

**КОГЕРЕНТНОЕ СЛОЖЕНИЕ ПУЧКОВ****Фазировка двух усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков суммарной мощностью 60 Вт****А.И.Тришнев, Ю.Н.Пырков, В.Б.Цветков**

*Продemonстрирована устойчивая работа системы поддержания постоянной разности фаз между двумя лазерными каналами суммарной выходной мощностью 60 Вт. Установка создана на базе двухканального волоконного усилителя с фазовыми модуляторами на основе пьезокерамических катушек. При основной частоте модуляции пьезоэлементов 11 кГц в условиях теплового и механического воздействия на активную среду время фазировки составило 100 мс.*

**Ключевые слова:** модуляция фазы, синхронное детектирование, когерентное сложение.

**1. Введение**

Использование методов когерентного и спектрального сложения лазерных пучков, активно развиваемых в последние годы, обеспечило значительный рост суммарной мощности как волоконных, так и твердотельных лазерных систем [1–4]. Так, мощность генерации в непрерывном режиме может достигать нескольких десятков киловатт при сохранении высокого качества результирующего излучения ( $M^2 < 3$ ) [5, 6]. Оба метода сложения обладают как преимуществами, так и недостатками. Спектральное сложение весьма удобно в случае использования лазеров с относительно небольшой мощностью генерации единичного излучателя (до нескольких десятков ватт) и широким спектром излучения [7–9]. При сложении лазерных пучков мощных лазеров предпочтительнее схема когерентного сложения [10–13]. И хотя метод когерентного сложения лазерных пучков требует контроля и поддержания фазы излучения в каждом канале с высокой точностью, он позволяет получать высокие выходные мощности (вплоть до 100 кВт) [14] без концентрации всей мощности на каком-либо одном оптическом элементе, как в случае спектрального сложения.

В настоящей работе описана система параллельного контроля и поддержания фаз излучения в нескольких лазерных каналах методом синхронного детектирования, где каждый канал имеет отдельный детектор. Скорость фазировки в данном случае не зависит от числа каналов, а определяется в основном быстродействием фазовых модуляторов. В многоканальных многокаскадных волокон-

ных и твердотельных лазерных системах с когерентным сложением в начальных каскадах используются волоконные иттербиевые усилители, поэтому одной из целей работы было создание комплексной, полностью волоконной системы фазовой подстройки.

Отличие настоящей работы от опубликованной нами ранее (см. [15]), посвященной сложению излучения двух и более каналов волоконной лазерной системы, заключается в уровне мощности излучения. В работе [15] проводилось сложение с мощностями на один канал до 5 Вт, в настоящей работе мощность излучения одного канала составляла 30 Вт.

**2. Экспериментальная установка**

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Исходное излучение формировалось задающим генератором  $I$  на основе одночастотного полупроводникового лазерного диода [16] с длиной волны 1080 нм и спектральной шириной линии генерации 2.8 МГц. Затем это излучение разделялось на три канала (один опорный и два силовых). В силовых каналах излучение, пройдя через систему усилителей, достигало требуемого уровня мощности – около 30 Вт на канал. После этого усиленное излучение собиралось в систему параллельных, близко расположенных лазерных пучков, формируя таким образом синтезированную апертуру лазерной системы.

Опорный канал предназначался для фазировки относительно него силовых каналов. Поскольку разность фаз силового и опорного каналов носит случайный характер, попытка фиксировать интерференционный сигнал выходного излучения по постоянному уровню не обеспечивает необходимой точности и стабильности. Поэтому следует использовать модуляционные методики для создания разности фаз  $\Delta\varphi$  по определенному закону, чтобы в каждый момент времени знать точную разность между фазой опорного канала  $\varphi$  и фазой силового канала  $\varphi_n$ . Если эта разность одинаковая для всех силовых каналов, то у них будет одна и та же фаза.

В качестве модуляторов фазы использовались пьезокерамические катушки 7,8 с намотанным одномодовым волокном. Модуляция фазы опорного канала и подстройка фаз силовых каналов осуществлялись за счет изменения

**А.И.Тришнев.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42; e-mail: trikshvegpi@gmail.com

**Ю.Н.Пырков.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

**В.Б.Цветков.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 16 мая 2017 г., после доработки – 25 сентября 2017 г.

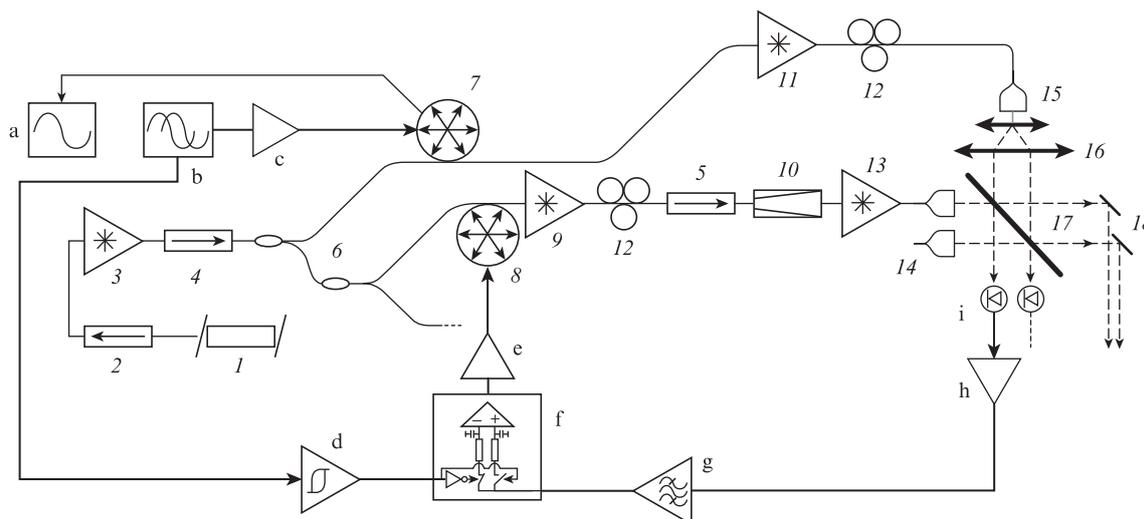


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Оптические компоненты: 1 – задающий генератор; 2 – двухкаскадный волоконный изолятор на 300 мВт; 3, 9 и 11 – волоконные усилители на основе GTWave-волокна; 4 – волоконный изолятор на 3 Вт; 5 – волоконный изолятор на 10 Вт; 6 – система волоконных разветвителей; 7 – пьезокерамический модулятор фазы; 8 – пьезокерамический управляющий элемент; 12 – контроллеры поляризации; 10 – модовый адаптер; 13 – волоконный усилитель на основе LMA-волокна; 14 – коллиматоры силовых каналов; 15 – коллиматор опорного канала; 16 – телескоп; 17 – делительная пластина; 18 – поворотные зеркала.

Электронные компоненты: а – генератор гармонических (синусоидальных) колебаний; б – фазовращатель модулирующего и опорного сигналов; с – усилитель модулирующего сигнала; д – формирователь прямоугольного опорного сигнала; е – выходной высоковольтный усилитель; ф – синхронный детектор; г – селективный полосовой предусилитель; h – предусилитель для фотоприемника; i – фотоприемник с волоконным выходом.

оптического хода лучей в волокне при растяжении волокна вследствие изменения диаметра пьезокерамической катушки. Положительными сторонами такой конструкции являются простота, надежность и возможность изменения диапазона фазовой модуляции за счет изменения длины намотанного на пьезокерамику волокна при одних и тех же характеристиках электрического управляющего сигнала, отрицательными – низкая частота модуляции (до нескольких десятков кГц), гистерезис и сильная температурная зависимость физических характеристик пьезокерамики. Последние два недостатка конструкции могут быть компенсированы путем создания управляющего генератора, в цепь которого, определяющую частоту генерации, включена сама пьезокерамическая катушка. При этом эффективность воздействия управляющего напряжения на катушку не будет зависеть от изменения характеристической частоты пьезокерамики. В экспериментах частота модуляции фазы опорного сигнала составляла 11 кГц. В настоящей работе система поддерживала разность фаз опорного и силового каналов близкой к нулю. Было установлено, что создаваемое пьезомодулятором напряжение волокна приводило к слабому изменению поляризации выходного излучения (менее 1/500 от общего уровня). Для уменьшения влияния пьезомодулятора на поляризацию основная частота модуляции немного смещалась от резонансной частоты.

Для исключения влияния неоднородностей активных волокон на поляризацию усиливаемого излучения использовались волоконные контроллеры поляризации 12. Для увеличения контрастности интерференционного сигнала мощность излучения опорного канала усиливалась волоконным усилителем 11 до 1.5 Вт. К выходному торцу каждого силового канала были приварены коллиматоры 14, обеспечивавшие получение лазерных пучков диаметром около 2 мм и расходимостью менее 1 мрад. Выделение разностного сигнала, пропорционального разности фаз

между опорным и силовым каналами, происходило при сложении излучения опорного канала и части излучения силовых каналов на гетеродинных детекторах, индивидуальных для каждого канала. Полученный сигнал использовался в цепи обратной связи для управления фазовыми модуляторами.

### 3. Анализ работы устройства определения и управления фазой излучения

Система управления была выполнена на базе синхронно-фазового детектора, работающего в области максимума или минимума сигнала интерференции. При работе в области максимума или минимума сигнала интерференции, когда между средней фазой опорного сигнала и фазами силовых каналов имеется сдвиг, равный целому числу полувольт, для амплитуд модуляции фазы опорного сигнала, не превышающих  $\pm \pi/3$ , будет иметь место модуляция сигнала интерференции на удвоенной частоте. В этом случае синхронный детектор на выходе выдаст нулевой сигнал, поскольку на плюсовой и минусовой входы дифференциального усилителя поступают одинаковые сигналы. Возможные режимы работы системы показаны на рис.2. Если же отстройки фазы опорного и силового каналов не равны целым числам полувольт, картина перестанет быть симметричной и синхронный детектор выдаст ненулевой сигнал. Направляя этот сигнал на управляющий элемент, изменяющий длину оптического пути в силовом канале, можно получить устойчивую, стабилизирующую отрицательную обратную связь.

Работу синхронного детектора можно описать следующим образом. На выходе фотоприемника с предусилителем в зависимости от фазы модуляции опорного сигнала  $\varphi$  интерференционный сигнал имеет вид

$$P = A \cos[B \sin(\varphi + \varphi_m) + C] + D, \quad (1)$$

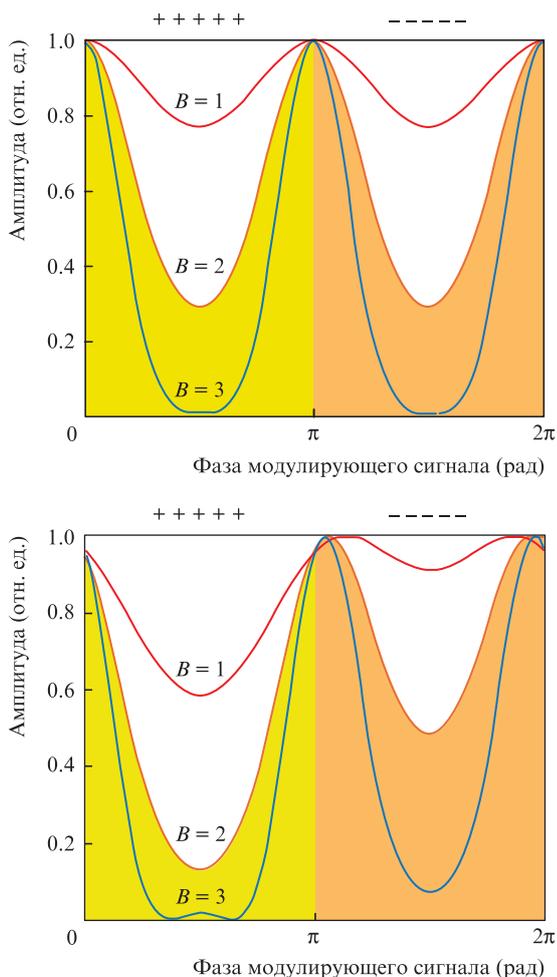


Рис.2. Зависимость амплитуды интерференционного сигнала от фазы модулирующего сигнала при различных амплитудах модуляции  $B$  для  $C = n\lambda/2$  (а) и  $C \neq n\lambda/2$  (б). В верхней части рисунка показано, какие области фазы модуляции приводят к увеличению полезного сигнала («+»), какие – к его уменьшению («-»).

где  $A$  – амплитуда интерференции;  $B$  – амплитуда модуляции опорного канала по фазе;  $\varphi_m$  – сдвиг фазы механической модуляции и синхросигнала;  $C$  – сдвиг фазы для средних значений фаз опорного и силового каналов;  $D$  – постоянная составляющая (отсекается электронным фильтром).

Управляющий сигнал на выходе ключевого синхронного детектора можно представить в виде разности интегралов сигнала с фотоприемника для первого и второго полупериодов модуляции:

$$\begin{aligned}
 S &= \int_0^\pi \cos[B \sin(\varphi + \varphi_m) + C] d\varphi \\
 &\quad - \int_\pi^{2\pi} \cos[B \sin(\varphi + \varphi_m) + C] d\varphi \\
 &= -2 \sin(C) \int_0^\pi \sin[B \sin(\varphi + \varphi_m)] d\varphi. \tag{2}
 \end{aligned}$$

Видно, что при нулевом сдвиге фаз  $C$  управляющий сигнал равен нулю и система находится в устойчивом равновесии. Если же  $C$  отличен от нуля, появляется возвращающий отрицательный сигнал обратной связи.

Чувствительность системы к изменению  $C$  определяется интегралом (2). При  $\varphi_m = \pi/2$  величина  $\sin(\varphi + \varphi_m)$  бу-

дет симметрично знакопеременной, и интеграл (2) обратится в ноль. При этом система перестанет реагировать на изменения  $C$ , что крайне нежелательно. При  $\varphi_m = \pi$ , т.е. при сдвиге на полпериода, когда опорный и силовой каналы будут не в фазе, а в противофазе, знак интеграла (2) изменится на противоположный, система окажется в неустойчивом равновесии и при минимальном возмущении сразу перейдет в устойчивое состояние.

#### 4. Результаты экспериментов

Быстродействие системы обратной связи в устройстве поддержания разности фаз проверялось при сведении излучения двух каналов с суммарной мощностью до 60 Вт. Интерференционная картина, возникающая на экране в области перекрытия лазерных пучков, наблюдалась с помощью ПЗС-матрицы (рис.3). Для получения одного центрального максимума в дальней зоне необходимо было свести лазерные пучки на расстояние менее  $4w$ , где  $w$  – радиус перетяжки лазерного пучка. Размеры коллиматоров (диаметром 11 мм) не позволяли сделать это напрямую. Для сведения применялась система отражающих зеркал. Поскольку некоторая часть пучка попадала на край зеркала, это приводило к искажению профиля интенсивности. При кратковременном воздействии на один из каналов (нагрев в течение 1 с или механический удар длительностью около 20 мс) быстродействие системы по оценке

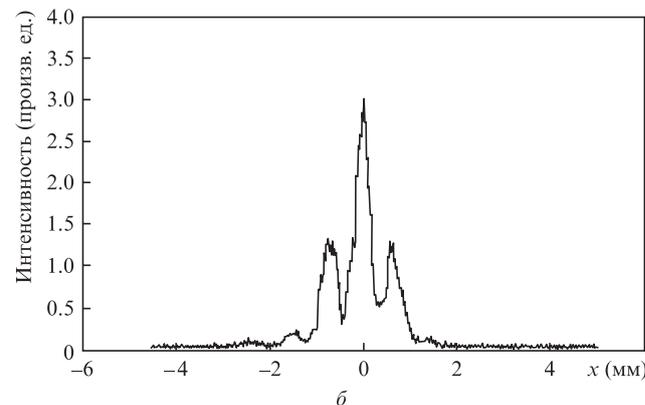
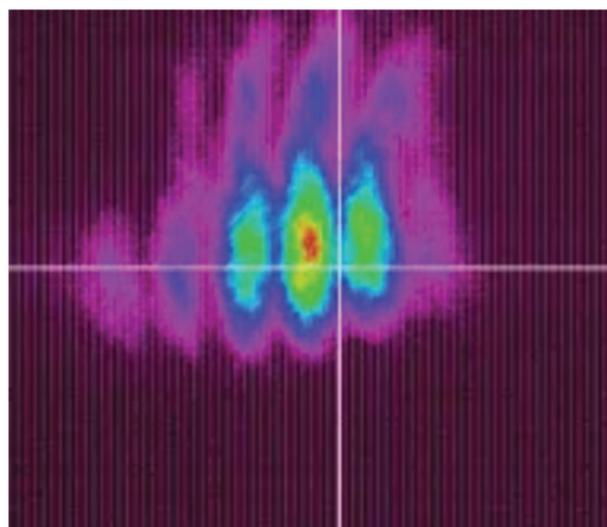


Рис.3. Интерференционная картина в дальнем поле (а) и профиль интенсивности интерференционного сигнала (б).

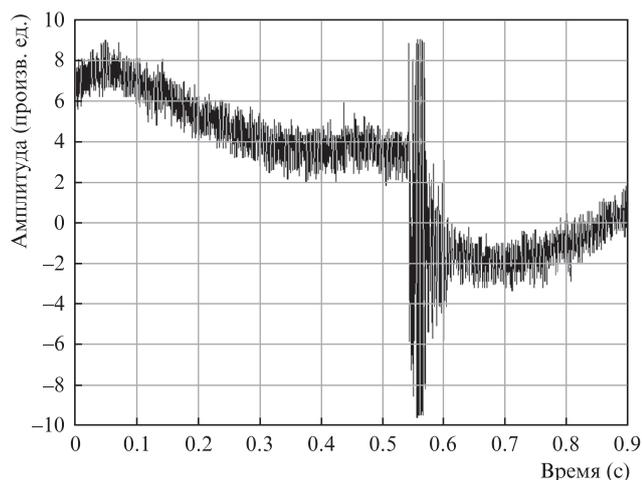


Рис.4. Сигнал с синхронного детектора.

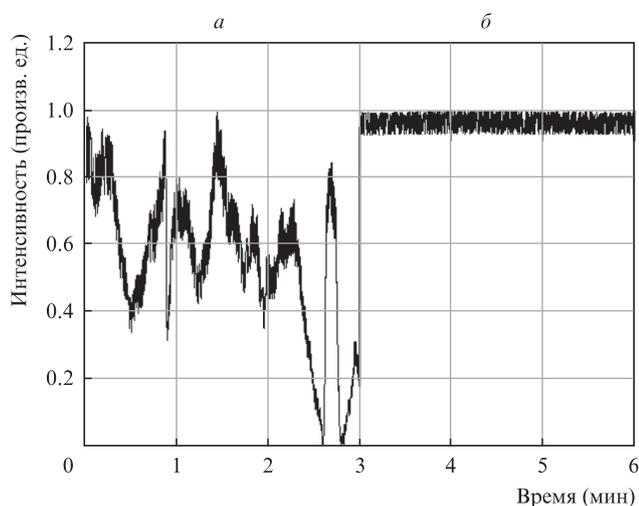


Рис.5. Интенсивность выходного излучения в свободном режиме (а) и в режиме синхронизации (б).

составило 100 мс (рис.4). Осциллограммы интенсивности центрального максимума интерференционной картины в

дальней зоне в режиме фазовой синхронизации и в свободном режиме представлены на рис.5.

## 5. Заключение

Создана система поддержания постоянной разности фаз между двумя лазерными каналами с суммарной выходной мощностью излучения 60 Вт. Продемонстрирована устойчивая работа системы обратной связи при компенсации разности фаз в лазерных каналах при тепловом и механическом воздействии на активную среду с характерным временем фазировки около 100 мс.

1. Andrusyak O., Smirnov V., Venus G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7195**, 71951Q (2009).
2. Uberna R., Bratcher A., Tiemann B.G., et al. *Appl. Opt.*, **49** (35), 6762 (2010).
3. Redmond S.M. *Opt. Lett.*, **36**, 909 (2011).
4. Yu C.X. et al. *Opt. Lett.*, **36**, 2686 (2011).
5. Lavan M. *Acta Phys. Polonica A*, **115**, 959 (2009).
6. Flores A., Shay T.M., Lu C.A., et al. *Proc. CLEO, SF3* (2011).
7. Wirth C., Schmidt O., Tsybin I., et al. *Opt. Express*, **17** (3), 1178 (2009).
8. August S.J. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8237**, 823704 (2012).
9. Meng H., Sun T., Tan H., Yu J., et al. *Opt. Express*, **23** (17), 21819 (2015).
10. Yu C.X., Kinsky J.E., Shaw S.E.J., Murphy D.V., Higgs C. *Electron. Lett.*, **42**, 1024 (2006).
11. Shay T.M. *Opt. Express*, **14**, 12188 (2006).
12. Волков В.А., Волков М.В., Гаранин С.Г., Долгополов Ю.В., Копалкин А.В., Куликов С.М., Стариков Ф.А., Сухарев С.А., Тютин С.В., Хохлов С.В., Чапарин Д.А. *Квантовая электроника*, **43** (9), 852 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (9), 852 (2013)].
13. Волков М.В., Гаранин С.Г., Долгополов Ю.В., Копалкин А.В., Куликов С.М., Синявин Д.Н., Стариков Ф.А., Сухарев С.А., Тютин С.В., Хохлов С.В., Чапарин Д.А. *Квантовая электроника*, **44** (11), 1039 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (11), 1039 (2014)].
14. McNaught S.J., Komine H., Weiss S.B., Simpson R., Johnson A.M., Machan J., Asman C.P., Weber M., Jones G.C., Valley M.M., Jankevics A., Burchman D., McClellan M., Sollee J., Marmo J., Injeyan H. *Proc. CLEO (Baltimor, MD, 2009, Paper CThA1)*.
15. Пырко Ю.Н., Триков А.И., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **42** (9), 790 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (9), 790 (2012)].
16. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А., Шишков В.В. *Квантовая электроника*, **25** (4), 301 (1998) [*Quantum Electron.*, **28** (4), 290 (1998)].