

Пространственно-временное мультиплексирование на основе гексагональных многосердцевинных световодов

И.С.Чеховской, М.А.Сорокина, А.М.Рубенчик, М.П.Федорук

С помощью генетического алгоритма решена задача нахождения параметров оптических гауссовых импульсов, при которых возможно их эффективное нелинейное сложение в одной из периферийных сердцевин 7-сердцевинного гексагонального световода. Рассмотрены два подхода, основанные на индивидуальном подборе пиковых мощностей и фаз полей вводимых в световод импульсов. Найденные режимы сложения гауссовых импульсов открывают новые возможности для разработки устройств по управлению оптическим излучением.

Ключевые слова: многосердцевинные световоды, нелинейное уравнение Шредингера, генетический алгоритм, нелинейное сложение импульсов.

1. Введение

Одной из современных технологий повышения прочностных характеристик металлических изделий на производстве является использование для этой цели коротких лазерных импульсов высокой мощности. Поверхность обрабатываемого металлического изделия подвергается воздействию последовательности мощных оптических импульсов. Каждый импульс облучает некоторую точку на поверхности изделия. Для генерации оптических пучков высокой мощности на практике применяются различные схемы линейного сложения импульсов [1,2]. Важное требование к таким схемам – необходимость точного управления фазами полей складываемых пучков для поддержания когерентности выходного импульса.

Ранее с помощью численного моделирования была продемонстрирована возможность использования нелинейных эффектов, возникающих в многосердцевинных световодах, для сложения и сжатия оптических импульсов [3, 4]. Такая нелинейная схема имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными линейными схемами [5, 6]. В частности, может быть существенно ослаблено требование к управлению фазами полей складываемых импульсов. При этом эффективного сложения можно добиться путем подбора параметров входных импульсов, в то время как характеристики волокна остаются неизменными.

В настоящей работе демонстрируется принципиальная возможность создания на основе гексагонального многосердцевинного световода устройства для нелиней-

ного сложения импульсов, способного генерировать мощные оптические импульсы, каждый из которых выходит из выбранной сердцевинки многосердцевинного световода. Поскольку при этом генерируемые импульсы получены в результате нелинейного сложения оптических импульсов, то данное устройство может быть использовано, например, для уплотнения металлических изделий. Однако, как было показано в предыдущих работах [3,4], при введении полностью одинаковых гауссовых импульсов их сложение в гексагональном световоде может произойти только в центральной сердцевине. Поэтому основной задачей в данном случае было определение условий, при которых можно эффективно складывать оптические импульсы не в центральной, а в любой другой сердцевине, подстраивая параметры этих импульсов.

2. Математическая модель

Для исследований был выбран 7-сердцевинный гексагональный световод длиной L (рис.1). При численном моделировании распространения вдоль него оптических

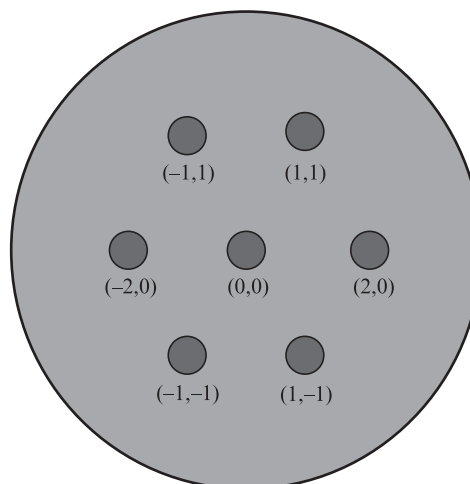


Рис.1. Схема рассматриваемого 7-сердцевинного гексагонального световода.

И.С.Чеховской, М.П.Федорук. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6; e-mail: i.s.chekhovskoy@gmail.com

М.А.Сорокина. Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK

А.М.Рубенчик. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA

импульсов с полями U_{nm} использовалось дискретно-непрерывное нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) для нормированных величин [3, 4]:

$$i \frac{\partial U_{nm}}{\partial z} + \frac{\partial^2 U_{nm}}{\partial t^2} + (CU)_{nm} + |U_{nm}|^2 U_{nm} = 0, \quad (1)$$

где

$$(CU)_{nm} = U_{n-1 m-1} + U_{n+1 m-1} + U_{n-2 m} + U_{n+2 m} + U_{n-1 m+1} + U_{n+1 m+1} - 6U_{nm}.$$

Для численного решения данной системы уравнений применялось обобщение метода расщепления по физическим процессам, заключающееся в вычислении матричной экспоненты в частотной области с помощью аппроксимации Паде [7]. В качестве начальных использовались гауссовы импульсы с полями

$$U_{nm}(z = 0, t) = \sqrt{P_{nm}} \exp\left[\frac{-(1 + i\alpha_{nm})t^2}{2\tau_{nm}^2}\right] \exp(-i\phi_{nm}). \quad (2)$$

Здесь P_{nm} – пиковая мощность начальных импульсов; α , τ и ϕ – чирп, ширина и фазовый сдвиг импульсов соответственно. Из-за большого числа варьируемых параметров инструментом поиска служил генетический алгоритм, широко применяемый для решения задач в оптике [8–14]. Использовалась его готовая программная реализация на языке Python в виде пакета DEAP [15], поддерживающего параллельное исполнение на системах с распределенной памятью с помощью библиотеки SCOOP [16]. В генетическом алгоритме в качестве генотипа каждой отдельной особи в популяции был выбран вектор значений, описывающих параметры вводимых в световод гауссовых импульсов: пиковые мощности, ширины, чирпы и фазы. В силу симметрии задачи для 7-сердцевинного гексагонального световода можно рассматривать параметры только пяти импульсов, уменьшив, таким образом, размер оптимизационной задачи. В качестве значения функции приспособленности для каждой особи в популяции использовалось максимальное значение эффективности сложения импульсов (отношение доли энергии, оказавшейся в периферийной сердцевине $(-2, 0)$, к полной энергии E , введенной в световод), которое может быть достигнуто при распространении импульсов с заданными параметрами (геномом) вдоль рассматриваемого световода. При этом не учитывалась энергия, содержащаяся в пьедестале сложного импульса.

3. Результаты моделирования

Были исследованы два подхода к определению параметров гауссовых импульсов, при которых сложный импульс может быть получен в одной из периферийных сердцевинок 7-сердцевинного световода.

Первый подход проще в плане практической реализации (в эксперименте). Его суть заключается в подборе величины пиковой мощности каждого оптического импульса в отдельности. Ширина и чирп для всех импульсов при этом одинаковые, но также подбираются с целью максимизации эффективности сложения импульсов. Начальные фазы всех импульсов равны нулю. Таким образом, общее число параметров в решаемой оптимизационной задаче, т. е. размер генома отдельной особи в генети-

ческом алгоритме, равняется 7. Значениями этих параметров для начальной популяции являются равномерно распределенные случайные величины из заданных интервалов. Как было сказано выше, функцией приспособленности для оценки «качества» особи служила полученная после расчета распространения введенных гауссовых импульсов вдоль световода эффективность сложения этих импульсов.

Если не накладывать никаких дополнительных ограничений на геномы отдельных особей, то для получения на выходе из периферийной сердцевины импульса, обеспечивающего максимальную эффективность сложения, нужно в эту сердцевину ввести чирпированный импульс с пиковой мощностью, превышающей пиковую мощность остальных импульсов на несколько порядков. Конечно, данное решение является тривиальным. Поэтому в дальнейшем было введено ограничение на разброс значений пиковых мощностей начальных гауссовых импульсов:

$$\frac{\min P_{nm}}{\max P_{nm}} < M, \quad (3)$$

где M – глубина модуляции.

Оказалось, что если пиковые мощности вводимых импульсов различаются не более чем в два раза, то максимальная эффективность их сложения, которую можно получить, равна 28%. Если же пиковые мощности различаются не более чем в пять раз, то максимальная эффективность составляет 53% (рис.2,а). В случае расхождения величин пиковых мощностей в 10 раз максимальная эффективность оказывается равной 69%.

Второй подход более сложен с технической точки зрения, т. к. требует управления фазами начальных импульсов. Предлагается сделать одинаковыми для всех вводимых импульсов пиковую мощность, ширину и чирп, но

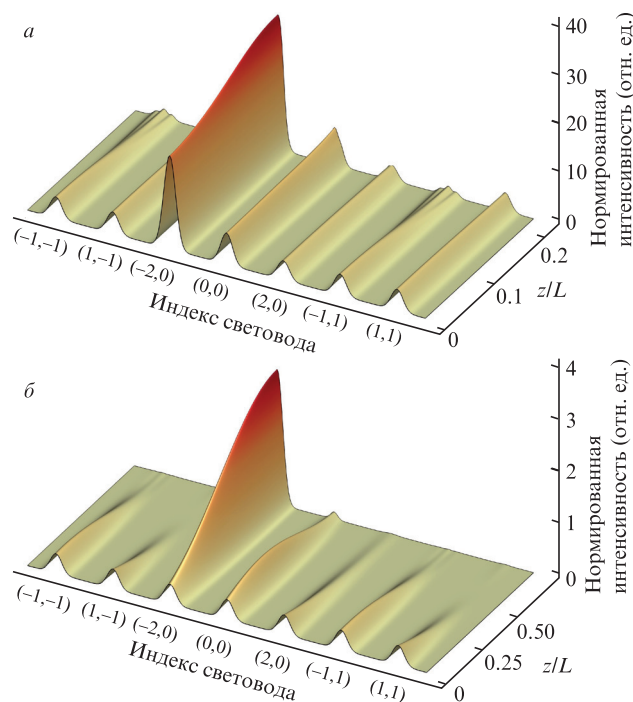


Рис.2. Динамика интенсивности оптических импульсов для режима с максимальной эффективностью сложения, полученного с помощью генетического алгоритма с использованием модуляции пиковых мощностей ($M = 0.2$) (а) или подбора фаз (б).

при этом подбирать фазу каждого импульса в отдельности и максимизировать эффективность сложения импульсов в периферийной сердцевине путем подбора восьми параметров. В итоге с помощью генетического алгоритма был получен режим, при котором возможно сложение 95% энергии всех введенных импульсов на расстоянии $z/L = 0.8$ (рис.2,б).

Важным условием функционирования предлагаемого устройства является возможность сложения импульсов на одинаковом расстоянии как в центральной сердцевине, так и в периферийной. На рис.3 представлена зависимость эффективности сложения гауссовых импульсов в центральной сердцевине 7-сердцевинного гексагонального световода [4]. В данном случае моделировалась динамика гауссовых импульсов с одинаковыми пиковой мощностью P и шириной τ . Белой штриховой линией выделены те режимы, в которых введенные в световод импульсы складывались на расстоянии $z/L = 0.8$, как и в случае наилучшего режима сложения импульсов в периферийной сердцевине, найденного с помощью подбора фаз. Из рис.3 видно, что на расстоянии $z/L = 0.8$ возможно сложение импульсов в центральной сердцевине с эффективностью около 90%.

Также было проведено исследование устойчивости найденных режимов по отношению к различным флуктуациям (рис.4). Изучалось изменение расстояния до точки сложения импульсов вдоль волокна как одной из важных характеристик предлагаемой схемы нелинейного сложения.

Рассмотрено влияние флуктуаций фаз начальных импульсов, которые моделировались с помощью функции C_{δ_p} , имеющей равномерное распределение на отрезке $[-\delta_p; \delta_p]$. Таким образом, начальные поля импульсов имели вид

$$\tilde{U}_{nm}(t) = U_{nm}(t)\exp(-iC_{\delta_p}). \quad (4)$$

Параметр δ_p изменялся от 0 до π . Для каждого из 100 его значений проведено 2000 расчетов, на основе кото-

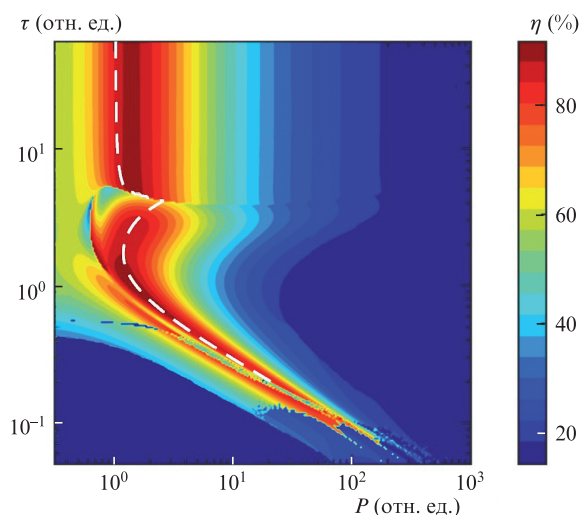


Рис.3. Эффективность сложения η гауссовых импульсов в центральной сердцевине (0,0) 7-сердцевинного гексагонального световода в зависимости от ширины τ и пиковой мощности P начальных импульсов. Белая штриховая линия соответствует тем параметрам гауссовых импульсов, при которых возможно их сложение на расстоянии $z/L = 0.8$, как и в случае, представленном на рис.2,б. Цветной вариант рис.3 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

рых были получены среднее значение расстояния до точки сложения z_0 , а также его минимальное (z_{\min}) и максимальное (z_{\max}) значения. Расчеты показали, что схема сложения остается устойчивой при $\delta_p \in [0; \pi/20]$ для рассмотренного ранее режима, в котором моделировались пиковые мощности, и при $\delta_p \in [0; \pi/5]$ в случае подбора фаз (рис.4,а, б).

Было исследовано влияние временных задержек между импульсами, задаваемых с помощью функции C_{δ_t} , которая имела равномерное распределение на отрезке $[-\delta_t; \delta_t]$. Возмущенные начальные поля гауссовых импульсов принимали вид

$$\tilde{U}_{nm}(t) = U_{nm}(t - C_{\delta_t}). \quad (5)$$

Как показали результаты моделирования, устойчивость схемы при подборе фаз наблюдается только при $\delta_t \in [0; \tau]$, где $\tau = 19.755$ – ширина начальных импульсов (рис.4,з). Однако режим, найденным путем подбора пиковых мощностей, оказался крайне чувствительным к флуктуациям данного типа (рис.4,в) и требует, чтобы временное расхождение между импульсами не превышало величину $\tau/20$.

При производстве многосердцевинных оптических волокон крайне важно, чтобы геометрия сечения волокна оставалась постоянной на протяжении всей его длины. Однако всегда неизбежны небольшие флуктуации расстояния между сердцевинами, радиусов сердцевины, а также распределения показателя преломления. Все это сильно влияет на значение коэффициента связи между сердцевинами C , поэтому данный аспект также был изучен. Флуктуации коэффициента связи моделировались с помощью винеровского случайного процесса $\Delta C(z)$. Коэффициент связи в данном случае представлялся в виде

$$C(z) = C_0 + \Delta C(z), \quad (6)$$

где C_0 – среднее значение коэффициента связи (в рассматриваемой модели $C_0 = 1$). Данный подход позволил относительно плавно менять значение коэффициента связи вдоль световода. Расчеты показали, что предложенная схема сжатия и сложения оптических импульсов достаточно устойчива к изменению коэффициента связи между сердцевинами. Основные характеристики начинают существенно ухудшаться при превышении стандартным отклонением коэффициента связи σ_c ($z = 0$) величины 10% для режима с подбором пиковых мощностей и 15% для режима с подбором фаз. Такое требование осуществимо на практике, поскольку при производстве многосердцевинных световодов расстояние между сердцевинами флуктуирует на величину, не превышающую 3%–5%. При этом характерная длина, на которой происходят указанные изменения составляет ~ 10 м. Таким образом, при использовании достаточно короткого (до 10 м) световода предложенная схема будет устойчива к возможным неоднородностям в его структуре.

4. Заключение

В настоящей работе предложено использование генетического алгоритма для нахождения параметров оптических гауссовых импульсов, при которых возможно их эффективное нелинейное сложение в одной из периферийных сердцевины 7-сердцевинного гексагонального све-

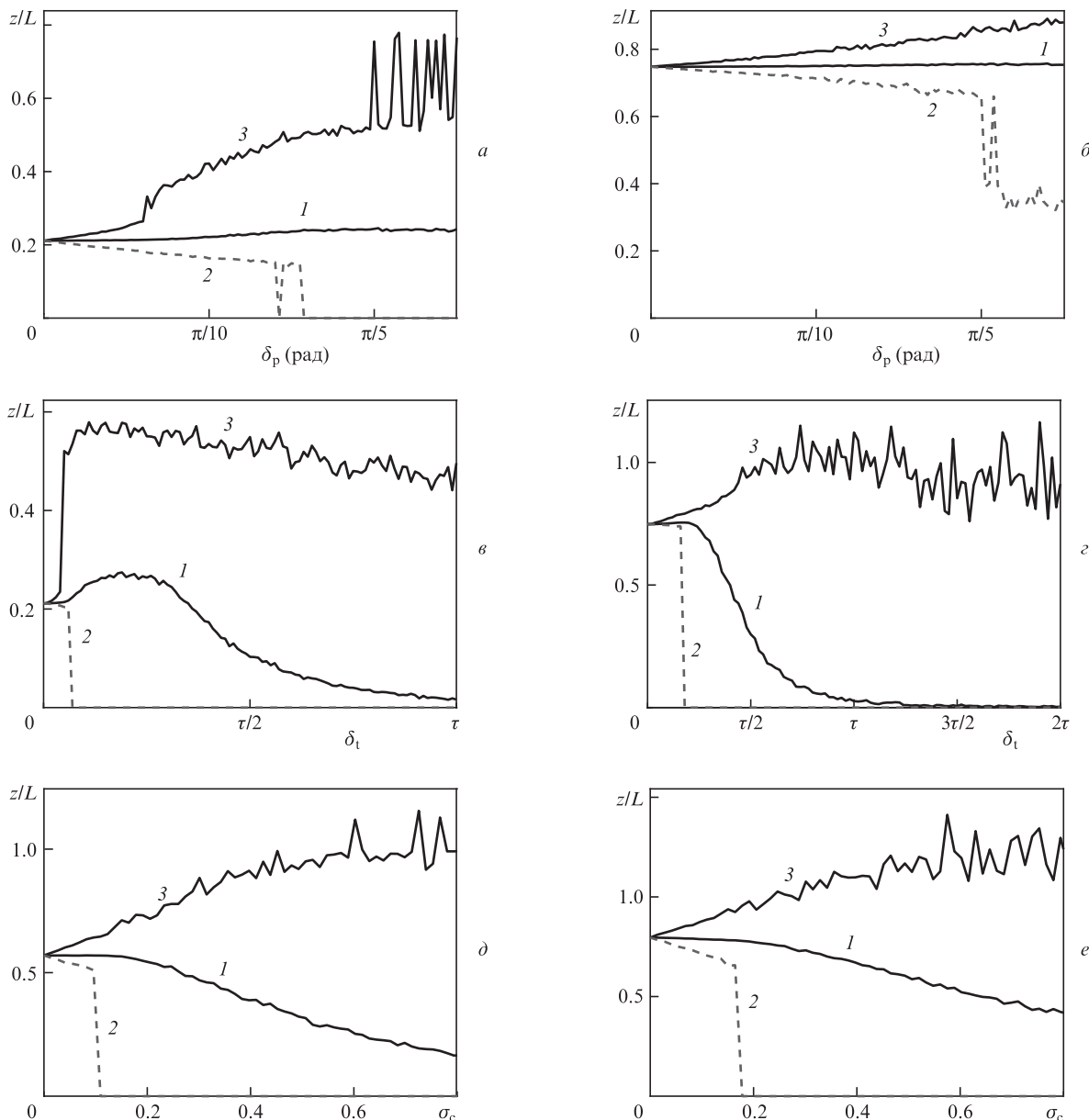


Рис.4. Влияние разброса фаз δ_p (а, б), временных задержек δ_t (в, г) и флуктуаций коэффициента связи σ_c (д, е) на расстояния z_0 (1), z_{\min} (2) и z_{\max} (3) до точки сложения гауссовых импульсов в периферийной сердцевине (-2,0). Рисунки а, в и д соответствуют режиму, полученному подбором пиковых мощностей ($M = 0.2$), б, г и е – режиму, полученному подбором фаз. Характеристики найдены усреднением по 2000 результатам моделирования.

товода. Рассмотрены два подхода, основанные на индивидуальном подборе пиковых мощностей и фаз вводимых в световод импульсов. Определены значения пиковых мощностей гауссовых импульсов, при которых эффективность сложения в периферийных сердцевинах достигает 69%. При подборе фаз полей вводимых в световод импульсов была получена эффективность сложения около 95%. Найденные режимы сложения гауссовых импульсов открывают новые возможности для разработки устройств по управлению оптическим излучением. Данная техника может найти применение в задачах, связанных с обработкой сигналов, с волоконными лазерами, криптографией, и во многих других задачах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-72-30006).

1. Fan T.Y. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11**, 3 (2005).
2. Hanna M. et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **49**, 6 (2016).
3. Rubenchik A.M. et al. *Opt. Lett.*, **40**, 5 (2015).
4. Chekhovskoy I.S. et al. *Phys. Rev. A*, **94**, 043848 (2016).
5. Zheng W. *Proc. ECOC* (London, 2013, OM3I.4).
6. Zhou J. *Opt. Express*, **23**, 17 (2015).
7. Chekhovskoy I.S. et al. *J. Comput. Phys.*, **334**, 31 (2017).
8. Kerrinckx E. et al. *Opt. Express*, **12**, 9 (2004).
9. Rosen S. et al. ArXiv preprint arXiv:1506.08586 (2015).
10. Askarov D. et al. *J. Lightwave Technol.*, **33**, 19 (2015).
11. Da Silva J.P. et al. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **55**, 2 (2013).
12. Ivorra B. et al. *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, **2**, 170 (2006).
13. Arteaga-Sierra F.R. et al. *Opt. Express*, **22**, 19 (2014).
14. Rosa L. et al. *Proc. ECOC* (Torino, Italy, 2010).
15. Fortin F.A. et al. *J. Mach. Learning Res.*, **13**, 2171 (2012).
16. Hold-Geoffroy Y. et al. *Proc. ICPS* (Austin, USA, 2014, p. 60).