

## Оптические вихри в резонаторах ввода-вывода

Б.П. Лапин<sup>1</sup>, С.С. Алиева<sup>1</sup>, М.А. Яворский<sup>1</sup>, К.Н. Алексеев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,  
 295007, Россия, Симферополь, пр-т Вернадского, д. 4

### Аннотация

В данной работе исследуется распространение оптических вихрей через резонатор ввода-вывода на основе многомодового волокна. В векторном приближении на основе формализма трансфер-матрицы изучается передача оптических вихрей через такую систему. Получены кривые пропускания оптических вихрей, и показано, что резонатор ввода-вывода может быть использован для маршрутизации оптических вихрей и инверсии топологического заряда оптических вихрей. Показано, что такую систему можно использовать для генерации вихревых частотных гребёнок. При исследовании времени групповой задержки установлено, что резонатор ввода-вывода может быть использован в линиях задержки для оптических вихрей. Кроме того, показано, что исследуемая система пригодна для управления орбитальным угловым моментом поля.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, резонатор ввода-вывода, оптический вихрь, орбитальный угловой момент.

**Цитирование:** Лапин, Б.П. Оптические вихри в резонаторах ввода-вывода / Б.П. Лапин, С.С. Алиева, М.А. Яворский, К.Н. Алексеев // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 3. – С. 378-382. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1561.

**Citation:** Lapin BP, Aliyeva SS, Yavorsky MA, Alexeyev CN. Optical vortices in add-drop filters. Computer Optics 2025; 49(3): 378-382. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1561.

### Введение

С момента первого упоминания волоконных резонаторов в литературе [1] данный класс волоконных систем занял особое место в современной оптике. Волоконные резонаторы используются при создании оптических сенсоров [2, 3], в качестве платформ для оптических фильтров [4, 5], для организации оптических вычислений [6], при создании оптических ловушек для микрочастиц [7]. Последние десятилетия отмечены ростом интереса к оптической связи, использующей кодирование информации в пучках орбитального углового момента (ОУМ) [8]. Несмотря на некоторые внутренние трудности фундаментального характера, связанные с проблемой преодоления спин-орбитального взаимодействия, была признана пригодность оптических волокон для передачи таких состояний с собственным ОУМ, известных как оптические вихри (ОВ) [9].

Несмотря на обширные исследования, посвящённые изучению различных аспектов распространения света в многочисленных типах волоконных резонаторов, до недавнего времени они касались только одномодовых волоконных резонаторов. Между тем использование структурированного света в многомодовых волокнах потенциально выгодно с точки зрения расширения возможностей по управлению световыми пучками. Недавно было показано, что резонаторы на многомодовых волокнах способны сверхэффективно управлять ОУМ и топологическим зарядом (ТЗ) выходящего оптического поля [10, 11], а также замедлять ОВ [12], что можно использовать при создании линий задержки для оптоволоконной связи на ОВ.

Рассмотренные в работах [10–12] системы обладают особенностью, которая ограничивает их использование при построении сложной разветвлённой оптической цепи, а именно единственностью входа и выхода. В связи с этим в настоящей работе мы ставим своей целью изучить в векторном приближении распространение ОВ в резонаторе ввода-вывода, построенном на многомодовых волокнах. В частности, мы исследуем характеристики передачи ОВ для таких систем и определяем возможность передавать ОВ по такому резонатору как без, так и с инверсией их ТЗ. Мы также изучаем время групповой задержки (ВГЗ) в такой системе и показываем, что такой элемент пригоден для реализации на его основе линий задержки для ОВ.

### 1. Формализм трансфер-матрицы и основные уравнения

Модель резонатора ввода-вывода показана на рис. 1а. В выделенных светло-серым цветом областях световые поля нижнего (L) и верхнего (U) параллельных участков многомодовых волокон эванесцентно перекрываются, что делает возможным туннелирование света из одного волокна в другое. Сердцевины волокон имеют показатель преломления  $n_{co}$ , а оболочки считаются бесконечными и имеют показатель преломления  $n_{cl} = n_{co} \sqrt{1 - 2\Delta}$ , где  $\Delta \ll 1$  – оптический контраст между сердцевиной и оболочкой. Радиус сердцевины равен  $r_0$ . Расстояние между центрами волокон, спаренных в отмеченной светло-серым цветом области, всюду полагается равным  $2,05r_0$ . Знание данных параметров позволяет определить все динамические характеристики системы, например,

постоянные распространения или величину связи между спаренными участками волокон.

Базовый волоконный разветвитель в этой схеме можно трактовать как некий четырехполосник (см. рис. 1б), преобразующий входящий сигнал в исходящий.

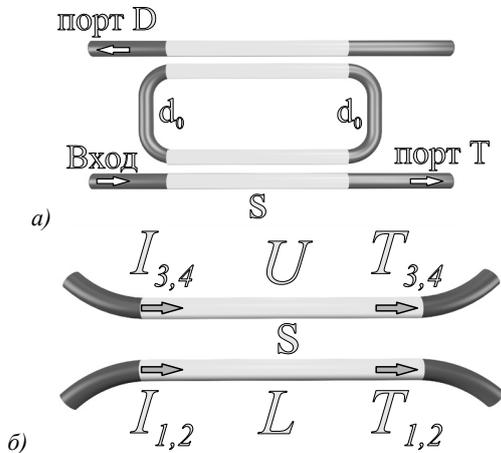


Рис. 1. (а) Модель резонатора ввода-вывода. Длина спаренных участков волокон равна  $s$ . Порты  $T$  и  $D$  обозначены выходящими стрелками. (б) Схема разветвителя, который служит базовым элементом резонатора ввода-вывода. Амплитуды входящих и выходящих полей для верхнего ( $U$ ) и нижнего ( $L$ ) волокон обозначены как  $I_i$  и  $T_i$ . Показатель преломления сердцевины оптического волокна полагается равным  $n_{co}$ , оптический контраст между сердцевиной и окружающей средой задаётся с помощью  $\Delta$ , радиус сердцевины равен  $g_0$

В целом, рассматриваемый разветвитель преобразует входящее поле

$$\Psi_{in} = I_1 |l, L\rangle + I_2 |-l, L\rangle + I_3 |l, U\rangle + I_4 |-l, U\rangle \quad (1)$$

в поле

$$\Psi_{out} = T_1 |l, L\rangle + T_2 |-l, L\rangle + T_3 |l, U\rangle + T_4 |-l, U\rangle, \quad (2)$$

где

$$|l, L / U\rangle = \exp(i l \phi_{L/U}) F_l(r_{L/U}),$$

$F_l$  – радиальная функция моды [13], а индексы  $L/U$  показывают, что полярные координаты ( $r, \phi$ ) связаны с нижним (верхним) волокном. Как показано в работе [10], коэффициенты  $I_i$  и  $T_i$ , представляющие разложение поля по ОВ  $|l, L / U\rangle$  с ТЗ  $l$ , связаны друг с другом посредством соотношения

$$\vec{T} = \exp(i\Phi) \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ b & a & d & c \\ c & d & a & b \\ d & c & b & a \end{pmatrix} \vec{I} \equiv \hat{T} \vec{I}, \quad (3)$$

где  $\vec{I} = \text{col}(I_1, I_2, I_3, I_4)$ ,  $\vec{T} = \text{col}(T_1, T_2, T_3, T_4)$ ,  $\Phi = s\tilde{\beta}_l$ ,  $s$  – длина разветвителя,  $\tilde{\beta}_l$  – скалярная постоянная распространения. В дальнейшем мы будем рассматривать только случай высших мод с  $l > 1$ . Тогда для

таких ОВ их поляризация не меняется при эволюции в разветвителе и в соединительных волокнах.

Матричные элементы в (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} a &= \cos \kappa_1 \cos \kappa_2, \quad b = -\sin \kappa_1 \sin \kappa_2, \\ c &= i \sin \kappa_1 \cos \kappa_2, \quad d = i \cos \kappa_1 \sin \kappa_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  описывают связь ОВ с одинаковыми и противоположными значениями ТЗ [10].

Как было показано в работе [14], в случае параксиального распространения поля  $|\Psi\rangle$  его мощность пропорциональна (но не в точности равна!)  $\langle \Psi | \Psi \rangle$ , где скалярное произведение подразумевает интегрирование по всему поперечному сечению пучка (волокна). При использовании нормировки  $\langle l | m \rangle = \delta_{lm}$ , в суперпозиции

$$\sum_i C_i |i\rangle$$

квадрат модуля комплексной амплитуды  $C_i$  может быть интерпретирован как величина, пропорциональная парциальной мощности ОВ  $|i\rangle$ . Тогда с точностью до мультипликативной константы мощности входящего и выходящего полей разветвителя определяются как

$$\sum_i |I_i|^2 = (\vec{I}, \vec{I})$$

и

$$\sum_i |T_i|^2 = (\vec{T}, \vec{T}),$$

где  $(\dots, \dots)$  означает скалярное произведение комплексных четырехкомпонентных векторов. Поскольку  $(\vec{T}, \vec{T}) = (\hat{T} \vec{I}, \hat{T} \vec{I}) = (\vec{I}, \hat{T}^\dagger \hat{T} \vec{I})$ , где « $\dagger$ » обозначает Эрмитово сопряжение, то для выполнения закона сохранения энергии для разветвителя

$$\sum_i |I_i|^2 = \sum_i |T_i|^2$$

надо требовать унитарность матрицы преобразования:  $\hat{T}^\dagger \hat{T} = 1$ . Используя явные выражения для элементов матрицы  $\hat{T}$ , можно доказать это свойство при произвольных значениях  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ .

Соответствие входных и выходных коэффициентов и концов разветвителя показано на рис. 1б. Поскольку в схеме резонатора присутствуют два разветвителя, имеем связь векторов (см. рис. 2):

$$\vec{T}^{(1)} = \hat{T} \vec{I}^{(1)}, \quad \vec{T}^{(2)} = \hat{T} \vec{I}^{(2)}. \quad (5)$$

Следует также учесть, что в соединительных волокнах длины  $d_0$  ОВ  $|l\rangle$  и  $|-l\rangle$  (здесь за ненадобностью опущены индексы  $L/U$ ) распространяются с разными фазовыми скоростями, так что их постоянные распространения  $\beta_\pm = \tilde{\beta}_l \pm \delta\beta$ , соответственно, где поправка  $\delta\beta$  определяется спин-орбитальным взаимодействием. Это позволяет получить ещё один набор уравнений, связывающий амплитуды ОВ:

$$I_1^{(2)} = T_3^{(1)} \exp(i\psi_+), I_2^{(2)} = T_4^{(1)} \exp(i\psi_-),$$

$$I_3^{(1)} = T_1^{(2)} \exp(i\psi_+), I_4^{(1)} = T_2^{(2)} \exp(i\psi_-), \quad (6)$$

где

$$\psi_{\pm} = \beta_{\pm} d_0.$$

Учитывая также, что в силу граничных условий  $I_{3,4}^{(2)} = 0$ , а величины  $I_{1,2}^{(1)}$  задаются входящим полем, уравнения (5), (6) позволяют определить трансмиссионные коэффициенты

$$D_{\pm} = |T_{3,4}^{(2)}|^2, T_{\pm} = |T_{1,2}^{(1)}|^2. \quad (7)$$

### 2. Распространение оптических вихрей

Описанный выше формализм позволяет определить коэффициенты прохождения ОБ при их распространении в резонаторах ввода-вывода. На рис. 3 показаны кривые передачи для ОБ. Видно, что режим работы резонатора сильно зависит от длины  $s$  участка связи. При небольших значениях  $s$  мощность входящего ОБ  $|l, L\rangle$  распределяется между входящим и вы-

ходящим портами, при этом конверсия исходного ОБ в ОБ с противоположным ТЗ почти отсутствует (рис. 3а, б). При увеличении длины  $s$  участка связи на порте  $T$  при некоторых значениях  $s$  можно наблюдать почти полную инверсию исходного ОБ, одновременно на порте  $D$  при этом формируется суперпозиция ОБ с противоположными ТЗ и равными мощностями (рис. 3в, г). Отметим выполнение закона сохранения энергии для всей системы. Численно проверено, что суммы мощностей ОБ на выходах системы равны единице (в единицах мощности входящего поля).

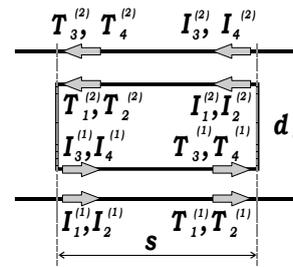


Рис. 2. Схема расстановки амплитуд ОБ в верхнем и нижнем разветвителях

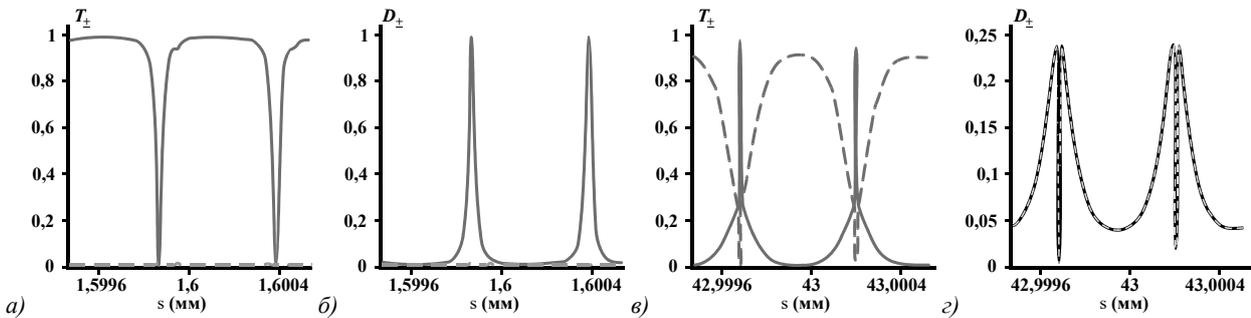


Рис. 3. Мощности выходящих ОБ (в единицах мощности входящего поля) с портов  $T$  (а, в) и  $D$  (б, г). Сплошная кривая отвечает ОБ с положительным ТЗ, а пунктирная – ОБ с отрицательным ТЗ. Параметры системы:  $n_{co} = 1,5$ ,  $\Delta = 9,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $r_0 = 10\lambda_T$ ,  $\lambda_T = 1550$  нм;  $d_0 = 2$  см, на вход подаётся ОБ с ТЗ  $l = 5$

Картина распределения мощностей ОБ при разных длинах  $s$  участка связи должна повторяться и в спектральном диапазоне. Действительно, при  $s = 1,7$  мм можно сформировать почти идеальные спектральные гребёнки на портах  $T$  и  $D$  для ОБ с положительным ТЗ  $l$  (рис. 4). Ширина пика на половине высоты для ОБ на порте  $D$  составляет 27 МГц, а расстояние между пиками – 302,5 МГц. Отметим перспективность такого применения исследуемого резонатора для генерации гребёнок оптических вихрей в связи с недавними результатами в этой области [15].

Резонаторы ввода-вывода, помимо генерации вихревых гребёнок, могут быть использованы также в качестве элементов линий задержки для оптических линий связи. Действительно, введём согласно [16] время групповой задержки (ВГЗ)  $t_d$

$$t_d = -\frac{d\Psi}{d\omega}, \quad (8)$$

где  $\Psi$  – фаза передаваемого поля,  $\omega$  – его частота. В тех случаях, когда выходное поле представляет собой

суперпозицию парциальных ОБ, следует рассчитывать ВГЗ для каждой составляющей по отдельности, что предполагает определение фаз  $\Psi_{\pm}$  для ОБ с ТЗ  $\pm l$ . Пунктирные кривые на рис. 5 показывают, что при некоторых значениях параметров системы ВГЗ для ОБ может достигать величин порядка 10 нс (рис. 5а). При этом следует отметить, что максимумы мощности ОБ на порте  $D$  совпадают с максимумами для ВГЗ. Величину ВГЗ можно контролировать с помощью подбора длины  $s$  (рис. 5б).

Необходимо также сказать о принципиальной возможности проведения эксперимента с резонатором ввода-вывода. Существующие на сегодняшний день модели многомодовых разветвителей, например, TM50R5F2B от «Торлабс» с диаметром 50 мкм и числовой апертурой 0,39, поддерживают распространение более 800 мод и работают в диапазоне от 400 нм до 2200 нм. Из двух подобных разветвителей можно собрать резонатор ввода-вывода, предварительно подобрав нужную модель по разделению мощности поля.

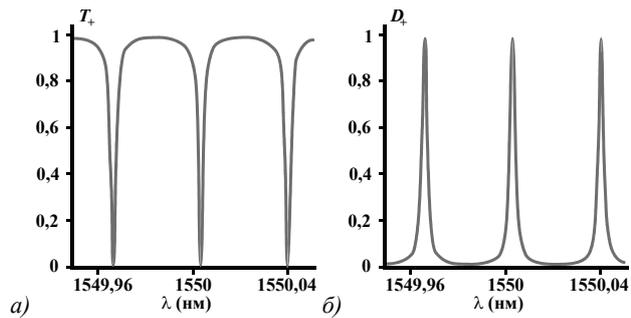


Рис. 4. Вихревые гребёнки, сформированные на портах  $T$  и  $D$  для ОВ с ТЗ  $l = 5$ . Мощности ОВ (в единицах мощности входящего поля) с отрицательным зарядом почти равны нулю, и кривые для них не приведены. Параметры системы и входящее поле те же, что и для рис. 3, за исключением  $s = 1,7$  мм

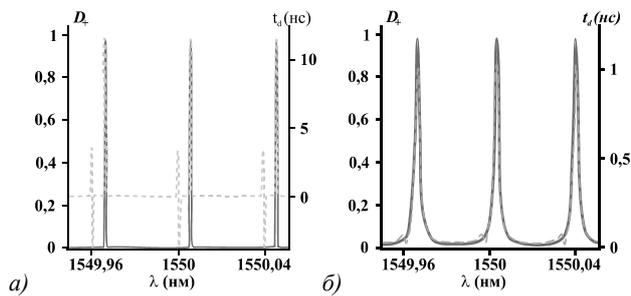


Рис. 5. Мощность ОВ (в единицах мощности входящего поля, левая ось, сплошная линия) и ВГЗ (правая ось, пунктирная линия) для ОВ с ТЗ  $l = 5$  на порте  $D$ . Параметры системы те же, что для рис. 3, за исключением  $s = 0,5$  мм (а) и  $s = 1,7$  мм (б). На вход подаётся ОВ ТЗ  $l = 5$

### 3. Управление ОУМ

Как и другие фотонные схемы на основе резонаторов, для управления ОУМ поля можно использовать фильтры ввода-вывода. В частности, этого можно добиться, изменяя длину связи  $s$  любого разветвителя в системе (верхнего или нижнего), что можно осуществить путём нагрева области связи [17]. Используя формализм, описанный в [11], можно рассчитать ОУМ прошедшего оптического поля. Для усреднённой по времени плотности ОУМ  $\langle L_z \rangle$ , интегрированной по поперечному сечению волокна, делённой на усреднённую по времени энергию  $\langle W \rangle$ , относящуюся к тому же сечению, имеем:

$$\omega \frac{\langle L_z \rangle}{\langle W \rangle} = \frac{\langle \Psi | -i\partial / \partial \varphi | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle} \equiv O, \quad (9)$$

кет-вектор  $|\Psi\rangle$  определяет электромагнитное поле в базе круговых поляризаций. Учитывая ортогональность ОВ, на выходящих портах имеем  $O = l(T_+ - T_-)$  и  $O = l(D_+ - D_-)$ . Из рис. 6а видно, что при малой длине  $s$  участка связи можно изменять ОУМ поля на портах  $T$  и  $D$  в пределах примерно от 0 до  $l$  за счёт изменения длины нижнего разветвителя. Подбором длины  $s$  можно расширить пределы изменения ОУМ  $O$  (рис. 6б) от  $-4,5$  до 5, однако при этом ОУМ поля на  $D$  порте будет принимать почти нулевые значения.

Кривые на рис. 6 остаются почти такими же, когда при тех же параметрах изменяется длина верхнего разветвителя, а нижнего, напротив, остаётся неизменной. Разница значений для ОУМ при одинаковых длинах разветвителей колеблется в пределах 0,006 (в единицах ОУМ для ОВ с ТЗ  $l$ ).

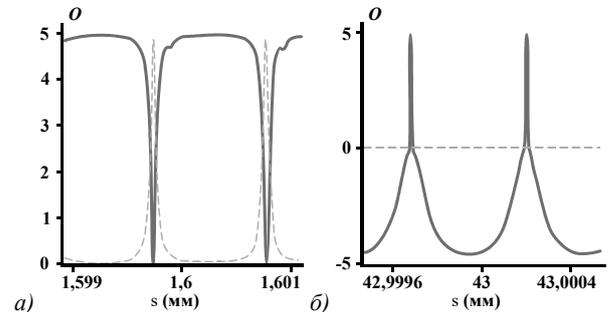


Рис. 6. Управление ОУМ (в единицах ОУМ для ОВ с ТЗ  $l$ ) выходящего поля на портах  $T$  (сплошная линия) и  $D$  (пунктирная линия) за счёт изменения длины  $s$  нижнего разветвителя при неизменной длине верхнего разветвителя. Параметры системы и входящее поле те же, что и для рис. 3, длина верхнего разветвителя – 1,6 мм (а) и 43 мм (б)

### Заключение

В данной работе мы исследовали распространение оптических вихрей через резонатор ввода-вывода на основе многомодового волокна. В векторном приближении с использованием формализма трансфер-матрицы исследована передача ОВ через такую систему. Получены кривые пропускания ОВ, и показано, что резонатор ввода-вывода может инвертировать топологические заряды входящих ОВ. Показано, что такая система может быть использована для генерации частотных гребёнок ОВ. Установлено, что резонатор ввода-вывода может быть использован в линиях задержки для структурированных мод. Кроме того, продемонстрирована возможность параметрического управления ОУМ выходящего поля в широких пределах.

### Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, Проект № 20-12-00291-П.

### References

- [1] Stokes LF, Chodorow M, Shaw HJ. All-single-mode fiber resonator. Opt Lett 1982; 7(6): 288-230. DOI: 10.1364/OL.7.000288.
- [2] Shi B, Chen X, Cai Y, Kang Q, Wang Y. Photonic crystal concentric dual-microring resonator for refractive index sensing. J Opt Soc Am B 2023; 40(9): 2462-2469. DOI: 10.1364/JOSAB.496822.
- [3] Ding Z, Sun J, Li C, Shi Y. Broadband ultrasound detection using silicon micro-ring resonators. J Lightw Technol 2023; 41(6): 1906-1910. DOI: 10.1109/JLT.2022.3227064.
- [4] Li X, Lu L, Chen J, Zhou L. Power-efficient polarization-insensitive tunable microring filter on a multi-layer Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-on-SOI platform. Opt Lett 2023; 48(18): 4861-4864. DOI: 10.1364/OL.498636.

- [5] Ren L, Yuan S, Zhu S, Shi L, Zhang X. Tunable kilohertz microwave photonic bandpass filter based on backscattering in a microresonator. *Opt Lett* 2022; 47(17): 4572-4575. DOI: 10.1364/OL.468442.
- [6] Bazzanella D, Biasi S, Mancinelli M, Pavesi L. A microring as a reservoir computing node: Memory/nonlinear tasks and effect of input non-ideality. *J Lightw Technol* 2022; 40(17): 5917-5926. DOI: 10.1109/JLT.2022.3183694.
- [7] Chang T-H, Fields BM, Kim ME, Hung C-L. Microring resonators on a suspended membrane circuit for atom-light interactions. *Optica* 2019; 6(9): 1203-1210. DOI: 10.1364/OPTICA.6.001203.
- [8] Shen Y, Wang X, Xie Z, Min C, Fu X, Liu Q, Gong M, Yuan X. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities. *Light Sci Appl* 2019; 8: 90. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [9] Wang J. Advances in communications using optical vortices. *Photonics Res* 2016; 4(5): B14-B28. DOI: 10.1364/PRJ.4.000B14.
- [10] Alexeyev CN, Barshak EV, Lapin BP, Yavorsky MA. Transmission of optical vortices through fiber loop resonators. *Opt Lett* 2019; 44(16): 4044-4047. DOI: 10.1364/OL.44.004044.
- [11] Alexeyev CN, Barshak EV, Lapin BP, Yavorsky MA. Topological resonances, superefficient orbital-angular-momentum control, and spin-orbit-interaction enhancement in fiber-loop resonators. *Phys Rev A* 2020; 101(): 063801. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.063801.
- [12] Alexeyev CN, Alieva SS, Barshak EV, Lapin BP, Yavorsky MA. Slow optical vortices in multicoil fiber resonators. *J Opt Soc Am B* 2022; 39(8): 2289-2294. DOI: 10.1364/JOSAB.461036.
- [13] Snyder AW, Love JD. *Optical waveguide theory*. London, New York: Chapman and Hall; 1983.
- [14] Berry MV. Paraxial beams of spinning light. *Proc SPIE* 1998; 3487: 6-11. DOI: 10.1117/12.317704.
- [15] Chen B, Zhou Y, Liu Y, Ye C, Cao Q, Huang P, Kim C, Zheng Y, Oxenløwe LK, Yvind K, Li J, Li J, Zhang Y, Dong C, Fu S, Zhan Q, Wang X, Pu M, Liu J. Integrated optical vortex microcomb. *Nature Photon* 2024; 18(6): 625-631. DOI: 10.1038/s41566-024-01415-0.
- [16] Schwelb O. Transmission, group delay, and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters—a tutorial overview. *J Lightw Technol* 2004; 22(5): 1380-1394. DOI: 10.1109/JLT.2004.827666.
- [17] Wang Y, Wu Q, Wang H, Liu J, Zheng Z, Zhang M, Zhang H. Thermally tunable microfiber knot resonator with flexible graphene heater. *Chin Opt Lett* 2021; 19(5): 051301. DOI: 10.1364/COL.19.051301.

### Сведения об авторах

**Лалин Борис Петрович**, 1986 года рождения, кандидат физико-математических наук, доцент; в 2009 году окончил Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского по специальности «Физика», работает в должности доцента на кафедре общей физики в Физико-техническом институте Крымского федерального университета. Область научных интересов: волоконная сингулярная оптика. E-mail: [lapinboris@gmail.com](mailto:lapinboris@gmail.com)

**Алиева Селиме Сейрановна**, 1997 года рождения, в 2020 году окончила Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского по специальности «Физика», является младшим научным сотрудником Лаборатории функциональных материалов для квантовых устройств Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: сингулярная оптика, оптические вихри, оптические волокна. E-mail: [selime\\_alieva@bk.ru](mailto:selime_alieva@bk.ru)

**Яворский Максим Александрович**, 1982 года рождения, в 2004 году окончил Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского по специальности «Физика», доктор физико-математических наук, профессор. Работает зам. директора по научной работе Физико-технического института КФУ им. В.И. Вернадского. Область научных интересов: волоконная оптика, акустооптика, сингулярная оптика. E-mail: [maxyavorsky@yahoo.com](mailto:maxyavorsky@yahoo.com)

**Алексеев Константин Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, 1960 года рождения; в 1982 году окончил Симферопольский государственный университет по специальности «Физика», работает профессором на кафедре теоретической физики в Физико-техническом институте Крымского федерального университета. Область научных интересов: волоконная сингулярная оптика. E-mail: [c.alexeyev@yandex.ru](mailto:c.alexeyev@yandex.ru)

ГРНТИ: 29.31.27 – Взаимодействие оптического излучения с веществом  
Поступила в редакцию 01 мая 2024 г. Окончательный вариант – 05 июля 2024 г.

---

# Optical vortices in add-drop filters

*B.P. Lapin<sup>1</sup>, S.S. Aliyeva<sup>1</sup>, M.A. Yavorsky<sup>1</sup>, C.N. Alexeyev<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Prospekt Vernadskogo 4, Simferopol, 295000, Russia*

## *Abstract*

In this paper, we study the propagation of optical vortices (OVs) through an add-drop filter based on a multimode fiber. Using vector approximation and the transfer matrix formalism, we study the transmission of OVs through such a system. We obtain transmission curves for OVs and show that the add-drop filter can invert topological charges of incoming vortices. We suggest that such a system may be used for generating OV frequency combs. We also study a group delay time and argue that such a photonic-circuit element may be used in time delay lines for structured modes. In addition, we study orbital angular momentum transformation by such a system.

*Keywords:* optical fiber, add-drop filter, optical vortex, orbital angular momentum

*Citation:* Lapin BP, Aliyeva SS, Yavorsky MA, Alexeyev CN. Optical vortices in add-drop filters. *Computer Optics* 2025; 49(3): 378-382. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1561.

*Acknowledgements:* This work was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 20-12-00291-II).

---

## *Author's information*

**Boris Petrovich Lapin** (born in 1986), candidate of physical and mathematical sciences; graduated from V.I. Vernadsky Taurida National University (specialty "Physics") in 2009, currently an associate professor at the Physical-Technical Institute of the Crimean Federal University. Research interests: singular fiber optics. E-mail: [lapinboris@gmail.com](mailto:lapinboris@gmail.com)

**Selime Seyranovna Aliyeva** (b. 1997), graduated from the V.I. Vernadsky Crimean Federal University in 2020 with a degree in Physics. Currently she is a junior researcher at the Laboratory of Functional Materials for Quantum Devices at the Physics and Technology Institute of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Research interests are singular optics, optical vortices, optical fibers. E-mail: [selime\\_alieva@bk.ru](mailto:selime_alieva@bk.ru)

**Constantine Nikolayevich Alexeyev**, (b. 1960) doctor of physical and mathematical sciences, professor, graduated from Simferopol State University in 1982 with a degree in Physics, currently a professor at the Theoretical Physics Chair at the Physical-Technical Institute of the Crimean Federal University. Research interests: singular fiber optics. E-mail: [c.alexeyev@yandex.ru](mailto:c.alexeyev@yandex.ru)

**Maxim Alexandrovich Yavorsky** (b. 1982) doctor of physical and mathematical sciences, professor, graduated from V.I. Vernadsky Taurida National University in 2004, majoring in Physics, PhD (2008). Currently he works as the vice director in science at the Physical-Technical Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Research interests are fiber optics, acousto-optics, singular optics. E-mail: [maxyavorsky@yahoo.com](mailto:maxyavorsky@yahoo.com)

---

*Received May 01, 2024. The final version – July 05 2024.*

---