

Новая схема мощного фемтосекундного лазера на длине волны 800 нм

Е.А.Хазанов

Предложена схема простого фемтосекундного лазера, включающая в себя волоконный эрбиевый лазер ($\lambda = 1550$ нм), волоконный стретчер, параметрический усилитель на кристалле ВВО, преобразующий входное излучение в излучение с $\lambda = 800$ нм, Ti:сапфировый или ВВО-усилитель и компрессор на дифракционных решетках.

Ключевые слова: параметрический усилитель, chirпированный импульс, стретчер, фемтосекундный лазер.

Большинство мощных фемтосекундных лазеров с длительностью импульсов излучения менее 50 фс основаны на усилении chirпированных импульсов в кристалле Ti:сапфира. Принципиальная схема таких лазеров приведена на рис.1,а. Многие элементы этой схемы (задающий генератор (ЗГ), стретчер, регенеративный усилитель, многопроходные широкоапертурные Ti:сапфировые усилители) весьма громоздки и сложны в юстировке и эксплуатации. В данной работе предлагается свободная от этих недостатков схема лазера (рис.1,б), основанная на использовании волоконного лазера, волоконного стретчера и оптических параметрических усилителей (ОПУ) chirпированных импульсов с синхронизованной накачкой.

Замена обычного фемтосекундного ЗГ волоконным весьма привлекательна вследствие простоты, надежности, компактности и дешевизны волоконных лазеров, особенно эрбиевых с длиной волны $\lambda = 1550$ нм [1, 2]. В работе [2] достигнута энергия импульса 9 нДж при его длительности 35 фс, а для эффективной работы предлагаемой нами схемы вполне достаточно существенно меньшей энергии (~ 1 нДж). Заметим, что волоконных лазеров, генерирующих в области 800 нм, не существует. Удвоение частоты импульсов излучения эрбиевого лазера хотя и позволяет усиливать такие импульсы в кристаллах Ti:сапфира, однако это приводит к большим потерям энергии (КПД удвоения около 10 %). В то же время длины волн Er- и Ti:сапфирового лазеров позволяют реализовать условия синхронизма при параметрическом усилении в случае накачки второй гармоникой неодимового лазера: $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$, где $\omega_{1,2}$ – частоты излучения Er ($\lambda = 1550$ нм) и Ti:сапфирового ($\lambda = 800$ или 810 нм) лазеров соответственно, а ω_3 – частота излучения второй гармоники неодимового лазера ($\lambda = 527$ или 532 нм).

ОПУ в последние годы широко используются вместо лазерных усилителей (см., напр., [3–7] и ссылки в них). Кристаллы ВВО при оо-взаимодействии имеют ширину полосы параметрического усиления около 3000 см^{-1} вблизи $\lambda = 800$ нм, что даже с учетом амплитудных и фазовых

искажений спектра позволяет получать импульсы длительностью 8 фс [4]. Кроме того, в отличие от кристаллов KDP и DKDP они прозрачны в области 1550 нм и могут использоваться вместо усилителей на Ti:сапфире [7]. Существенным ограничением в этом случае до недавнего времени являлась невозможность синхронизовать фемтосекундный ЗГ и лазер накачки с погрешностью, много меньшей длительности chirпированного импульса. Из-за этого длительность импульса накачки выбиралась существенно большей длительности chirпированного импульса [7], что значительно уменьшало КПД. Применение метода синхронизации, предложенного и детально описанного в [6, 8, 9], устраняет этот недостаток.

Волна с $\lambda = 1550$ нм в ОПУ на кристалле ВВО является холостой, т. е. волной, направление волнового вектора которой зависит от частоты. Поэтому для получения на выходе первого ОПУ широкополосного коллимированного излучения необходимо перед кристаллом ВВО установить обычную призму, вносящую соответствующую угловую дисперсию [6]. Во второй ОПУ лучше инжектировать сигнальную волну с $\lambda = 800$ нм. В этом случае электрооптический затвор не требуется, т. к. ОПУ будет сам идеально вырезать из последовательности импульсов только один импульс, который попадает в него одновременно с импульсом накачки.

Вообще говоря, после второго ОПУ можно сжать импульс как сигнальной ($\lambda = 800$ нм), так и холостой ($\lambda = 1550$ нм) волны, но первый вариант представляется более перспективным. Это связано с тем, что, во-первых, импульс с $\lambda = 800$ нм имеет в два раза большую энергию, а во-вторых, он может усиливаться далее не только в ВВО, но и в Ti:сапфировом усилителе. Если в стретчере используется одна волна (например, холостая), а в компрессоре другая (например, сигнальная), то для фазы импульса после компрессора $\Phi(\Omega)$ вместо обычного выражения получаем соотношение

$$\Phi(\Omega) = \Phi_{\text{com}}(\omega_{10} + \Omega) - \Phi_{\text{str}}(\omega_{20} - \Omega), \quad (1)$$

где ω_{10} и ω_{20} – центральные частоты сигнальной и холостой волн; Ω – отстройка частоты от центральной; Φ_{com} и Φ_{str} – фазы, внесенные компрессором и стретчером. Чтобы удовлетворить выражению (1) для волн с $\lambda = 1250$

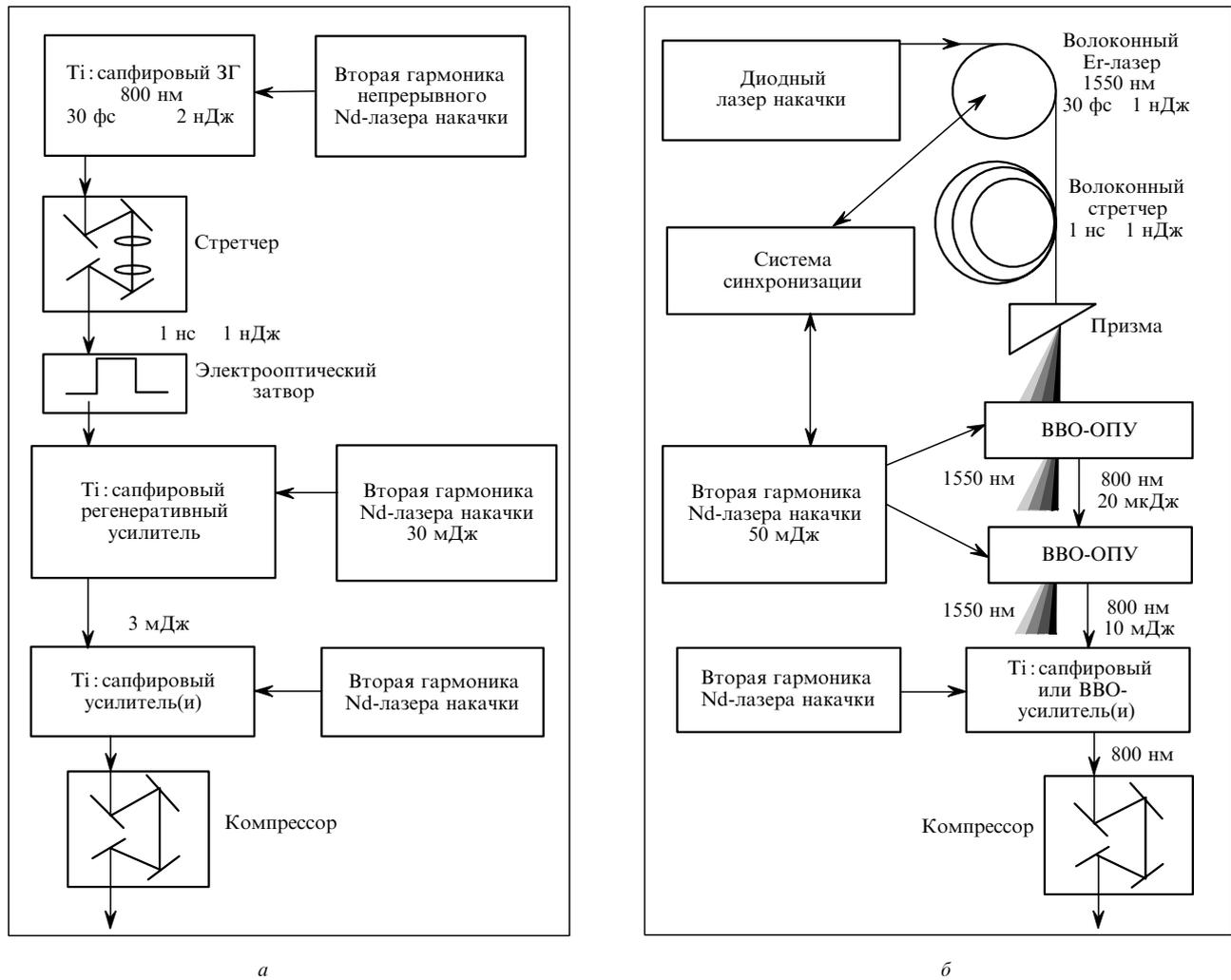


Рис. 1. Традиционная (а) и предлагаемая (б) схемы мощного фемтосекундного лазера.

нм (холостая) и $\lambda = 910$ нм (сигнальная), в работе [6] в качестве стретчера применялся компрессор с двумя призмами. Для $\lambda = 1550$ и 800 нм можно сделать и волоконный стретчер, используя широкие возможности управления дисперсией в волокнах на $\lambda = 1550$ нм (см., напр., [10]). Из (1) следует, что у стретчера дисперсия второго порядка должна быть аномальной, что выполняется для большинства волокон. Точные значения дисперсии второго, третьего и т. д. порядков можно получить, выбрав волокно с оптимальной дисперсией или подбирая длины последовательно расположенных волокон различного типа. Заметим, что из-за малой энергии импульса (1 нДж) нелинейные эффекты в волоконном стретчере будут несущественными.

Взяв для оценки кристалл ВВО длиной 12 мм, при интенсивности накачки 1 ГВт/см^2 (длительность импульса 1.5 нс, энергия 50 мДж, диаметр пучка 2 мм) получим коэффициент усиления ОПУ по слабому сигналу, равный 2×10^4 . Следовательно, во втором ОПУ усиление будет происходить уже в режиме сильного насыщения. При типичном для этого режима КПД по числу фотонов 25 % – 30 % (рекордные значения – около 60 % [11]) энергия на выходе составит 8–10 мДж ($\lambda = 800$ нм).

Дальнейшее усиление возможно как в лазерных усилителях на кристаллах Ti:сапфира, так и в ОПУ на кристаллах ВВО. В последнем случае лазер накачки должен

быть синхронизован с фемтосекундным ЗГ. К недостаткам ОПУ следует отнести также меньший КПД и меньшую (чем у кристаллов Ti:сапфира) апертуру. Преимущества ОПУ заключаются в значительно меньшем нагреве и большем коэффициенте усиления. Таким образом, выбор между кристаллами ВВО и Ti:сапфира в силовых каскадах усиления, а также число этих каскадов определяются конкретными параметрами выходного излучения.

Резюмируем преимущества и недостатки новой схемы (рис.1,б) по сравнению с традиционной (рис.1,а). К преимуществам относятся существенно более простой, надежный, компактный и дешевый ЗГ, простой и не требующий юстировки стретчер, использование ОПУ вместо регенеративного усилителя, отсутствие электрооптического затвора, снижающего частоту следования импульсов, возможность применения ОПУ в силовых каскадах. Недостатки – наличие системы синхронизации и чирпирующей призмы – весьма незначительны в силу простоты и надежности этих устройств [6, 8, 9].

Новая схема вобрала в себя все преимущества волоконной техники, предназначенной для работы на $\lambda = 1550$ нм, а также широкополосного параметрического усиления в кристаллах ВВО и широкополосного лазерного усиления в кристаллах Ti:сапфира на $\lambda = 800$ нм. Ее можно использовать как для создания новых, так и для

модернизации уже существующих лазерных Ti : сапфировых систем.

Автор выражает благодарность А.М.Сергееву за полезные обсуждения.

1. Таусенев А.В., Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **34**, 106 (2004).
2. Nicholson J.W., Yablon A.D., Westbrook P.S., Feder K.S., Yan M.F. *Opt. Express*, **12**, 3025 (2004).
3. Dubietis A., Jonusauskas G., Piskarskas A. *Opt. Commun.*, **88**, 437 (1992).
4. Ross I.N., Matousek P., Towrie M., Langley A.J., Collier J.L. *Opt. Commun.*, **144**, 125 (1997).
5. Freidman G., Andreev N., Ginzburg V., Katin E., Khazanov E., Lozhkarev V., Palashov O., Sergeev A., Yakovlev I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4630**, 135 (2002).
6. Андреев Н.Ф., Беспалов В.И., Бредихин В.И., Гаранин С.Г., Гинзбург В.Н., Дворкин К.Л., Катин Е.В., Корытин А.И., Ложкарев В.В., Палашов О.В., Рукавишников Н.Н., Сергеев А.М., Сухарев С.А., Фрейдман Г.И., Хазанов Е.А., Яковлев И.В. *Письма в ЖЭТФ*, **79**, 178 (2004).
7. Javonovic I., Ebbers A., Barty C.P.J. *Opt. Lett.*, **27**, 1622 (2002).
8. Khazanov E., Anastasiev A., Katin E., Palashov O. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4629**, 144 (2002).
9. Катин Е.В., Ложкарев В.В., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **33**, 836 (2003).
10. Okuno T., Onishi M., Kashiwada T., Ishikawa S., Nishimura M., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **5**, 1385 (1999).
11. Waxer L.J., Bagnoud V., Begishev I.A., Guardalben M.J., Puth J., Zuegel J.D. *Opt. Lett.*, **28**, 1245 (2003).