

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФАЗЫ БЕРРИ И ОПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА МАГНУСА. I. ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

А.В.Воляр, Ю.Н.Мицай, В.И.Мягков, Т.А.Фадеева

Возрастание интереса к таким, на первый взгляд, разнокачественным явлениям, как топологическая фаза Берри [1] и оптический эффект Магнуса [2], обязано ряду причин. Первая из них — исследование глубинных механизмов деполаризующего действия многомодовых волокон [3], вторая — вскрытие физической природы шумов при передаче информации в системе волокно/кристалл [4]. Однако осевой проблемой является обобщенное рассмотрение этих процессов. В работе [2] уже высказывалось предположение, что топологическая фаза Берри и оптический эффект Магнуса являются проявлением единого процесса спин-орбитального взаимодействия в когерентном ансамбле фотонов.

В настоящей работе сделана попытка экспериментального и модельного рассмотрения единства выше указанных эффектов. Экспериментально исследовалось явление расщепления меридиональной плоскости распространения локальной волны в многомодовом волокне. На основе полученных результатов строилась модель взаимодействия топологической фазы Берри и оптического эффекта Магнуса.

1. Для исследования расщепления меридиональной плоскости распространения локальной волны использовалась экспериментальная установка, подробно рассмотренная в работе [5]. Смена состояния поляризации света на входе волокна с линейной — $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ на циркулярную — $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$ осуществлялась посредством подачи на электрооптический модулятор прямоугольного импульса. Исследовалось расщепление интерференционных максимумов, образующих лучевую каустику. В качестве опытного образца было выбрано существенно многомодовое прямое цилиндрическое ступенчатое волокно диаметром 500 мкм, длиной 10 см и числовой апертурой 0.25. Волокно возбуждалось в центр входного торца $20\times$ микрообъективом. Тогда вдоль него в основном распространяются локальные волны с меридиональными лучевыми траекториями [5]. Расщепление интерферен-

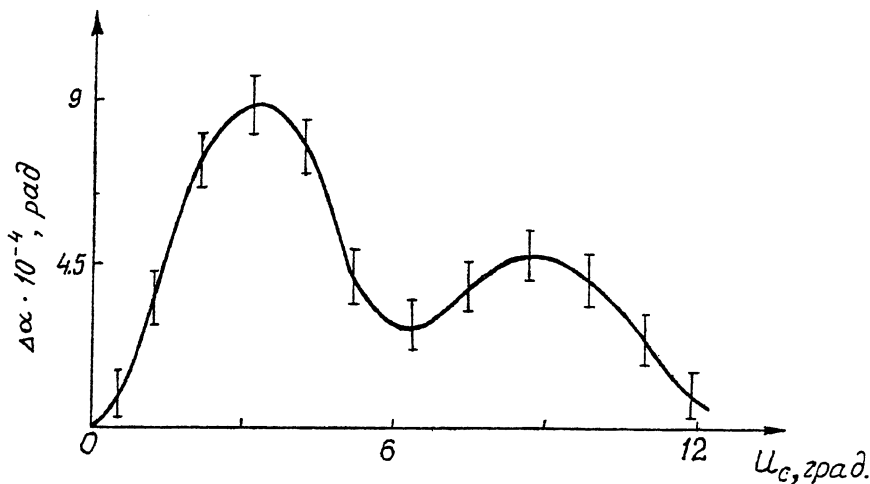


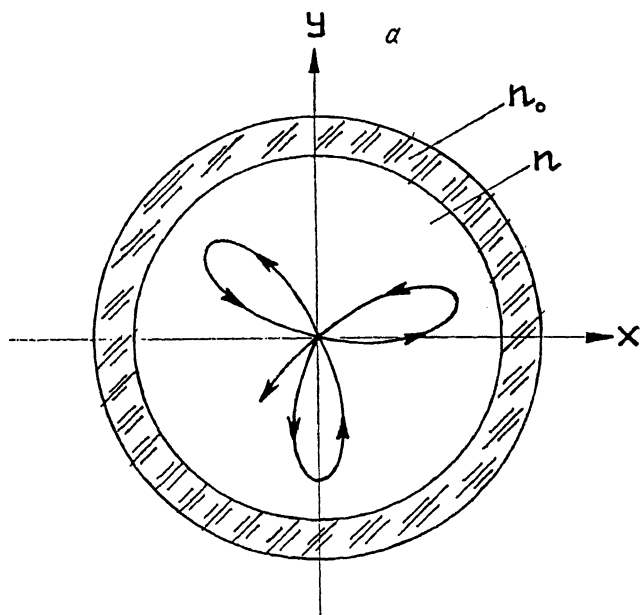
Рис. 1. Зависимость углового расщепления каустики локальной волны $\Delta\alpha$ от полярного угла u_c .

ционных максимумов наиболее ярко наблюдалось для тех лучевых каустик, азимутальная ориентация которых параллельна направлению линейной поляризации электрического вектора после модулятора. На рис. 1 приведена кривая зависимости относительной величины углового расщепления меридиональной плоскости лучевой траектории волны $\Delta\alpha$ от полярного угла u_c наклона траектории к оси волокна. Найдено, что угловое расщепление изменяется от 10^{-4} до 10^{-6} рад. На наш взгляд, такое расщепление каустики связано с особым типом двулучепреломления, в основе которого лежит, как оптический эффект Магнуса, так и топологическая фаза Берри, участвующие в процессе многолучевой поляризационной интерференции локальных волн.

2. Рассмотрим процесс возникновения этого двулучепреломления. Для простоты выберем градиентное волокно с распределением показателя преломления, приведенным на рис. 2, а. За счет оптического эффекта Магнуса простая синусоидальная траектория распространения локальной волны с произвольным состоянием поляризации распадается на две геодезические кривые на прямых геликоидах, которые имеют встречную циркуляцию

$$x = A \cos(at) \cos(bt), \quad y = A \cos(at) \sin(bt), \quad z = ct, \quad (1)$$

где A — амплитуда, $a = \pi c/l$ частота геодезической кривой, $b = \kappa c$, c — скорость распространения света вдоль оси z , $\kappa = \delta_{\perp}/R$ — удельное кручение траектории, l — полупериод траектории [6], R — радиус сердцевины волокна, δ_{\perp} — среднее линейное смещение [7].



$$n = \begin{cases} n_c(1 - \alpha r^2), & r \leq 1 \\ n_0, & r > 1 \end{cases}$$

Рис. 2. Фазовый портрет локальной волны в градиентном волокне. *a* — проекция траектории локальной волны на поперечное сечение волокна.

Пространственный характер геликоидальной кривой указывает на накопление топологической фазы Берри в процессе распространения локальной волны. В самом деле, проекции этих геодезических на поперечное сечение волокна имеет вид лепестковых кривых, вращающихся в противоположных направлениях (рис. 2, *a*). В пространстве импульсов характер траектории опишется прецессией эллиптической траектории:

$$\alpha = -\frac{1}{N} \left(a \sin(at) \cos(bt) + b \cos(at) \sin(bt) \right),$$

$$\beta = -\frac{1}{N} \left(a \sin(at) \sin(bt) - b \cos(at) \cos(bt) \right),$$

$$\gamma = -\frac{c}{NA}, \quad N^2 = a^2 \sin^2(at) + b^2 \cos^2(at) + \left(\frac{c}{A} \right)^2. \quad (2)$$

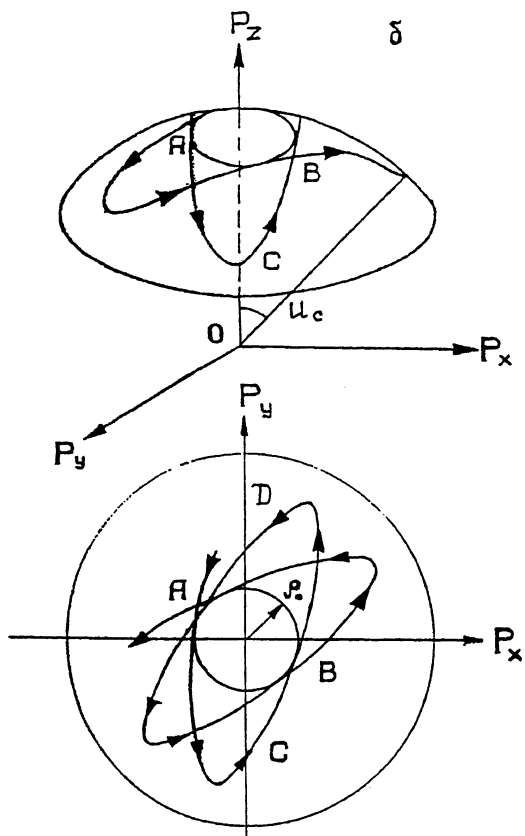


Рис. 2. (продолжение)

b — траектория волны в пространстве импульсов.

Экстремумы этой траектории на поверхности сферы единичного радиуса (рис. 2, *b*) равны

$$\rho_{\max} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + \left(\frac{c}{A}\right)^2}}, \quad \rho_{\min} \approx \frac{bA}{c}. \quad (3)$$

Оценочное значение топологической фазы Берри может быть найдено посредством определения площади, охватываемой кривой *ABCD*. Полная топологическая фаза опре-

делится как

$$\theta \approx \pi \rho_{\max} \rho_{\min} \frac{d}{l}, \quad (4)$$

где d — длина волокна.

Для нашего случая величина топологической фазы Берри оказалась равной $\theta \approx \frac{\pi}{2} 10^{-2}$ рад. Соответственно для второй геодезической, имеющей противоположную ориентацию, фаза Берри будет описываться тем же выражением (4), но с противоположным знаком. Топологическая фаза проявляется как дополнительный экспоненциальный множитель в выражении для электрического поля: $\exp i(\omega t - krn \pm \theta)$. Величину θ можно представить как $\theta = kr\delta n$, где δn — корректировочная поправка к показателю преломления n . Величина этой поправки оказывается равной для нашего случая $\delta n \approx \pi \cdot 10^{-8}$ и зависит только от топологических свойств лучевой траектории. Как показывает расчет многолучевой поляризационной интерференции в волокне, средняя величина относительного углового смещения получается порядка 10^{-4} рад. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 1).

Таким образом, процесс взаимодействия фазы Берри и оптического эффекта Магнуса вызывает топологическое двулучепреломление, характер которого не зависит от типа волокна, а определяется геометрическими свойствами траектории локальной волны.

Список литературы

- [1] Виницкий С., Дербов В., Дубовик В., Марковски Б., Степановский Ю. // УФН. 1990. Т. 160. В. 6. С. 1–49.
- [2] Дугин А.В., Зельдович Б.Я., Кундикова Н.Д., Либерман В.С. // ЖЭТФ. 1991. Т. 100. В. 5. № 11. С. 1474–1482.
- [3] Воляр А.В., Кухтарев Н.В., Лапаева С.Н., Лейфер П.Н. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 13. С. 1–5.
- [4] Воляр А.В., Лапаева С.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 24. С. 74–77.
- [5] Воляр А.В., Лапаева С.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 8. С. 53–56.
- [6] Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 655 с.
- [7] Федоров Ф.И. // ЖПС. 1977. В. 4. С. 580–588.

Симферопольский государственный университет им. М.В.Фрунзе

Поступило в Редакцию
7 сентября 1993 г.