

Вихревой волоконно-оптический фильтр

С.И. Халилов
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
server.khalilov.94@mail.ru

М.В. Брецко
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
mihailbretcko4@gmail.com

В.И. Шостка
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
vshostka@cfuv.ru

А.Ф. Рыбась
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
rubass@cfuv.ru

Я.Е. Акимова
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
ak1mova.yana.@yandex.ru

С.И. Якубов
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
yakubov-selim@mail.ru

Б.В. Соколенко
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
simplexx.87@gmail.com

А.В. Воляр
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
vshostka@cfuv.ru

Ю.А. Егоров
Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
yuriyegorov@cfuv.ru

Аннотация—В работе представлены экспериментальные результаты сохранения состояния поляризации и величины топологического заряда оптического вихря при распространении по навитому оптическому волокну, путем фильтрации невихревых мод. Методом Стокс-поляриметрии и измерения вихревого спектра в каждой компоненте поля, были найдены условия навивки волокна. Для маломодового оптического волокна с $V = 3,8$ условия сохранения, следующие: шаг витка $H = 1,5$ мм, число витков $n = 20-21$ и радиус спирали $r = 2$ мм, при навивке на кварцевый цилиндр.

Ключевые слова— оптический вихрь, маломодовое оптическое волокно, топологический заряд, поляризация света, навитое волокно.

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерный пучок с геликоидальным волновым фронтом $\exp(i\ell\phi)$, известен как оптический вихрь (ОВ), где ϕ - азимутальный угол, ℓ - топологический заряд (ТЗ), характеризующий число ветвей геликоида. В 1992 году, L. Allen с соавторами [1] обнаружили, что данный луч света обладает орбитальным угловым моментом (ОУМ) равный $\ell\hbar$ на один фотон. С тех пор пучки света со спиральным волновым фронтом стали предметом интереса в сообществе и нашли свое применение в различных областях, начиная с астрономии и заканчивая захватом и манипуляцией микрочастиц [2]. Но одним из многообещающих перспектив использования стала оптическая связь [3]. При кодировании информации в значениях ТЗ ОВ, с использованием двух ортогональных состояний поляризации и длин волн возможно увеличить число информационных каналов в десятки раз по сравнению с существующими методами. Nenad Bozinovic в работе Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [4], опубликовал результаты, свидетельствующие о увеличении пропускной способности в оптическом волокне. В эксперименте было использовано четыре канала на одной длине волны с состояниями $|S, \ell\rangle$, где $S = \pm 1$ указывает на право- или лево- циркулярную поляризацию, $\ell = 0, \pm 1$ - ТЗ. Показана возможность передачи данных со скоростью 400 Гб/с и 1,6 Тб/с при использовании двух вихревых состояний на 10 длинах волн, в специально разработанном оптическом волокне на расстояние 1,1 км. Данный тип волокна создан

с минимальным межмодовым взаимодействием, для эффективной передачи и разделения уплотненного сигнала по всем параметрам на выходе из волокна. Однако, стоимость данного волокна в десятки раз больше существующих, что является экономически не выгодным.

Предложенный в настоящей работе подход эффективен для стандартных линий связи [5], благодаря увеличению волноводного параметра волокна с одномодового режим ($V < 2,4$) до мало- ($2,4 < V < 12$) или много- модового ($V > 12$) режима, для существования и распространения оптического вихря по волокну [6,7]. Также, помимо вихревых мод, в данном волокне существуют невихревые моды и фундаментальная мода, которые относятся к шуму. Поэтому, перед нами была поставлена следующая цель: найти условия, при которых оптический вихрь в ходе распространения по стандартному волокну сохранял исходное состояние поляризации и величину ТЗ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Объектом исследования явилось навитое на цилиндр маломодовое оптическое волокно, которое характеризуется радиусом R , шагом H и числом витков n . Ввиду присутствия спиральных изгибов, волокно на практике имеет один недостаток – это наличие радиальных потерь мощности, которые в данной задаче отвечают за высвечивание невихревых мод и смещение к периферии волокна фундаментальной моды, формируя на выходе из волокна оптический вихрь.

Экспериментальные исследования проводились на установке представленной, на рис. 1.

Свет от источника L_s проходя через делительный куб $Bs1$ образует неравноплечный интерферометр Маха-Цендера. В предметном плече при помощи поляризатора $P1$ и четверть волновой пластины $\lambda/4$ формируем право циркулярную поляризацию с $S = +1$. Далее, Гауссов пучок проходя через оптический клин C так, что часть пучка проходит по клину, а вторая часть по свободному пространству, дифрагируя, образует цепочку, состоящую из ОВ [8]. Изменяя угол наклона клина относительно распространения лазерного излучения в перетяжке пучка, выделяем единичный ОВ с ТЗ $\ell = +1$.

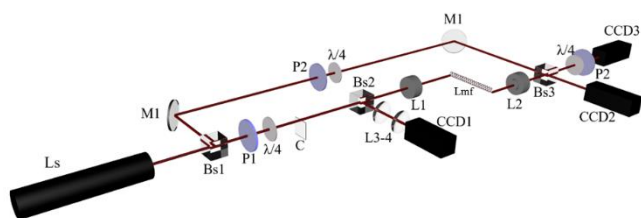


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: (*Ls*) He – Ne лазера, (*Bs*) делительный кубик, ($\lambda/4$) четверть волновая пластина, (*P*) поляризатор, (*C*) оптический клин, (*M*) зеркало, (*L*) микрообъектив, (*CCD*) камера, (*Lmf*) маломодовое оптическое волокно

После чего ОВ при помощи микрообъектива *L1* проецируется на входной торец маломодового оптического волокна. Микроскопом бокового вида, состоящий из системы линз *L3 – L4*, производилось центрирование системы пучок-волокно и контролировалась перетяжка пучка.

В эксперименте использовалось изотропное оптическое волокно, имеющее градиентный показатель преломления с круглой сердцевиной. Длина использованного волокна составила 10,8 м, где один метр навивался на цилиндр с радиусом $r = 2$ мм, число витков $n = 1 - 25$ и шагом $H = 1,5$ мм. Показатель преломления цилиндра был приближенно равен показателю преломлению волокна, что позволяло пренебречь механическими напряжениями на границе волокно-цилиндр при тепловом расширении.

Поле волокна при помощи микрообъектива *L2*, переотражаясь от делительного кубика *Bs2*, проецировалось на матрицу камеры *CCD2*.

Для анализа тонкой структуры, поле излучения пропускали через четверть волновую пластину и поляризатор, под углами: (0;0), (0;45), (0;90), (0;135), (45;135) и (45;45) [9] соответственно. И при помощи дифференциального поляриметра производили построение векторного поля волокна.

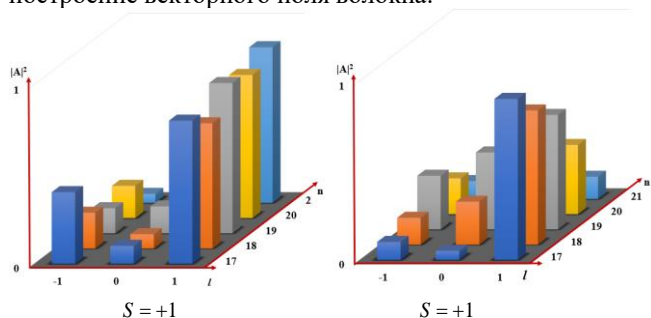


Рис. 2. Диаграмма вихревого спектра навитого волокна в ортогональных компонентах поляризации, от числа витков

Для полного анализа измерялся вихревой спектр поля волокна в каждой из компонент используя методику,

предложенную профессором Воляром А.В. [10]. Для удобства проведения эксперимента, волокно разматывалось с 21 до 1 витка. Исходя из рис. 2, при числе витков $n = 21$, вся энергия сосредоточена в правой компоненте поляризации $S = 1$ и ТЗ $\ell = 1$, формируя исходное поле.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При распространении циркулярно поляризованного оптического вихря $|S, \ell\rangle$ по навитому волокну на цилиндр с экспериментально подобранными параметрами радиуса $r = 2$ мм, шага $H = 1,5$ мм и числа витков $n = 21$, в нем создается наведенная анизотропия. Данное явление способствует высвечиванию невихревых мод, а фундаментальную моду смещает к периферии волокна, при этом вся энергия перекачивается в исходное состояние $|S, \ell\rangle$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45(11). – P. 8185-8189. DOI: 10.1103/PhysRevA.45.8185.
- [2] Shostka, N. Generation of the trapping light structures based on vector fields / N. Shostka, O. Karakchieva, B. Sokolenko // *Journal of Physics Conference Series*. – 2018. – Vol. 1128(5). – P. 051061. DOI: 10.1088/1742-6596/1124/5/051061.
- [3] Wang, Z. High-volume optical vortex multiplexing and demultiplexing for free-space optical communication / Z. Wang, N. Zhang, X.-C. Yuan // *Optical Express*. – 2011. – Vol. 19(2). – P. 482-492. DOI: 10.1364/OE.19.000482.
- [4] Bozinovic, N. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran // *Science*. – 2013. – Vol. 340(6140). – P. 1545-1548. DOI: 10.1126/science.1237861.
- [5] Halilov, S. Multiplexing and demultiplexing of the complex signal in the singular beams propagating in a few-mode optical fibers: an experiment / S. Halilov, A. Piyasova, A. Rubass, A. Pogrebnaya // *Journal of Physics Conference Series*. – 2016. – Vol. 737(1). – P. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/737/1/012003.
- [6] Ibragimov, A. Modeling of self-consistent modes in optical fibers with $V=3,8$ / A. Ibragimov, A. Rubass, S. Halilov, B. Sokolenko, Ya. Akimova, M. Bretsko // *Journal of Physics Conference Series*. – 2018. – Vol. 1062(1). – P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1062/1/012002.
- [7] Snyder, A.W. *Optical waveguide theory* / A.W. Snyder, J.D. Love. – London and New York: Chapman and Hall, 1985. – 11 p.
- [8] Izdebskaya, Ya.V. Optical vortex generation by optical wedge / Ya.V. Izdebskaya, V.G. Shvedov, D. Kurabtzev, A.N. Alexeyev, A.V. Volyar // *Proceedings of SPIE*. – 2002. – Vol. 4607. – P. 78-82. DOI: 10.1117/12.455173.
- [9] Born, M. *Principles of optics* / M. Born, E. Wolf. – Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt, 1968. – 510 p.
- [10] Volyar, A. Measurement of the vortex spectrum in a vortex-beam array without cuts and gluing of the wavefront / A. Volyar, M. Bretsko, Ya. Akimova, Yu. Egorov // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43(22). – P. 5635-5638. DOI: 10.1364/OL43.005635.