

Спиральные брэгговские решётки, записываемые пучком фемтосекундного лазера

В.В. Лихов, С.В. Васильев, Г.К. Алагашев, А.Г. Охримчук

Институт общей физики РАН, Научный центр волоконной оптики РАН

**E-mail: okhrim@fo.gpi.ru*

DOI:10.31868/RFL.2024.111-112

Оптические пучки, несущие орбитальный угловой момент (ОАМ), перспективны для пространственного уплотнения каналов связи как в свободном пространстве, так и в световодах. В настоящее время манипуляции с ОАМ (генерация, фильтрация, конвертация) осуществляются преимущественно с помощью объёмной оптики главным образом с использованием пространственных модуляторов свет (SLM), которые плохо совместимы с волоконными линиями связи. Поэтому необходимо создавать волноводные устройства для манипуляций с ОАМ. Спиральные структуры с различным шагом спирали, интегрированные в волоконные системы, являются естественным решением для генерации и фильтрации мод с ОАМ [1]. Спиральные структуры с шагом спирали порядка длины волны, то есть спиральные Брэгговские решётки, интересны еще и тем, что на их основе в перспективе можно создать волоконные лазеры, генерирующие моды, несущие ОАМ высокой чистоты. Для создания таких структур требуется технология структурирования показателя преломления в трёхмерном формате с субмикронным пространственным разрешением. Прямая лазерная запись отвечает этим требованиям, что подтверждается недавно созданными спиральными Брэгговскими решётками [2,3].

Спиральная брэгговская решётка в простейшем случае представляет собой непрерывный след от модификации в стекле или кристалле, возникающей в перетяжке пучка фемтосекундного лазера при спиралевидном движении образца относительно неподвижной перетяжки. Такое движение обладает замечательным кинетическим свойством – это равномерное поступательное движение по одной координате и движение по эллипсу в ортогональной плоскости, что обеспечивает постоянство шага брэгговской решётки с высокой точностью, что и определяет качество ее спектра. Спектр Брэгговской решётки, записанной в одномодовом волоконном световоде по спиральной схеме, близок к теоретическому [4]. В последнем случае конечно спиральная структура не приводит к генерации мод, обладающих ОАМ, поскольку соответствующие моды не поддерживаются в одномодовом световоде.

Спиральная Брэгговская решётка обладает одновременно и волноведущими свойствами, причем как при положительном изменении показателя преломления в спирали, так и при отрицательном. В последнем случае она представляет собой волновод с депрессированной оболочкой [3,5,6]. Такой многомодовый волновод поддерживает в том числе моду с максимумом интенсивности в центре, поэтому в него может быть заведён с высокой эффективностью Гауссов пучок из свободного пространства, а при отражении от спиральной Брэгговской решётки происходит трансформация в моду, несущую ОАМ.

Для получения в отраженном пучке чистой ОАМ моды (с определенным значением ОАМ) необходима однородная по азимутальному углу спиральная структура, с одинаковым показателем преломления и геометрическими параметрами. Запись с помощью традиционной сигарообразной перетяжки лазерного пучка не может обеспечить постоянную по углу ширину спирали.

Однако использование круглой линзообразной перетяжки, ось аксиальной симметрии которой ориентирована вдоль оси спирали, решает проблему записи непрерывной однородной спирали в кристалле YAG [3], но при записи в стекле возникают проблема однородности изменения показателя преломления. Эта проблема снимается при записи гармонически сегментированной спирали, состоящей из m одинаковых угловых сегментов (Рис.1(а)). При этом в кварцевом стекле получаем положительное изменение показателя преломления в сегментах, а распределение интенсивности в модах имеет вид, представленный на Рис.1(б) ([6]). Для сегментированной Брэгговской спирали ОАМы набегающей и отраженной моды связаны обобщенным условием углового фазового синхронизма [6,7]:

$$q - l = \alpha p \pm m \quad (1),$$

при этом должно выполняться и традиционное резонансное Брэгговским условие:

$$\beta_q + \beta_l = \frac{2\pi}{\Lambda} p, \quad (2),$$

где q и l – топологические заряды отраженной и набегающей моды соответственно; $\alpha = \pm 1$ – хиральность; p – порядок брэгговского резонанса; m – номер гармоники в разложении показателя преломления в ряд Фурье по азимутальному углу.

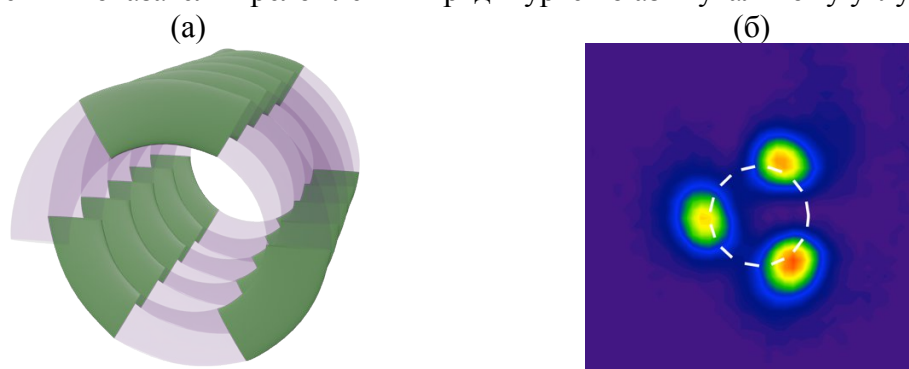


Рис.1. ([6]) а) Структура сегментированной спиральной брэгговской решётки с основной гармоникой $m_0=3$. б) Измеренный профиль интенсивности моды с ОАМ=-1. Фаза поля в максимумах интенсивности отличается на $2\pi/3$. Белым пунктиром показан средний диаметр спиральной Брэгговской решётки.

Метод записи спиральной Брэгговской решётки линзообразной перетяжкой лазерного пучка позволяет избежать негативный эффект от астигматизма в записывающем пучке, возникающего при прохождении цилиндрической границы сердцевина-оболочка халкогенидного волоконного световода, отличающегося высоким показателем преломления (около 2,5). Брэгговская решётка первого порядка, записанная таким методом в селенидном волоконном световоде, легированном ионами Tb^{3+} , недавно позволила продемонстрировать первый полностью волоконный лазерный резонатор, генерирующий на длине волны более $5 \mu m$.

Литература

- [1] L. Fang and J. Wang, Opt Lett **40**, 4010 (2015).
- [2] Q. Guo, S. Liu, X. Pan, et al, Opt Lett **46**, 4836 (2021).
- [3] A.G. Okhrimchuk, V. V. Likhov, et al, J. of Lightwave Technology **40**, 2481–2488 (2022).
- [4] V. V. Likhov, S.A. Vasiliev, et al, ICLO-2022, DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840316.
- [5] А.Г. Охримчук, А.Д. Прямыков, патент РФ 2711001 (2020).
- [6] V.V. Likhov, S.A. Vasiliev, et al, Optics Letters, 49(5), 1217 (2024).
- [7] V.V. Likhov, S.A. Vasiliev, et al, Bull. of the Lebedev Physics Institute **50**, S314–S321 (2023).