

Фазировка нескольких усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков

Ю.Н.Пырков, А.И.Трикшев, В.Б.Цветков

Создана система поддержания постоянной разности фаз между несколькими лазерными каналами и разработан алгоритм ее работы в условиях медленного (не быстрее 100 мс) изменения фазы излучения в канале. Проанализированы различные возможные режимы работы системы измерения и удержания разности фаз и разработан оптимальный алгоритм. На примере семиканального волоконного усилителя, работающего на длине волны 1.064 мкм экспериментально продемонстрирована длительная устойчивая работа системы в условиях теплового и механического воздействия на активную среду.

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

1. Введение

Когерентное и спектральное сложение лазерных пучков, активно развиваемое в последние годы, привело к значительному росту мощности лазерных систем, как волоконных, так и твердотельных [1–4]. При этом мощность генерации в непрерывном режиме достигает нескольких десятков киловатт при сохранении высокого качества результирующего излучения, близкого к дифракционному пределу [5, 6]. Оба метода имеют как преимущества, так и недостатки. Спектральное сложение весьма удобно в случае использования диодных или маломощных волоконных лазеров с относительно небольшой мощностью генерации единичного излучателя (до нескольких десятков ватт) и широким спектром излучения [7]. При сложении лазерных пучков мощных лазеров предпочтительной является схема когерентного сложения пучков [8, 9]. С одной стороны, метод когерентного сложения лазерных пучков требует контроля и поддержания фазы излучения в каждом канале с высокой точностью (вплоть до 0.01 рад), с другой – позволяет получать высокие выходные мощности (вплоть до 100 кВт) без концентрации всей мощности на каком-либо одном оптическом элементе, как в случае спектрального сложения.

В настоящей работе описан подход к созданию системы контроля и поддержания фазы излучения в нескольких лазерных каналах с точностью не хуже 0.01 рад. В многоканальных многокаскадных волоконных и твердотельных лазерных системах с когерентным сложением в начальных каскадах используются волоконные итербиевые усилители, поэтому одной из целей работы было создание комплексной, полностью волоконной системы фазовой подстройки. При этом, поскольку изменение фазы излучения в отдельных каналах происходит за счет тепловых процессов, т.е. относительно медленно, за время

порядка десятков миллисекунд, то создаваемая система обработки информации о величине фазового сдвига и система управления фазой излучения в усилителе должны обеспечивать быстроедействие на уровне не хуже 10 мс.

2. Экспериментальная установка

Лазерная установка построена по схеме генератор–усилитель и работает следующим образом (рис. 1). Исходное одночастотное излучение формируется задающим генератором, созданным на основе одночастотного полупроводникового лазера с длиной волны генерации 1.064 мкм и шириной спектра ~ 3 МГц. Затем это излучение разделяется на восемь каналов (один опорный и семь «силовых»). В силовых каналах излучение, пройдя через си-

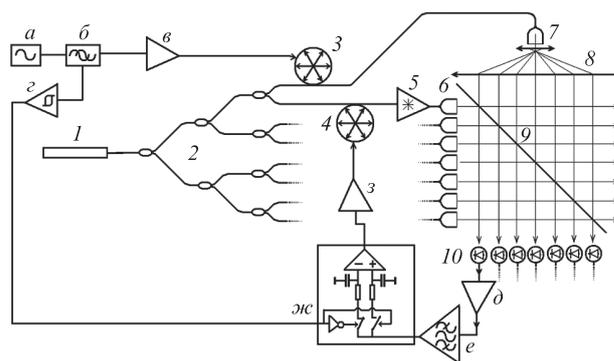


Рис. 1. Схема установки.

Оптические элементы: 1 – задающий одночастотный диодный лазер; 2 – волоконные ответвители; 3 – пьезокерамический модулятор фазы; 4 – пьезокерамические управляющие элементы; 5 – волоконно-оптические усилители; 6 – коллиматоры рабочих каналов; 7 – коллиматор опорного канала; 8 – телескоп; 9 – делительная пластина; 10 – фотоприемники. Электронные компоненты: а – генератор гармонических (синусоидальных) колебаний; б – фазовращатель модулирующего и опорного сигналов; в – усилитель модулирующего сигнала; г – формирователь прямоугольного опорного сигнала; д – предусилитель для фотоприемника; е – селективный полосовой предусилитель; ж – синхронный детектор; з – выходной высоковольтный усилитель.

Ю.Н.Пырков, А.И.Трикшев, В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pyrkovyun@lsk.gpi.ru, tsvetkov@lsk.gpi.ru

Поступила в редакцию 27 июля 2012 г.

стему усилителей, достигает требуемого уровня мощности. После усилительных каналов излучение собирается в систему параллельных, близко расположенных лазерных пучков, формируя, таким образом, синтезированную апертуру лазерной системы. В нашем случае усиление обеспечивало уровень мощности в каждом канале не более 100 мВт, поскольку основная задача работы состояла в измерении и поддержании синфазного излучения в каналах, а не в получении максимальной выходной мощности лазерной системы.

Для когерентного сложения излучений усиленных рабочих каналов необходимо знать фазу каждого из них и уметь управлять ею. Опорный канал предназначен для того, чтобы относительно него фазировались рабочие каналы. Попытка фиксировать интерференционный сигнал выходного излучения по постоянному уровню не обеспечивает необходимой точности и стабильности. Поэтому следует использовать модуляционные методики, причем как амплитудную, так и фазовую или частотную модуляцию. Модулятор может быть любым – механическим, электромеханическим (пьезокерамическим и электродинамическим), электрооптическим, акустооптическим и др.

В настоящей работе нами использовался волоконный пьезокерамический модулятор, который конструктивно представляет собой одномодовое оптическое волокно, намотанное на цилиндрическую катушку из пьезокерамики и приклеенное к ней. Модуляция фазы осуществлялась за счет изменения механических напряжений и длины оптического волокна при изменении геометрии пьезокерамического цилиндра в случае подачи на него периодического управляющего напряжения. 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 (не более нескольких десятков кГц), гистерезис характеристик пьезокерамики и их сильная температурная зависимость. Последние две отрицательные стороны могут быть компенсированы путем создания такого управляющего генератора, в частотно-определяющую цепь которого включена сама пьезокерамическая катушка. При этом амплитуда воздействия управляющего напряжения на катушку не будет зависеть от изменения характеристической частоты пьезокерамики. В экспериментах частота модуляции фазы опорного сигнала f_m составляла 11–12 кГц.

Устройство определения и управления фазой излучения предназначено для установления текущего значения фазы излучения силового канала и изменения ее таким образом, чтобы разность фаз излучения каждого из силовых и опорного каналов, измеряемая на выходе лазерной системы, была близка к нулю. Таким образом, рабочие каналы будут синфазными, т. е. их излучения будут когерентно складываться. Уровень регулировки фазы составлял в экспериментах 3–5 длин волн.

Для исключения влияния неоднородностей активных волокон на поляризацию усиливаемого излучения использовались волоконные контроллеры поляризации. Выходная мощность в каждом силовом канале выравнивалась аттенуатором.

Выделение разностного сигнала, пропорционального разности фаз между опорным и силовым каналами, происходило при сложении излучения опорного канала и ча-

сти излучения силовых каналов на гетеродинных детекторах, индивидуальных для каждого канала. Полученный сигнал обрабатывался в блоке управления фазового модулятора (ФМ) и использовался в цепи обратной связи для управления ФМ.

3. Анализ работы устройства определения и управления фазой излучения

Система управления выполнена на базе синхронно-фазового детектора, работающего в области максимума или минимума сигнала интерференции. В области подъема или спада интенсивности интерференционного сигнала будет наблюдаться максимальный размах амплитуды модуляции на частоте f_m , но чувствительность к разности фаз между опорным и рабочим каналами будет слабой.

При работе в области максимума или минимума сигнала интерференции, когда между средней фазой опорного сигнала и фазами рабочих каналов имеется сдвиг на целое число полувольт, для амплитуд модуляции фазы опорного сигнала, не превышающих $\pm\lambda/3$, будет иметь место модуляция сигнала интерференции на частоте $2f_m$.

Удвоенная частота модуляции обусловлена одинаковым увеличением (в области минимума) или уменьшением (в области максимума) сигнала интерференции и для положительной, и для отрицательной полувольты модулирующего сигнала, поэтому одному периоду опорного сигнала будут соответствовать два одинаковых симметричных пика интерференционной картины. Синхронный детектор на выходе покажет нулевое значение сигнала, потому что на плюсовой и минусовой входы дифференциального усилителя будут поступать одинаковые сигналы. Возможные режимы работы системы проиллюстрированы на рис.2.

Если же отстройки фазы опорного и рабочего канала не будут равны целым числам полувольт, картина перестанет быть симметричной и синхронный детектор выдаст ненулевой сигнал. Заведя этот сигнал на управляющий элемент, изменяющий длину оптического пути в рабочем канале, можно получить устойчивую, стабилизирующую отрицательную обратную связь. Полярность

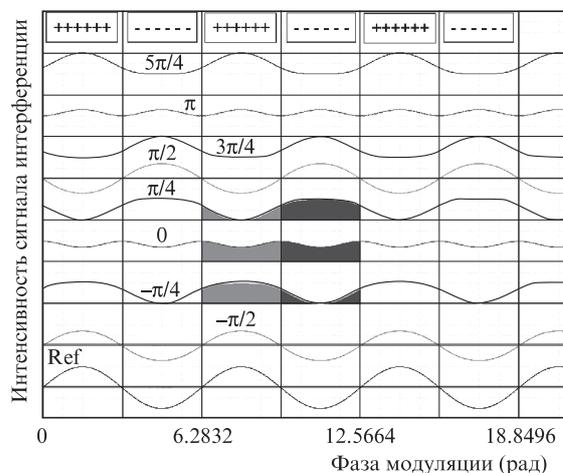


Рис.2. Зависимости интенсивности сигнала интерференционной картины от фазы модулирующего сигнала (кривая Ref) и от сдвига фаз рабочего канала относительно среднего значения фазы опорного (кривые от $\pi/2$ до $5\pi/4$). В верхней части рисунка показано, как работает синхронный детектор, – какие области фазы модуляции идут в полезный сигнал с «плюсом», какие с «минусом».

подключения управляющего элемента определит, где будет удерживаться сигнал интерференции – в максимуме или в минимуме.

Работу синхронного детектора можно описать следующим образом. На выходе фотоприемника с предусилителем в зависимости от фазы модуляции опорного сигнала x интерференционный сигнал

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

где A – амплитуда интерференции; B – амплитуда модуляции опорного канала по фазе; φ – сдвиг фазы механической модуляции и синхросигнала; C – сдвиг фазы среднего значения фазы опорного и рабочего каналов; D – постоянная составляющая.

Знак и величина A могут меняться в зависимости от величины лазерного сигнала, коэффициентов усиления электронных компонентов и полярности подключения пьезокерамики. Постоянная составляющая еще на входе отрезается электронным фильтром.

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

$$S = \int_0^{\pi} \cos[B \sin(x + \varphi) + C] dx - \int_0^{\pi} \cos[B \sin(x + \varphi) + C] dx \\ = -2 \sin C \int_0^{\pi} \sin[B \sin(x + \varphi)] dx. \quad (2)$$

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

Чувствительность системы к изменению C определяется интегралом (2). При $\varphi = \pi/2$ величина $\sin(x + \varphi)$ будет симметрично знакопеременной и интеграл (2) обратится в ноль. Система перестанет реагировать на изменения C , что крайне нежелательно. При $\varphi = \pi$, т.е. при сдвиге на полпериода, когда опорный и рабочий 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.

Весьма интересна зависимость чувствительности системы от амплитуды (глубины) модуляции по фазе (рис.3). Вначале при увеличении амплитуды до $\lambda/4$ и даже больше (до 2 рад, т.е. до $\lambda/3$) чувствительность повышается, а затем падает и даже меняет знак, поскольку при амплитуде модуляции свыше $\lambda/2$ начинают складываться противофазные компоненты интерференционного сигнала.

Анализ работы управляющей системы на базе ключевого синхронного детектора позволяет дать следующие экспериментально проверенные рекомендации.

1. Необходимо не допускать, чтобы разность фаз механических колебаний пьезокерамики и синхросигнала превышала $\pi/4$, иначе чувствительность будет снижаться.

2. Следует поддерживать амплитуду модуляции длины оптического пути в опорном канале около $\lambda/3$, поскольку при меньшей амплитуде чувствительность падает; при увеличении амплитуды чувствительность также снижается и даже возможен «перескок» системы в противофазный режим.

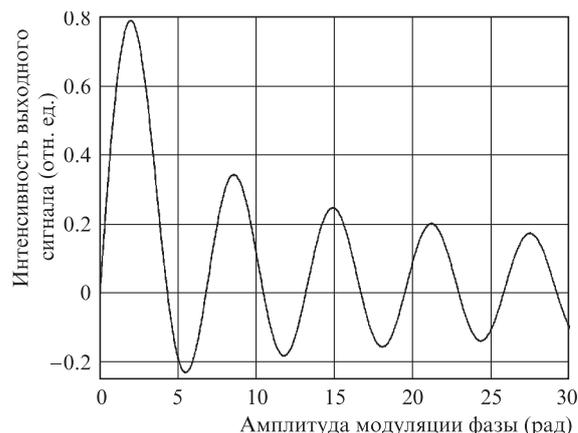


Рис.3. Зависимость чувствительности управляющей системы от амплитуды модуляции фазы.

4. Результаты экспериментов

Основное внимание в экспериментах уделялось поддержанию постоянной разности фаз между излучением отдельных каналов. К выходному торцу каждого силового канала был приварен коллиматор, обеспечивавший получение лазерного пучка с диаметром около 2 мм и расходимостью ~ 1 мрад. В свою очередь коллиматоры были вклеены в держатель так, что их оси излучения пересекались в одной точке на расстоянии 4 м от держателя. Расположение выходов силовых каналов имело гексагональную симметрию (рис.4). Интерференционная картина, возникающая на экране в области пересечения лазерных пучков, наблюдалась с помощью ПЗС-матрицы, а ее временная стабильность контролировалась дополнительно с помощью фотодиода.

Поочередно исследовались различные варианты сложения излучений лазерных каналов (путем выключения излучения накачки отдельных волоконных усилителей). При возбуждении двух каналов наблюдалась устойчивая интерференционная картина (рис.4). Постоянная разность фаз между каналами $\Delta\varphi$ вносилась путем подачи дополнительного постоянного напряжения на фазовый модулятор одного из каналов. Интерференционная картина на рис.4,а соответствует $\Delta\varphi = 0$, а на рис.4,б случай $\Delta\varphi = \pi$. Хорошо видно смещение картины на половину периода.

Быстродействие системы обратной связи в устройстве поддержания разности фаз проверялось также при сведении излучений двух каналов. Установлено, что при кратковременном воздействии на один из каналов (нагрев в течение 1 с или удар длительностью около 20 мс) быстродействие системы лучше 100 мс.

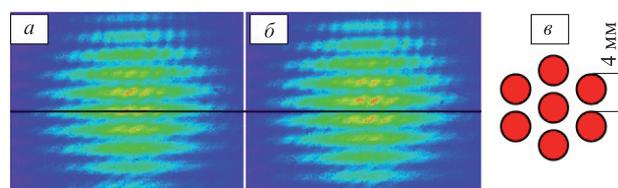


Рис.4. Интерференционная картина, полученная при сложении излучений двух каналов при $\Delta\varphi = 0$ (а) и $\Delta\varphi = \pi$ (б); в – расположение выходных коллиматоров силовых каналов.

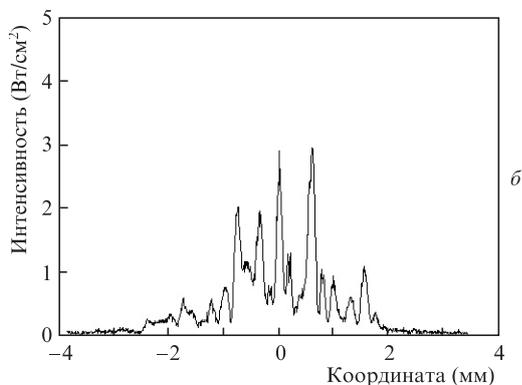
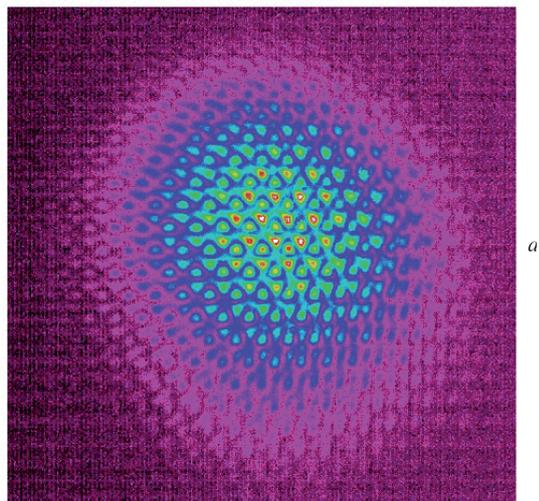


Рис.5. Интерференционная картина (а) и распределение интенсивности в ее поперечном сечении (б), полученные при сложении излучений семи каналов.

При сложении излучений всех семи каналов (рис.5) также наблюдалась устойчивая в долговременном плане интерференционная картина (длительность эксперимента составляла более часа). Стабильность картины не нарушалась при медленном тепловом воздействии на различные каналы (скорость нагрева около 10 К/мин). Влияние работы системы удержания фазы на суммарную интенсивность излучения семи каналов видно из на рис.6.

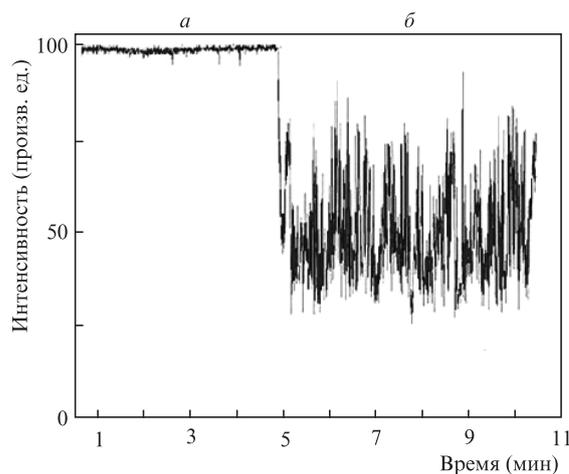


Рис.6. Стабильность суммарного излучения семи каналов при включенной (а) и выключенной (б) системе удержания фазы.

5. Заключение

Создана простая и эффективная система удержания разности фаз между несколькими лазерными каналами и разработан алгоритм её работы. На примере когерентного сложения излучения семи каналов иттербиевых волоконных усилителей продемонстрирована устойчивая работа всей системы. Показана возможность ее использования в более мощных лазерных системах для компенсации разности фаз в лазерных каналах при тепловом и механическом воздействии на активную среду, приводящем к относительно медленному (характерное время более 100 мс) изменению фазы излучения в отдельных каналах.

1. Goodno G.D., Komine H., McNaught S.J., et al. *Opt. Lett.*, **31**, 1247 (2006).
2. Hecht J. *Laser Focus World*, **44**, July (2008).
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. August S.J. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8237**, 823704 (2012).
8. Yu C.X., Kinsky J.E., Shaw S.E.J., Murphy D.V., Higgs C. *Electron. Lett.*, **42**, 1024 (2006).
9. Shay T.M. *Opt. Express*, **14**, 12188 (2006).