

# Лазерное излучение с пространственной деполаризацией

Е.Ф.Ищенко, А.Л.Соколов

*Рассмотрены характеристики поляризационно-неоднородного лазерного излучения с учетом его частичной поляризации. Показано, что такое излучение можно представить совокупностью мод Эрмита–Гаусса с разными интенсивностью, состоянием поляризации и степенью когерентности. Проведен анализ устройств, обладающих неоднородной деполаризацией и поляризацией. Показано, что при распространении поляризационно-неоднородного излучения его поляризационная структура не сохраняется.*

**Ключевые слова:** поляризационно-неоднородное лазерное излучение, пространственная деполаризация, когерентность.

## 1. Введение

Эффекты, связанные с поляризационной неоднородностью излучения, несмотря на их малую величину, оказывают существенное влияние на работу оптических приборов, например лазерных гироскопов. В работах [1–4], посвященных поляризационно-неоднородным волнам, рассмотрены оптические элементы, не обладающие деполаризующими свойствами. Вместе с тем деполаризация присутствует во всех оптических системах, что обусловлено флуктуациями параметров анизотропии оптических элементов (например, активного элемента твердотельного лазера [1, 5]) и рассеянием волн. Случайные флуктуации анизотропии резонатора могут привести к тому, что наряду с линейно поляризованной основной модой генерируется случайно поляризованная компонента излучения [5]. При времени измерения, сравнимом с постоянной времени инерционных фотоприемников данное излучение воспринимается как неполяризованное.

Цель настоящей работы – исследование эффектов, связанных с неоднородной по сечению деполаризацией и поляризацией излучения. Поляризационно-неоднородное лазерное излучение в параксиальной области можно представить совокупностью когерентных мод Эрмита–Гаусса [3, 4], что позволяет на основе метода поляризационно-волновых матриц решить собственную задачу для оптического резонатора [6, 7]. Покажем, что лазерное излучение с пространственной деполаризацией описывается набором как когерентных, так и некогерентных мод Эрмита–Гаусса с различным состоянием поляризации, амплитудой и фазой.

## 2. Оптическая система с пространственной деполаризацией

Рассмотрим элемент с пространственной деполаризацией, который располагается в перетяжке гауссова пучка.

**Е.Ф.Ищенко, А.Л.Соколов.** Московский энергетический институт (Технический университет), Россия, 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

Поступила в редакцию 3 июля 2003 г.

ка. Соответствующая матрица Мюллера имеет вид

$$\mathbf{M}_d = \tau \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - P(r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - P(r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - P(r) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – коэффициент изотропного пропускания;  $P(r) = ar^2/w_0^2$  – коэффициент деполаризации, зависящий от поперечного радиуса  $r$ ;  $a$  – коэффициент поляризационной неоднородности ( $a \ll 1$ );  $w_0$  – радиус лазерного пучка в перетяжке. Вектор Стокса исходного линейно поляризованного лазерного пучка

$$\mathbf{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} I_0 \exp(-2r^2/w_0^2) \quad (2)$$

после прохождения элемента с пространственной деполаризацией преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}' &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 - P(r) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} I(r) \\ &= \tau \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} I(r)(1 - ar^2/w_0^2) + \tau I(r) ar^2/w_0^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w_0^2)$ , а излучение с пространственной деполаризацией представлено как некогерентная суперпозиция двух пучков. Первый – полностью поляризованный – запишем следующим образом:

$$\mathbf{S}_p = \tau \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} I(r)(1 - ar^2/w_0^2) \approx I_p(r) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $I_p(r) = \tau I_0 \exp(-2r^2/w_p^2)$ ;  $w_p \approx w_0(1 - a/2)$  – радиус пучка (пятна генерации), уменьшившийся за счет перехо-

да части излучения в пространственно-неполяризованное состояние. Неполаризованная часть прошедшего излучения описывается совокупностью трех когерентных между собой мод Эрмита–Гаусса (ТЕМ<sub>00</sub>, ТЕМ<sub>20</sub>, ТЕМ<sub>02</sub>) с радиусом пучка  $w_0$ .

Степень деполаризации прошедшего излучения определяется отношением интенсивности неполаризованной части излучения к интенсивности всего излучения и возрастает к периферии пучка:

$$D(r) = 1 - P(r) \approx ar^2/w_0^2. \tag{5}$$

Здесь  $P(r)$  – степень поляризации.

На расстоянии  $z$  от перетяжки, где располагается деполаризатор, обе части излучения имеют также различные радиусы пучка, при этом степень деполаризации зависит не только от поперечной координаты  $r$ , но и от продольной координаты  $z$ :

$$D(r, z) \approx ar^2/w^2(z), \tag{6}$$

где  $w(z) = w_0[1 + (\omega_0 z)^2]^{1/2}$ ;  $\omega_0 = \lambda/\pi w_0^2$ .

### 3. Оптическая система с пространственной поляризацией

Рассмотрим поляризационно-неоднородные свойства плоскопараллельной пластинки, грани которой расположены под углом Брюстера к оптической оси. Поскольку волновая поверхность падающего излучения является сферической в параксиальной области, то в произвольной точке поверхности плоскость падения оказывается развернутой и закон Брюстера не выполняется. Элементы матрицы Джонса брюстеровской пластинки зависят от поперечных координат и кривизны волновой поверхности лазерного излучения  $\rho_x, \rho_y$  в меридиональных плоскостях  $xu$  и  $xz$  системы координат, связанной с осевым лучом (рис. 1):

$$\mathbf{J}_b \approx \begin{pmatrix} 1 - a_2 & b \\ b & T - d \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{(n^4 - 1)^2}{8n^6} \rho_x^2 x^2 + \frac{(1 - n^2)^2}{n^2(1 + n^2)^2} \rho_y^2 y^2; \\ b &= \frac{(1 - n^2)^2}{n(1 + n^2)^2} \rho_y y; \\ T &= \frac{4n^2}{(1 + n^2)^2}; \quad d = \frac{2(n^2 - 1)^2}{n^2(n^2 + 1)} \rho_x x. \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь  $n$  – показатель преломления материала брюстеровской пластинки.

Используя (7), запишем матрицу Мюллера брюстеровской пластинки в следующем виде:

$$\mathbf{M}_b = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(1 + T^2) - a_2 - Td + b^2 & 0 & b(1 + T) - bd & 0 \\ \frac{1}{2}(1 + T^2) - a_2 + Td & 0 & b(1 - T) + bd & 0 \\ b(1 + T - d) & b(1 - T + d) & T(1 - a_2) - d + b^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T(1 - a_2) - d - b^2 \end{pmatrix}. \tag{8}$$

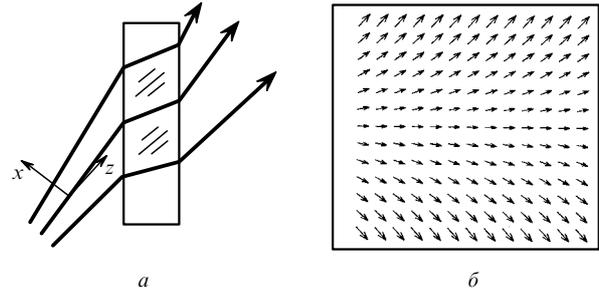


Рис.1. Схема прохождения светового пучка через брюстеровскую пластинку (а) и поляризационная структура светового пучка, прошедшего через пластинку (б).

Пусть на брюстеровскую пластинку падает лазерное излучение, которое состоит из полностью поляризованной компоненты с горизонтальной ориентацией вектора  $\mathbf{E}$  и полностью неполаризованной (случайно поляризованной) компоненты с интенсивностями  $I_p$  и  $I_{np}$  соответственно; при этом обе они представляют собой гауссов пучок. Степень поляризации такого излучения  $P = I_p/(I_p + I_{np})$ .

Запишем элементы матрицы (7) в виде полиномов Эрмита по поперечным координатам. Полностью поляризованная часть излучения после брюстеровской пластинки может быть представлена совокупностью трех когерентных мод Эрмита–Гаусса с индексами 00, 20, 02, которые имеют исходную линейную горизонтальную поляризацию, и моды с индексом 01 с линейной вертикальной поляризацией. Прошедшее излучение приобретает пространственную поляризационную структуру, показанную на рис.1. Азимут поляризации является функцией координаты  $y$ :

$$\psi(y) \approx \frac{(1 - n^2)^2}{n(1 + n^2)^2} \rho_y y. \tag{9}$$

Интересно, что на любом расстоянии от пластинки излучение является эллиптически поляризованным за счет возникновения разности фаз между модами нулевого и первого порядков, образующими полностью поляризованную часть излучения. Распределение эллиптичности в поперечном сечении пучка имеет зеркальную симметрию относительно оси  $y$ , т. е. каждому поляризационному эллипсу с правым вращением вектора  $\mathbf{E}$  соответствует такой же эллипс с левым вращением.

Действие пластинки на неполаризованную часть исходного излучения приводит к частичной пространственной поляризации. Потери  $A$  основной моды обусловлены как отраженным поляризационно-неоднородным пучком, так и переходом энергии от основной моды к паразитным модам (рис. 2).

В результате лазерное излучение на выходе из брюстеровской пластинки характеризуется достаточно сложной поляризационной структурой, и его можно представить некогерентной суммой трех пучков, или групп мод: первого – полностью поляризованного, состоящего из

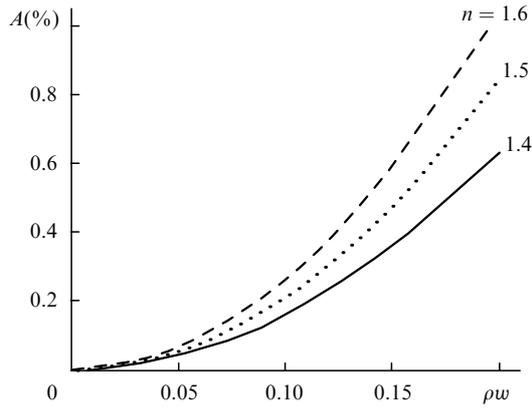


Рис.2. Зависимость потерь на брюстеровской пластинке от параметров пучка при разных  $n$ .

набора когерентных мод Эрмита – Гаусса (вектор Стокса  $S_1$ ), второго – полностью неполяризованного ( $S_2$ ) и третьего – полностью поляризованного, возникшего из неполяризованной части излучения ( $S_3$ ). Имеем

$$S_1 = \begin{pmatrix} I'_p \\ (1 - 2a_2 - b^2)I_p \\ 2bI_p \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_2 = I_{np}' \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$S_3 = \begin{pmatrix} I_{npnp} \\ [\frac{1}{2}(1 - T^2) - a_2 + Td]I_{np} \\ b(1 + T - d)I_{np} \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $I'_p = (1 - 2a_2 + b^2)I_p$  – интенсивность первого пучка (поляризованная компонента излучения);  $I'_{np} = [T^2 - 2Td - 2b^2T/(1 - T)]I_{np}$  – интенсивность второго пучка (неполяризованная часть излучения);

$$I_{npnp} = \left[ \frac{1}{2}(1 + T^2) - a_2 + Td + b^2 \frac{1 + T}{1 - T} \right] I_{np} \quad (11)$$

– интенсивность третьего пучка. Степень поляризации результирующего излучения определим для случая, когда на брюстеровскую пластинку падает только неполяризованное излучение ( $I_p = 0$ ):

$$P \approx \frac{1 - T^2}{1 + T^2} \left[ 1 - \frac{4a_2T^2}{1 - T^4} + \frac{4dT}{1 - T^4} + \frac{4b^2T}{(1 - T)^2(1 + T^2)} \right], \quad (12)$$

где учитывается, что  $d, a_2, b^2 \ll 1 - T$ . Как следует из (9)–(11), а также (7), степень поляризации зависит от поперечных координат.

Все три пучка (группы) образованы набором когерентных мод нулевого, первого и второго порядков с различными поляризациями и интенсивностями. Расходимости и фазовые скорости мод не одинаковы, поэтому поляризационная структура изменяется как для каждого пучка, так и для всего излучения. При распространении излучения в пространстве распределение степени поляризации в поперечном сечении также не сохраняется.

Из рассмотренных выше примеров следует, что в оптической системе с элементами, поляризационные или деполаризационные параметры которых зависят от поперечных координат, лазерное излучение может быть описано совокупностью мод Эрмита – Гаусса с различными поляризациями, амплитудами и степенями взаимной когерентности.

В [8] впервые решена аддитивная поляризационная задача для произвольного числа пучков с произвольными состоянием поляризации и степенью когерентности между ними. В данном случае для расчета результирующей поляризационной структуры излучения целесообразно использовать следующую методику:

- собрать все взаимно когерентные моды в группы, которые некогерентны между собой, и сложить все векторы Джонса для мод данной группы;
- вектор Джонса каждой группы путем стандартного преобразования трансформировать в вектор Стокса;
- сложить векторы Стокса всех групп.

Некоторые особенности трансформативной задачи для поляризационно-неоднородного лазерного излучения иллюстрирует табл.1.

#### 4. Выводы

1. В оптических системах с поляризационно-неоднородными элементами, параметры которых, включая коэффициент деполаризации, являются функциями поперечных координат, лазерное излучение в параксиальной

Табл.1.

Элементы оптической системы	Группа, состоящая из когерентных между собой неполяризованных (случайно поляризованных) мод	Группа, состоящая из полностью поляризованных когерентных мод
Линейные фазовые пластинки, вращатели	Не изменяют состояние поляризации	
Поляризаторы, параметры которых не зависят от поперечных координат	Из каждой моды образуются поляризованные составляющие – новые группы	Состояние поляризации каждой моды преобразуется независимо
Оптические промежутки	Возникает разность фаз между когерентными модами различного порядка	
Элементы с неоднородной по сечению поляризацией (линзы, брюстеровские пластинки)	Образуются новые группы, состоящие из полностью поляризованных мод	Возникают новые когерентные моды различного порядка
Элементы с однородной по сечению деполаризацией ( $P \neq f(x, y)$ )	Не влияют	Из каждой моды образуются неполяризованные составляющие – новые группы
Элементы с неоднородной по сечению деполаризацией ( $P = f(x, y)$ )	Не влияют	Образуются новые группы, состоящие из набора неполяризованных когерентных мод различного порядка

области может быть описано совокупностью мод Эрмита–Гаусса с различными состояниями поляризации, интенсивностями и степенями взаимной когерентности.

2. Поляризационная пространственная структура лазерного излучения не сохраняется при распространении его даже в однородном изотропном пространстве, что объясняется сдвигом фаз между модами разного порядка, образующими данное излучение. Степень поляризации поляризационно-неоднородного лазерного излучения связана с волновыми параметрами (радиусом кривизны волнового фронта и поперечным радиусом пучка) и, подобно эллипсометрическим параметрам, непрерывно изменяется не только в поперечном, но и в продольном направлении.

3. Брюстеровская пластинка по отношению к лазерному пучку является поляризационно-неоднородным элементом, в результате прохождения которого изменяется модовый состав прошедшего излучения, в частно-

сти возникает мода  $TEM_{01}$  с ортогональной поляризацией. При наличии в падающем излучении неполяризованной компоненты происходит также пространственная поляризация и излучение описывается тремя некогерентными группами мод; при этом степень поляризации изменяется в поперечном сечении.

1. Витрицак И.Б., Сомс А.Н., Тарасов А.А. *ЖТФ*, **44** (5), 1055 (1974).
2. Петрунькин Ю.В., Кожевников Н.М. *Труды ЛПИ*, № 366, 12 (1979).
3. Соколов А.Л. *Оптика и спектроскопия*, **83** (6) 1005 (1997).
4. Соколов А. Л. *Оптика и спектроскопия*, **89** (3) 512 (2000).
5. Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. *Оптика и спектроскопия*, **89** (1) 141 (2000).
6. Курятов В.Н., Соколов А.Л. *Квантовая электроника*, **30** (2) 125 (2000).
7. Курятов В.Н., Соколов А.Л. *Квантовая электроника*, **32** (4), 324 (2002).
8. Ищенко Е.Ф. *Измерительная техника*, № 2, 10 (1997).