

# 10-фемтосекундный титан-сапфировый лазер со сложным кольцевым резонатором

А.А.Бабин, А.М.Киселев, А.В.Кирсанов, А.Н.Степанов

*Предложена и реализована схема фемтосекундного титан-сапфирового лазера, позволяющего получать импульсы длительностью 10 фс при использовании стандартного активного элемента длиной 1 см. Схема основана на применении широкополосного (низкодисперсионного) компенсатора дисперсии и нетрадиционного кольцевого резонатора.*

**Ключевые слова:** фемтосекундный лазер, компенсатор дисперсии, кольцевой резонатор.

В последние годы достигнут большой прогресс в получении световых импульсов длительностью несколько оптических периодов как при непосредственной лазерной генерации [1, 2], так и при внешней компрессии выходного фемтосекундного импульса [3, 4]. Эти достижения связаны в основном с использованием зеркал с управляемой дисперсией (так называемых chirpiрующих зеркал), обеспечивающих компенсацию дисперсии в широкой спектральной области [5, 6]. Однако фазовые характеристики подобных зеркал чрезвычайно чувствительны даже к незначительным вариациям толщины слоев, что предъявляет жесткие требования к точности их расчета и изготовления.

Для ослабления этих требований необходимо, чтобы положительная дисперсия, которая должна компенсироваться такими зеркалами, была как можно меньше. Для этого в линейном резонаторе типа Фабри–Перо, во-первых, применяют короткие (2–3 мм) Ti:сапфировые кристаллы с большим коэффициентом усиления и, во-вторых, используют chirpiрующие зеркала в сочетании с призмами из низкодисперсионного материала [7–9]. Пара таких призм, последовательно расположенных в резонаторе, компенсирует положительную дисперсию второго порядка, вносимую кристаллом, а малая дисперсия 3-го и более высоких порядков может быть устранена с помощью chirpiрующих зеркал. В этом случае существенно снижаются требования к точности их изготовления. Так, в работе [8] впервые получена генерация импульсов длительностью менее двух оптических периодов (ширина спектра больше 400 нм) с помощью Ti:сапфирового лазера, использующего chirpiрующие зеркала в комбинации с призмами из низкодисперсионного материала (CaF<sub>2</sub>).

С этой же целью применяют кольцевой резонатор, в котором дисперсия, вносимая кристаллом, автоматически уменьшается вдвое [10]. В работе [11] получена генерация импульсов длительностью 13 фс в кольцевом лазере с четырьмя призмами из плавленного кварца в резонаторе. Использование кольцевого резонатора имеет и

ряд других преимуществ, отмеченных в [10, 11]. Во-первых, в этом случае лазер менее чувствителен к переотражению луча назад в резонатор, во-вторых, в кольцевом резонаторе менее вероятна генерация сателлитов или двойных импульсов, в-третьих, симметричная схема кольцевого резонатора позволяет получать фемтосекундный режим в центре области устойчивости резонатора и, следовательно, оптимизировать выходную мощность лазера.

В настоящей работе исследуется фемтосекундный лазер с резонатором в виде сложного кольца, в котором, как и в линейном резонаторе, для компенсации дисперсии достаточно только одной пары призм. В таком резонаторе мы впервые, насколько нам известно, применили низкодисперсионные призмы из фторида лития (LiF), которые, как оказалось, наилучшим образом компенсируют дисперсию активного элемента вблизи центра полосы генерации ( $\lambda = 800$  нм).

Схема, показанная на рис.1, поясняет ход лучей в предложенном нами сложном кольцевом резонаторе. Излучение из левого плеча фокусирующей системы, образованной зеркалами 5 и 6, дважды проходит последовательно призм 7 и 8. Первый раз – в прямом направлении, распространяясь над вспомогательным зеркалом 3, второй раз – в обратном направлении, отразившись от зеркала 1 под небольшим углом ( $\sim 12^\circ$ ) в вертикальной плоскости. После второго прохождения через призму 8 луч попадает на вспомогательное зеркало 3, которое совместно с зеркалом 4, выходным зеркалом 10 и сфери-

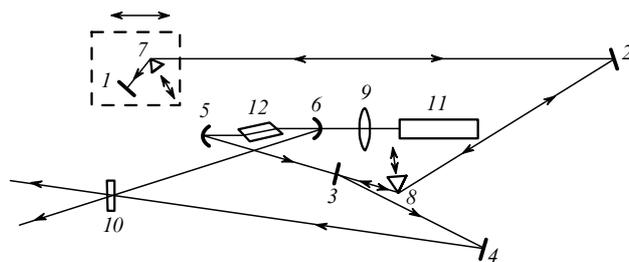


Рис.1. Схема фемтосекундного Ti:сапфирового лазера со сложным кольцевым резонатором: 1–4 – плоские зеркала; 5, 6 – сферические зеркала; 7, 8 – призмы; 9 – линза; 10 – выходное зеркало; 11 – аргонный лазер; 12 – активный элемент.

ческим зеркалом 6 правого плеча фокусирующей системы замыкает кольцо. Такая конфигурация резонатора, на наш взгляд, более проста в настройке и удобна в работе по сравнению с традиционным кольцевым резонатором, в котором для компенсации дисперсии используются две пары призм [10, 11]. Как показали наши эксперименты, для возникновения и поддержания режима генерации фемтосекундных импульсов в обычной кольцевой схеме необходимо выравнять расстояния между призмами в каждой паре с высокой точностью (погрешность не более десятка микрометров). В связи с этим даже небольшие изменения положения какой-либо из четырех призм относительно луча срывают генерацию фемтосекундных импульсов.

В нашем резонаторе эта проблема отсутствует, поскольку применяется только одна пара призм. Перемещение призм в поперечном относительно луча направлении использовалось для управления шириной и формой выходного спектра. Титан-сапфировый кристалл с коэффициентом поглощения  $\alpha = 1.9 \text{ см}^{-1}$  на  $\lambda = 514 \text{ нм}$  и брестеровскими рабочими гранями закреплялся в медном держателе, охлаждаемом термостабилизированной водой при температуре  $17^\circ\text{C}$ . Излучение серийного аргонового лазера ЛГН-512 мощностью 6 Вт фокусировалось линзой 9 ( $f = 12 \text{ см}$ ) в центр кристалла, расположенного между дихроичными сферическими зеркалами 5 и 6 ( $f = 5 \text{ см}$ ). Зеркала 1–4 были плоскими и имели высокий коэффициент отражения в диапазоне 700–900 нм, выходное зеркало 10 обладало прозрачностью 5%. Призмы 7 и 8, применявшиеся для компенсации дисперсии, были изготовлены из LiF. Призма 7 и зеркало 1 установлены на одном трансляторе, что обеспечивало возможность плавного изменения расстояния между призмами 7 и 8 без разъюстировки резонатора. Полная длина кольцевого резонатора  $L = 414 \text{ см}$ , расстояние между призмами 7 и 8  $d = 131.5 \text{ см}$ . Расстояния между элементами схемы, за исключением длины фокусирующей системы 1, образованной сферическими зеркалами 5 и 6, не являлись критичными. Область устойчивости по параметру  $l$  для непрерывной генерации имела ширину приблизительно 1.5 мм. Для нашей геометрии резонатора лазера оказалось, что только в узком ( $\sim 0.2 \text{ мм}$ ) окне этой области устойчивости был возможен фемтосекундный режим генерации.

В лазере имела место двунаправленная непрерывная генерация с выходной мощностью в каждом направлении  $P = 200 - 250 \text{ мВт}$  независимо от настройки. Изменяя настройку, можно было получить однонаправленный фемтосекундный режим генерации в направлении как по часовой стрелке, так и против нее. Он был устойчив и поддерживался без срывов часами. Пространственное распределение выходного излучения при фемтосекундном режиме генерации было близко к ТЕМ<sub>00</sub>-моду, а выходная мощность  $P = 300 - 350 \text{ мВт}$ .

Для выбора пары призм, дисперсия которой наиболее оптимально согласуется с дисперсией кристалла, мы проанализировали дисперсию кольцевого резонатора, содержащего Ti:сапфировый кристалл и пару призм из таких низкодисперсионных материалов, как CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> и LiF. Дисперсия воздуха при этом не учитывалась. На рис.2 приведена рассчитанная дисперсия групповой задержки  $\Delta$ , вносимая рассматриваемыми парами призм при оптимальном (обеспечивающем минимальную групповую задержку) расстоянии между ними. Здесь же пред-

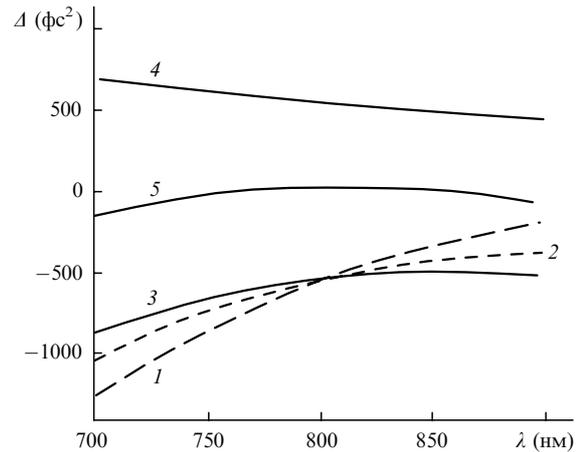


Рис.2. Дисперсия групповой задержки  $\Delta$  в кольцевом резонаторе, вносимая призмными компенсаторами из CaF<sub>2</sub> (1), SiO<sub>2</sub> (2), LiF (3) и Ti:сапфировым кристаллом длиной 1 см (4), а также суммарная дисперсия групповой задержки в резонаторе, содержащем Ti:сапфировый активный элемент и призмный компенсатор из LiF (5).

ставлена дисперсия  $\Delta$ , вносимая кристаллом, а также суммарная дисперсия  $\Delta$  в резонаторе, содержащем Ti:сапфировый активный элемент длиной 1 см и призмный компенсатор из LiF. Как следует из рис.2, наиболее широким для спектрального диапазона Ti:сапфирового лазера является компенсатор с призмами из LiF.

Для измерения длительности выходных импульсов был собран автокоррелятор с широкополосными оптическими элементами по симметричной коллинеарной схеме [12]. Выходной спектр регистрировался оптическим анализатором спектра на основе монохроматора МДР-12. Для компенсации дисперсии подложки выходного зеркала толщиной 7 мм применялась дополнительная внешняя пара призм из LiF, не показанная на рис.1. Типичная функция автокорреляции интенсивности и соответствующий спектр выходных импульсов приведены на рис.3. Из данных измерений в предположении, что временной профиль интенсивности описывается функцией  $\text{sech}^2 t$ , следует, что длительность импульса по половине высоты  $\tau = 10 \text{ фс}$  при ширине спектра по полувысоте  $\Delta\lambda \sim 96 \text{ нм}$ . Это соответствует произведению длительности импульса на ширину полосы  $\tau\Delta\nu = 0.43$ , что несколько выше теоретического предела для  $\text{sech}^2$ -подобных импульсов (0.315) и связано, возможно, с отличием формы импульса от предполагаемой.

Как уже отмечалось выше, ширина спектра выходных импульсов легко варьировалась при поперечном перемещении призмы компенсатора. Максимальная ширина

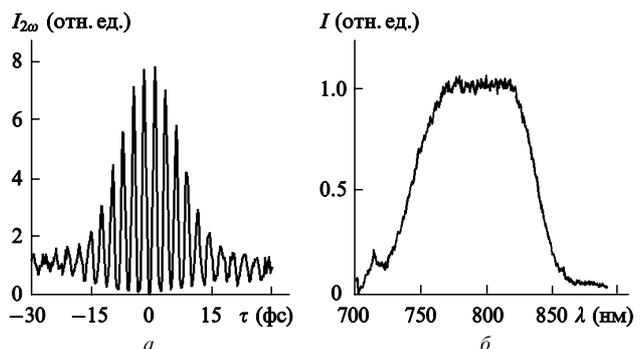


Рис.3. Автокорреляционная функция (а) и спектр выходного излучения (б) фемтосекундного лазера.

спектра, которую удалось получить в исследуемом лазере, равнялась  $\sim 180$  нм по основанию и была близка к спектральной ширине полосы отражения применявшихся зеркал. Однако форма спектра при этом оказывалась двугорбой, а в этом случае, как известно [13], длительность выходного импульса генератора увеличивается примерно в 1.5 раза по сравнению со случаем гладкого (гауссова или  $\text{sech}^2$ -подобного) спектрального распределения, имеющего такую же ширину.

Таким образом, в настоящей работе было показано, что наиболее подходящим для генерации предельно короткого импульса  $\text{Ti} : \text{сапфирового}$  лазера является компенсатор дисперсии с призмами из  $\text{LiF}$ . Применение такого компенсатора в сочетании с оригинальной схемой кольцевого резонатора позволило получить длительность импульса выходного излучения 10 фс при длине активного элемента 1 см без использования зеркал с управляемой дисперсией.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 01-02-17512).

1. Xu L., Spielmann C., Krausz F., Szpöcs R. *Opt. Lett.*, **21**, 1259 (1996).
2. Xu L., Tempea G., Spielmann C., Krausz F., Stingl A., Ferencz K., Takano S. *Opt. Lett.*, **23**, 789 (1998).
3. Baltuska A., Wei Z., Psenichnikov M., Wiersma D. *Opt. Lett.*, **22**, 102 (1997).
4. Nisoli M., Silvestri S.D., Zvelto O., Szpöcs R., Ferencz K., Spielmann C., Sartania S., Krausz F. *Opt. Lett.*, **22**, 522 (1997).
5. Szpöcs R., Ferencz F., Spielmann C., Krausz F. *Opt. Lett.*, **19**, 201 (1994).
6. Kärtner F., Matuschek N., Schibli T., Keller U., Haus H., Heine G., Morf R., Scheuer V., Tilsch M., Tschudi T. *Opt. Lett.*, **22**, 831 (1997).
7. Jung I., Kärtner F., Matuschek N., Sutter D., Morier-Genoud F., Zhang G., Keller U., Scheuer V., Tilsch M., Tschudi T. *Opt. Lett.*, **22**, 1009 (1997).
8. Morgner U., Kärtner F., Cho S.H., Chen Y., Haus H., Fujimoto J.G., Ippen I.P., Scheuer V., Angelov G., Tschudi T. *Opt. Lett.*, **24**, 411 (1999).
9. Ell R., Morgner U., Kärtner F., Fujimoto J.G., Ippen E.P., Scheuer V., Angelov G., Tschudi T., Lederer M.J., Boiko A., Luther-Davies B. *Opt. Lett.*, **26**, 373 (2001).
10. Pelouch W.S., Powers P.E., Tang C.L. *Opt. Lett.*, **17**, 1581 (1992).
11. Beddard T., Penman Z., Reid D.T., Sibbett W. *Techn. Digest CLEO'99* (Baltimore, 1999, p. 84).
12. Spielmann C., Xu L., Krausz F. *Appl. Opt.*, **36**, 2523 (1997).
13. Rousseau G., McCarthy N., Piche M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4087**, 910 (2000).