

С. В. ГАГАРСКИЙ, В. В. КИЙКО, В. А. КОНДРАТЬЕВ, В. А. ПОДВЯЗНИКОВ,  
А. Н. СЕРГЕЕВ, В. К. ЧЕВОКИН

## УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ $\text{Nd}^{+3}:\text{YAG}:\text{Cr}^{+4}$ -МИНИЛАЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНОЙ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ОПТИКИ

Экспериментально исследован минилазер с пассивным затвором и активным выходным зеркалом на базе интерферометра Фабри — Перо. Показано, что использование активного интерферометра в качестве выходного зеркала позволяет эффективно управлять временными характеристиками выходного излучения.

**Ключевые слова:** минилазер, микрочип-лазер, активное выходное зеркало, интерферометр Фабри — Перо, форма импульса.

**Введение.** В мобильных устройствах в качестве компактных источников когерентного излучения большой пиковой мощности широкое распространение получили полностью твердотельные микрочип-лазеры и минилазеры с диодной накачкой. Как правило, микрочип-лазер состоит из двух или более кристаллов, соединенных вместе и выполняющих функции лазерного активного элемента, пассивного затвора, нелинейных преобразователей частоты, спектральных селекторов или дополнительных прозрачных теплоотводов. Диэлектрические покрытия, нанесенные непосредственно на торцы монокристаллических элементов, выполняют функцию зеркал резонатора. При наличии в оптической схеме компактного лазера выделенных элементов (зеркал резонатора, элементов модулятора добротности и т.д.), но при условии, что область свободной дисперсии резонатора сравнима с шириной полосы усиления активной среды, а длительность импульсов находится в субнаносекундном диапазоне, можно квалифицировать такие излучатели как минилазеры.

При использовании твердотельных минилазеров с диодной накачкой в различных областях, в частности в медицине, при микрообработке металлических, диэлектрических и полупроводниковых материалов, а также для осуществления локального оптического воздействия на биологические объекты, необходима определенная временная форма лазерного импульса. При этом для решения различных задач требуются различные временные характеристики генерируемого излучения, возможность управления которыми в микрочип-лазерах, характеризующихся малой длиной резонатора и субнаносекундной длительностью генерируемых импульсов, практически отсутствует. В настоящее время для изменения формы импульса используются только внешние устройства: пространственные модуляторы на жидких кристаллах (SLM — Spatial Light Modulator) [1—3], акустооптические программируемые дисперсионные фильтры (DAZZLER) [4, 5], нелинейные кристаллы [6], волоконные усилители с насыщением [7, 8]. Все эти устройства характеризуются относительно низким КПД преобразования и могут быть использованы, вследствие ограниченной лучевой прочности, только для получения импульсов с малой энергией. Размещение в резонаторе управляемых активных затворов приводит к увеличению времени полного обхода резонатора и, как следствие, к увеличению минимальной длительности генерируемых импульсов.

В настоящей статье представлены результаты исследований по управлению формой выходного временного профиля светового импульса минилазера, построенного на основе микрочип-лазера с пассивной модуляцией добротности путем использования внутрирезонаторного активного зеркала с управляемым амплитудно-фазовым пространственно-распределенным коэффициентом отражения. Продемонстрирована возможность управления длительностью и

формой одиночного импульса, а также возможность получения последовательности пачек из ограниченного числа импульсов с управляемой скважностью в пачках.

**Схема экспериментальной установки.** Основой экспериментальной установки (рис. 1) является микрочип-лазер 2 на активном элементе  $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ , диффузно-соединенном с пассивным затвором  $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$ . Глухое и выходное зеркала резонатора нанесены на торцевые грани активного элемента и затвора соответственно. Излучение накачки вводится в активный элемент через глухое для генерируемого излучения зеркало. Основные параметры микрочип-лазера приведены ниже.

Активный элемент.....	1 ат. % $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ [111]
Пассивный затвор.....	1 ат. % $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ [110]
Общая длина, мм.....	6
Диаметр, мм.....	3
Начальное пропускание затвора, %, при $\lambda_p=1064$ нм.....	60
Коэффициент отражения $R_2$ выходного зеркала, %, при $\lambda_p=1064$ нм.....	70
Пропускание глухого зеркала, %, при $\lambda_p=808$ нм.....	94

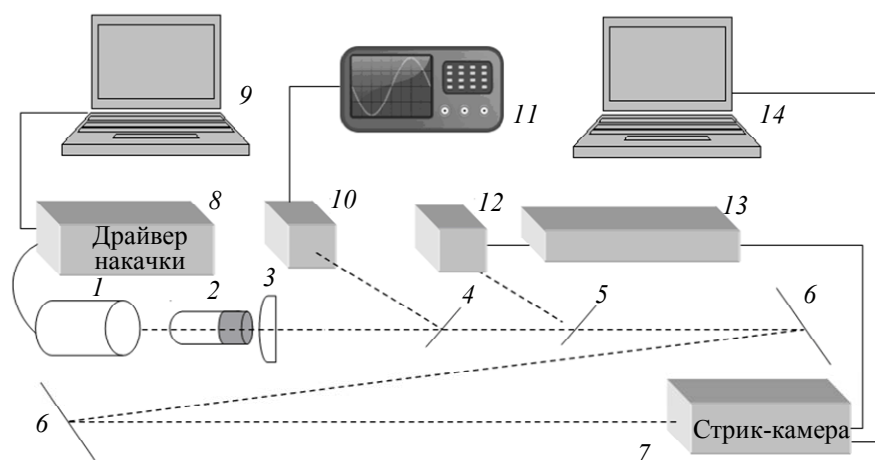


Рис. 1

Накачка активного элемента осуществляется импульсным лазерным диодом 8 (JOLD 70 QPXF-1L) с пиковой мощностью до 70 Вт, питание и управление которым обеспечивается драйвером LDMPS100 [9], сопряженным с персональным компьютером 9. Излучение накачки вводится в оптическое волокно диаметром 400 мкм с числовой апертурой  $Na=0,22$ . Фокусировка в активный элемент осуществляется двухлинзовым объективом 1, обеспечивающим перестройку диаметра перетяжки в объеме активного элемента в диапазоне 340—400 мкм. Изменение продольного положения перетяжки относительно входного торца лазерного стержня обеспечивает дополнительные возможности для реализации выбранного режима генерации посредством изменения соотношения диаметров эффективно прокачанной зоны и основной собственной моды резонатора. Частичная поляризация излучения накачки и конструкция крепления минилазера обеспечивали генерацию поляризованного излучения с контрастом не хуже 1:100. Накачка осуществлялась импульсами длительностью 120—250 мкс. Энергия импульса накачки, регулируемая, как правило, его длительностью, подбиралась таким образом, чтобы в течение импульса накачки генерировался либо один лазерный импульс, либо цуг импульсов. Период следования импульсов в цуге варьировался изменением пиковой мощности импульса накачки в пределах 40—100 мкс. Для уменьшения воздействия на параметры резонатора тепловой линзы, возникающей в активном элементе, частота импульсов накачки устанавливалась не более 1 кГц. Для регистрации временных характеристик излучаемых импульсов и запуска электронных устройств часть излучения отводилась делителями 4, 5, 6. Регистрация общей временной структуры осуществлялась приемником излучения 10 Thorlabs DET10A/m с постоянной времени 600 пс, сопряженным с осциллографом 11 LeCroy WaveJet 352A. Ширина полосы осциллографа составляет 500 МГц и совместно

с приемником излучения обеспечивает постоянную времени порядка 2 нс. Данное временное разрешение позволяет лишь качественно оценить форму и состав генерируемых импульсов. Для изучения тонкой пространственно-временной структуры импульсов генерации использовалась стрик-камера 7 VISA-03 с пикосекундным временным разрешением. Запуск стрик-камеры осуществлялся по сигналу лавинного фотоприемника 12. Точное временное согласование сигнала запуска разветки стрик-камеры с приходом на нее импульса генерации обеспечивалось блоком электронной задержки 13 совместно с линией оптической задержки общей длиной до 30 м, сформированной зеркалами 6. Визуализация и обработка изображения, получаемого с экрана стрик-камеры, осуществлялась персональным компьютером 14.

Для управления временными характеристиками микрочип-лазера использовано дополнительное выходное зеркало 3 с коэффициентом отражения  $R_3$ . Оно установлено таким образом, что в паре с нанесенным на плоский торец активного элемента выходным зеркалом микрочип-лазера с коэффициентом отражения  $R_2$  образует интерферометр Фабри — Перо (рис. 2, а). Такая конструкция комбинированного выходного отражателя не приводит к сколь-либо существенному увеличению базы резонатора, а следовательно, и к увеличению минимальной длительности генерируемых импульсов.

Выпуклое зеркало с радиусом кривизны 50,8 мм и коэффициентом отражения 55 % крепилось на кольцевом пьезоэлементе, обеспечивающем перемещение зеркала вдоль оптической оси в пределах 2,5 мкм. Для перекрытия всей полосы генерации база интерферометра ( $l$ ) выбирается исходя из условия, что свободный спектральный интервал интерферометра должен быть гораздо больше, чем ширина линии лазерной генерации  $\Delta\nu$  [10]:

$$l \ll \frac{c}{2\Delta\nu},$$

где  $c$  — скорость света.

В проведенных экспериментах значение  $l$  составляло величину порядка 200 мкм. Увеличенное изображение интерферометра, образованного выходным зеркалом микрочип-лазера ( $R_2$ ) и дополнительным сферическим зеркалом ( $R_3$ ), представлено на рис. 2, б. Так как одно из зеркал интерферометра неплоское, при вариации базы  $l$  изменяется амплитудно-фазовый пространственный коэффициент отражения эквивалентного выходного зеркала. Это позволяет активно управлять пространственно-энергетическими и временными характеристиками генерируемого излучения [11—13].

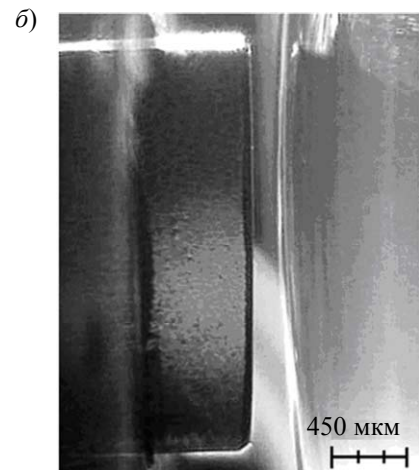
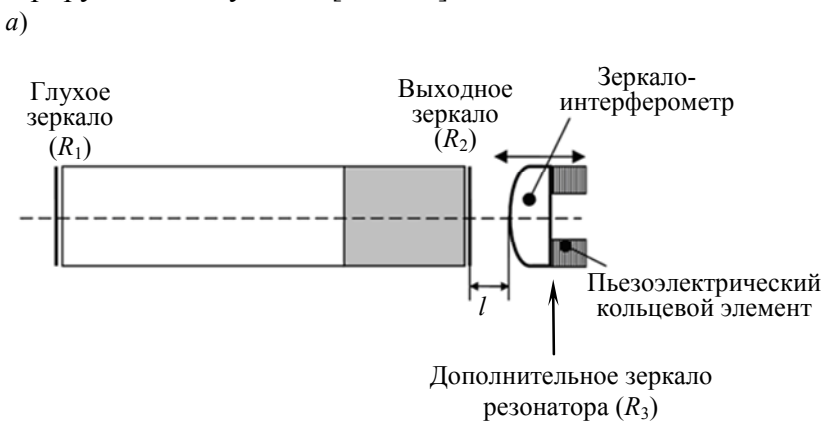


Рис. 2

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Основные закономерности процесса генерации излучения лазера с активным выходным зеркалом на основе интерферометра Фабри — Перо с неплоскими зеркалами рассматривались в работах [11—13], при этом было

детально исследовано влияние интерферометра на пространственные характеристики излучения. Однако для рассматриваемой конфигурации минилазера очевидно, что пространственные характеристики будут неизбежно влиять на временные процессы развития генерации.

Как хорошо известно, понятие модовой структуры для импульсного излучения в условиях пространственно-неоднородного насыщения усиления активной среды и насыщения поглощения пассивного затвора применимо лишь условно [14, 15], поэтому в дальнейшем этот термин используется лишь для краткости изложения. Вследствие разницы по радиальной координате текущих значений коэффициентов усиления и нелинейного поглощения, а также эффективного коэффициента отражения комбинированного выходного зеркала следует ожидать неодновременного превышения порога генерации в различных областях активной среды. При этом можно выделить две основные ситуации. При выполнении условий генерации для одной поперечной моды (рис. 3, а) возможна неодновременная генерация в различных участках ее поперечного сечения. Это позволяет изменять временную форму генерируемого импульса в широких пределах. При значительно большем объеме прокачанной области активной среды реализуется генерация поперечных мод высшего порядка (рис. 3, б). В этом случае возможно не только изменение формы суммарного импульса, но даже и временное разделение момента генерации в различных участках поперечного сечения за счет задания практически произвольного поперечного распределения коэффициента отражения выходного зеркала. На практике можно получить последовательность из двух-трех-четырёх импульсов, разделённых временными интервалами, сопоставимыми с длительностью импульсов.

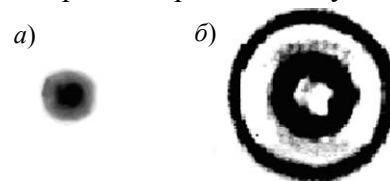


Рис. 3

На первом этапе экспериментов сформированная перетяжка излучения накачки с минимально возможным для используемых оптических элементов диаметром располагалась вблизи торца активного элемента. Это обеспечивало режим генерации микрочип-лазером основной поперечной моды. При этом в зависимости от частоты повторения импульсов диаметр пучка излучения в плоскости выходного зеркала изменяется в пределах 200—300 мкм (см. рис. 3, а). Каустика излучения в плоскости выходного зеркала полностью „укладывается“ в пределы нулевого кольца интерферометра, а коэффициент отражения выходного зеркала в пределах апертуры пучка изменяется от 20 до 100 % [11]:

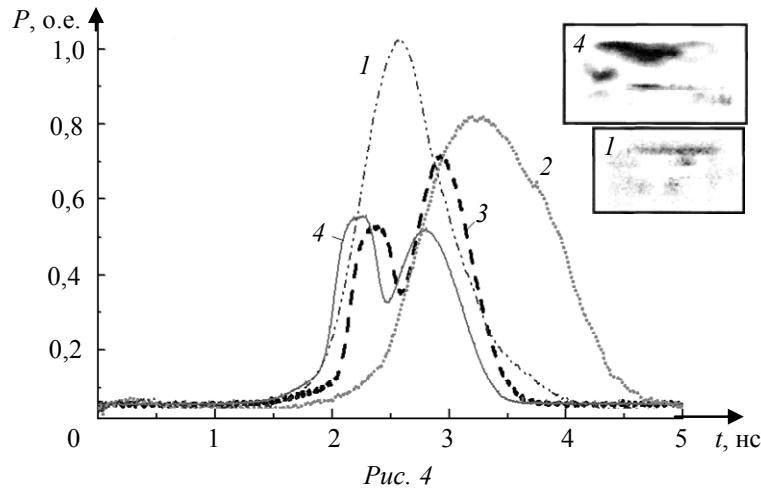
$$|R_{\text{инт}}|^2 = \frac{(R_2 - R_3)^2 + 4R_2R_3 \sin^2(\varphi/2)}{(1 - R_2R_3)^2 + 4R_2R_3 \sin^2(\varphi/2)},$$

здесь  $|R_{\text{инт}}|^2$  — коэффициент отражения интерферометра по мощности;  $\varphi = 2kl - \Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi$  — „добавка“ к геометрическому набегу фазы на двойной проход через резонатор,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число.

Изменение базы интерферометра приводит к изменению пространственного распределения его коэффициента отражения по поперечному сечению пучка в широких пределах. Значение максимального значения  $R_{\text{инт}}$  вблизи осей резонатора позволяет обеспечить условия для генерации в центральной части пучка и максимального удельного энергосъема с прокачанной зоны активного элемента на переднем фронте импульса. Уменьшением коэффициента отражения в центре до минимума обеспечивается растяжение процесса энергосъема с центральной области с максимальной инверсией по всей длительности импульса. Форма импульса при этом может варьироваться в широких пределах.

На рис. 4 приведены экспериментальные временные зависимости  $P(t)$  мощности импульсов генерации, соответствующих различным величинам базы интерферометра, изменяющимся в пределах  $0,75\lambda$ . Профили получены при интегрировании по поперечной координате

фотохронограмм с экрана стрик-камеры; кривые 1—4 соответствуют различным уровням поданного на пьезоэлемент напряжения: 1 — 0, 2 — 50 В, 3 — 100 В, 4 — 150 В; в рамках приведены примеры фотохронограмм импульсов в режимах 1 и 4. Видно, что при изменении базы возможна регулировка длительности импульса и изменение его формы.



Для определения возможности разделения генерации различных мод во времени была изменена оптическая схема накачки. Объем области накачки был увеличен таким образом, чтобы обеспечить генерацию мод высшего порядка. Размер поперечного сечения пучка в плоскости выходного зеркала при этом „укладывался“ в пределы двух первых колец интерферометра (см. рис. 3, б). Это позволяло варьировать отношение коэффициента усиления к коэффициенту потерь для генерируемых мод в широких пределах и обеспечить режим генерации в виде пачек из ограниченного количества импульсов, разделенных временным интервалом, сопоставимым с длительностью импульса.

На рис. 5 показан последовательный процесс развития генерации при ступенчатом изменении базы интерферометра. Временной интервал  $T$ , указанный для каждого изображения, соответствует расстоянию между максимумами импульсов в пачке. Приведенные изображения получены при регистрации осциллографом. Все временные характеристики определены путем обработки данных со стрик-камеры. На рисунке отчетливо прослеживается постепенная генерация мод высокого порядка — изображения 1—10, что косвенно подтверждается увеличением интервала  $T$  за счет увеличения времени развития генерации мод высшего порядка. Дальнейшее увеличение поперечного сечения области накачки привело к появлению третьего импульса в пачке — изображения 11, 12, при этом тонкой подстройкой величины базы интерферометра можно получить практически любое соотношение энергий в импульсах пачки.

**Заключение.** В результате проведенных экспериментальных исследований минилазера с пассивным затвором и активным внутрирезонаторным зеркалом можно утверждать, что активное выходное зеркало на основе интерферометра Фабри — Перо с неплоскими зеркалами не только может использоваться в качестве эффективного пространственного селектора и модулятора выходной мощности излучения, но и позволяет управлять временной структурой. Продемонстрирована возможность управления длительностью и формой одиночного импульса, а также возможность получения последовательности пачек из ограниченного числа импульсов с управляемой скважностью в пачках. Такая пространственно-временная структура может быть эффективно использована при разработке лазерной аппаратуры, в особенности, содержащей нелинейно-оптические преобразователи частоты.

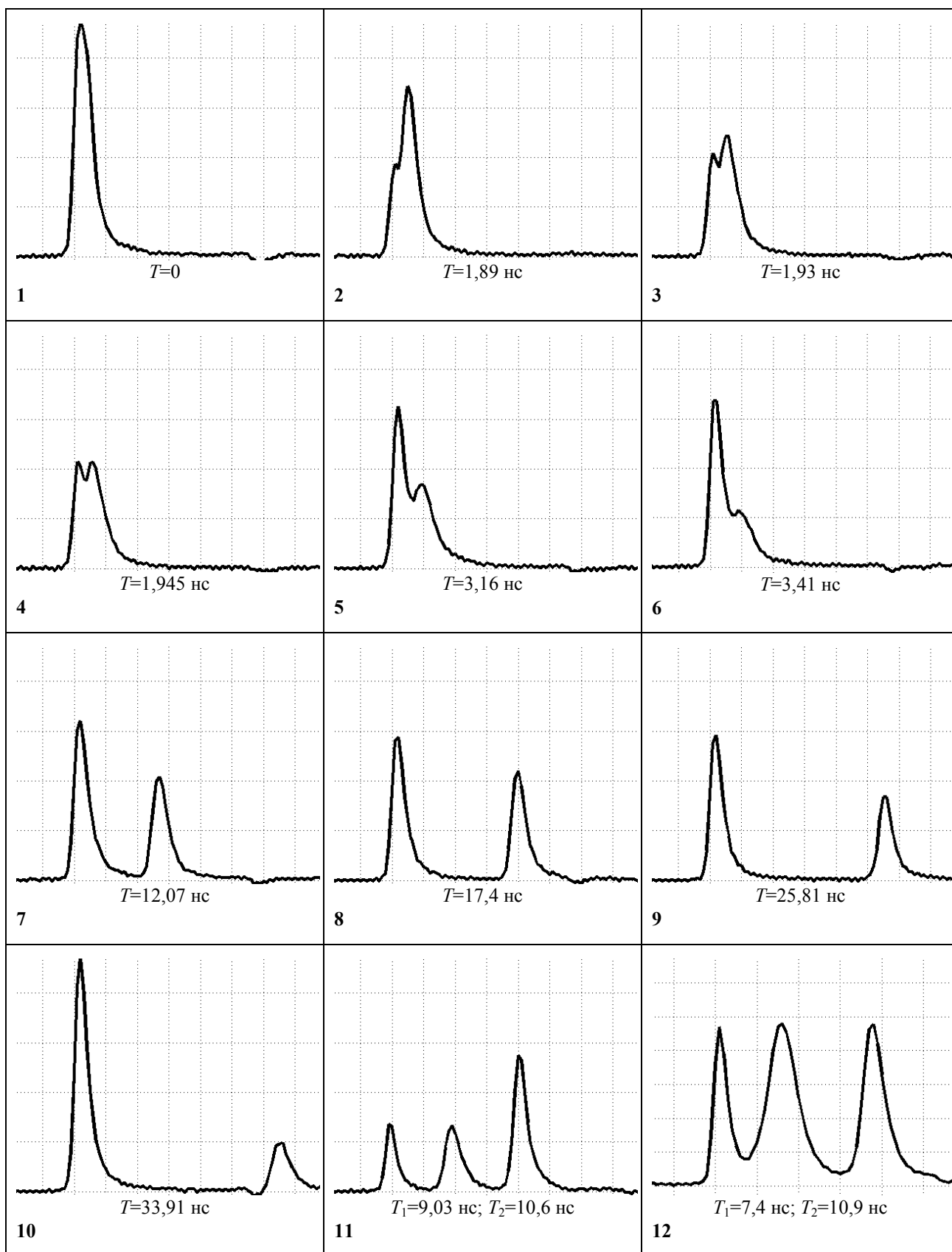


Рис. 5

Управление временной структурой с помощью выходного зеркала-интерферометра реализуется в широких пределах, что не обеспечивается ни одним из известных устройств. Рассмотренный подход позволяет изменять выходные временные характеристики лазерного излучения в режиме реального времени и перспективен для применения в современных миниатюрных лазерах.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ, гос. контракт № 07514114159.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oron D., Silberberg Y.* Spatiotemporal coherent control using shaped, temporally focused pulses // *Optics Express*. 2005. Vol. 13, N 24. P. 9903—9908.
2. *Meshulach D., Yelin D., Silberberg Y.* Adaptive real-time femtosecond pulse shaping // *J. Optic. Soc. Amer. B*. 1998. Vol. 15, N 5. P. 1615—1619.
3. *Weiner A. M.* Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators // *Rev. of Scientific Instruments*. 2000. Vol. 71, N 5. P. 1929—1960.
4. *Ghigo A., Vicario C., Petrarca M., Cialdi S.* Laser temporal pulse shaping based on the DAZZLER // *Coordinated Accelerator Research in Europe (CARE) Reports*. 2007. N 019. P. 1—11.
5. *Verluse F., Laude V., Huignard J. P., Tournois P., Migus A.* Arbitrary dispersion control of ultrashort optical pulses with acoustic waves // *J. Optic. Soc. Amer. B*. 2000. Vol. 17, N 1. P. 138—145.
6. *Cialdi S., Castelli F., Boscolo I.* Rectangular pulse formation in a laser harmonic generation // *Applied Physics. B*. 2006. Vol. 82. P. 383—389.
7. *Schimpf D. N., Ruchert C., Nodop D., Limpert J., Tunnermann A., Salin F.* Compensation of pulse-shaping due to saturation in fiber-amplifiers // *Proc. of SPIE*. 2009. Vol. 7195.
8. *Vu K. T., Malinowski A., Richardson D. J., Ghiringhelli F. H., Zervas L. M. B.* Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system // *Optics Express*. 2006. Vol. 14. P. 10996—11001.
9. *Тогатов В. В., Гагарский С. В., Гнатюк П. А., Черевко Ю. И.* Импульсный блок питания лазерных диодных модулей для накачки твердотельных лазеров // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 2. С. 158—159.
10. *De Silvestri S., Laporta P., Mangi V., Svelto O.* Radially variable reflectivity output coupler of novel design for unstable resonators // *Optics Letters*. 1987. Vol. 12, N 2. P. 84—86.
11. *Kiiko V. V., Kislov V. I., Ofitserov E. N.* Mirror with a variable amplitude-phase reflectance. 2. Modelling of a laser resonator with an active output mirror // *Quantum Electronics*. 2011. Vol. 41, N 3. P. 239—242.
12. *Куйко В. В., Офицеров Е. Н.* Исследование термооптических искажений активного элемента (Nd:YVO<sub>4</sub>) при различных способах его крепления // *Квантовая электроника*. 2006, Т. 36, № 5. С. 483—486.
13. *Куйко В. В., Кондратьев В. А., Кислов В. И., Офицеров Е. Н., Суздальцев А. Г.* Управление пространственно-временными характеристиками микрочип-лазера на основе YAG:Nd с пассивной модуляцией добротности // *Тр. конф. „Лазеры, измерения, информация“*. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2012. С. 92.
14. *Yao G., Shouhuan Zhou, Wang P., Lee K. K., Chen Y. C.* Dynamic of transverse mode in self-Q-switched solid-state lasers // *Optics Communications*. 1995. Vol. 114. P. 101—105.
15. *Okhrimchuk A. G., Shestakov A. V.* The time and spatial dynamics of the YAG:Nd<sup>3+</sup>/YAG:Cr<sup>4+</sup> microchip laser emission // *Proc. of SPIE*. 2007. Vol. 6610. P. 661002-1—661002-10.

#### Сведения об авторах

**Сергей Валерьевич Гагарский**

— канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: s.gagarsky@mail.ru

**Вадим Вениаминович Куйко**

— канд. техн. наук; Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, кафедра мощных лазеров, Москва; E-mail: hkww@mail.ru