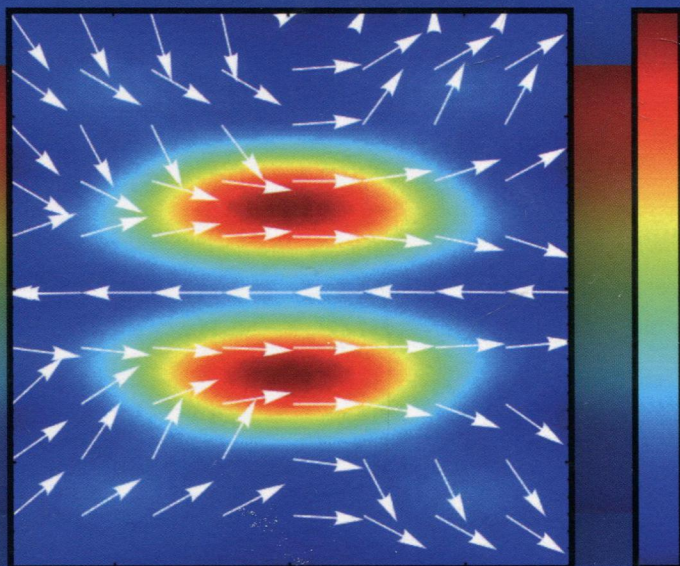


В. В. КОТЛЯР  
С. С. СТАФЕЕВ  
А. Г. НАЛИМОВ



# ОБРАТНЫЙ ПОТОК СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ В ФОКУСЕ

В. В. КОТЛЯР  
С. С. СТАФЕЕВ  
А. Г. НАЛИМОВ

# ОБРАТНЫЙ ПОТОК СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ В ФОКУСЕ



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2021

УДК 535.42  
ББК 22.243.4  
О 23

Котляр В.В., Стафеев С.С., Налимов А.Г. **Обратный поток световой энергии в фокусе.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. — 216 с. — ISBN 978-5-9221-1932-0.

Еще в 424 г. до н.э. в пьесе древнегреческого поэта Аристофана «Облака» упоминается о том, что с помощью фокусировки солнечного света можно добывать огонь. С тех пор и до наших дней исследование поведения света в фокусе вызывает интерес у оптиков. В фокусе сходится свет из разных областей пространства, который обладает разной амплитудой, фазой и состоянием поляризации. Чтобы адекватно описывать свет в фокусе, следует использовать все шесть проекций векторов напряженности электрического и магнитного полей. В 1959 г. Б. Ричардсом и Э. Вольфом была создана аналитическая теория строгого описания света вблизи острого фокуса, которая применяется до сих пор. Проверить ее правильность сегодня можно с помощью разностного решения системы уравнений Максвелла в рамках одного из многих коммерческих программных продуктов. Численный метод решения уравнений Максвелла (FDTD-метод) был разработан А. Тафловом и М.И. Бродвином в 1975 г. Один из интересных оптических эффектов, который имеет место в остром фокусе световых полей, — эффект обратного потока энергии, о котором впервые упоминает в 1920 г. В.С. Игнатовский. В данной книге эффект обратного потока энергии в фокусе лазерного света изучается теоретически на основе формализма Ричардса–Вольфа, численно на основе разностного решения уравнений Максвелла и экспериментально. Выясняется природа данного эффекта и условия, при которых он возникает.

Книга предназначена широкому кругу научных работников, инженеров, работающих в области оптики, фотоники, лазерной физики, оптоинформационных технологий, оптического приборостроения. Также может быть полезной бакалаврам и магистрам по специальностям «Прикладная математика и физика», «Прикладная математика и информатика», «Оптика» и аспирантам, специализирующимся в этих областях.

*Институт систем обработки изображений РАН —  
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева*

© ФИЗМАТЛИТ, 2021

© В. В. Котляр, С. С. Стафеев,  
А. Г. Налимов, 2021

ISBN 978-5-9221-1932-0

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	7
<b>Глава 1. Обратный поток для вихревых пучков и для пучков с цилиндрической поляризацией . . . . .</b>	<b>8</b>
1.1. Обратный поток в фокусе оптического вихря с круговой поляризацией . . . . .	8
1.1.1. Распределение интенсивности в плоскости фокуса оптического вихря . . . . .	9
1.1.2. Продольная проекция вектора Пойнтинга в фокусе оптического вихря . . . . .	10
1.1.3. Обратный поток энергии вблизи оптической оси в плоскости фокуса . . . . .	12
1.1.4. Поперечные составляющие вектора Пойнтинга в плоскости фокуса . . . . .	13
1.1.5. Моделирование FDTD-методом дифракции оптического вихря на зонной пластинке Френеля . . . . .	14
1.2. Обратный поток энергии в фокусе цилиндрического векторного пучка. . . . .	16
1.2.1. Теоретическое обоснование . . . . .	17
1.2.2. Моделирование по формулам Ричардса–Вольфа . . . . .	21
1.2.3. Моделирование с помощью FDTD-метода . . . . .	24
1.3. Острая фокусировка света с поляризационной и фазовой сингулярностью. . . . .	26
1.3.1. Световое поле с комбинированной сингулярностью в фокусе апланатической системы . . . . .	26
1.3.2. Частные случаи из общей формулы . . . . .	30
1.3.3. Моделирование острой фокусировки оптического вихря с радиальной и азимутальной поляризацией высокого порядка . . . . .	33
<b>Глава 2. Механизм формирования обратного потока энергии. . . . .</b>	<b>39</b>
2.1. Обратный поток при интерференции четырех плоских волн . . . . .	39
2.1.1. Интерференция четырех плоских волн с линейной поляризацией . . . . .	40
2.1.2. Формирование обратного потока на оптической оси в фокусе светового поля с поляризационной сингулярностью . . . . .	43

2.2. Орбитальный поток энергии и поток спина . . . . .	45
2.2.1. Поток спина и орбитальный поток энергии в декартовых координатах . . . . .	46
2.2.2. Проекция вектора напряженности электрического поля в остром фокусе . . . . .	47
2.2.3. Поток спина и орбитальный поток энергии в фокусе . . . . .	49
2.2.4. Моделирование по формулам Ричардса–Вольфа . . . . .	49
2.3. Тороидальные потоки поляризации вблизи фокуса . . . . .	53
2.3.1. Формулы Ричардса–Вольфа для случая узкой кольцевой апертуры . . . . .	55
2.3.2. Результаты моделирования фокусировки поляризационного вихря . . . . .	58
<b>Глава 3. Экспериментальное исследование обратного потока энергии . . . . .</b>	<b>64</b>
3.1. Металинза для формирования обратного потока . . . . .	64
3.1.1. Расчет рельефа поверхности спиральных металинз . . . . .	66
3.1.2. Моделирование работы спиральной металинзы с $m = 1$ . . . . .	71
3.1.3. Расчет проекции вектора Умова–Пойнтинга в фокусе спиральной металинзы . . . . .	74
3.1.4. Поток энергии в фокусе для спиральной металинзы с $m = 2$ . . . . .	77
3.2. Измерение обратного потока в фокусе металинзы . . . . .	79
3.2.1. Изготовление металинзы . . . . .	80
3.2.2. Моделирование методом конечных разностей во временной области (FDTD-метод) . . . . .	81
3.2.3. Измерение поперечной интенсивности в фокусе металинзы . . . . .	84
3.3. Измерение обратного потока энергии с помощью микрообъектива . . . . .	90
3.3.1. Эксперимент по обнаружению обратного потока в фокусе оптического вихря с круговой поляризацией . . . . .	91
3.3.2. Эксперимент по обнаружению обратного потока в фокусе поляризационного вихря второго порядка . . . . .	96
3.3.3. Силы, действующие на наночастицу в обратном потоке энергии . . . . .	99
<b>Глава 4. Обратный поток в ближней зоне и вблизи поверхности раздела сред . . . . .</b>	<b>102</b>
4.1. Обратный поток энергии в ближней зоне . . . . .	102
4.1.1. Интенсивность и продольная проекция вектора Пойнтинга . . . . .	104
4.1.2. Обратный поток энергии в начальной плоскости . . . . .	107
4.1.3. Поперечные проекции вектора Пойнтинга . . . . .	108
4.1.4. Моделирование . . . . .	110

4.2. Оптический эффект «углового трактора» . . . . .	113
4.2.1. Угловой трактор в параксиальном случае . . . . .	114
4.2.2. Угловой трактор в фокусе непараксиального оптического вихря . . . . .	116
4.2.3. Эксперимент по вращению микросфер полистирола в пучке Бесселя с круговой поляризацией . . . . .	119
4.3. Обратный поток вблизи выходной поверхности градиентной линзы . . . . .	121
4.3.1. Градиентная секансная линза . . . . .	122
4.3.2. Результаты моделирования фокусировки света градиентной секансной линзой . . . . .	123
4.3.3. Градиентная секансная линза с металлизацией . . . . .	125
4.3.4. Градиентная секансная линза с отверстием . . . . .	125
4.4. Сила, действующая на частицу вблизи обратного потока . . . . .	126
4.4.1. Постановка задачи . . . . .	128
4.4.2. Падающее поле — левая круговая поляризация и фазовый вихрь $m = 2$ . . . . .	129
4.4.3. Падающее поле — круговая поляризация без фазового вихря . . . . .	131
4.4.4. Влияние размера частицы на величину проекцию силы . . . . .	132
<b>Глава 5. Спин-орбитальная конверсия в фокусе . . . . .</b>	<b>134</b>
5.1. Обратный поток в фокусе для вихревого поля с линейной поляризацией . . . . .	134
5.1.1. Теоретическое основание . . . . .	135
5.1.2. Поток энергии в фокусе . . . . .	137
5.1.3. Спин-орбитальная связь в фокусе . . . . .	138
5.1.4. Моделирование . . . . .	139
5.2. Инверсия продольной составляющей спинового углового момента . . . . .	142
5.2.1. Спиновой угловой момент в фокусе гауссова пучка с круговой поляризацией . . . . .	145
5.2.2. Спиновой угловой момент в фокусе оптического вихря с топологическим зарядом 2 и круговой поляризацией . . . . .	147
5.2.3. Моделирование . . . . .	149
5.3. Круговая поляризация в фокусе при освещении светом с линейной поляризацией . . . . .	153
5.3.1. Поток энергии и спиновой угловой момент в фокусе . . . . .	154
5.3.2. Моделирование . . . . .	158
5.4. Орбитально-спиновая конверсия, «фотонный вертолет» и полная магнетизация . . . . .	162
5.4.1. Спин-орбитальная конверсия в фокусе . . . . .	162
5.4.2. Орбитально-спиновая конверсия в фокусе и лента Мебиуса . . . . .	168
5.4.3. Фотонные колеса или фотонный вертолет . . . . .	172
5.4.4. Только продольная компонента спина в фокусе (полная магнетизация) . . . . .	173

---

<b>Глава 6. Поток энергии в фокусе пучка с дробной и гибридной цилиндрической поляризацией</b> . . . . .	176
6.1. Обратный поток в фокусе пучка с цилиндрической поляризацией дробного порядка. . . . .	176
6.1.1. Фокусировка цилиндрических векторных пучков с порядком от нуля до единицы . . . . .	177
6.1.2. Фокусировка цилиндрических векторных пучков с порядком больше единицы . . . . .	181
6.2. Поперечный поток энергии в остром фокусе света с циркулярно-азимутальной поляризацией высокого порядка . . . . .	184
6.2.1. Интенсивность света с гибридной поляризацией в фокусе . . . . .	185
6.2.2. Поток энергии в фокусе для света с гибридной поляризацией . . . . .	188
6.2.3. Спиновый угловой момент в фокусе поля с гибридной поляризацией . . . . .	190
6.2.4. Результаты моделирования фокусировки света с гибридной поляризацией . . . . .	191
Заключение . . . . .	196
Литература . . . . .	198