

Волоконная вихревая акусто-оптика

Д.В. Викулин

Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
vikulindmitriy@mail.ru

Е.В. Баршак

Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
lena.barshak@gmail.com

Б.П. Лапин

Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
lapinboris@gmail.com

А.А. Енина

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

К.Н. Алексеев

Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
c.alexeyev@yandex.ua

М.А. Яворский

Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
maxyavorsky@yahoo.com

Аннотация—В данной работе исследовано распространение света в циркулярных волокнах с возбужденной циркулярно-поляризованной акустической волной высшего порядка, переносящей полный угловой момент ± 2 на фонон. Получены аналитические выражения для резонансных мод и спектра постоянных распространения. Продемонстрирована эффективная генерация оптических вихрей высших порядков непосредственно из фундаментальной моды.

Ключевые слова— оптические вихри, орбитальный угловой момент, акусто-оптическое взаимодействие.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно [1-3], что индуцируемое бегущей в оптическом волокне фундаментальной изгибной акустической волной акусто-оптическое взаимодействие (АОВ) может быть использовано для эффективного динамического управления и генерирования пучков с геликоидальным волновым фронтом – оптических вихрей (ОВ) [4]. Благодаря ряду свойств, в частности наличию орбитального углового момента (ОУМ), данные пучки находят широкое практические применения в различных областях, особенно в области информационных технологий [5-6]. Понятно, что для полноценного практического применения топологически заряженных пучков необходимы устройства, способные как эффективно их возбуждать, так и осуществлять управление параметрами. Для генерации ОВ были созданы различные устройства, такие как q-пластинки, фазовые диаграммы или дифракционные решетки [4]. Однако подобные устройства существенно ограничены в способности управления вихревыми пучками. Поэтому представляется актуальным исследование новых способов эффективной генерации пучков ОВ и динамического управления их параметрами посредством акустических волн высших порядков. Таким образом, в данной работе изучено влияние изгибной акустической волны, переносящей полный угловой момент ± 2 на фонон, на распространение света в циркулярном слабнонаправляющем волокне.

2. АКУСТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ОВ

В данной работе изучено распространение монохроматического оптического излучения в циркулярном волокне с возбужденной циркулярно-поляризованной акустической волной высшего порядка, переносящей полный угловой момент ± 2 .

Диэлектрическая проницаемость такой системы может быть записана в виде:

$$\varepsilon(r, \varphi, z, t) = \varepsilon_0(r) + \delta\varepsilon_g(r, \varphi, z, t), \quad (1)$$

где первое слагаемое – диэлектрическая проницаемость невозмущенного циркулярного волокна, второе описывает индуцируемый бегущей акустической волной эффект смещения физических точек волокна.

Реализуемые на практике приближения позволяют рассматривать АОВ как возмущение, что позволяет применить развитую ранее резонансную теорию возмущений [5] для решения волнового уравнения с «акусто-оптической» диэлектрической проницаемостью (1) в скалярном приближении и аналитически определить структуру оптических резонансных мод и спектра постоянных распространения.

Резонансные моды системы представлены взвешенной суперпозицией циркулярно-поляризованной фундаментальной моды и идентично-поляризованного ОВ. Отметим, что частоты парциальных полей оказываются сдвинутыми на частоту акустической волны, моды вырождены по направлению циркулярной поляризации.

Полученная структура резонансных мод позволяет аналитически решить практически важную задачу о распространении фундаментальной моды в акустически-возмущенном волокне. Действительно, пусть система настроена на резонанс, тогда возбуждаемая на входном торце волокна циркулярно-поляризованная фундаментальная мода на оптимальной при данных параметрах длине конверсии полностью трансформируется в ОВ высшего порядка:

$$|\sigma, 0\rangle e^{-i\omega t} \rightarrow |\sigma, -M_a\rangle e^{-i(\omega - \Omega)t}, \quad (2)$$

где ОВ $|\sigma, \ell\rangle = (1/\sqrt{2})(1, i\sigma)^T F_{|\ell|}(r) e^{i\ell\varphi}$, $\sigma = \pm 1$ задает состояние поляризации, $\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ - топологический заряд вихря, $F_{|\ell|}$ - известное радиальное распределение оптического поля, M_a - полный угловой момент акустической волны, ω и Ω - частота оптической и акустической волн соответственно. Это преобразование описывает новую акустически управляемую генерацию ОВ высшего порядка непосредственно из фундаментальной моды. Важно, что топологический заряд генерируемого ОВ с точностью до знака равен полному угловому моменту акустической волны.

Возможен обратный процесс. Так возбуждаемый на входном торце волокна ОВ с топологическим зарядом, равным с точностью до знака полному угловому моменту акустической волны, на оптимальной длине конверсии оказывается полностью преобразованным в фундаментальную моду на сдвинутой вверх частоте:

$$|\sigma, -M_a\rangle e^{-i\omega t} \rightarrow |\sigma, 0\rangle e^{-i(\omega+\Omega)t}. \quad (3)$$

Установленная модовая структура акустически-возмущенного волокна позволяет определить интеграл перекрытия между оптическими и акустической радиальными функциями и выполнить численный расчет параметров (оптимальная длина конверсии, эффективность и т.д.) оптической модовой конверсии при конкретных параметрах оптического волокна и бегущей изгибной акустической волны. Например, в циркулярном волокне с волоконным параметром $V = 9,41$, радиусом сердцевинки $r_0 = 5$ мкм, высотой профиля $\Delta = 0,008$, мощностью акустического вихря 100 мВт на длине волны гелий-неонового лазера 632,8 нм наименьшая длина оптической конверсии составляет 16 см. Полный угловой момент акустического вихря равен ± 2 , частота акустической волны $\nu = 23,2064$ МГц.

Изучено влияние параметров изгибной акустической волны на процесс модовой конверсии в зависимости от близости к резонансу и мощности акустической волны. Расчет показывает, что эффективность модового преобразования достигает 100 % при строгом выполнении условий резонанса, а отстройка от резонанса приводит к снижению эффективности преобразования пучка и уменьшению длины волокна, на которой достигается максимум энергии при данных параметрах. Увеличение мощности акустической волны приводит к уменьшению длины конверсии, что позволяет модулировать интенсивность генерируемого вихря посредством изменения акустической мощности при некоторой фиксированной длине оптического волокна. Произведен расчет эффективности генерации вихревого пучка в спектральной области. Показано, что процесс генерации вихря сохраняет эффективность генерации более 60% при сдвиге длины волны не более 2 нм относительно исходной, при которой выполняется условие резонанса.

Полученные результаты могут быть использованы для практической реализации полностью волоконных акусто-

оптических устройств нового поколения, позволяющих осуществлять динамическое управление пучками, переносящих ОУМ.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе изучено распространения оптических пучков в циркулярных волокнах с возбужденной циркулярно-поляризованной изгибной акустической волной высшего порядка. Получены аналитические выражение для резонансных мод и соответствующих постоянных распространения. Продемонстрирована эффективная устойчивая генерация ОВ с ТЗ ± 2 непосредственно из фундаментальной моды. Полученные результаты могут быть применены при создании акусто-оптических устройств ОУМ фотоники нового поколения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 20-12-00291.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yavorsky, M.A. Revised model of acousto-optic interaction in optical fibers endowed with a flexural wave / M.A. Yavorsky, D.V. Vikulin, E.V. Barshak, B.P. Lapin, C.N. Alexeyev // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44(3). – P. 598-601. DOI: 10.1364/OL.44.000598.
- [2] Zhang, W. High-order optical vortex generation in a few-mode fiber via cascaded acoustically driven vector mode conversion / W. Zhang, L. Huang, K. Wei, P. Li, B. Jiang, D. Mao, F. Gao, T. Mei, G. Zhang, J. Zhao // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41(21). – P. 5082-5085. DOI: 10.1364/OL.41.005082.
- [3] Yavorsky, M. Photon-phonon spin-orbit interaction in optical fibers / M. Yavorsky, D. Vikulin, C. Alexeyev, V. Belotelov // *Optica*. – 2021. – Vol. 8(5). – P. 638-641. DOI: 10.1364/OPTICA.416498.
- [4] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie // *Light: Science & Applications*. – 2019. – Vol. 8(1). – P. 1-29. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [5] Alexeyev, C.N. Perturbation theory approach for the wave equation in fibre acousto-optics / C.N. Alexeyev, E.V. Barshak, A.V. Volyar, M.A. Yavorsky // *Journal of Optics*. – 2010. – Vol. 12.(11). – P. 115708. DOI: 10.1088/2040-8978/12/11/115708.
- [6] Bozinovic, N. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovich, Y. Yue, Y. Ren, P. Kristensen, H. Huang // *Science*. – 2013. – Vol. 340(6140). – P. 1545-1548. DOI: 10.1126/science.1237861.
- [7] Willner, A.E. Optical communications using orbital angular momentum beams / A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7(1). – P. 66-106. DOI: 10.1364/AOP.7.000066.