

индексов теплоемкости  $\alpha$ , восприимчивостей  $\gamma$ ,  $\gamma_k$ , параметров порядка  $\beta$ ,  $\beta_k$ , индексов Фишера  $\eta$ ,  $\eta_k$  и радиусов корреляции  $\nu$ ,  $\nu_k$  выполнен на основе соотношений теории конечномерного скейлинга с соблюдением единой методики в рамках одного исследования. Значения индексов Фишера  $\eta$  и  $\eta_k$  для этой модели рассчитаны впервые. Полученные результаты свидетельствуют о принадлежности 3D-фрустрированной модели Гейзенберга на треугольной слоистой решетке к новому классу универсальности. Результаты данного исследования позволяют говорить о том, что класс универсальности критического поведения антиферромагнитной модели Гейзенберга на треугольной решетке зависит от типа и величины межслойного обменного взаимодействия.

Работа поддержана РФФИ (грант 07-02-00194 и грант "Юг России" 06-02-96602), Программой ведущих научных школ (грант НШ-5547.2006.2) и Фондом содействия отечественной науке.

## Список литературы

1. Паташинский А З, Покровский В Л *Флуктуационная теория фазовых переходов* 2-е изд. (М.: Наука, 1982) [Translated into English: Patashinskii A Z, Pokrovskii V L *Fluctuation Theory of Phase Transitions* (Oxford: Pergamon Press, 1979)]
2. Ma Sh *Modern Theory of Critical Phenomena* (Reading, Mass.: W.A. Benjamin, 1976) [Ma Ш *Современная теория критических явлений* (М.: Мир, 1980)]
3. Доценко Вик С *УФН* **165** 481 (1995) [Dotsenko Vik S *Phys. Usp.* **38** 457 (1995)]
4. Коршунов С Е *УФН* **176** 233 (2006) [Korshunov S E *Phys. Usp.* **49** 225 (2006)]
5. Муртазаев А К *УФН* **176** 1119 (2006) [Murtazaev A K *Phys. Usp.* **49** 1092 (2006)]
6. Малеев С В *УФН* **172** 617 (2002) [Maleev S V *Phys. Usp.* **45** 569 (2002)]
7. Камиллов И К, Муртазаев А К, Алиев Х К *УФН* **169** 773 (1999) [Kamilov I K, Murtazaev A K, Aliev Kh K *Phys. Usp.* **42** 689 (1999)]
8. Loison D et al. *Письма в ЖЭТФ* **72** 487 (2000) [*JETP Lett.* **72** 337 (2000)]
9. Kawamura H *J. Phys. Soc. Jpn.* **56** 474 (1987)
10. Kawamura H *J. Phys. Soc. Jpn.* **61** 1299 (1992)
11. Mailhot A, Plumer M L, Caille A *Phys. Rev. B* **50** 6854 (1994)
12. Муртазаев А К, Рамазанов М К, Бадиев М К *ЖЭТФ* **132** 1152 (2007) [Murtazaev A K, Ramazanov M K, Badiev M K *JETP* **105** 1011 (2007)]
13. Murtazaev A K, Ramazanov M K *Phys. Rev. B* **76** 174421 (2007)
14. Mitsutake A, Sugita Y, Okamoto Y *Biopolymers* **60** 96 (2001)
15. Svistov L E et al. *Phys. Rev. B* **67** 094434 (2003)
16. Свистов Л Е и др. *Письма в ЖЭТФ* **80** 231 (2004) [Svistov L E et al. *JETP Lett.* **80** 204 (2004)]
17. Свистов Л Е и др. *Письма в ЖЭТФ* **81** 133 (2005) [Svistov L E et al. *JETP Lett.* **81** 102 (2005)]
18. Pelissetto A, Rossi P, Vicari E *Phys. Rev. B* **65** 020403 (2001)
19. Peles A, Southern B W *Phys. Rev. B* **67** 184407 (2003)
20. Smirnov A I et al. *Phys. Rev. B* **75** 134412 (2007)
21. Гехт Р С *ЖЭТФ* **102** 1968 (1992) [Gekht R S *JETP* **75** 1058 (1992)]
22. Гехт Р С *УФН* **159** 2 (1989) [Gekht R S *Sov. Phys. Usp.* **32** 871 (1989)]
23. Binder K, Wang J-Sh *J. Stat. Phys.* **55** 87 (1989)
24. Peczak P, Ferrenberg A M, Landau D P *Phys. Rev. B* **43** 6087 (1991)
25. Binder K, Heermann D W *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics* (Berlith: Springer-Verlag, 1988) [Биндер К, Хеерман Д В *Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике* (М.: Наука, 1995)]
26. Binder K *Z. Phys. B* **43** 119 (1981)
27. Ferrenberg A M, Landau D P *Phys. Rev. B* **44** 5081 (1991)
28. Ferdinand A E, Fisher M E *Phys. Rev.* **185** 832 (1969)
29. Fisher M E, Barber M N *Phys. Rev. Lett.* **28** 1516 (1972)
30. Landau D P *Physica A* **205** 41 (1994)
31. Loison D *Phys. Lett. A* **257** 83 (1999)

32. Муртазаев А К, Камиллов И К, Магомедов М А *ЖЭТФ* **120** 1535 (2001) [Murtazaev A K, Kamilov I K, Magomedov M A *JETP* **93** 1330 (2001)]
33. Holm Ch, Janke W *Phys. Rev. B* **48** 936 (1993)

PACS numbers: **42.55.-f**, **42.60.By**, **42.65.-k**  
DOI: 10.3367/UFNr.0178.200809h.1006

## Петтаваттные лазеры на основе оптических параметрических усилителей: состояние и перспективы

Е.А. Хазанов, А.М. Сергеев

### 1. Введение

В докладе приведен обзор современного состояния фемтосекундных лазеров с рекордно высокой на сегодня мощностью — порядка 1 ПВт. На основе анализа преимуществ и недостатков параметрического усиления по сравнению с лазерным усилением в неодимовом стекле и кристалле сапфира показано, что использование параметрических усилителей является весьма перспективным путем для преодоления петтаваттного барьера. Обсуждаются также и другие концепции мультипеттаваттных лазеров, в том числе основанных на уникальных свойствах лазерной керамики.

С момента создания первого лазера одной из важнейших целей квантовой электроники было и остается увеличение пиковой мощности лазерного излучения. Само понятие "высокая пиковая мощность" постоянно меняется, и сегодня речь идет о мощности не менее 1 ПВт ( $10^{15}$  Вт). Ключевой вехой, позволившей достичь такой мощности, стало изобретение [1] в 1985 г. основополагающего принципа — усиления чирпированных (растянутых во времени, частотно-модулированных) импульсов — СРА (chirped pulse amplification). Идея (рис. 1) заключается в том, что перед усилением фемтосекундный импульс растягивается до длительности порядка 1 нс, что уменьшает его мощность и позволяет усилить его до большой энергии без самофокусировки и пробоя, а затем сжимается до исходной длительности с помощью дифракционных решеток, имеющих высокий порог пробоя, так как свет только отражается от них и не проходит

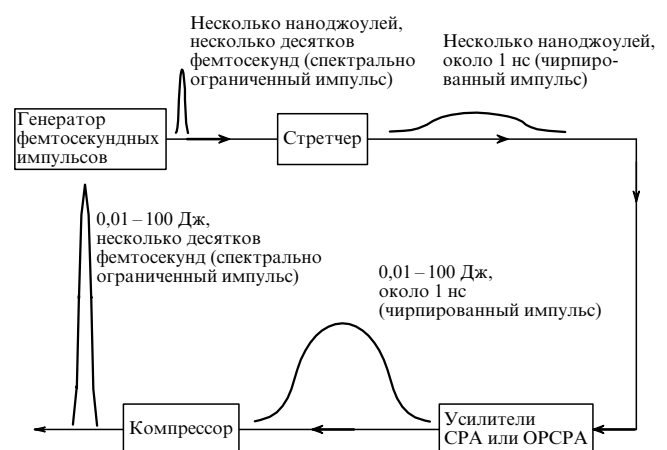


Рис. 1. Общая схема мощных фемтосекундных лазеров.

**Таблица.** Сравнение концепций петаваттных лазеров. Символы "+", "-" и "0" указывают соответственно на характеристики выше средних, ниже средних и средние

Усиливающая среда	Nd:стекло		Ti:сапфир		DKDP		Cr:YAG-керамика	
Источник энергии	Nd:стекло		Nd:стекло		Nd:стекло		Nd:стекло	
Накачка	нет	(+)	$2\omega$ Nd*	(-)	$2\omega$ Nd	(-)	$1\omega$ Nd**	(0)
Длительность накачки, нс	нет	(+)	> 10	(0)	1	(-)	> 10	(0)
Апертура усилителя, см	40	(0)	8	(-)	40	(0)	> 50	(+)
Минимальная длительность, фс	250	(-)	25	(+)	25	(+)	25	(+)
К.п.д. ( $1\omega$ Nd $\rightarrow$ фс)***, %	80	(+)	15	(0)	10	(-)	25	(0)
Количество петаватт из 1 кДж $1\omega$ Nd	3,2 (3)****		6 (1,5)****		4		10	
Достигнутая мощность, ПВт	1,36 [2]		0,85 [4]		0,56 [23]		—	
<p>* Вторая гармоника неодимового лазера.  ** Первая гармоника неодимового лазера.  *** Из импульса первой гармоники неодимового лазера — в фемтосекундный импульс.  **** Стойкость дифракционных решеток и кристаллов сапфира ограничивает максимальную мощность на уровне 3 ПВт и 1,5 ПВт соответственно.</p>								

внутри материальной среды. Принцип СРА используется во всех без исключения лазерах с мощностью 1 ТВт и более.

Петаваттная мощность впервые была получена в 1996 г. на основе СРА в неодимовом стекле [2]: длительность импульса 440 фс, энергия 600 Дж. Открытие [3] кристалла сапфира (корунд с титаном) позволило получить значительно более короткие импульсы и привело к созданию петаваттного лазера [4] с гораздо меньшей энергией импульса — 28 Дж при длительности 33 фс. В [5] было предложено использовать вместо обычного лазерного усиления параметрическое усиление (ОРСРА — optical parametrical chirped pulse amplification). Первый ОРСРА-лазер петаваттного уровня был создан [6] в 2006 г. на основе нелинейного кристалла DKDP (Deuterated Potassium Dihydrogen Phosphate).

Таким образом, все существующие и проектируемые петаваттные лазеры можно разделить на три типа по усиливающей среде: 1) неодимовое стекло [2, 7–14], 2) сапфир (корунд с титаном) [4, 13, 15–17] и 3) параметрические усилители на кристаллах KDP (Potassium Dihydrogen Phosphate) и DKDP [6, 18–25] (см. таблицу). Во всех трех типах энергия (в виде инверсии населенности) запасается в ионах неодима в стекле. В первом случае эта энергия непосредственно преобразуется в энергию чирпированного импульса, который затем сжимается. Во втором и третьем случаях запасенная энергия преобразуется в энергию узкополосного наносекундного импульса, который после преобразования во вторую гармонику служит накачкой усилителей чирпированных импульсов. Эта накачка либо обеспечивает инверсию населенностей в кристалле сапфира, либо параметрически распадается на два чирпированных импульса в нелинейном кристалле.

Пиковая мощность определяется длительностью сжатого импульса и его энергией. Максимальная энергия достигается в лазерах на неодимовом стекле, поскольку запасенная в виде инверсии населенности энергия непосредственно преобразуется в чирпированный импульс. Однако узкая полоса усиления лазерных стекол с неодимом ограничивает длительность сжатого импульса на уровне несколько сотен фемтосекунд. В результате оптическая стойкость дифракционных реше-

ток ограничивает продвижение в мультитераваттный диапазон.

В отличие от лазеров на неодимовом стекле лазеры на сапфире обеспечивают широкополосное усиление, позволяющее сжать импульс вплоть до 10–20 фс. В то же время при существующей технологии выращивания апертура кристаллов сапфира составляет не более 10 см. Столь малая апертура при попытке превысить петаваттный уровень будет приводить к ограничению энергии чирпированного импульса из-за оптического пробоя и самофокусировки.

## 2. Преимущества и недостатки параметрического усиления

От вышеуказанных недостатков неодимового стекла и сапфира свободны параметрические усилители, поскольку апертура выращиваемых сейчас нелинейных кристаллов KDP и DKDP составляет 40 см, что сравнимо с размерами элементов из неодимового стекла, а полоса усиления сравнима с полосой сапфира. Более того, сам принцип ОРСРА имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с СРА.

Во-первых, при ОРСРА достигается очень высокий коэффициент усиления за один проход — до  $10^4$ , по сравнению с 10 при СРА. Во-вторых, при ОРСРА усиление направленное, что исключает усиленную спонтанную люминесценцию и самовозбуждение усилителей в поперечном к распространению накачки направлении, снимая существенное для СРА-лазеров ограничение. В-третьих, низкий уровень усиленной спонтанной люминесценции в продольном направлении обеспечивает высокий временной контраст сжатого импульса. В-четвертых, при ОРСРА разница энергий кванта накачки и сигнала, в отличие от таковой при СРА, не выделяется в кристалле в виде тепла, так как выносится холостой волной. Даже при работе в частотном режиме это обеспечивает малые тепловые нагрузки и, как следствие, дифракционное качество пучка. И наконец, искажение спектра чирпированного импульса из-за насыщения усиления при ОРСРА меньше, чем при СРА, поскольку отсутствует эффект уменьшения инверсии населенностей к концу импульса. Таким образом, использование пара-

метрических усилителей — весьма перспективный путь преодоления петаваттного барьера.

В то же время следует отметить и недостатки ОРСРА. Прежде всего, это необходимость использования короткого (длительностью около 1 нс) импульса накачки, поскольку в отличие от лазерного усилителя параметрический усилитель не может накапливать энергию за счет инверсии населенностей. По этой же причине ОРСРА требует высокой (100 пс) точности синхронизации импульса накачки и chirпированного импульса. Кроме того, при ОРСРА практически невозможно использовать несколько лазеров для накачки одного усилителя, что легко реализуется при СРА.

Как видно из вышеизложенного, все преимущества ОРСРА связаны непосредственно с усилителем, а недостатки — с лазером накачки, требования к которому выше, чем при СРА.

### 3. Выбор нелинейного кристалла для ОРСРА

Наиболее перспективной накачкой для создания мощных параметрических усилителей является излучение второй гармоники лазеров на неодимовом стекле с длиной волны  $\lambda_p = 527$  нм. Для этой длины волны наиболее широкую полосу усиления имеют кристаллы LBO (борат лития), ВВО (метаборат бария), KDP и DKDP [26, 27]. Первые два кристалла обладают большой нелинейностью, но современная технология выращивания позволяет получать такие кристаллы с поперечными размерами лишь порядка нескольких сантиметров. Следовательно, кристаллы LBO и ВВО могут использоваться только в первых каскадах ОРСРА. Кристаллы KDP и DKDP, хотя и обладают меньшей нелинейностью, могут быть выращены до размеров, обеспечивающих апертуру в 40 см и более, что позволяет использовать их в оконечных каскадах петаваттных ОРСРА-лазеров.

Ключевое значение для широкополосного параметрического усиления имеют дисперсионные зависимости показателя преломления, определяющие расстройку волновых векторов  $\Delta k$ , которая может быть представлена в виде разложения в ряд Тейлора по отстройке  $\Omega$  от центральной частоты трехволнового синхронизма:

$$\Delta k(\Omega) \equiv \Delta k(0) - \left( \frac{dk_s}{d\omega} + \frac{dk_{iz}}{d\omega} \right) \Omega - \frac{1}{2} \left( \frac{d^2k_s}{d\omega^2} + \frac{d^2k_{iz}}{d\omega^2} \right) \Omega^2 - O(\Omega^3),$$

где  $k_s$  — волновой вектор сигнальной волны, распространяющейся вдоль оси  $z$ ,  $k_{iz}$  — проекция волнового вектора холостой волны на ось  $z$ . В зависимости от количества нулевых слагаемых в этом ряду говорят о фазовом синхронизме (нулю равно только первое слагаемое), групповом синхронизме (нулевые первые два слагаемых) и сверхширокополосном синхронизме (нулевые первые три слагаемых). Для реализации последнего случая необходимо выполнение трех условий. При заданной длине волны накачки  $\lambda_p$  имеются три свободных параметра: два угла (между оптической осью кристалла и волновыми векторами накачки и сигнала) и длина волны сигнала  $\lambda_s$ . Анализ, проведенный в [27], показал, что для кристаллов, в которых  $\lambda^* > 2\lambda_p$ , существует такой набор указанных трех параметров, при котором

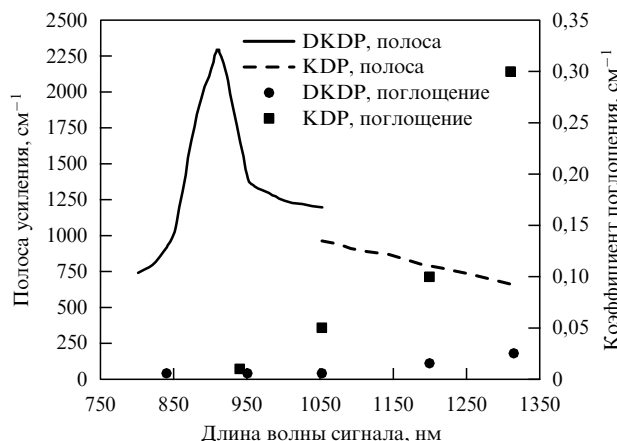


Рис. 2. Коэффициент поглощения обыкновенной волны и ширина полосы (по полувысоте) усиления при интенсивности накачки  $1 \text{ ГВт см}^{-2}$  на длине волны  $\lambda_p = 527$  нм и длине кристалла 70 мкм [27].

выполняются три условия сверхширокополосного синхронизма, а для кристаллов, в которых  $\lambda^* < 2\lambda_p$ , эти три условия никогда не выполняются и сверхширокополосный синхронизм не существует. Здесь  $\lambda^*$  — длина волны, при которой вторая производная волнового числа обыкновенной волны по частоте обращается в нуль,  $d^2k/d\omega^2 = 0$ .

При  $\lambda^* < 2\lambda_p$  максимальная ширина полосы усиления достигается при вырожденном взаимодействии ( $\lambda_s = 2\lambda_p$ ). К этому типу кристаллов относится кристалл KDP, который в работах [18, 19, 26, 28–31] рассматривался как единственный кандидат для мощных ОРСРА-лазеров. Однако, как видно из рис. 2, максимальная полоса усиления в KDP не превышает  $1000 \text{ см}^{-1}$  и достигается при  $\lambda_s = 2\lambda_p = 1054$  нм — в диапазоне, в котором не существует лазеров с длительностью импульса 30 фс и меньшей.

В [32] предложено вместо KDP использовать кристалл DKDP. В [27, 32, 33] определены достоверные дисперсионные зависимости DKDP и рассмотрен вопрос о влиянии на них степени дейтерирования. В этих же работах показано, что для DKDP  $\lambda^* < 2\lambda_p$  и при  $\lambda_s = 910$  нм выполняются условия сверхширокополосного синхронизма, а полоса усиления более чем вдвое превосходит полосу усиления в KDP (см. рис. 2), позволяя усиливать импульсы длительностью  $\sim 15$  фс. Важно отметить, что как на сигнальной (910 нм), так и на холостой (1250 нм) длинах волн имеются источники фемтосекундных импульсов с такой длительностью — лазеры на сапфире и на форстерите с хромом [34, 35]. Кроме того, кристалл DKDP имеет существенно меньшее поглощение (см. рис. 2).

Таким образом, наиболее перспективной архитектурой петаваттных ОРСРА-лазеров является усиление chirпированного импульса с центральной длиной волны 910 нм в кристалле DKDP. В разделе 4 описан созданный согласно этой архитектуре ОРСРА-лазер мощностью 0,56 ПВт [23].

### 4. 0,56-петаваттный ОРСРА-лазер на кристалле DKDP

Общая схема лазера, созданного в Институте прикладной физики (ИПФ) РАН, приведена на рис. 3. Как

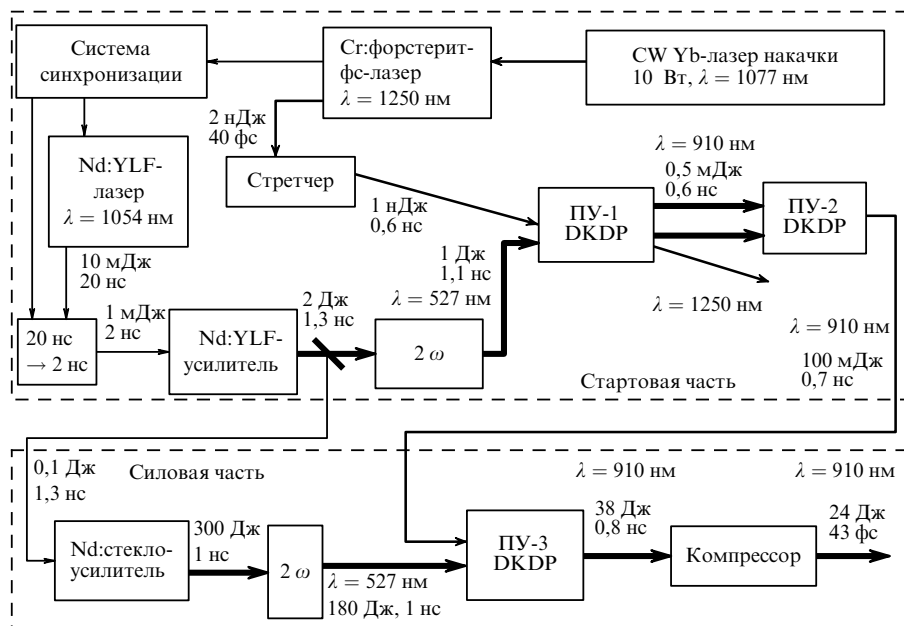


Рис. 3. Схема ОРСПА-лазера с мощностью 0,56 ПВт [23]. (ПУ — параметрический усилитель.)

указывалось в разделе 3, на вход параметрического усилителя на основе кристалла DKDP могут подаваться как сигнальная волна (лазер на сапфире,  $\lambda_s = 910$  нм), так и холостая (лазер на форстерите с хромом,  $\lambda_s = 1250$  нм). В работе [23] использовался последний вариант — задающим генератором являлся лазер на форстерите с хромом, излучающий импульсы длительностью 40 фс с энергией 3 нДж. Перед усилением эти импульсы растягивались в стретчере.

При растяжении импульса на одной длине волны (холостой), а сжатии — на другой (сигнальной) длине волны требуется нестандартная дисперсионная характеристика стретчера. Расчеты показали, что такую характеристику имеет компрессор, в который установлены две призмы с одинаковыми углами при вершинах [36, 37]. Такой нестандартный стретчер на основе голографической дифракционной решетки (1200 штрихов на 1 мм) растягивал 40-фемтосекундный импульс до длительности 0,6 нс и имел полосу пропускания  $1000 \text{ см}^{-1}$ .

Накачкой первых двух параметрических усилителей служил одномодовый одночастотный Nd:YLF-лазер с энергией импульса второй гармоники ( $\lambda_p = 527$  нм) до 1 Дж [38], синхронизованный с лазером на форстерите с хромом с точностью 50 пс [39]. Третий параметрический усилитель накачивался импульсом второй гармоники лазера на неодимовом стекле с энергией 180 Дж и длительностью импульса 1 нс. Таких высоких значений параметров удалось добиться благодаря реализации ряда ключевых особенностей лазера накачки: высокоэффективные усилители [40]; специальная конструкция пространственных фильтров [41]; система ввода [42] излучения в усилитель, позволившая довести коэффициент заполнения апертуры выходного каскада усиления до 0,8; использование циркулярной поляризации в двух выходных усилителях для подавления мелкомасштабной самофокусировки [43]; удвоитель с первым типом синхронизма, что позволило получить к.п.д. удвоения 70 % при термонаведенной деполяризации более 2 % [44].

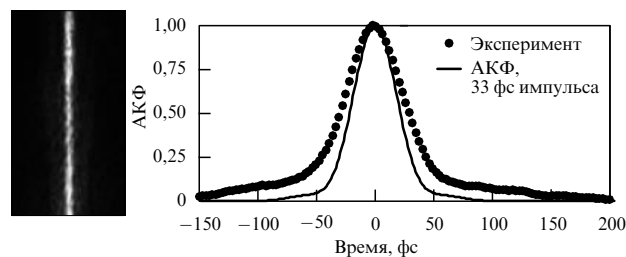


Рис. 4. Автокорреляционная функция выходного импульса (фотография и точки) и фурье-ограниченного импульса длительностью 33 фс (сплошная кривая) [23].

Первый параметрический усилитель — двухпроходный. На первом проходе он осуществлял преобразование импульсов на длине волны 1250 нм в импульсы на длине волны 910 нм, а на втором проходе усиливал излучение на длине волны 910 нм. Второй усилитель — однопроходный, его к.п.д. составлял  $\sim 15\%$ , что соответствует результатам численного моделирования. Ширина спектра усиленного импульса была примерно на 30 % меньше ширины спектра инжектируемого сигнала. При сжатии этого импульса были получены импульсы длительностью  $\sim 80$  фс при мощности 0,44 ТВт [20].

Третий параметрический усилитель (длина кристалла DKDP 80 мм, апертура 120 мм) находился в насыщении, благодаря чему спектр chirпированного импульса расширялся, его энергия достигала 38 Дж, а к.п.д. усилителя составлял более 20 %. В компрессоре использовались две дифракционные решетки (1200 штрихов на 1 мм) с размерами  $24 \times 35$  см. Максимальная энергия сжатых импульсов 24 Дж. Автокорреляционной функции (рис. 4) соответствует импульс длительностью по полувысоте 43 фс, т.е. пиковая мощность составляла 0,56 ПВт. Последняя величина в 35 раз превышает уровень, ранее достигнутый [19] в ОРСПА-лазерах (рис. 5).

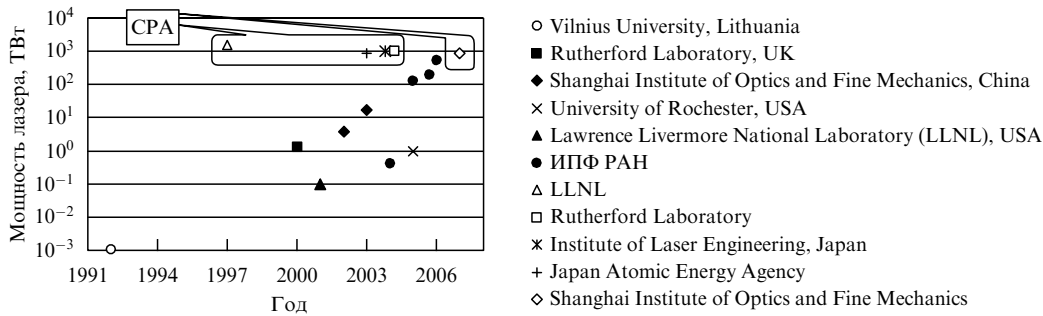


Рис. 5. ОРСПА-лазеры и петаваттные СПА-лазеры.

Благодаря ОРСПА и компактному лазеру накачки на неодимовом стекле петаваттный лазер со всей инфраструктурой умещается в лаборатории площадью менее 80 м<sup>2</sup>.

### 5. Перспективы продвижения в мультипетаваттный диапазон

Как указывалось в разделе 4, одним из преимуществ ОРСПА-лазеров на кристаллах DKDP является легкость масштабирования, которое сегодня ограничено лишь энергией импульса накачки. Сейчас выполняются четыре крупных проекта, имеющих целью достижение мультипетаваттной мощности ОРСПА-лазеров.

Прежде всего отметим российский проект [45], выполняемый в Российском федеральном ядерном центре (г. Саров) с участием ИПФ РАН. Этот проект является прямым продолжением работы [23]. В дополнение к лазеру, аналогичному использованному в [23], создан еще один параметрический усилитель на кристалле DKDP диаметром 200 мм. Для накачки использовался один из каналов установки "Луч" [46] (энергия импульса второй гармоники 1 кДж, длительность импульса 2 нс). В качестве задающего генератора для канала установки "Луч" был специально разработан лазер, обеспечивающий синхронизацию накачки как с фемтосекундным лазером, так и с лазером накачки предыдущих каскадов параметрического усиления [47]. Максимальная энергия chirпированного импульса после окончательного каскада усиления составила около 100 Дж [45]. Эффективность четырехрешеточного компрессора 68%. Завершить работы по компрессии планируется в 2008–2009 гг., достигнув мощности около 2 ПВт.

На 2011 г. запланировано завершение строительства 10-петаваттного ОРСПА-лазера в Резерфордской лаборатории (Великобритания) [24]. В качестве накачки двух последних усилителей используются два канала лазера "Вулкан" на неодимовом стекле с энергией импульса 600 Дж в каждом. Так же, как и в [23, 45], используется сверхширокополосный синхронизм в кристалле DKDP на длине волны chirпированного импульса около 910 нм. Особенностью этого проекта является очень длинный (3 нс) chirпированный импульс.

Недавно стартовали два крупнейших панъевропейских лазерных проекта: HiPER (High Power laser Energy Research) [48] и ELI (Extreme Light Infrastructure) [49]. Проект HiPER направлен на исследование лазерного управляемого термоядерного синтеза при относительно скромной энергии излучения, сжимающего лазерную

мишень: менее 0,4 МДж во второй гармонике против 1,8 МДж в третьей гармонике на установке NIF (National Ignition Facility) [50]. Такая "экономия" энергии достигается за счет использования наряду с наносекундными импульсами более коротких (порядка 1 пс) импульсов с мощностью от 150 до 2000 ПВт для поджигания термоядерной мишени. Целью проекта ELI является создание сверхмощного (50–1000 ПВт) фемтосекундного лазера для проведения уникальных научных исследований. В этих панъевропейских проектах, так же как и в [45], архитектура фемтосекундного лазера [23] (параметрическое усиление chirпированных лазерных импульсов с центральной длиной волны 910 нм в кристалле DKDP) признается оптимальной для дальнейшего масштабирования.

Схема с ОРСПА является не единственной из обсуждаемых схем, предназначенных для создания в будущем мультипетаваттных и экзаваттных лазеров. Возможно появление кристаллов сапфира с апертурой 30–40 см, использование нескольких марок неодимовых стекол для увеличения полосы усиления. Особенно интересной представляется концепция, связанная с лазерной керамикой — новым оптическим материалом, совмещающим преимущества стекла и монокристалла. Лазерная керамика уже внесла существенные коррективы в лазеры с высокой средней мощностью [51]. Имеется огромное количество публикаций и по фемтосекундным керамическим лазерам малой мощности. В мощных лазерах керамика на практике пока не применялась, однако в будущем лазеры на основе керамики вполне могут составить конкуренцию как лазерам на неодимовом стекле и сапфире, так и ОРСПА-лазерам.

В частности, в [52] предложена концепция создания сверхмощных фемтосекундных лазеров на основе керамики Sr:YAG, сочетающая в себе как традиционные принципы (источник энергии — наносекундные импульсы лазера на неодимовом стекле, CPA), так и новые возможности, открывающиеся благодаря использованию лазерной керамики. Как видно из таблицы, керамика из Sr:YAG одновременно обладает тремя ключевыми свойствами: широкая полоса усиления, позволяющая усиливать импульсы до 20 фс; большая апертура, дающая возможность усиливать chirпированные импульсы до мультикилоджоульного уровня; высокая эффективность преобразования узкополосного излучения лазеров на неодимовом стекле. Эти свойства открывают возможность создания уникального лазера с пиковой мощностью 100 ПВт при энергии накачки 10 кДж. Заметим, что хотя элементы из Sr:YAG-керамики пока

не использовались как активные элементы, они широко применяются [53, 54] в качестве пассивных модуляторов добротности.

Кроме большой апертуры, чрезвычайно важным преимуществом керамики является возможность создания активных сред, которые практически не могут быть выращены в виде монокристалла. Примером могут служить допированные неодимом и иттербием оксиды редкоземельных элементов: Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [55], Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [56], (Nd,Yb):Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [57], Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [58] и т.д. В работе [59] на кристаллах Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> получена генерация с длительностью 65 и 70 фс соответственно. Это позволяет предложить еще один вариант построения мультитераваттного лазера: CPA в широкоапертурной керамике (Nd,Yb):Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или (Nd,Yb):Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с ламповой накачкой, по аналогии с лазерами на неодимовом стекле, длительность импульсов которых значительно больше. Возбуждение от ионов неодима передается ионам иттербия, которые обеспечивают широкую полосу (прямая накачка иттербия возможна только диодными лазерами, что затрудняет возможность масштабирования). Еще более широкая полоса может быть получена с помощью одновременного использования нескольких оксидных кристаллов (Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и т.д.) аналогично использованию нескольких марок неодимовых стекол [12, 50] или нескольких гранатов с ионом хрома [52]. Таким образом, в ближайшем будущем возможно появление новых петаваттных и мультитераваттных проектов, основанных на CPA в лазерной керамике.

## 6. Заключение

Создаваемые во всем мире петаваттные лазеры уже в ближайшее время станут инструментом для освоения новой области знаний — физики экстремальных световых полей [49]. В будущем петаваттные лазеры могут быть использованы в качестве ускорителей заряженных частиц для фундаментальных исследований, военнотехнических и медицинских приложений. Из последних следует отметить создание фабрики изотопов для позитронно-эмиссионной томографии, а также компактного и дешевого источника ионов для адронной терапии.

Эти и другие потенциальные приложения, а также значительный прогресс в области петаваттных лазеров вызывают интерес коммерческих фирм к освоению петаваттного диапазона, что еще больше ускоряет развитие лазерных технологий. Все это позволяет надеяться, что через 5–10 лет петаваттные лазеры (в том числе ОРСПА-лазеры) перестанут быть экзотикой и станут доступными для многих лабораторий во всем мире.

## Список литературы

- Strickland D, Mourou G *Opt. Commun.* **56** 219 (1985)
- Pennington D M et al. *Proc. SPIE* **3047** 490 (1997)
- Moulton P F *J. Opt. Soc. Am. B* **3** 125 (1986)
- Aoyama M et al. *Opt. Lett.* **28** 1594 (2003)
- Пискарскас А, Стабинис А, Янкаускас А *УФН* **150** 127 (1986) [Piskarskas A, Stabinis A, Yankauskas A *Sov. Phys. Usp.* **29** 869 (1986)]
- Lozhkarev V et al., Preprint No. 720 (Nizhniy Novgorod: Inst. of Appl. Phys. of the Russ. Acad. of Sci., 2006)
- Barty C P J et al., in *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO): San Francisco, Calif., May 17–21, 2004* (Washington, DC: Opt. Soc. of Am., 2004) p. JTUG4
- Waxer L J et al. *Opt. Photon. News* **16** (7) 30 (2005)
- Kitagawa Y et al. *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 281 (2004)
- Danson C N et al. *Nucl. Fusion* **44** S239 (2004)
- Blanchot N et al. *Proc. SPIE* **5975** 59750C (2005)
- Gaul E et al., in *Proc. Advanced Solid-State Photonics, Nara, Japan, January 27–30, 2008*, p. MC3
- Zhu Q et al. *Proc. SPIE* **6823** 682306 (2007)
- Perry M D et al. *Opt. Lett.* **24** 160 (1999)
- Collier J L et al., in *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO): Baltimore, MD, May 22–27, 2005* (Washington, DC: Opt. Soc. of Am., 2005) p. JFB1
- Liang X et al. *Opt. Express* **15** 15335 (2007)
- Yanovsky V et al. *Opt. Express* **16** 2109 (2008)
- Ross I N et al. *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2945 (2002)
- Yang X et al. *Opt. Lett.* **27** 1135 (2002)
- Андреев Н Ф и др. *Письма в ЖЭТФ* **79** 178 (2004) [Andreev N F et al. *JETP Lett.* **79** 144 (2004)]
- Ложкарев В В и др. *Письма в ЖЭТФ* **82** 196 (2005) [Lozhkarev V V et al. *JETP Lett.* **82** 178 (2005)]
- Lozhkarev V V et al. *Opt. Express* **14** 446 (2006)
- Lozhkarev V V et al. *Laser Phys. Lett.* **4** 421 (2007)
- Chekhlov O et al. *Proc. SPIE* **6735** 67350J (2007)
- Karsch S et al., in *Proc. Advanced Solid-State Photonics, Nara, Japan, January 27–30, 2008*, p. WF1
- Butkus R et al. *Appl. Phys. B* **79** 693 (2004)
- Lozhkarev V V et al. *Laser Phys.* **15** 1319 (2005)
- Ross I N et al. *Opt. Commun.* **144** 125 (1997)
- Matousek P, Rus B, Ross I N *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 158 (2000)
- Ross I N et al. *Appl. Opt.* **39** 2422 (2000)
- Chekhlov O V et al. *Opt. Lett.* **31** 3665 (2006)
- Freidman G I et al. *Proc. SPIE* **4630** 135 (2002)
- Freidman G I et al. *Proc. SPIE* **4972** 90 (2003)
- Yanovsky V et al. *Opt. Lett.* **18** 1541 (1993)
- Ivanov A A, Alfimov M V, Zheltikov A M *Laser Phys.* **10** 796 (2000)
- Yakovlev I V et al. *Proc. SPIE* **6614** 661403 (2007)
- Фрейдман Г И, Яковлев И В *Квантовая электроника* **37** 147 (2007) [Freidman G I, Yakovlev I V *Quantum Electron.* **37** 147 (2007)]
- Потемкин А К и др. *Квантовая электроника* **35** 302 (2005) [Potemkin A K et al. *Quantum Electron.* **35** 302 (2005)]
- Катин Е В, Ложкарев В В, Палашов О В, Хазанов Е А *Квантовая электроника* **33** 836 (2003) [Katin E V, Lozhkarev V V, Palashov O V, Khazanov E A *Quantum Electron.* **33** 836 (2003)]
- Poteomkin A K et al. *IEEE J. Quantum Electron.* (to be published)
- Potemkin A K et al. *Appl. Opt.* **46** 4423 (2007)
- Мартыанов М А, Потемкин А К, Шайкин А А, Хазанов Е А *Квантовая электроника* **38** 354 (2008) [Martyanov M A, Poteomkin A K, Shaykin A A, Khazanov E A *Quantum Electron.* **38** 357 (2008)]
- Власов С Н, Таланов В И *Самофокусировка волн* (Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1997)
- Khazanov E A et al., in *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO): San Jose, CA, 2008* (Washington, DC: Opt. Soc. of Am., 2008) p. CThX6
- Белов И А и др., в сб. *Труды Междунар. конф. X Харитоновские тематические научные чтения*, 11–14 марта 2008 г., Саров (Саров: РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2008) с. 145
- Гаранин С Г и др. *Квантовая электроника* **35** 299 (2005) [Garanin S G et al. *Quantum Electron.* **35** 299 (2005)]
- Palashov O V, Katin E V, Luchinin G A, Khazanov E A *Appl. Opt.* **47** 3124 (2008)
- HiPER, <http://www.hiper-laser.org/>
- ELI: the Extreme Light Infrastructure european project, <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>
- Miller G H, Moses E I, Wuest C R *Nucl. Fusion* **44** S228 (2004)
- Yamamoto R M et al., in *Proc. Advanced Solid-State Photonics, Nara, Japan, January 27–30, 2008*, p. WC5
- Khazanov E A, Sergeev A M *Laser Phys.* **17** 1398 (2007)
- Takaichi K et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** L96 (2002)
- Feng Y et al. *Appl. Opt.* **43** 2944 (2004)
- Lupei A et al. *J. Luminescence* **102–103** 72 (2003)
- Lu J et al. *Appl. Phys. Lett.* **81** 4324 (2002)
- Lupei V, Lupei A, Ikesue A, in *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO): San Francisco, Calif., May 17–21, 2004* (Washington, DC: Opt. Soc. of Am., 2004) p. CThT55
- Shirakawa A et al. *Opt. Express* **11** 2911 (2003)
- Tokurakawa M et al. in *Proc. Advanced Solid-State Photonics, Nara, Japan, January 27–30, 2008*, p. WB16