

# Анализ влияния ошибок рассогласования на когерентное сложение пучков на основе световода с самоизображением\*

Жумао Тхао, Сяолин Ван, Пху Чжоу, Лей Си

*Построена теоретическая модель когерентного сложения пучков (КСП) на основе световода с самоизображением (ССИ), смоделировано и численно проанализировано влияние ошибок рассогласования на КСП. При совместном использовании теоретической модели и метода конечных разностей для распространения пучков численно изучаются две основные категории ошибок (ошибки сборки и ошибки, не связанные со сборкой) с целью исследования их влияния на качество пучка с помощью фактора  $M^2$ . Вкратце обсуждаются оптимизация ССИ и принцип контроля ошибок системы. Приведенная обобщенная методика предоставляет полезную справочную информацию для всестороннего исследования когерентного сложения пучков мощных волоконных лазеров на основе световода.*

**Ключевые слова:** эффекты самоизображения, сложение лазерных лучей, волоконные лазеры.

## 1. Введение

Со времени первой демонстрации получения самоизображения в световоде [1] многомодовый световод на основе эффектов самоизображения стал использоваться для расщепления и сложения большого числа оптических пучков [2], что весьма важно в интегральной оптике. Благодаря превосходным свойствам (компактность, малые потери, стабильный коэффициент расщепления) и простоте изготовления (хорошие допуски на изготовление) многомодовые интерференционные ответвители на основе световода с самоизображением (ССИ) были использованы в сложных фотонных интегральных схемах (лазеры/усилители) для оптической связи [3, 4], в нечувствительных к поляризации переключателях интерферометров Маха–Цендера (ИМЦ) [5, 6], в приемниках с поляризационным разнесением [7] и оптических гибридных схемах для сетей с разнесением по фазе [8, 9]. Ранее Christensen и др. впервые разработали ССИ для реализации когерентного сложения пучков (КСП) [10], и было экспериментально реализовано КСП волоконных лазеров на основе ССИ для уровней мощности ниже среднего [11]. КСП на основе ССИ позволяет обеспечивать намного лучшую эффективность сложения и устранять побочные лепестки в дальнем поле [11]. Эти свойства КСП на основе ССИ показывают их преимущества перед другими архитектурами фазированных решеток со свободным пространством, которые являются преобладающими архитектурами для КСП [12–19]. Нами выведено аналитическое выражение для параметров самоизображения световода и с помощью метода конечных разностей распространения

пучков (МКРРП) смоделированы характеристики, показавшие, что при КСП на основе ССИ можно получить объединенный лазерный пучок без побочных лепестков с качеством, близким к дифракционному пределу [20, 21]. Таким образом, КСП на основе ССИ является одним из перспективных подходов для масштабирования волоконных лазеров для получения высокой мощности при превосходном качестве пучка.

Одно из достоинств световодного устройства – компактная структура, обеспечивающая высокую точность сборки и работы систем КСП на основе ССИ. Однако, с другой стороны, такая структура приводит к тому, что КСП на основе ССИ неизбежно присущи многие ошибки рассогласования, которых нет в архитектурах фазированных решеток со свободным пространством [13]. В результате качество когерентно объединенного пучка ухудшается. Эти ошибки рассогласования можно разделить на две основные группы. Первая группа включает ошибки сборки, которые вносятся при реализации КСП на основе ССИ. К ним относятся: ошибка смещения решетки (оси ССИ и решетки волоконных лазеров параллельны друг другу, но не находятся на одной линии), ошибка ориентирования решетки (ось ССИ не может быть строго параллельной оси решетки волоконных лазеров), ошибка положения пучка (положение падающего пучка на ССИ не всегда точно совмещено с положением самоизображения) и ошибка ориентирования пучка (оси волоконных лазеров в решетке не могут быть строго параллельными). Другая группа включает ошибки, которые вносятся волоконным лазером. Это фазовые ошибки (разности фаз между составляющими пучками в результате работы системы регулирования фаз), флуктуации выходной мощности волоконного лазера и ошибка размера пучка (размеры пучков волоконных лазеров не могут быть идентичными). Влияние ошибок рассогласования на когерентно объединенные пучки волоконных лазеров на основе фазированных решеток со свободным пространством изучалось в [13, 22–24]. Ранее нами были аналитически выведены свойства самоизображения ССИ, численно изучена осуществимость КСП на основе ССИ, кратко обсужден принцип

\* Перевод с англ. Е.А.Витовтовой.

R.Tao, X.Wang, P.Zhou, L.Si. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China; e-mail: taorumao@sohu.com

Поступила в редакцию 21 июня 2014 г., после доработки – 5 ноября 2014 г.

оптимизации световода и выработаны некоторые полезные правила проектирования [20, 21]. Однако, насколько нам известно, влияние ошибок рассогласования на КСП на основе ССИ детально не исследовалось.

В настоящей работе аналитически изучено КСП волоконных лазеров в ССИ на основе теории разложения по модам и использован МКРП для численного подтверждения аналитического вывода. Нами проанализировано влияние ошибок сборки и ошибок, не связанных со сборкой, на качество когерентно объединенного пучка волоконных лазеров с некоторым иллюстративным обсуждением.

## 2. Теоретическая модель

В настоящей работе мы используем конфигурацию системы для КСП на основе ССИ [20, 21], но в целях экономии места ее здесь не приводим. Теория разработана для двумерного случая. Однако представленные результаты также могут быть отнесены к квадратному и прямоугольному самоизображению, сформированному световодами с квадратным или прямоугольным сечением [25, 26]. Если обозначить поле входного одиночного луча как  $f(x)$ , то для фазированной решетки лазеров полное распределение поля на входе имеет вид

$$f_{\text{in}}(x) = C \left[ \frac{1}{C} \sum_{q=0}^{N-1} f(x - x_q) \exp(-j\varphi_q) \right], \quad (1)$$

где

$$C = \exp(-j\beta_0 L_N^M) \sum_{q=0}^{N-1} \exp\left(-j\pi \frac{x_q}{W} - j\varphi_q\right), \quad (2a)$$

$$x_q = (2q + 1 - N) \frac{M}{N} \frac{W}{2}, \quad (2б)$$

$$\varphi_q = q(N - q - 1) \frac{M}{N} \pi. \quad (2в)$$

Здесь  $x_q$  – положение пучка на входе;  $\varphi_q$  – фаза поршня световода, которая необходима для реализации когерентного сложения и вводится механизмом регулирования, т.е. фазовым модулятором;  $N$  – число волоконных лазеров;  $M$  вместе с  $N$  определяют возможные длины световода  $L_N^M$  вследствие наличия нескольких положений пучка в световоде, где может быть получено самоизображение ( $M$  и  $N$  – любые положительные целые числа без общего делителя);  $W$  – активный диаметр световода (рис.1), равный его физической толщине  $W_0$ , которая немного скорректирована с двух сторон на глубину проникновения света (эффект Гуса – Хенхен) в оболочку световода с показателем преломления  $n_{\text{cl}} < n$  [25–27].

Для волоконного лазера

$$f(x) = \left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4} \sqrt{P/w} \exp(-x^2/w^2), \quad (3)$$

где  $P$  – мощность волоконного лазера и  $w$  – радиус пучка.

Для полей сильно каналированных собственных мод ССИ имеем [26]

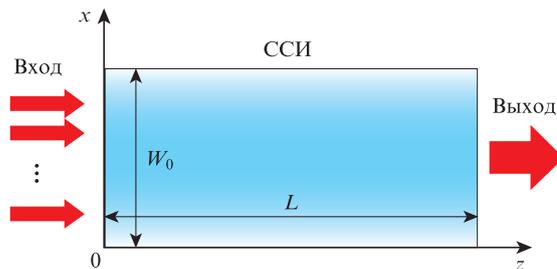


Рис.1. Схема световода.

$$E_i(x) = \sin\left[\pi(i + 1) \frac{x}{W}\right], \quad (4)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots$  – индекс моды.

Используя пространственное разложение Фурье, можно записать распределение поля  $f(x)$  как суперпозицию бесконечного числа сильно каналированных четных собственных мод  $E_i(x)$  с коэффициентами  $a_i$ :

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} a_{2i} E_{2i}(x), \quad a_i = \frac{2}{W} \int_0^W f(x) E_i^*(x) dx. \quad (5)$$

Уравнения (5) получены с использованием свойств симметрии распределения входного излучения и свойств соосного падающего излучения (направление падения для поля излучения на входе параллельно оси  $z$ ). Тогда

$$f_{\text{in}}(x) = C \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} a_{2i} \left[ \frac{1}{C} \sum_{q=0}^{N-1} E_{2i}(x - x_q) \exp(-j\varphi_q) \right] \right\}. \quad (6)$$

Используя

$$\frac{1}{C} \sum_{q=0}^{N-1} E_{2i}(x - x_q) \exp(-j\varphi_q) = B_{2i} E_{2i}(x), \quad (7)$$

где

$$B_{2i} = \frac{1}{C} \sum_{q=0}^{N-1} \exp\left[-j\pi(2i + 1) \frac{x_q}{W} - j\varphi_q\right], \quad (8a)$$

и заменив индекс суммирования  $q$  суммы на  $N - q - 1$ , можно записать выражение (8a) как

$$B_{2i} = \frac{1}{C} \sum_{q=0}^{N-1} \exp\left[j\pi(2i + 1) \frac{x_q}{W} - j\varphi_q\right]. \quad (8б)$$

Введем коэффициенты  $A_{2i}$ , которые определяются как

$$A_0 = \exp(j\beta_0 L_N^M), \quad A_{2i} = A_{2(i-1)} \exp[-j\pi(M/N) 2i]. \quad (9)$$

Тогда в соответствии с формулами (2a) и (8) имеем  $A_0 = B_0$ . Используя выражения (2б), (2в) и (8a), получим

$$\Phi_{2i,q-1} = \Phi_{2(i-1),q} + \pi(M/N)(-2i). \quad (10)$$

Если вспомнить о повторяемости  $N$  слагаемых, то имеем

$$B_{2i} = B_{2(i-1)} \exp[-j\pi(M/N) 2i]. \quad (11)$$

В соответствии с уравнениями (9) и (11) устанавливается следующая связь:

$$A_{2i} = B_{2i}. \tag{12}$$

С учетом (12) уравнение (6) может быть записано как

$$f_{in}(x) = C \sum_{i=0}^{\infty} a_{2i} A_{2i} E_{2i}(x). \tag{13}$$

В выражении (4) постоянные поперечного распространения

$$k_{xi} = (i + 1)\pi/W. \tag{14}$$

Соответствующие постоянные продольного распространения

$$\beta_i^2 = n_2 k_0^2 - k_{xi}^2. \tag{15}$$

Используя параксиальное приближение, получим

$$\beta_i \approx nk_0 - k_{xi}^2/2nk_0. \tag{16a}$$

$$\beta_i \approx nk_0 - \Delta\beta_{02}/8, \quad \Delta\beta_{02} = \beta_0 - \beta_2 \approx 4\pi^2/(nk_0 W^2), \tag{16b}$$

$$\beta_{2i} \approx \beta_0 - i(i + 1)\Delta\beta_{02}/2, \tag{16в}$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda$  – постоянная распространения в вакууме.

Если длина световода

$$L_N^M = \frac{M}{N} 2L_c = \frac{M}{N} \frac{2\pi}{\Delta\beta_{02}}, \tag{17}$$

где  $L_c = \pi/\Delta\beta_{02}$  – длина участка связи между двумя модами низшего порядка, то поле на выходе

$$f_{out}(x) = C \sum_{i=0}^{\infty} a_{2i} A_{2i} E_{2i}(x) \exp(-j\beta_{2i} L_N^M) = Cf(x). \tag{18}$$

Из уравнения (18) видно, что  $f(x)$  при различных положениях, пронумерованных как  $q = 0, 1, \dots, N - 1$ , объединяются в одну общую сумму. Это означает, что КСП на основе ССИ достигнуто.

### 3. Численные расчеты

Для исследования формул, полученных в разд.2, мы используем МКРРП [28, 29] с «прозрачными» граничными условиями [30, 31] для моделирования распространения света на участке планарного световода, такого же, что и в [20, 21]. Рассматривается планарный световод с  $W = 50$  мкм и  $n = 1.45$ , который находится в воздухе, т.е.  $n_{cl} = 1$ . Также предполагается, что  $\lambda = 1$  мкм. При сложении пучков двух волоконных лазеров ( $N = 2, M = 1$ ), исходя из уравнений (3) и (18), имеем  $L_2^1 = 1833.5$  мкм. Два гауссовых пучка одинаковой мощности с диаметром перетяжки 5 мкм вертикально вводятся в световод при  $z = 0$  (рис.2). Относительная фаза поршня световода для двух полей на входе задается уравнением (2в). При моделировании с помощью МКРРП выберем шаг дискретизации  $\Delta x = 0.02$  мкм. Распределение светового поля в световоде, показанное на рис.2, демонстрирует когерентное сложение пучков волоконных лазеров в единый пучок.

Прежде чем изучать влияние aberrаций, необходимо найти оптимальные рабочие условия, которые обеспечи-

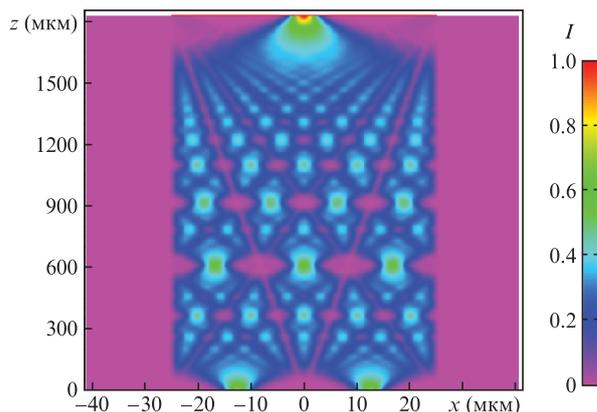


Рис.2. Распределение светового поля.

вают оптимальное сложение и могут использоваться для оценки влияния ошибок рассогласования. В качестве характеристического параметра для анализа характеристик сложения системы взят параметр  $M^2$ . На рис.3 представлены зависимость параметра качества пучка  $M^2$  от длины световода и поперечное распределение интенсивности излучения. Оптимальная длина световода, которая составляет 1834.5 мкм в соответствии с  $M^2 = 1.156$ , отличается от расчетной длины, равной 1833.5 мкм в соответствии с  $M^2 = 1.157$ . Относительная ошибка длины составляет около 0.05%, а ухудшение качества пучка – около 0.08%. Таким образом, формулы в разд.2 достаточно точны, поскольку относительная ошибка длины и ухудшение качества луча пренебрежимо малы.

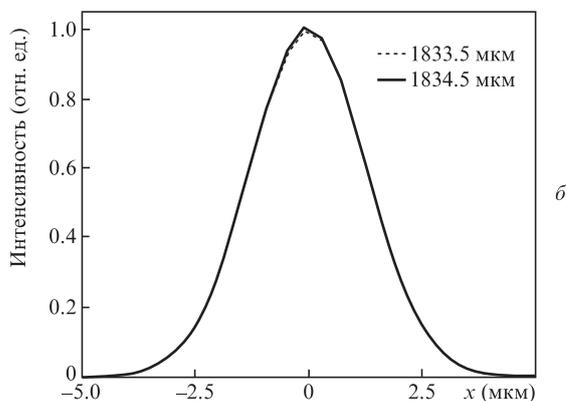
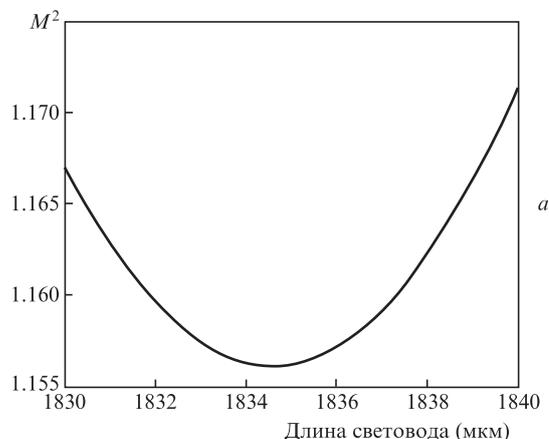
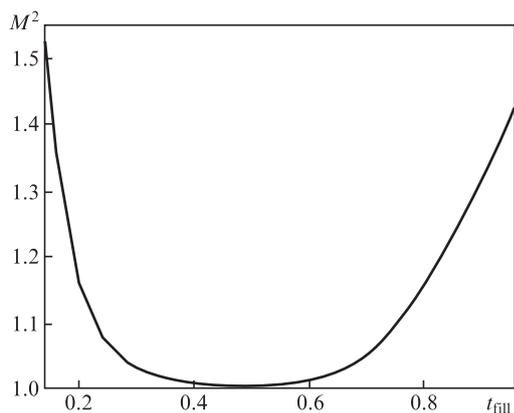


Рис.3. Параметр качества пучка  $M^2$  как функция длины световода (а) и распределение интенсивности выходного излучения (б).

Рис.4. Фактор  $M^2$  как функция коэффициента заполнения.

В следующем модельном эксперименте длина световода принята фиксированной и равной 1834.5 мкм. Определим коэффициент заполнения входа световода как  $t_{\text{fill}} = 2w/(W/N)$ . На рис.4 показана зависимость  $M^2$  от  $t_{\text{fill}}$ . Оптимальный коэффициент заполнения равен 0.52, что соответствует оптимальному диаметру перетяжки 13 мкм. Поскольку кривая имеет профиль U-типа, то в диапазоне  $0.4 < t_{\text{fill}} < 0.6$  параметр  $M^2$  практически не зависит от коэффициента заполнения, и можно получить дифракционно-ограниченный пучок.

### 3.1. Влияние ошибок рассогласования

Основное требование для высокоэффективного когерентного сложения пучков волоконных лазеров на основе ССИ заключается в том, что отдельные лазеры должны быть практически одинаковы. Именно это дает возможность сделать полностью обратное самоизображение. Поэтому лазеры должны быть пространственно синхронизированы, взаимно отрегулированы и синхронизированы по фазе с высокой точностью. Однако на практике эти условия трудно выполнить в полном объеме, и эффективность сложения ухудшается. На рис.5 и 6 показаны распределения интенсивности лазерного излучения в ближнем поле без каких-либо ошибок рассогласования и при их наличии. В первом случае (рис.5) получен единый пучок без каких-либо побочных лепестков. Однако при наличии ошибок рассогласования (ошибки фазы поршня световода в каждом пучке, ошибки смещения и ошибки ориентирования) возникают некоторые побочные лепестки (рис.6). Таким образом, ошибки приводят к ухудшению качества пучка, поэтому необходимо изучить влияние различных aberrаций.

В работе [11] экспериментально продемонстрирована решетка волоконных лазеров  $2 \times 2$  в двумерном ССИ. Такая решетка может быть принята за исходную единицу для масштабирования большего числа лазеров при каскадной конфигурации (рис.7). Поэтому здесь мы сосредоточимся главным образом на анализе решетки лазеров  $2 \times 2$ .

Для исследования влияния aberrаций на объединенный лазерный пучок использовались оптимальные параметры световода: длина световода была 1834.5 мкм; гауссовы пучки с  $2w_{\text{opt}} = 13$  мкм ( $t_{\text{fill}} = 0.52$ ) вводились вертикально в плоскости  $z = 0$ . Нами определялся допуск на ошибку, гарантирующий  $M^2 < 1.2$ . При наличии ошибок рассогласования поле на входе решетки волоконных ла-

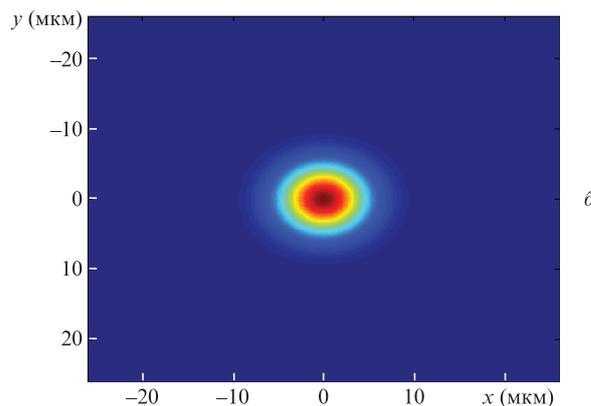
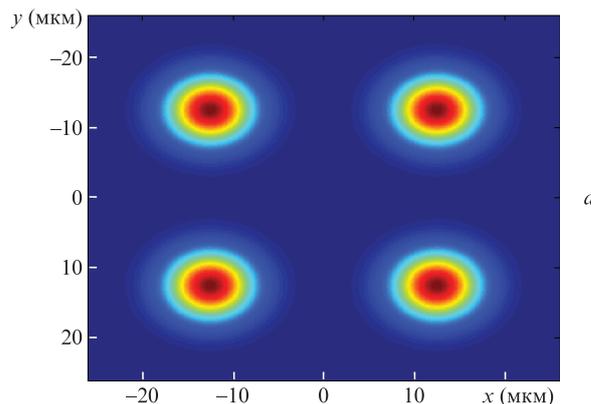


Рис.5. Распределение интенсивности входного (а) и выходного (б) излучений без aberrаций.

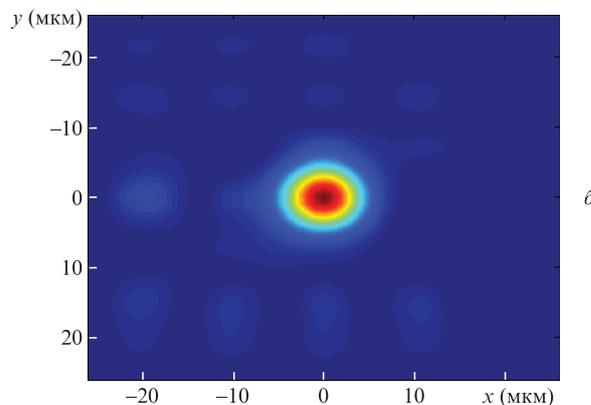
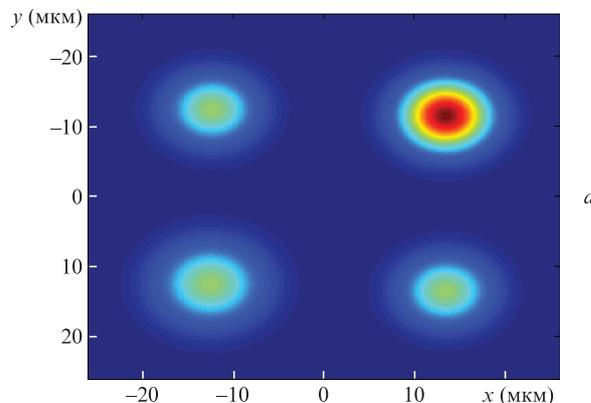


Рис.6. Распределение интенсивности входного (а) и выходного (б) излучений при наличии aberrаций.

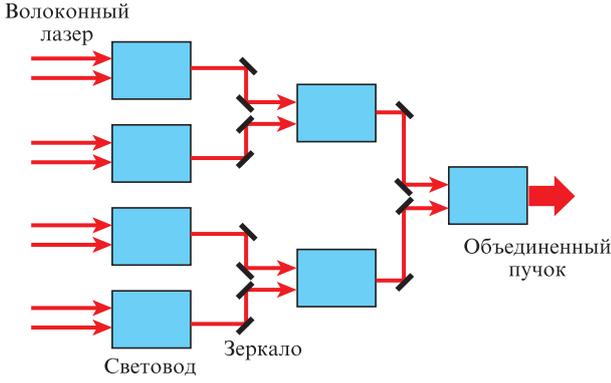


Рис.7. Каскадная компоновка световодов.

зеров в соответствии с уравнением (3) может быть записано как

$$f_m(x) = \left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4} \sum_{q=0}^{N-1} \sqrt{\frac{P + \delta P_q}{w_{opt} + \delta w_q}} \exp[-j(\varphi_q + \delta\varphi_q)] \times \exp\left[-\frac{(x \cos(\delta\theta_q) - x_q - \delta x_q)^2}{(w_{opt} + \delta w_q)^2}\right], \quad (19)$$

где  $\delta P_q$ ,  $\delta w_q$ ,  $\delta\theta_q$ ,  $\delta x_q$  и  $\delta\varphi_q$  обозначают соответственно изменение мощности, радиуса пучка, ориентирования, положения и фазы поршня световода для  $q$ -го лазерного пучка.

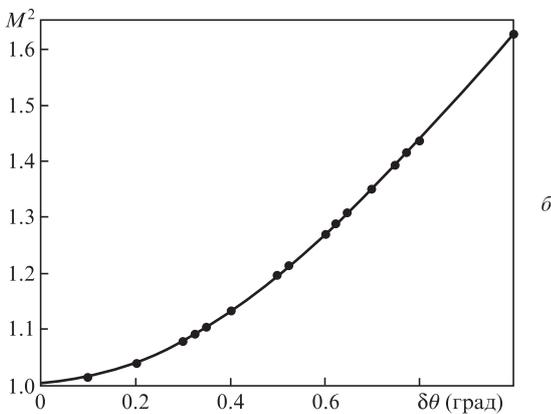
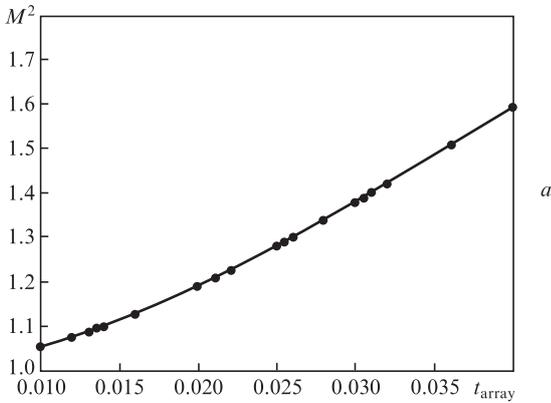


Рис.8. Фактор  $M^2$  как функция ошибки смещения (а) и ошибки ориентирования решетки (б) (точки – расчетные данные, сплошная линия – подгоночная кривая).

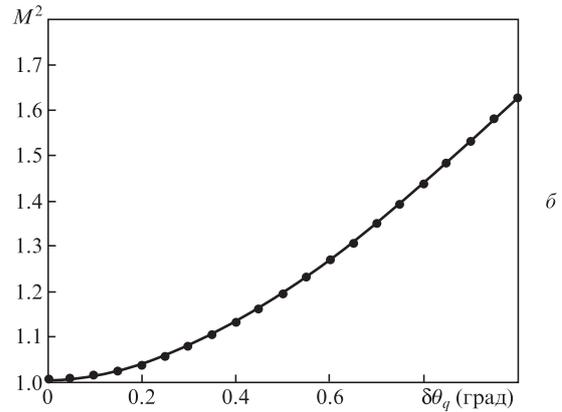
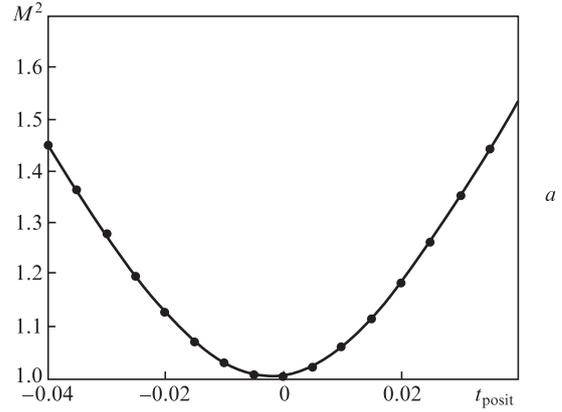


Рис.9. Фактор  $M^2$  как функция ошибки положения (а) и ошибки ориентирования пучка (б) (точки – расчетные данные, сплошная линия – подгоночная кривая).

**3.1.1. Влияние факторов сборки.** Существуют четыре основных вида ошибок сборки, а именно: ошибка смещения решетки, ошибка ориентирования решетки, ошибка положения и ошибка ориентирования пучка. Из-за ограниченной точности механической обработки и сборки оси симметрии лазеров решетки не могут быть строго параллельными оси световода, что определяется как ошибка смещения решетки от «нулевого» положения ( $t_{array} = \delta x/W$ ,  $\delta x_0 = \dots = \delta x_{N-1} = \delta x$ ) и ошибка ориентирования решетки ( $\delta\theta_0 = \dots = \delta\theta_{N-1} = \delta\theta$ ). Показанные на рис.8 графики изменения качества пучка в зависимости от  $t_{array}$  и  $\delta\theta$  демонстрируют уменьшение  $M^2$  пропорционально рассогласованию между решеткой и световодом. Ошибка смещения и ошибка ориентирования должны регулироваться соответственно в пределах  $0.02^\circ$  и  $0.5^\circ$  (для  $M^2 < 1.2$ ).

Поскольку оптические оси лазеров в решетке не могут быть строго параллельными друг другу и относительное положение каждого лазерного пучка не может быть точно совмещено с правильным положением его в световоде, то вводятся ошибка положения пучка ( $t_{posit} = \delta x_q/W$ ) и ошибка ориентирования пучка ( $\delta\theta_q$ ). На рис.9 представлены зависимости качества пучка от этих ошибок. Для выполнения условия  $M^2 < 1.2$  ошибка положения и ошибка ориентирования единого пучка должны удовлетворять условиям:  $-0.025 < t_{posit} < 0.021$  и  $\delta\theta_q < 0.55^\circ$ .

**3.1.2. Влияние факторов, не связанных со сборкой.** Существуют три основных вида ошибок, не связанных со сборкой: ошибка фазы поршня световода  $\delta\varphi_q$ , флуктуации

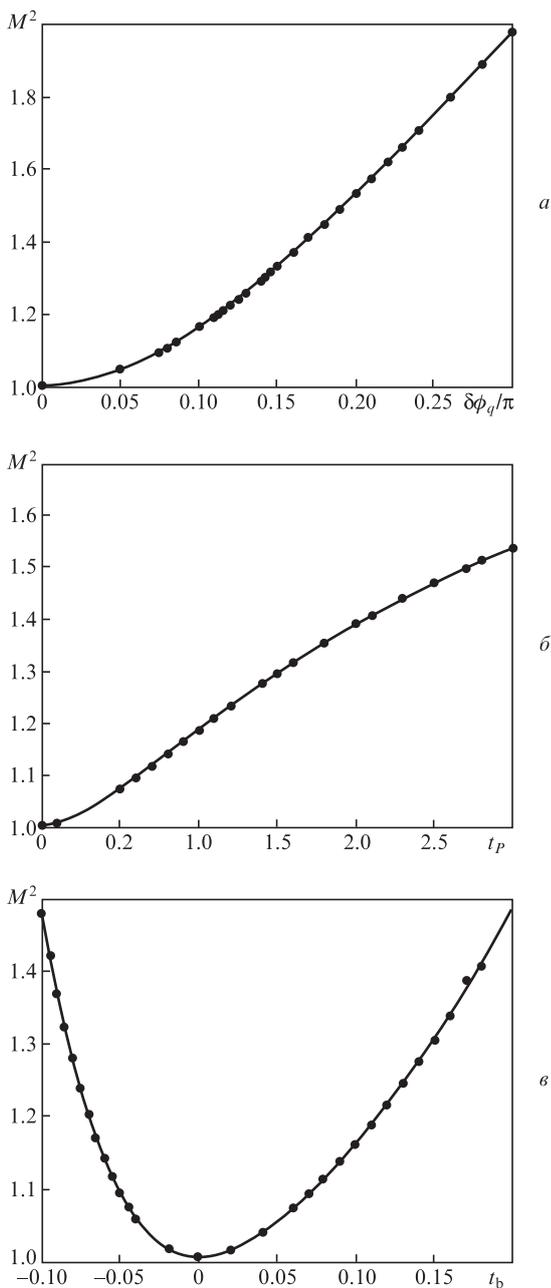


Рис.10. Фактор  $M^2$  как функция ошибки фазы поршня световода (а), флуктуаций мощности (б) и ошибки размера пучка (в) (точки – расчетные данные, сплошная линия – подгоняющая кривая).

мощности  $t_P = \delta P_q/P$  и ошибка размера пучка  $t_b = \delta w_q/w_{opt}$  (рис.10). Качество объединенного лазерного пучка зависит от aberrаций отдельных пучков. Чтобы получить объединенный лазерный пучок, близкий к дифракционно-ограниченному, значение  $\delta\phi_q$  должно регулироваться в пределах  $\pi/10$ , флуктуации мощности – быть меньше 1, а ошибка размера пучка – находиться в пределах от  $-0.07$  до  $0.11$ .

Полученные допуски на ошибки рассогласования представлены в табл.1. Видно, что каждый тип ошибок в различной степени отрицательно влияет на качество когерентно объединенного пучка. Однако мы считаем, что в инженерной практике влияние отдельных ошибок может быть уменьшено или устранено с помощью технических усовершенствований. Флуктуации мощности и ошибка размера пучка могут быть уменьшены путем повышения

Табл.1. Допуски на aberrации.

Факторы, не связанные со сборкой	Допуски
Остаточная ошибка фазы поршня световода $\delta\phi_q$	$< \pi/10$
Флуктуации мощности $t_P = \delta P_q/P$	$< 1$
Ошибка размера пучка $t_b = \delta w_q/w_{opt}$	$-0.07 < t_b < 0.11$
Факторы сборки	
Ошибка смещения решетки $t_{array} = \delta x/W$ $\delta x_0 = \dots = \delta x_{N-1} = \delta x$	$< 0.02$
Ошибка ориентирования решетки $\delta\theta_0 = \dots = \delta\theta_{N-1} = \delta\theta$	$< 0.5^\circ$
Ошибка положения пучка $t_{posit} = \delta x_q/W$	$-0.025 < t_{posit} < 0.021$
Ошибка ориентирования пучка $\delta\theta_q$	$< 0.55^\circ$

надежности промышленных волоконных лазеров, ошибки смещения и ориентирования решетки – с помощью точной регулировки экспериментальной платформы и оптимального проектирования геометрии эксперимента, ошибки положения и ориентирования одиночного волоконного лазера – при прецизионной сборке волоконного лазера. Несмотря на то, что возможность устранения фазового шума волоконного лазера киловаттного уровня мощности была экспериментально продемонстрирована [18], такие вопросы, как влияние ССИ на фазовые характеристики и возможность уменьшения фазового шума системы КСП на основе ССИ, остаются открытыми и требуют дальнейшего изучения.

#### 4. Заключение

Когерентное сложение пучков волоконных лазеров на основе ССИ является многообещающим методом получения мощного лазера с хорошим качеством пучка. Качество объединенного пучка ухудшается из-за aberrаций. Теоретическая модель КСП на основе ССИ представляет собой систему, основанную на разложении по модам, и влияние aberrаций на КСП на основе ССИ моделируется с помощью МКРРП. В настоящей работе рассмотрены aberrации, как обусловленные сборкой, так и не связанные со сборкой, и предложена общая методика для исследования влияния всех факторов aberrации.

С помощью критерия качества пучка  $M^2$  показано, что существует оптимальная ширина входного пучка волоконного лазера, при которой можно получить дифракционно-ограниченный выходной пучок ( $M^2 = 1.0054$ ). Поскольку  $M^2$  изменяется слабо, дифракционно-ограниченный пучок может быть получен в диапазоне  $0.4 < t_{fill} < 0.6$ . В случае, если допустимо, что  $M^2 < 1.2$ , для получения пучка, близкого к дифракционно-ограниченному, фазовая ошибка должна регулироваться в пределах  $\pi/10$ , ошибка ориентирования решетки волоконных лазеров и ошибка одиночного волоконного лазера должны быть меньше  $0.55^\circ$  и  $0.5^\circ$  соответственно. Следует учитывать, что незначительная ошибка смещения решетки или незначительная ошибка положения пучка вызывает существенное ухудшение качества пучка, а также следует учитывать влияние флуктуаций мощности и ошибки размера пучка.

Из всех перечисленных aberrаций влияние флуктуаций мощности, ошибки размера пучка, ошибок смещения и ориентирования решетки или волоконного лазера в решетке может быть уменьшено или устранено с помощью технических усовершенствований, тогда как фа-

зоявая ошибка создает трудности при использовании когерентного сложения пучков на основе ССИ в инженерной практике. Наша методика более полно исследует КСП волоконных лазеров, и результаты могут обеспечить справочную информацию для проектирования КСП мощных лазеров на основе ССИ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Инновационного фонда для выпускников-отличников Национального университета оборонных технологий (грант № В120704) и Инновационного фонда для аспирантов провинции Хунань (грант № СХ2012В035).

1. Bryngdahl O. *J. Opt. Soc. Am.*, **63**, 416 (1973).
2. Soldano L.B., Pennings E.C.M. *J. Lightwave Technol.*, **73**, 615 (1995).
3. Van Roijen R., Pennings E.C.M., van Stralen M.J.N., van Dongen T., Verbeek B.H., van der Keijden J.M.M. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1753 (1994).
4. Baker H.J., Lee J.R., Hall D.R. *Opt. Express*, **10**, 297 (2002).
5. Zucker J.E., Jones K.L., Chiu T.H., Tell B., Brown Goebeler K. *J. Lightwave Technol.*, **10**, 1926 (1992).
6. Bachmann M., Smit M.K., Besse P.A., Gini E., Melchior H., Soldano L.B. *Proc. Opt. Fiber Conf. and Intern. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. OSA Technical Digest Series. Vol. 4* (OSA, Washington, D.C., 1993, pp 32–33).
7. Deri R.J., Pennings E.C.M., Scherer A., Gozdz A.S., Caneau C., Andreadakis N.C., Shah V., Curtis L., Hawkins R.J., Soole J.B.D., Song J.I. *Photon. Technol. Lett.*, **4**, 1238 (1992).
8. Niemeier Th., Ulrich R. *Opt. Lett.*, **11**, 677 (1986).
9. Pennings E.C.M., Deri R.J., Bhat R., Hayes T.R., Andreadakis N.C. *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.* (Genova, Italy, 1992, pp 461–464).
10. Christensen S.E., Koski O., in *Advanced Solid-State Photonics. OSA Techn. Digest Series (CD)* (OSA, 2007, paper WC1).
11. Uberna R., Bratcher A., Alley T.G., Sanchez A.D., Flores A.S., Pulford B. *Opt. Express*, **18**, 13547 (2010).
12. Zhou P., Liu Z., Xu X., Chen Z. *Appl. Opt.*, **47**, 3350 (2008).
13. Shay T.M., Baker J.T., Sanchez A.D., Robin C.A., Vergien C.L., Zerinque C., Gallant D., Lu C.A., Pulford B., Bronder T.J., Lucero A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7195**, 71951M (2009).
14. Jolivet V., Bourdon P., Bennai B., Lombard L., Goular D., Pourtal E., Canat G., Jaouën Y., Moreau B., Vasseur O. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 257 (2009).
15. Jianfeng Li, Kailiang Duan, Yishan Wang, Wei Zhao. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20**, 888 (2008).
16. Vorontsov M.A., Weyrauch T., Beresnev L.A., Carhart G.W., Liu L., Aschenbach K. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 269 (2009).
17. Yu C.X., Augst S.J., Redmond S.M., Goldizen K.C., Murphy D.V., Sanchez A., Fan T.Y. *Opt. Lett.*, **36**, 2686 (2011).
18. Goodno G.D., McNaught S.J., Rothenberg J.E., McComb T.S., Thielen P.A., Wickham M.G., Weber M.E. *Opt. Lett.*, **35**, 1542 (2010).
19. Ma Y., Wang X., Leng J., Xiao H., Dong X., Zhu J., Du W., Zhou P., Xu X., Si L., Liu Z., Zhao Y. *Opt. Lett.*, **36**, 951 (2011).
20. Tao R., Si L., Ma Y., Zhou P., Liu Z. *Appl. Opt.*, **51**, 5826 (2012).
21. Tao R., Wang X., Xiao H., Zhou P., Si L. *Photon. Res.* (to be published).
22. Nabors C.D. *Appl. Opt.*, **33**, 2284 (1994).
23. Shellan J.B. *J. Opt. Soc. Am. A*, **2**, 555 (1985).
24. Goodno G.D., Chun-Ching Shih, Rothenberg J.E. *Opt. Express*, **18**, 25403 (2010).
25. Ulrich R., Kamiya T. *J. Opt. Soc. Am.*, **68**, 583 (1978).
26. Bachmann M., Besse P.A., Melchior H. *Appl. Opt.*, **33**, 3905 (1994).
27. He S., Ao X., Romanov V. *Appl. Opt.*, **42**, 4855 (2003).
28. Scarmozzino R., Gopinath A., Pregla R., Helfert S. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 150 (2000).
29. Scarmozzino R., Osgood, R.M. Jr. *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**, 724 (1991).
30. Hadley G.R. *Opt. Lett.*, **16**, 624 (1991).
31. Hadley G.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 363 (1992).