

## II. СОЗДАНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

**В.В. Акулиничев**

*(Институт аналитического приборостроения АН СССР,  
Ленинград).*

**Г.Б. Альтшулер, А.В. Окишев**

*(Ленинградский институт точной механики и оптики)*

### **ОТ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ К НОВЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ В ОПТИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ (обзор)**

#### **Часть I. ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ**

Одной из актуальных задач современной лазерной техники является создание систем, генерирующих световые импульсы высокой мощности и энергии, необходимых для исследования физических процессов в сверхсильных оптических полях и для различных приложений: рентгеновской литографии, микроскопии, спектроскопии и т.д.

Первые шаги в области создания таких сверхмощных систем были сделаны в рамках проектов по лазерному термоядерному синтезу. Однако лазерные системы этого класса являются уникальными крупногабаритными и дорогостоящими сооружениями и недоступными для широкого круга исследователей.

В настоящее время основной тенденцией при конструировании мощных лазерных систем для получения сверхсильных световых полей является разработка настольных вариантов с сохранением высокой мощности излучения за счет генерации и усиления сверхкоротких лазерных импульсов ( $\sim 10^{-12}$ – $10^{-14}$  с), доступных практически любой лазерной лаборатории [1].

К моменту написания настоящего обзора в литературе имеются сведения о создании мощных лазерных систем практически на всех типах активных сред:

- 1) жидкостные (растворы органических красителей);
- 2) газовые (экимерные);
- 3) твердотельные (Nd-стекло, Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.).

Растворы органических красителей обладают большим сечением усиления, что позволяет создавать на их основе компактные высокоэффективные лазерные системы, генерирующие импульсы фемтосекундной длительности. Однако при увеличении



трудности при создании однородного разряда по объему активной среды, что необходимо для получения однородного поперечного распределения усиленного излучения, необходимого для его фокусировки в пятно наименьшего диаметра для создания максимальной плотности мощности;

большие габаритные размеры и высокая стоимость.

Твердотельные мощные лазерные системы, очевидно, являются наиболее перспективными в настоящее время, так как позволяют генерировать импульсы фемтосекундной длительности с большой энергией и хорошим поперечным распределением и в то же время — компактны и недороги.

Первая часть настоящего обзора посвящена сравнительному анализу основных типов мощных лазерных систем для получения сверхсильных световых полей.

### Лазерные системы на основе растворов органических красителей

Основным достоинством красителей как активных сред является широкая (около 50 нм) линия люминесценции, которая, с одной стороны, обеспечивает возможность генерации предельно коротких световых импульсов (на выходе лазера — до 25 фс), а с другой стороны, позволяет плавно перестраивать длину волны излучения. При низких уровнях возбуждения растворы красителей обладают оптимальными качествами для создания усилителей (в первую очередь, высоким сечением усиления — около  $10^{-16}$  см<sup>2</sup>). Однако если ставится задача получения на выходе усилительного тракта высокой энергии (100 мДж и более), то использование красителей представляется все более затруднительным в связи с самовозбуждением активной среды.

В работе [2] описана лазерная система на основе красителей (рис. 1). В качестве задающего генератора использовался непрерывный лазер на красителе, синхронно накачиваемый второй гармоникой Nd—YAG лазера с синхронизацией мод. За счет добавления в раствор активной среды (родамин 6Ж) насыщающегося поглотителя (DQOCI) на выходе лазера генерировались импульсы длительностью 70 фс. Усилительный тракт состоял из трех каскадов усилителей на красителях с продольной накачкой. Для накачки использовался предварительно усиленный в регенеративном и двухпроходовом усилителе одиночный импульс второй гармоники непрерывного Nd—YAG лазера длительностью 70 пс. Авторами показано, что такая длительность импульса накачки предпочтительнее используемой в других работах (около 10 нс) вследствие более эффективного использования запасенной в усилителе энергии (время затухания люминесценции в растворах красителей 2—5 нс).

На выходе лазерной системы регистрировались импульсы длительностью 600 фс с энергией в сотни микроджоулей при частоте повторения 7 Гц. Очевидно, длительность импульса может быть существенно сокращена за счет методов рекомпрессии, заключающихся в компенсации уширения импульса, возни-

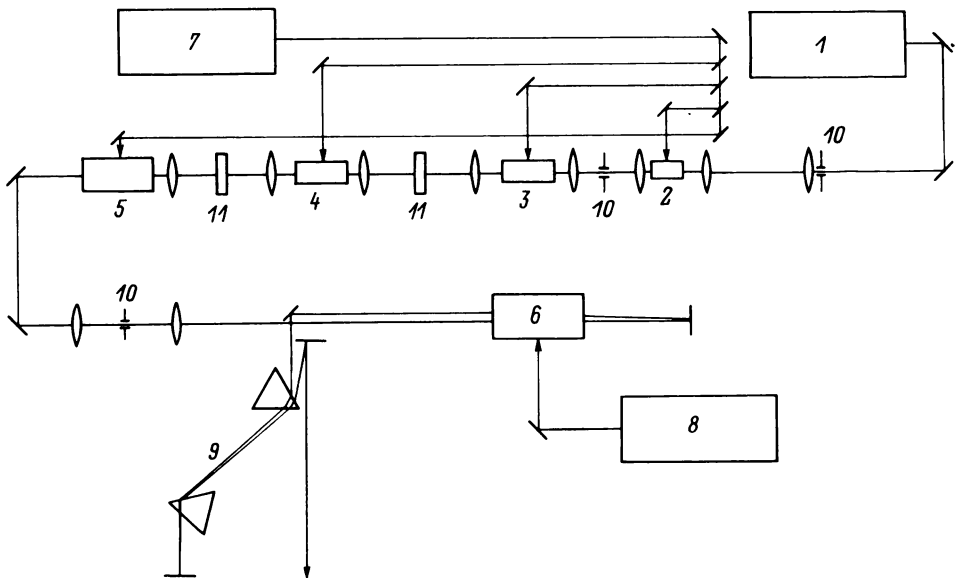


Рис. 2. Схема фемтосекундной лазерной системы на красителях [3]:

1 — непрерывный лазер на красителях со столкновительной синхронизацией мод; 2-6 — усилительные каскады на красителях с диаметром активной среды 2, 3, 3, 6 и 20 мм, соответственно; 7 — Nd-YAG лазер DCR-11; 8 — Nd-YAG лазер DCR-2A; 9 — призмный рекомпрессор; 10 — пространственные фильтры; 11 — насыщающиеся поглотители-развязки

кающего вследствие фазовой самомодуляции в оптических элементах усилителей.

Следует отметить, что в настоящее время фирмами CONTINUUM и QUANTRONIX выпускаются промышленные образцы лазерных систем, аналогичных описанной выше.

Импульсы длительностью 110—160 фс с энергией до 3.5 мДж были получены в лазерной системе на красителях, описанной в работе [3] (рис. 2). Для накачки использовались серийные лазеры DCR-11 и DCR-2A (QUANTA RAY, SPECTRA PHYSICS) с энергией 70 и 350 мДж, соответственно (распределение энергий накачки между первыми четырьмя каскадами: 4, 9, 14 и 30 мДж). После прохождения усилительного тракта длительность импульса увеличивалась со 114 до 600 фс за счет дисперсии групповой скорости в оптических элементах и активной среде усилителей. Для компенсации этой дисперсии служил двухпроходовой призмный рекомпрессор. Полученное излучение обладало хорошим поперечным распределением: при фокусировке 50-сантиметровой линзой через отверстие диаметром 50 мкм, помещенное в фокусе, проходило более 80 % падающего излучения. Достигнутая при этом плотность мощности составляла  $4 \cdot 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>.

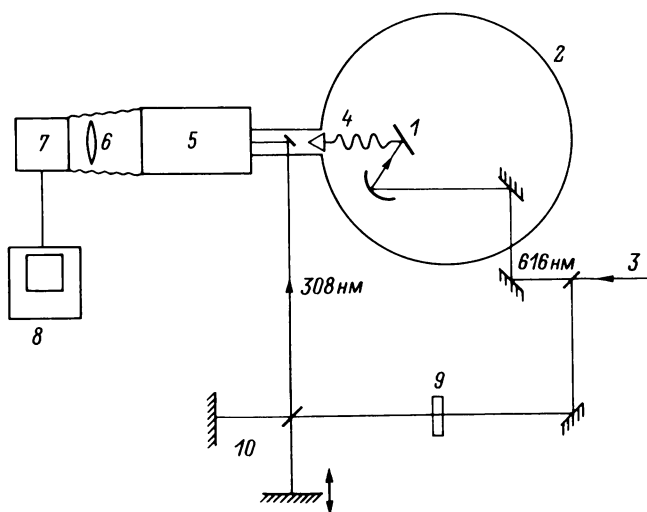


Рис. 3. Экспериментальная установка для генерации и измерения длительности импульсов рентгеновского излучения [4]: 1 — мишень; 2 — вакуумная камера; 3 — излучение накачки; 4 — рентгеновское излучение; 5 — скоростная рентгеновская камера; 6 — оптическая система; 7 — камера на основе ПЗС-матрицы; 8 — персональный компьютер IBM PC/AT; 9 — генератор второй гармоники; 10 — интерферометр

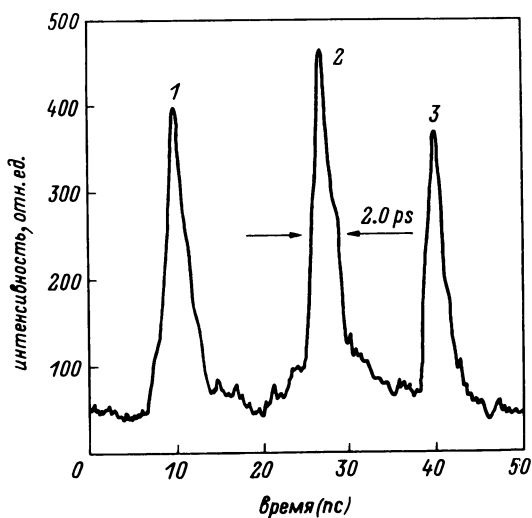


Рис. 4. Денситограмма временной развертки второй гармоники импульса накачки (1, 3) и рентгеновского импульса (2)

В работе [4] описанная выше лазерная система использовалась для генерации сверхкоротких импульсов рентгеновского излучения и исследования временной разрешающей способности рентгеновской скростной камеры (рис. 3). Удвоение частоты импульса накачки и использование интерферометра обеспечивало временную калибровку камеры. На рис. 4 приведена денситограмма временной развертки импульса рентгеновского излучения, заключенного между калибровочными импульсами.

Изложенное позволяет сделать вывод, что растворы органических красителей являются подходящей активной средой для создания лазерных систем сверхкоротких импульсов с выходной энергией на уровне нескольких миллиджоулей. Дальнейшее увеличение выходной энергии связано с трудностями по борьбе с усиленным спонтанным излучением в усилителях.

### Комбинированные лазерные системы с эксимерными модулями

Дальнейшее увеличение энергии лазерных систем на красителях может быть осуществлено в усилителях с другими типами активных сред, имеющих меньшее сечение усиления, а значит, способных запасать большую энергию.

Комбинирование различных активных сред в задающем генераторе, предусилителе и оконечных каскадах усиления обеспечиваются возможностью плавной перестройки длины волны генерации лазера на красителях, т.е. точной подстройки длины волны усиливаемого излучения под центральную частоту линии люминесценции активной среды оконечного усилителя.

В работах [5, 6] приведены результаты разработки мощных лазерных систем ультрафиолетового диапазона с задающими генераторами на красителях и оконечными усилителями на эксимерных модулях с  $KrF$  (рис. 5, 6). Авторами работы [6] была разработана компактная фемтосекундная лазерная система на  $KrF$  с выходной мощностью 4 ТВт [7] (рис. 7). Ее особенностью является усиление в двух каналах, развязанных по времени и поляризации. Полученные импульсы длительностью 280 фс и энергией 400 мДж использовались для генерации гармоник (вплоть до 23) в He и Ne.

В Rutherford Appleton Laboratory в 1989 году запущена сверхмощная лазерная система на эксимерах SUPERSPRITE, имеющая следующие характеристики [8]:

количество пучков .....	12
максимальная энергия .....	3.5 кДж
максимальная мощность .....	300 ТВт
длительность импульса .....	1 пс–10 нс
длина волны .....	268–277 нм
частота повторения вспышек .....	10 в час

Эта лазерная система используется для генерации рентгеновского излучения, в исследованиях плазмы, спектроскопии, рентгеновской микроскопии и т.д.

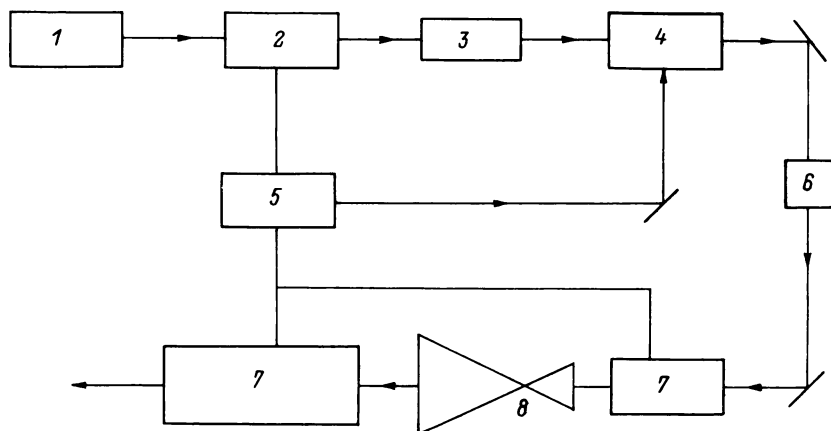


Рис. 5. Мощная субпикосекундная лазерная система на  $KrF$  [5]:

1 — непрерывный  $Nd-YAG$  лазер; 2 — непрерывный лазер на красителе с пассивной синхронизацией мод и разгрузкой резонатора, генерирующий импульсы длительностью 1 пс с энергией 10 нДж; 3 — оптический компрессор, сжимающий импульс до 250 фс; 4 — двухкаскадный усилитель на красителях, выходная энергия импульса — 130 мкДж; 5 — импульсный  $Nd-YAG$  лазер для накачки усилителей на красителях; 6 — генератор второй гармоники; 7 —  $KrF$  эксимерные модули с коэффициентом усиления 1000; 8 — пространственный фильтр. Выходной импульс на длине волны 248 нм имел энергию 25 мДж и пиковую мощность 50 ГВт

Несмотря на хорошие параметры, полученные в эксимерных лазерных системах, они являются достаточно сложными и крупногабаритными, а значит, недоступными широкому кругу исследователей. Кроме того, возникает целый ряд трудностей, связанных, во-первых, с усилением фемтосекундных импульсов в эксимерах, имеющих сложную форму контура усиления, и, во-вторых, с необходимостью создания однородного электрического разряда во всем объеме активной среды для получения поперечного распределения излучения высокого качества, необходимого для фокусировки в пятно возможно меньшего размера.

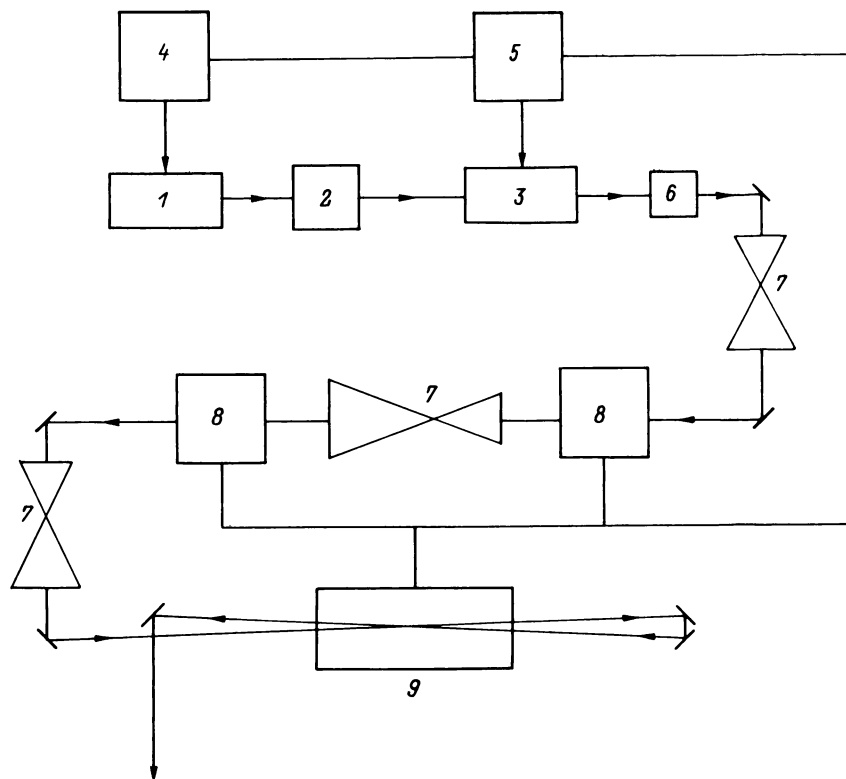


Рис. 6. Мощная пикосекундная лазерная система на  $KrF$  [6]: 1 — импульсный лазер на красителе с пассивной синхронизацией мод; 2 — система выделения одиночного импульса; 3 — усилитель на красителе; 4, 5 — эксимерные лазеры на  $XeCl$  для накачки лазера и усилителя на красителе с длительностью импульса 200 пс и 10 нс, соответственно; 6 — генератор второй гармоники; 7 — пространственные фильтры; 8 — эксимерные модули на  $KrF$  сечением  $7 \times 7$  см, пиковая мощность на выходе — 10 ГВт; 9 — эксимерный модуль на  $KrF$  сечением  $23 \times 23$  см, выходная пиковая мощность 1 ТВт



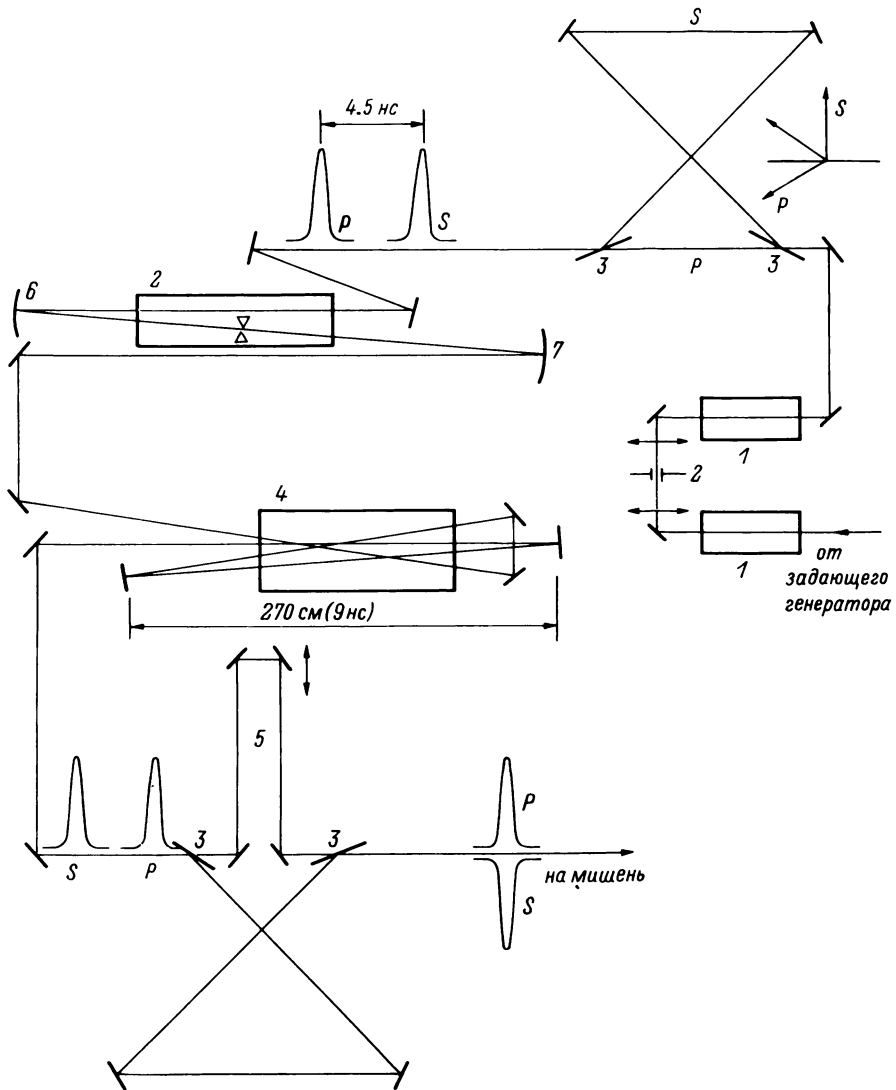


Рис. 7. Схема тераваттной эксимерной лазерной системы, работающей на частоте 10 Гц [7]:  
 1 — предусилители; 2 — пространственные фильтры; 3 — поляризаторы; 4 — эксимерный модуль на KrF сечением 6x4 см; 5 — линия задержки; 6, 7 — сферические зеркала с радиусами кривизны 2 и 8 м, соответственно

### Твердотельные мультитераваттные настольные лазерные системы

Наибольший прогресс в генерации импульсов большой пиковой мощности достигнут при использовании в качестве активной среды стекла, активированного Nd. Это связано с применением методики расширения—сжатия сверхкороткого импульса (СКИ) [9–11].

Как известно, усиление СКИ до высоких энергий сопровождается трудностями, обусловленными проявлениями нелинейных эффектов при прохождении таких импульсов высокой пиковой мощности через оптические среды и ведущими к искажениям волнового фронта пучка, самофокусировке и разрушению оптических элементов усилителей. Метод, предложенный в [10,11], обеспечивает усиление СКИ при поддержании достаточно низкого уровня пиковой мощности в усилителе. Такой режим изображен на рис. 8: СКИ чирпируется и расширяется во времени, далее усиливается практически до насыщения при сохранении низкой пиковой мощности и, наконец, компрессируется до начальной длительности.

В работе [11] в качестве расширителя импульса использовалось оптическое волокно длиной 1.3 км (рис. 9), в котором за счет совместного действия фазовой самомодуляции и дисперсии групповой скорости входной СКИ линейно чирпировался и удлинялся с 55 до 300 пс. В качестве компрессора использовалась пара дифракционных решеток. В работах [9, 10] предлагается применять решетки в антипараллельной геометрии (рис. 10). В этом случае после усиления расширенного таким образом импульса достигается максимальная степень сжатия в отличие от сжатия импульса, линейно чирпированного в волокне, поскольку изменение групповой задержки с частотой для пары дифракционных решеток не является строго линейным. Коэффициент расширения—сжатия при использовании таких двух пар дифракционных решеток может достигать 5000 [11].

В связи с тем, что энергия одиночного импульса после расширения достаточно мала (1–10 нДж) и не может быть непосредственно направлена на вход мощного усилителя, в настоящее время широкое распространение получили регенеративные усилители [12–15]. Основными достоинствами таких усилителей являются:

большая эффективность;

высокая стабильность выходной энергии, определяемая лишь флуктуациями энергии лампы накачки [13];

отсутствие необходимости выделения одиночного импульса из цуга импульсов генерации задающего лазера.

Импульсы на выходе регенеративного усилителя имеют характерные значения энергии 1–5 мДж и длительности 10–50 пс. В работе [15] при использовании методики расширения—сжатия при регенеративном усилении в александрите импульсов перестраиваемого лазера на красителе на выходе системы были получены одиночные импульсы с энергией более 3 мДж длительностью 300 фс на частоте 30 Гц.

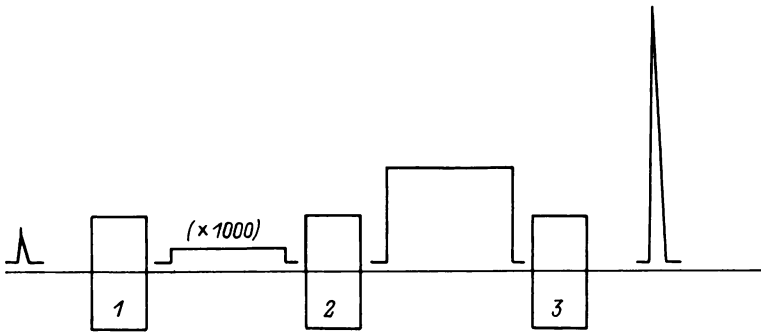


Рис. 8. Метод усиления chirпованного импульса [11]:  
1 — расширитель-усилитель; 2 — усилитель; 3 — компрессор

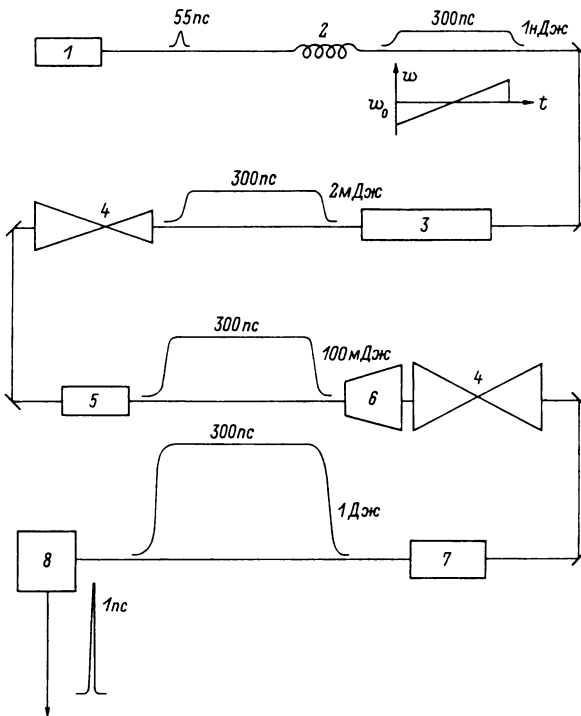


Рис. 9. Схема лазерной системы тераваттной мощности на неодимовом стекле с использованием методики расширения-сжатия [11]:

1 — непрерывный пикосекундный Nd-YAG лазер; 2 — волокно длиной 1.3 км; 3 — регенеративный усилитель на Nd-стекле; 4 — пространственные фильтры; 5 — четырехпроходный усилитель на Nd-стекле; 6 — телескоп; 7 — однопроходный усилитель на Nd-стекле; 8 — двухпроходный решеточный компрессор

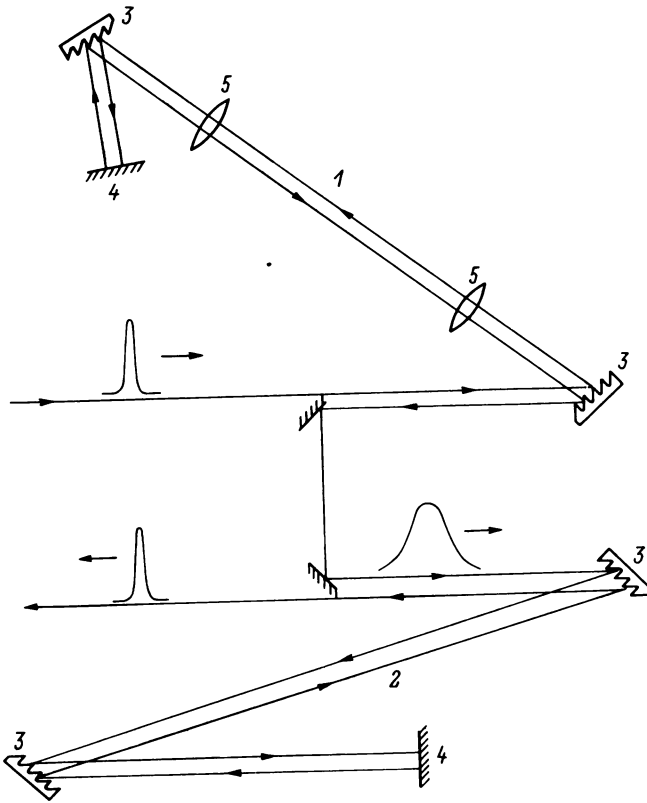


Рис. 10. Система расширения—сжатия на дифракционных решетках [9]:

1 — расширитель; 2 — компрессор; 3 — дифракционные решетки; 4 — зеркала; 5 — телескоп с единичным увеличением

Использование концепции усиления чирпированных импульсов (УЧИ) позволило в последнее время выйти на уровень мощностей более 1 ПВт при частоте всплеск 1 Гц: выходная энергия превосходила 1 кДж [16]. В работе [17] описывается одноканальная лазерная система с выходной мощностью более 50 ТВт. Однако поскольку использовался волоконный расширитель, длительность сжатого импульса была не менее 1 пс [11].

В работе [18] приводятся результаты разработки компактной лазерной системы на фосфатном неодимовом стекле, генерирующей спектрально-ограниченные импульсы длительностью 700 фс и энергией 10 Дж. Для увеличения энергии использовался новый тип регенеративного усилителя [19] с коэффициентом усиления  $10^9$  (выходная энергия до 15 мДж) и цепочка однопроходных усилителей с энергией на выходе 15 Дж. Сжатие выходного импульса осуществлялось парой решеток. Использование методики формирования спектра чирпированного

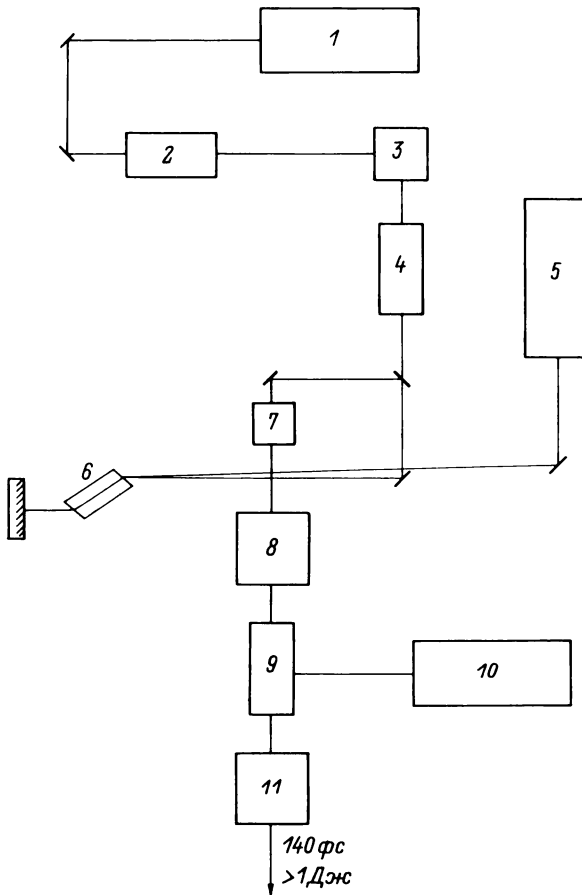


Рис. 11. Мультитераваттная фемтосекундная лазерная система на  $Ti:Al_2O_3$  [21]:

1 — непрерывный пикосекундный Nd-YAG лазер Quantronix-416; 2 — волоконно-решеточный компрессор; 3 — генератор второй гармоники; 4 — фемтосекундный лазер на красителях с синхронной накачкой и пассивной синхронизацией мод; 5 — импульсный Nd-YAG лазер Quanta Ray GCR-4; 6 — предусилитель на  $Ti:Al_2O_3$ ; 7 — система выделения одиночного импульса; 8 — решеточный расширитель; 9 — усилитель на  $Ti:Al_2O_3$ ; 10 — лазер на красителях с ламповой накачкой; 11 — решеточный компрессор. Выходной импульс — длительность 140 фс, энергия > 1 Дж

импульса [20] перед компрессией позволило поднять контраст выходного импульса до  $10^5:1$  (в отсутствие формирования спектра он составлял  $10:1$ ). При помощи описанной лазерной

системы достигались плотности мощности в фокусе оптической системы более  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Использование новых твердотельных активных сред (александрит,  $Ti:Al_2O_3$ ,  $Cr:LiCaAlF_6$ ,  $Cr:LiSrAlF_6$ , форстерит и др.) позволяет генерировать перестраиваемые импульсы тераваттной мощности в различных спектральных диапазонах. Компактная фемтосекундная мультитераваттная лазерная система на сапфире с титаном описана в работе [21] (рис. 11).

В качестве задающего генератора использовался непрерывный лазер на красителе с гибридной синхронизацией мод, генерировавший импульсы с длительностью 50–60 фс средней мощностью 20 мВт на длине волны 815 нм. Промежуточный усилитель на сапфире с титаном имел коэффициент усиления  $10^4$ , энергия выходного импульса составляла около 100 нДж. Для расширения — сжатия использовались две пары решеток, коэффициент расширения — сжатия достигал 5000.

Для накачки окончательных усилительных каскадов на  $Ti:Al_2O_3$  использовались мультиджоулевые лазеры на красителях с ламповой накачкой. На выходе лазерной системы были получены импульсы длительностью около 140 фс и энергией более 1 Дж.

В качестве предварительного усилителя для увеличения энергии импульсов задающего генератора на красителе может

*Лазерные системы  
для генерации мощных сверхкоротких импульсов*

Тип активной среды усилителя [описанный в лит-ре]	Параметры выходного импульса		
	длина волны, нм	длительность импульсов,	энергия/плотность мощности
Раствор органического красителя [3]	616	150	$\frac{3.5 \text{ мДж}}{4 \times 10^{15} \text{ Вт/см}^2}$
Экцимерные молекулы KrF:	[7] 247	280	400 мДж
	[8] 247	1000	300 Дж (12 каналов)
Неодимовое стекло:	[11] 1053	1000	1 Дж
	[16] 1053	1000	1000 Дж (многоканальная)
	[17] 1064	1000	50 Дж (одноканальная)
	[18] 1053	700	$\frac{10 \text{ Дж}}{10^{18} \text{ Вт/см}^2}$
$Ti:Al_2O_3$ [21]	815	140	>1 Дж

использоваться регенеративный усилитель на  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  с лазерной накачкой [22]. В отличие от промежуточного двухпроходового усилителя, описанного в [21], энергия выходного импульса достигала 0.3 мДж.

Задающим генератором для тераваттной лазерной системы на  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  могут служить лазер на сапфире с титаном с инъекцией импульса в 0.1 пДж фемтосекундного лазера на красителе [23] или пикосекундного диода [24].

Таким образом, в настоящее время реализована генерация световых импульсов с пиковой мощностью в несколько тераватт и более в компактных лазерных системах на неодимовом стекле,  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  и эксимерных модулях. Основные параметры мощных лазерных систем приведены в таблице.

Во второй части обзора мы подробно остановимся на возможных применениях рассмотренных мощных лазерных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С.А., Вислоух В.А., Чуркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. — М.: Наука, 1988.
2. Sizer T., Kafka J.D., Duling I.N., Gabel C.W., Mourou G.A. Synchronous Amplification of Subpicosecond Pulses // IEEE J. Quant. Electron. — 1983. — V. QE-19, N 4. — P. 506-510.
3. Murname M.M., Falcone R.W. High-power femtosecond dye laser system // J. Opt. Soc. Am. B. — 1988. — V. 5, N 8. — P. 1573-1575.
4. Murname M.M., Kapteyn H.C., Falcone R.W. X-ray Streak camera with 2ps response // Appl. Phys. Lett. 1990, — V. 56, N 20. — P. 1948-1950.
5. McIntyre I.A., Schwarzenbach A.P., Luk T.S., McPherson A., Boyer K., Rhodes C.K. High-power subpicosecond KrF laser system. — Digest of Technical of Conf. on Lasers & Electro-optics, 9-13 June 1986, San-Francisco, USA. — P. 68.
6. Watanabe S., Endoh A., Watanabe M. Picosecond high-power KrF laser system. — Ibid. — P. 68.
7. Watanabe S., Watanabe M., Sarukura N., Nata K., Adachi T. Ultrahigh power excimer lasers. — In Int. Conf. on Quant. Electron. Techn. Digest. — 1990. — V. 8 (OSA, Washington, DC 1990). — P. 2.
8. Annual Report to the Laser Facility Committee 1989, Rutherford Appleton Laboratory, Chitton, DIDCOT Oxon OX11 0QX, UK. — P. 184.
9. Pessot M., Maine P., Mourou G. 1000 times expansion/compression of optical pulses for chirped pulse amplification // Opt. Commun. — 1987. — V. 62, N 6. — P. 419-421.
10. Martinez O.E. Design of high -power ultrashort pulse amplifiers by expansion and recompression // IEEE J. Quant. Electron. — 1987. — V. QE-23, N 8. — P. 1385-1387.

11. *Maine P., Strickland D., Bado P., Pessot M., Mourou G.* Generation of Ultrahigh Peak Power Pulses by Chirped Pulse Amplification // IEEE J. Quant. Electron. — 1988. — V. 24, N 2. — P. 398-403.

12. *Coe J.S., Maine P., Bado P.* Regenerative amplification on picosecond pulses in Nd-YLF gain narrowing and gain saturation // J. Opt. Soc. Am. B. — 1988. — V. 5, N 12. — P. 2560-2563.

13. *Murray J.E., Lowdermilk W.H.* Nd-YAG regenerative amplifier // J. Appl. Phys. — 1980. — V. 51, N 7. — P. 3548-3555.

14. *Harter D.J., Bado P.* Wavelength tunable alexandrite regenerative amplifier // Appl. Opt. — 1988. — V. 27, N 21. — P. 4392-4395.

15. *Pessot M., Squier J., Bado P., Mourou G., Harter D.J.* Chirped pulse amplification of 300 fs pulses in an alexandrite regenerative amplifier // IEEE J. Quant. Electron. — 1989. V. 25, N 1. — P. 61-66.

16. *Bado P., Coe S., Luctapie L., Squier J., Mourou G.* Ultra high peak power generation terawatt to petawatt. — In Conf. on Quant. Electron. Tech. Digest Series. — 1990. — V. 8 (OSA, Washington, DC 1990). — P. 2.

17. *Sauturet C., Husson D., Seznec S., Thiel G., Mainfray G., Lompre L.A., Ferray M., Migus A.* Chirped pulse amplification to multiterawatt level. — Ibid, p. 2.

18. *Perry M.D., Patterson F.G.* Multiterawatt subpicosecond Nd: glass laser system. — Ibid, p. 2.

19. *Patterson F.G., Perry M.D.* Novel high gain/low loss amplifier for generating intense high contrast subpicosecond pulses via chirped pulse amplification. In Conference on Lasers & Electro-Optics (OSA, Washington, DC 1990), Advance program, paper CWSSO, p. 67.

20. *Perry M.D., Patterson F.G., Campbell E.M.* „Spectral shaping in chirped pulse amplification“ (to be published).

21. *Kapteyn H.C., Sullivan A., Hamster H., Falcone R.W.* Multiterawatt femtosecond laser based on Ti-sapphire. — Reprint of Department of Physics, University of California at Berkley, Berkley, California, 94720, USA (to be published).

22. *Viallancourt G., Norris T.B., Coe J.S., Bado P., Mourou G.A.* Operation of a 1-kHz pulse pumped Ti-sapphire regenerative amplifier // Opt. Lett. — 1990. — V. 15, N 6. — P. 317-319.

23. *LaGasse M.J., Schoenlein R.W., Fujimoto J.G., Schulz P.A.* Amplification of femtosecond pulses in Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using an injection-seeded laser // Opt. Lett. — 1989. — V. 14, N 24. — P. 1347-1349.

24. *Basu S., May P., Halbout J.M.* 64-dB amplification of 19-psec laser-diode pulses in a Ti-sapphire laser // Opt. Lett., 1989. — V. 14, N 22. — P. 1272-1274.