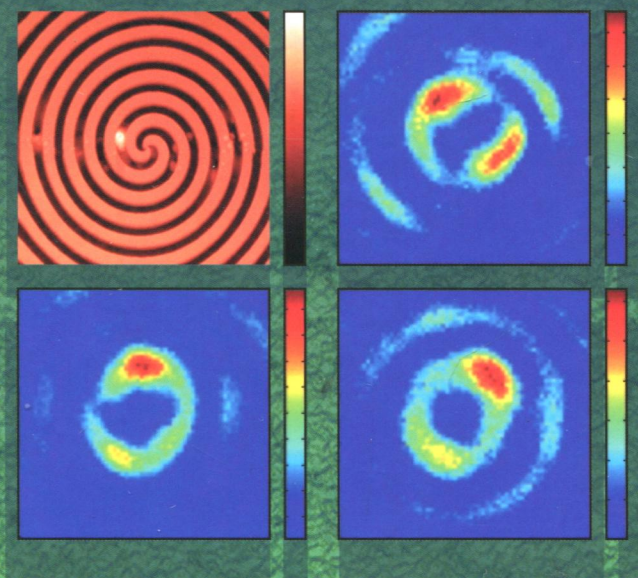


В. В. КОТЛЯР  
А. А. КОВАЛЕВ  
С. Н. ХОНИНА



**ВРАЩАЮЩИЕСЯ  
ВИХРЕВЫЕ  
ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ**

к 73

В. В. КОТЛЯР  
А. А. КОВАЛЕВ  
С. Н. ХОНИНА

**ВРАЩАЮЩИЕСЯ  
ВИХРЕВЫЕ  
ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ**

УДК 535.42  
ББК 22.243.4  
В 81



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 21-17-00004, не подлежит продаже

Котляр В.В., Ковалев А.А., Хонина С.Н. **Вращающиеся вихревые лазерные пучки.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. — 240 с. — ISBN 978-5-9221-1915-3.

В монографии рассмотрены лазерные световые пучки, у которых при распространении в свободном пространстве поперечное распределение интенсивности вращается вокруг оптической оси. Причины, приводящие к вращению поперечной интенсивности пучка в пространстве, могут быть разные. Все эти различные виды вращающихся пучков подробно рассматриваются в книге.

Вращающиеся лазерные пучки применяются в микроскопии для получения сверхразрешения по продольной координате и при измерении локализации и ориентации отдельных молекул, при зондировании атмосферы и в беспроводных системах связи, в передаче информации под водой, а также в датчиках магнитного поля.

Книга будет полезной для широкого круга специалистов в области фотоники, студентов старших курсов, бакалавров и магистров, обучающихся по специальностям «Оптика», «Прикладная математика и физика», «Прикладная математика и информатика», и аспирантов, специализирующихся в этих областях.

ISBN 978-5-9221-1915-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2021

© В.В. Котляр, А.А. Ковалев,  
С.Н. Хонина, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	6
Глава 1. <b>Инвариантные пучки и пучки с продольной периодичностью</b> . . . . .	9
1.1. Инвариантные лазерные пучки (эксперимент) . . . . .	9
1.1.1. Самовоспроизведение как инвариантность к действию различных операторов . . . . .	10
1.1.2. Бездифракционные пучки Бесселя . . . . .	11
1.1.3. Гауссовы пучки . . . . .	16
1.1.4. Формирование самовоспроизводящихся лазерных пучков в дифракционных порядках . . . . .	19
1.1.5. Обнаружение угловых гармоник . . . . .	22
1.2. Чистые оптические вихри . . . . .	26
1.2.1. Чистые вихри — инвариантные пучки с минимальной расходимостью . . . . .	27
1.2.2. Гипергеометрические моды . . . . .	31
1.2.3. Свойства чистых вихрей . . . . .	33
1.2.4. Результаты численного моделирования . . . . .	34
1.3. Гипергеометрические моды (эксперимент) . . . . .	37
1.3.1. Теоретические основы . . . . .	38
1.3.2. Численное моделирование . . . . .	40
1.3.3. Эксперимент . . . . .	43
Глава 2. <b>Многомодовые вращающиеся пучки</b> . . . . .	48
2.1. Пучки с продольной периодичностью . . . . .	48
2.1.1. Теоретические основания . . . . .	49
2.1.2. Алгоритмы расчета ДОЭ . . . . .	51
2.1.3. Результаты моделирования . . . . .	53
2.2. Вращение многомодовых пучков Бесселя . . . . .	57
2.2.1. Расчет фазового ДОЭ для формирования вращающегося пучка . . . . .	58
2.2.2. Градиентный алгоритм расчета фазового ДОЭ . . . . .	60
2.2.3. Вращение многомодового пучка в волокне . . . . .	61
2.2.4. Численный расчет . . . . .	62
2.3. Вращающиеся пучки без орбитального углового момента . . . . .	67
2.4. Эллиптический пучок Лагерра–Гаусса . . . . .	73
2.4.1. Преобразование Френеля от моды Лагерра–Гаусса . . . . .	75
2.4.2. Наклонный параксиальный световой пучок Лагерра–Гаусса . . . . .	77

2.4.3. Эллиптический параксиальный пучок Лагерра–Гаусса . . . . .	80
2.4.4. Результаты численного моделирования . . . . .	88
2.4.5. Эксперимент . . . . .	91
<b>Глава 3. Вращение вихревых пучков в ближней зоне.</b> . . . . .	<b>96</b>
3.1. Вращение пучка при дифракции на спиральной фазовой пластинке . . . . .	96
3.1.1. Ход лучей после спиральной фазовой пластинки . . . . .	97
3.1.2. Скалярная теория дифракции на рельефе СФП . . . . .	100
3.1.3. Строгое моделирование с помощью уравнений Максвелла . . . . .	103
3.1.4. Эксперимент . . . . .	104
3.2. Вращение двухлепесткового оптического вихря в ближнем поле вихревого микроаксикона . . . . .	106
3.2.1. Теоретические основания . . . . .	108
3.2.2. Моделирование . . . . .	109
3.2.3. Изготовление вихревого аксикона . . . . .	112
<b>Глава 4. Вращающиеся асимметричные лазерные пучки</b> . . . . .	<b>115</b>
4.1. Вращающийся асимметричный пучок Бесселя–Гаусса . . . . .	115
4.1.1. Линейная комбинация БГ-пучков . . . . .	116
4.1.2. Фурье-спектр аБГ-пучка . . . . .	124
4.1.3. Орбитальный угловой момент аБГ-пучка . . . . .	125
4.1.4. Взаимная неортогональность функций, описывающих семейство аБГ-пучков . . . . .	126
4.1.5. Эксперимент . . . . .	127
4.2. Асимметричные вращающиеся пучки Лагерра–Гаусса . . . . .	129
4.2.1. Пучки Лагерра–Гаусса с комплексным смещением . . . . .	131
4.2.2. Мощность смещенного пучка Лагерра–Гаусса . . . . .	133
4.2.3. Орбитальный угловой момент смещенного пучка Лагерра–Гаусса . . . . .	136
4.2.4. Параксиальные пучки Лагерра–Гаусса в форме вращающегося полумесяца . . . . .	140
4.2.5. Экспериментальное формирование асимметричного пучка Лагерра–Гаусса . . . . .	144
4.2.6. Вращающиеся суперпозиции асимметричных пучков Лагерра–Гаусса . . . . .	147
4.3. Асимметричные вращающиеся пучки Куммера . . . . .	150
4.3.1. Смещенные пучки Куммера . . . . .	150
4.3.2. Орбитальный угловой момент асимметричного пучка Куммера . . . . .	153
4.3.3. Численное моделирование . . . . .	155
<b>Глава 5. Эллиптические вращающиеся пучки</b> . . . . .	<b>157</b>
5.1. Гауссов пучок с внедренным эллиптическим вихрем . . . . .	157
5.1.1. Вычисление орбитального углового момента . . . . .	158
5.1.2. Вычисление комплексной амплитуды поля . . . . .	160
5.1.3. Эксперимент по формированию эллиптического гауссова вихря . . . . .	163

5.2. Дифракция эллиптического гауссова пучка на эллиптической спиральной фазовой пластинке . . . . .	171
5.2.1. Орбитальный угловой момент эллиптического пучка после прохождения через эллиптическую спиральную фазовую пластинку . . . . .	173
5.2.2. Численное моделирование . . . . .	177
5.2.3. Вывод формулы для нормированного ОУМ . . . . .	181
<b>Глава 6. Вращающиеся астигматические лазерные пучки . . . . .</b>	<b>184</b>
6.1. Безвихревой астигматический пучок . . . . .	184
6.1.1. Безвихревой пучок с орбитальный угловым моментом . . . . .	185
6.1.2. Орбитальный угловой момент астигматического пучка . . . . .	187
6.1.3. Моделирование . . . . .	191
6.1.4. Астигматический пучок после скрещенных цилиндрических линз и в ABCD-системе . . . . .	192
6.2. Вращающийся астигматический пучок Эрмита–Гаусса . . . . .	195
6.2.1. Безвихревой пучок с ОУМ . . . . .	197
6.2.2. Формирование эллиптического гауссова пучка . . . . .	200
6.2.3. Эллиптический пучок Эрмита–Гаусса после цилиндрической линзы . . . . .	202
6.2.4. Эксперимент . . . . .	204
6.3. Вращающийся эллиптический астигматический вихревой гауссов пучок . . . . .	209
6.3.1. Амплитуда пучка на двойном фокусном расстоянии от цилиндрической линзы . . . . .	210
6.3.2. Семейство астигматических эллиптических гауссовых вихрей . . . . .	213
6.3.3. Результаты моделирования . . . . .	215
6.3.4. Эксперимент . . . . .	217
Заключение . . . . .	221
Список литературы . . . . .	222