генерации в присутствии излуче-

ния задающего генератора. Время развития генерации после открытия затвора характеризует эффективность совмещения мод задающего генератора и импульсного лазера. Это дает возможность создать систему автоподстройки резонаторов на основе критерия минимального времени развития генерации. Однако такой подход дает информацию о состоянии лазерной системы только в момент импульса и не имеет возможности отслеживать ее состояние между импульсами, что существенно снижает спектр возмущений, которые возможно скомпенсировать.

Величиной, используемой для оценки режима работы лазерной системы, был выбран разброс времени задержки генерации лазерного импульса (максимума интенсивности излучения) относительно времени открытия затвора. Вопрос зависимости задержки от других факторов исследовался отдельно. В многомодовом режиме при отсутствии внешней инжекции излучения разброс времени задержки не превышал $2\ \text{ns}$, что свидетельствует о хорошей стабильности лазерной системы. Значительное отличие стабильности многомодового режима от одномодового объясняется связью времени задержки и эффективности инжекции излучения. В многомодовом режиме стабильность не связана с положением конкретных мод резонатора, в то время как в одномодовом режиме время начала развития генерации зависит от степени перекрытия спектра излучения задающего генератора и продольной моды резонатора. На рис. 3, *c* и *d* представлены результаты измерения разброса задержки в первом и втором варианте подстройки для серии из 1000 выстрелов с частотой следования $1\ \text{Hz}$. Для режима стабилизации длины резонатора импульсного лазера разброс задержки составил $20.1 \pm 0.2\ \text{ns}$, для режима подстройки задающего генератора под резонатор импульсного лазера — $14.3 \pm 0.2\ \text{ns}$.

Подстройка резонатора под задающий генератор оказалась довольно трудоемкой при первичной ручной настройке частоты задающего генератора. Ограниченность диапазона линейного перемещения зеркала ($< 2\ \mu\text{m}$) привела к необходимости введения второй петли обрат-

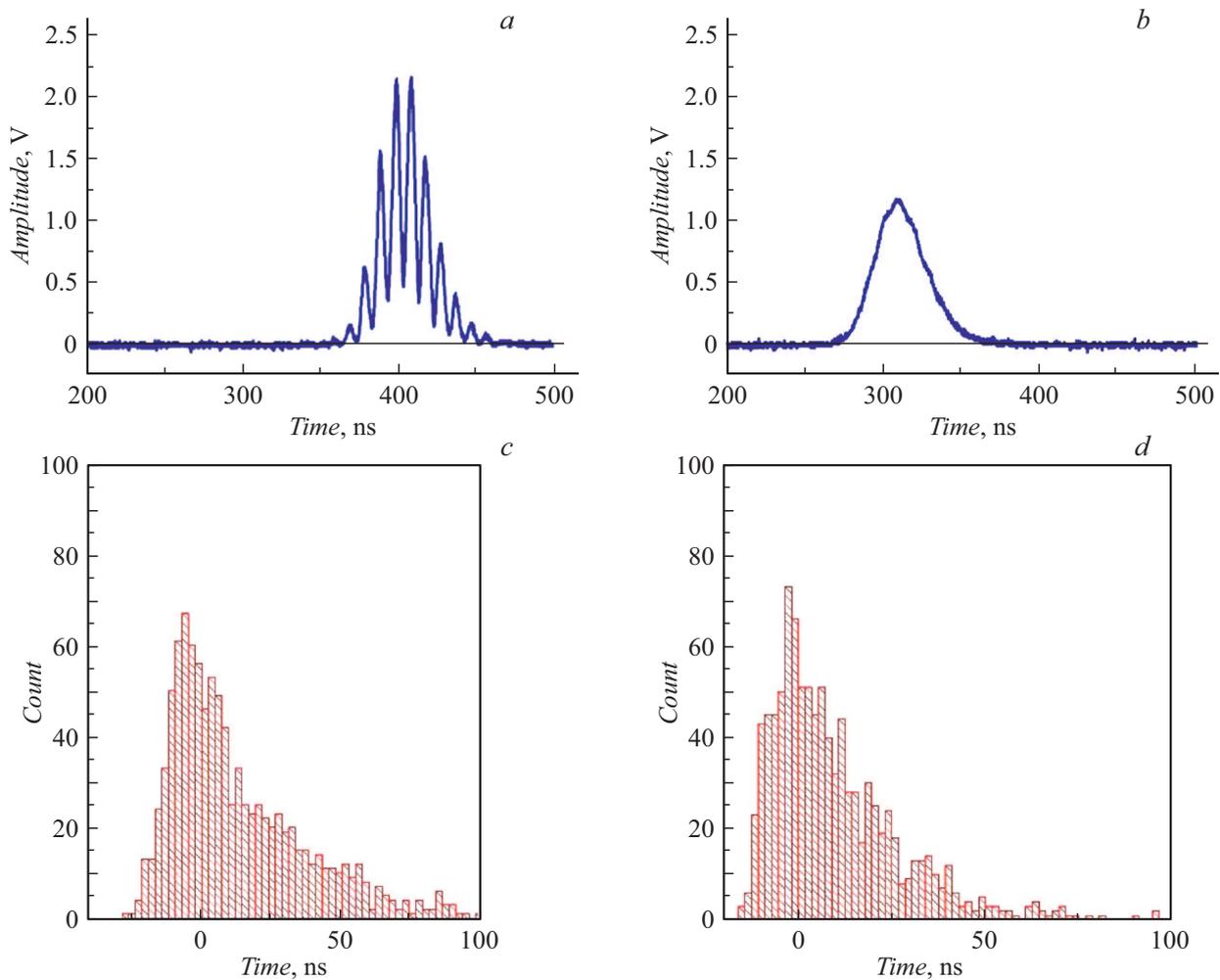


Рис. 3. Генерация в многочастотном (a) и одночастотном (b) режимах, гистограммы временной задержки между открытием затвора и импульсом генерации для серии из 1000 импульсов при подстройке длины резонатора под частоту задающего генератора (c) и при подстройке частоты задающего генератора под свободный резонатор (d).

ной связи (стабилизации длины волны задающего генератора) и невозможности компенсировать единичные возмущения. В свою очередь система обратной связи на основе управления длиной волны задающего генератора имела большой диапазон перестройки задающего генератора (> 15 GHz), что позволило компенсировать возмущения, выходящие за пределы диапазона работы первого варианта схемы.

Для интерферометрических измерений в физике высоких плотностей энергии на мощных лазерных установках килоджоульного уровня энергии была разработана одночастотная система лазерной подсветки мишени на длине волны 660 nm с длительностью импульса 50 ns и энергией в импульсе до 30 mJ.

Показано, что метод привязки частоты задающего генератора к моде резонатора импульсного лазера позволяет получить большую стабильность одночастотной генерации в сравнении с методом подстройки резонатора путем перемещения зеркала.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с Объединенным институтом высоких температур РАН № 075-15-2020-785).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Schroder, C. Lemmerz, O. Reitebuch, M. Wirth, C. Wührer, R. Treichel, Appl. Phys. B, **87**, 437 (2007). DOI: 10.1007/s00340-007-2627-5
- [2] F. Theron, O. Carraz, G. Rennon, N. Zahzam, Y. Bidet, M. Cadoret, A. Bresson, Appl. Phys. B, **118**, 1 (2015). DOI: 10.1007/s00340-014-5975-y

- [3] P.M. Celliers, D.K. Bradley, G.W. Collins, D.G. Hicks, T.R. Boehly, W.J. Armstrong, *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, 4916 (2004). DOI: 10.1063/1.1807008
- [4] Q. Peng, R. Ma, Z. Li, J. Liu, G. Chen, *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 113106 (2007). DOI: 10.1063/1.2814028
- [5] G. Debras, C. Courtois, F. Lambert, S. Brygoo, A. Duval, S. Darbon, B. Villette, I. Masclet-Gobin, F. Philippe, A. Casner, P. Seytor, L. Videau, H. Graillot, T. Chies, O. Henry, D. Raffestin, C. Chicanne, *EPJ Web Conf.*, **59**, 02006 (2013). DOI: 10.1051/epjconf/20135902006
- [6] Q. Xiao, X. Pan, J. Guo, X. Wang, J. Wang, X. Jiang, G. Li, X. Lu, X. Wang, S. Zhou, X. Li, *Appl. Opt.*, **59**, 6070 (2020). DOI: 10.1364/AO.395805
- [7] A.V. Mikhaylyuk, D.S. Koshkin, K.L. Gubskii, A.P. Kuznetsov, *J.Phys.: Conf. Ser.*, **774**, 012057 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012057
- [8] С.Г. Гаранин, А.И. Зарецкий, Р.И. Илькаев, Г.А. Кириллов, Г.Г. Кочемасов, Р.Ф. Курунов, В.М. Муругов, С.А. Сухарев, *Квантовая электроника*, **35** (4), 299 (2005). [S.G. Garanin, A.I. Zaretskii, R.I. Il'kaev, G.A. Kirillov, G.G. Kochemasov, R.F. Kurunov, V.M. Murugov, S.A. Sukharev, *Quantum Electron.*, **35**, 299 (2005). DOI: 10.1070/QE2005v035n04ABEH003417].
- [9] M. Hercher, *Appl. Opt.*, **8**, 1103 (1969). DOI: 10.1364/AO.8.001103
- [10] A. McGrath, J. Munch, G. Smith, P. Veitch, *Appl. Opt.*, **37**, 5706 (1998). DOI: 10.1364/AO.37.005706
- [11] M. Bogdanovich, A.V. Grigor'ev, K.I. Lantsov, Y.V. Lebiadok, K.V. Lepchenkov, A.G. Ryabtsev, G.I. Ryabtsev, M.A. Shchemelev, *J. Appl. Spectrosc.*, **82**, 573 (2015). DOI: 10.1007/s10812-015-0147-3