

И.С. Тырышкин, Ю.Н. Пономарев, Б.А. Тихомиров, Б.С. Могильницкий

**ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА ИАГ:Nd С ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С МАЛОЙ РАСХОДИМОСТЬЮ**

Представлены результаты разработки лазерной системы для генерации мощных коротких импульсов излучения с длиной волны 1,064 мкм. Излучатель системы включает в себя задающий генератор и два каскада усиления с активными элементами из ИАГ: Nd. Для модуляции добротности короткого неустойчивого резонатора в задающем генераторе системы применен пассивный затвор из кристалла LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски. Лазер позволяет получать импульсы излучения с длительностью 2 нс, энергией в импульсе до 1,1 Дж, расходимостью 0,48 мрад и частотой следования до 10 Гц.

Лазеры на ИАГ: Nd широко применяются в научных исследованиях, технологических и промышленных приложениях. Наиболее характерные режимы работы этих лазеров: непрерывной, с модуляцией добротности (с длительностью импульсов  $\tau = 5-20$  нс) и режим генерации сверхкоротких импульсов пикосекундного диапазона. Однако для решения ряда задач, например, в атмосферной оптике или дальнометрировании, требуются импульсно-периодические высокоэнергетичные лазеры с длительностью импульса излучения  $\tau \approx 1$  нс, энергией в импульсе  $E \approx 1$  Дж и малой угловой расходимостью. Требуемые лазеры должны отличаться простотой конструкции и высокой надежностью.

Проблема получения коротких высокоэнергетичных гигантских импульсов, на наш взгляд, наиболее просто решается при использовании в конструкции задающего генератора (ЗГ) лазерной системы предельно короткого резонатора с пассивной модуляцией добротности и применении в усиливающих каскадах активных элементов (АЭ) из ИАГ: Nd с большой ( $\varnothing 8-12$  мм) апертурой.

В [1, 2] теоретически показано, что при параметре  $\beta = y/y_0 \gtrsim 4$ , где  $y$  — плотность инверсной населенности к моменту начала генерации,  $y_0$  — плотность инверсной населенности при полностью включенной добротности резонатора, длительность импульса генерации стремится к предельному значению  $\tau \approx 2\tau_\phi = 2L/c_k$ , где  $\tau_\phi$  — время жизни фотона в резонаторе длины  $L$ ,  $c$  — скорость света,  $k$  — коэффициент потерь внутри резонатора и на излучение из резонатора за один проход. В [3] для ИАГ-лазера с пассивным затвором на основе никельсодержащего красителя с временем релаксации  $\sim 1$  нс при предельно короткой длине резонатора  $L \approx 200$  мм полученная минимальная длительность импульса генерации  $\tau \approx 2,5$  нс.

Для пассивной модуляции добротности неодимовых лазеров эффективно используются кристаллы из LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски [4, 5]. Однако, несмотря на то что кристаллы LiF:  $F_2^-$  имеют более высокий параметр включения и лучшие температурные характеристики, чем у затворов на красителях, затворы из LiF для решения проблемы получения импульсов длительностью 1–2 нс до сих пор не применялись.

Цель настоящей работы — создание простой лазерной системы на ИАГ: Nd с использованием пассивных лазерных затворов (ПЛЗ) из LiF:  $F_2^-$  для получения коротких импульсов излучения с энергией  $\sim 1$  Дж и малой угловой расходимостью.

Возможность применения ПЛЗ из LiF:  $F_2^-$  для генерации предельно коротких гигантских импульсов излучения проверялась в ИАГ-лазере с резонатором из плоских зеркал. АЭ ГП–6,3×65 мм и ПЛЗ из LiF:  $F_2^-$  помещались в резонатор с длиной  $L = 140$  мм, составленный из зеркал с коэффициентами отражения  $\rho_1 \gtrsim 0,995$  и  $\rho_2 = 0,4$ . Накачка АЭ осуществлялась лампой ИПП-5/60 А-1 в цилиндрическом кварцевом осветителе с серебряным покрытием.

Фотографическая регистрация формы и длительности лазерного импульса осуществлялась с помощью фотоприемника ФК-26 и осциллографа С7-19.

При начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 = 60\%$  лазер генерировал импульсы излучения с формой, близкой к колоколообразной и длительностью по уровню  $0,5\tau = 10$  нс. Энергия в импульсе  $E \approx 0,03$  Дж. При уменьшении начального пропускания ПЛЗ до  $T_0 = 30\%$  длительность импульса сокращалась до  $\tau = (1,8 \pm 0,2)$  нс. При этом передний фронт импульса сокращался значительно сильнее заднего. Энергия в импульсе возрастала до 0,1 Дж. Дальнейшее увеличение оптической плотности затвора не приводило к заметному уменьшению длительности импульса. При  $T_0 = 10\%$  энергия импульса достигла 0,15 Дж и происходило разрушение оптических элементов лазера.

Таким образом, кристаллы LiF с  $T_0 \approx 15-30\%$  можно эффективно использовать для получения импульсов излучения с высокой энергией и длительностью в единицы наносекунд.

Во всех случаях расходимость излучения, измеренная с помощью линзы с фокусным расстоянием 1 м, составляла  $\sim 4,5$  мрад. С целью уменьшения расходимости излучения был применен неустойчивый телескопический резонатор с выводом излучения через полупрозрачное выпуклое зеркало. Излучатель лазерной системы схематически представлен на рис. 1. Резонатор ЗГ образован зеркалами  $R_1$  и  $R_2$ , между которыми помещены ПЛЗ из LiF:  $F_2^-$  1 и АЭ 2. Для получения поляризованного излучения в резонатор ЗГ вводилась плоскопараллельная пластинка, устанавливаемая под углом Брюстера. При выполнении условия  $\beta \gtrsim 4$  основным фактором, определяющим длительность лазерного импульса, является длина резонатора [3]. В нашем случае минимальная длина резонатора ограничивалась размерами осветителя (95 мм), ПЛЗ (40 мм), поляризатора (20 мм) и составляла  $\sim 170$  мм. При этом эквивалентная длина резонатора [6]  $L_3 \approx 130$  мм.

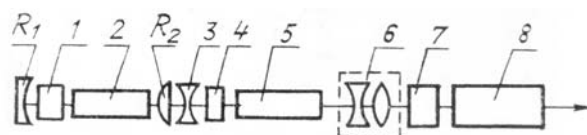


Рис. 1. Схема излучателя лазерной системы

Исходя из  $L_3$ , рассчитывались зеркала резонатора. В расчетах учитывалась также тепловая линза, наводимая в АЭ излучением лампы накачки. Измерения, проведенные в [7] при аналогичных условиях, показали, что при частоте следования импульсов накачки  $f = 10$  Гц с энергией в импульсе  $\gtrsim 50$  Дж фокусное расстояние тепловой линзы  $f_T \approx 9$  м. Как и в [7], в наших расчетах наведенная тепловая линза аппроксимировалась тонкой линзой, расположенной в центре АЭ. При радиусе кривизны вогнутого зеркала  $R_1 = 500$  мм расчет дает для радиуса кривизны выпуклого зеркала резонатора  $R_2 = 225$  мм. В этом случае увеличение  $M = 2,14$ . Коэффициенты отражения зеркал  $\rho_1 \approx 0,99$ ,  $\rho_2 \approx 0,4$ .

В экспериментах использовались АЭ ГП–6,3×65 мм высокой оптической однородности с массовой долей неодима 0,5%, выращенные методом направленной кристаллизации. Осветительная камера и лампа накачки аналогичны описанным ранее. Начальное пропускание ПЛЗ  $T_0 \approx 25\%$ . В связи с тем что рабочие грани ПЛЗ были непросветленными, затвор разъюстировался от оси резонатора на угол  $\gtrsim 5^\circ$ .

Излучение от ЗГ усиливалось однопроходным квантовым усилителем, состоящим из двух каскадов. Для исключения влияния каскадов усиления друг на друга и на ЗГ, между ЗГ и первым каскадом устанавливался кристалл из LiF:  $F_2^-$  с  $T_0 = 10\%$  4, а между каскадами усиления кристалл LiF:  $F_2^-$  с  $T_0 = 50\%$  7.

В первом усиливающем каскаде использовался АЭ ГП–6,3×80 мм, накачиваемый лампой ИНП-5/75 А-1 в цилиндрическом осветителе диаметром 40 мм. Прокачиваемая длина АЭ составляла  $\sim 75$  мм. Во втором каскаде усиления использовался АЭ ГП–10×80 мм, накачиваемый двумя лампами ИНП-5/75 А-1 в двухэллипсном осветителе. Для компенсации кривизны волнового фронта на выходе ЗГ устанавливалась отрицательная линза 3 с фокусным расстоянием 220 мм. Согласование поперечных размеров лазерного пучка между каскадами усиления производилось с помощью линзового телескопа 6.

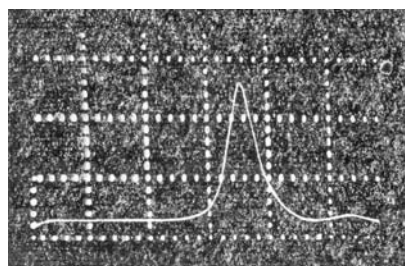


Рис. 2. Оциллограмма лазерного импульса (развертка – 5 нс/см)

Длительность импульса генерации ЗГ  $\tau = (2,5 \pm 0,2)$  нс (рис. 2). При использовании кристаллов LiF:  $F_2^-$  с отношением коэффициента активного поглощения к коэффициенту неактивных потерь (контрастность)  $\eta \lesssim 15$  примерно 10% импульсов модулированы по амплитуде. Для ПЛЗ с  $\eta \gtrsim 20$  число импульсов с модуляцией уменьшается до 3–4%. Частота и глубина модуляции изменяются хаотически от импульса к импульсу. Ширина спектра излучения гладких импульсов не превышала  $0,05 \text{ см}^{-1}$ . Спектр излучения импульсов с модуляцией был изрезан, и его общая ширина достигла  $0,2 \text{ см}^{-1}$ . Появление модулированных импульсов может быть обусловлено самосинхронизацией мод в резонаторе. Это подтверждается тем, что примерно у 30–40% модулированных импульсов период

модуляции совпадает с временем обхода резонатора, а также наличием в ПЛЗ на основе LiF:  $F_2^-$  бистрорелаксирующих центров окраски [8].

Распределение интенсивности излучения по сечению пучка регистрировалось с помощью оптического многоканального анализатора на ПЗС линейке 1200ЦЛ-1. В ближней зоне поперечное распределение интенсивности излучения имеет вид концентрических колец (рис. 3, а), характерный для неустойчивых резонаторов с выводом излучения через полупрозрачное зеркало.

В дальней зоне поперечное распределение имеет гладкую колоколообразную форму (рис. 3, б). Расходимость излучения, измеренная как с помощью линзы — выходного зеркала ЗГ, так и с использованием компенсирующей линзы 3 (см. рис. 1) и дополнительной линзы с фокусным расстоянием 1 м, составляет 0,48 мрад. Следует отметить, что приведенные на рис. 3 распределения интенсивности излучения и значение расходимости лазерного пучка были получены только с АЭ, отличающиеся высокой оптической однородностью. Для имеющихся в нашем распоряжении АЭ других типов, поперечное распределение интенсивности носит ярко выраженный неоднородный характер.

При начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 \approx 25\%$  и 10%-ном превышении уровня накачки над пороговым выходная энергия лазерного импульса ЗГ составляла 0,05 Дж. Пороговая энергия накачки в зависимости от контрастности ПЛЗ изменялась от 28 до 32 Дж. Энергия импульса на выходе первого каскада усиления при энергии накачки в 75 Дж составляла  $\sim 0,3$  Дж. Энергия накачки второго каскада усиления варьировалась в пределах 70—150 Дж. При этом выходная энергия лазерной системы достигала 1,1 Дж за импульс.

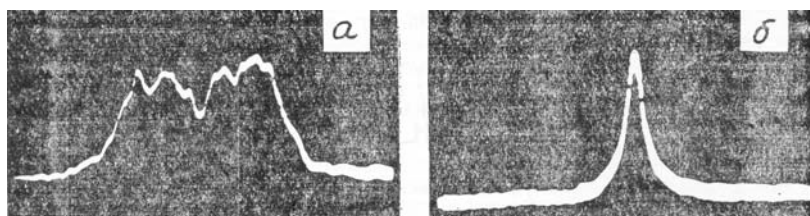


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения по диаметру лазерного пучка в ближней зоне (а) и в фокусе линзы с фокусным расстоянием 1 м (б)

При пропускании лазерного импульса через АЭ усилителей и просветляющиеся кристаллы развязки из LiF:  $F_2^-$  его длительность сокращалась до 2,0 нс.

Длительные испытания лазерной системы в режиме одиночных импульсов, а также с частотой следования до 10 Гц показали ее надежность и долговечность.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В.М. Хулугурову и Н.А. Иванову (ИПФ при Иркутском госуниверситете) за полезные обсуждения и предоставление высококачественных ПЛЗ из LiF:  $F_2^-$ .

1. Пилипович В.А., Ковалев А.А. Оптические квантовые генераторы с просветляющимися фильтрами. Минск: Наука и техника. 1975. 216 с.
2. Wagner W.G., Lengyel B.A. //J. Appl. Phys. 1968. V. 34. P. 2040.
3. Кокурин Ю.Л., Кузьменко Н.Е., Мизин В.М. и др. //Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 12. С. 2541.
4. Иванов Н.А., Парфианович И.А., Хулугуров В.М., Чепурной В.А. //Изв. АН СССР. Физика. 1982. Т. 46. № 10. С. 1985.
5. Иванов Н.А., Пономарев Ю.Н., Тихомиров Б.А., Чепурной В.А. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 8. С. 1717.
6. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. 328 с.
7. Апанасевич П.А., Квац В.В., Коптев В.Г. и др. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 2. С. 265.
8. Васильев Н.Н., Гадонас Р.А., Дудчик Ю.И. и др. //Квантовая электроника (Киев). 1987. № 33. С. 28.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступило в редакцию  
15 февраля 1989 г.

I.S. Tyryshkin, Yu.N. Ponomarev, B.A. Tikhomirov, B.S. Moqilnitskii. **Nd: YAG-Laser System with a Passive Q Switch Designed for Delivering High Energy Short Pulses with Small Angular Divergence.**

The paper presents the description of the laser system designed for delivering high power short pulses of radiation at 1,064  $\mu\text{m}$ . The system involves the Nd: YAG master oscillator and a two-stage amplifier. The LiF crystal with  $F_2^-$  colour centers is used in the master oscillator as a Q switch. This laser system can deliver 1,1 J per pulse of 2 ns duration at a pulse repetition frequency to 10 Hz. Angular beam width is about 0,48 mrad.