

[9] О в ч и н н и к о в И.Т., Я н ш и н Э.В. - ФТТ, 1983, т. 25, № 7, с. 2196-2198; С а у х G.L., B r u n A. - IEEE J. of Quantum Electronics, 1987, v. QE-23, N 10, p. 1680-1688.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
15 апреля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 14

26 июля 1988 г.

ФОКУСИРУЮЩИЙ ВОЛНОВОД ВИДА КАНАЛ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

В.А. Е п и ш и н, В.А. М а с л о в,
В.Н. Р я б ы х, В.А. С в и ч,
А.Н. Т о п к о в

Локализация поля при помощи волноводов без использования традиционных оптических узлов позволяет сочетать в одном простом элементе функции фокусировки и транспортировки пучков излучения [1-3]. Такой длиннофокусный элемент перспективен, например, в лазерной технологии [4], субмиллиметровой лазерной диагностике плазмы [5]. В [2] проведено рассмотрение особенностей локализации поля в многомодовых волновых каналах. Установлена необходимость создания сложного входного поля. Приведены приближенные оценки периодически расположенных областей локализации излучения для волноводов некоторых типов.

В данной работе сообщается о фокусировке осесимметричного линейно-поляризованного пучка, не требующей формирования сложного поля на входе волновода. В качестве последнего использовался распространенный в ИК диапазоне (особенно в длинноволновой части) волновод кругового сечения вида канал в диэлектрике (ВКД). Расположение областей локализации установлено путем расчетов на ЭВМ и проверено экспериментально. Аперриодичность следования этих областей вдоль оси ВКД объяснена аналитически. Предложено простое устройство локализации поля - фокусирующий волновод [6].

В круглом ВКД при $ka \gg 1$, $|\frac{j_m}{k} - 1| \ll a$ в нулевом порядке по $\frac{1}{ka}$ ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ - длина волны, a - радиус канала, j_m - постоянные распространения мод ВКД) [7, 8], моды EH_{1m} имеют линейную поляризацию и при $m \ll \sqrt{\frac{a}{\lambda}}$ описываются нормированными функциями, входящими в полную ортогональную систему,

$$V_m(\rho) = \frac{\sqrt{2} J_0(U_{0m} \rho)}{J_1(U_{0m})}, \quad (1)$$

где J_0, J_1 - функции Бесселя первого рода, U_{0m} - корни уравнения $J_0(U_{0m}) = 0$, $\rho = r/a$ - безразмерная радиальная координата,

r - цилиндрическая координата волнового канала. При этом всегда можно выбрать размеры волновода такими, чтобы комплексную амплитуду поля на его входе $F(\rho)$ записать в виде ряда по функциям (1). Тогда комплексная амплитуда на расстоянии L от входа равна

$$W(\rho) = \sum_{m=1}^M C_m V_m(\rho) \exp \{ i g_m L \}, \quad (2)$$

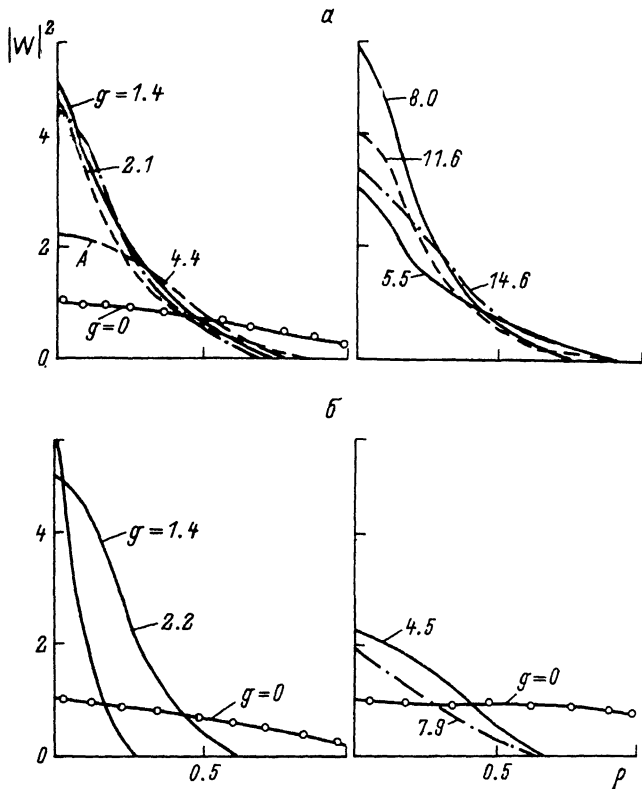
где $C_m = \int_0^1 V_m(\rho) F(\rho) \rho d\rho$, $M < \sqrt{\frac{a}{\lambda}}$ - число мод, достаточное для представления входного поля с заданной погрешностью, определяемой соотношением [9]

$$\delta = \frac{\sum_{n=1}^G \left| \sum_{m=1}^M C_m V_m(\rho_n) \right|^2 - |F(\rho_n)|^2}{\sum_{n=1}^G |F(\rho_n)|^2}, \quad (3)$$

где G - число точек численного задания функций.

Пусть падающий пучок на входе волновода занимает поверхность, превышающую занимаемую модой EH_{11} . Из (2) следует, что возбуждаемые при этом высшие гибридные EH_{1m} моды противофазны EH_{11} . Тогда, при прохождении пучком по ВКД расстояния, при котором разности фазовых набегов между EH_{11} и несколькими высшими модами расположатся в интервале $(2n+1)\frac{\pi}{2} \div (2n+1)\frac{3\pi}{2}$ ($n=0, 1, 2, \dots$), можно ожидать осевой локализации поля. Эти расстояния, вычисленные из известных значений фазовых постоянных [7], равны $L = g a^2 / \lambda$, $g \in] 0.8; 2.4 [U] 4; 5.6 [U] 7.2; 8.8 [U] 10.4; 12 [] 13.6; 15.2 [.$ Данные выводы подтверждены расчетами по (2) на ЭВМ, уточнившими приведенные значения параметра g .

Из результатов расчетов следует, что форма распределения поля входного пучка для фокусировки не нуждается в сколь-нибудь жестких условиях и может изменяться в широких пределах. Необходимым требованием является, чтобы диаметр d , в пределах которого на входном торце волновода заключено не менее половины энергии этого пучка, должен быть не менее чем в 1.2 раза больше радиуса волнового канала. Локализация поля при этом наблюдается на расстояниях от входа, характеризуемых следующими значениями параметра $g \in] 0.7; 1.7 [U] 1.8; 2.4 [U] 4.2; 5.2 [U] 5.4; 5.9 [U] 7.6; 8.5 [U] 10.1; 11.7 [U] 13.5; 14.2 [U] 14.4; 15.3 [.$ Указанные интервалы соответствуют локализации энергии, при которой интенсивность поля на оси фокального пятна более чем в 2 раза превосходит осевую интенсивность в падающем пучке. Макс-



Распределения интенсивности полей на входной апертуре фокусирующих устройств ($g=0$), в фокальной плоскости линзы (A), соответствующей $g=1, 4$, и в различных сечениях локализации ВКД. а - теория, $a/\lambda = 80$; б - эксперимент.

Симметричная локализация поля на оси получается при $g = 1.4, 2.1, 4.4, 5.5, 8.0, 11.6, 14.6$, когда расчетное отношение интенсивности в фокальном пятне к максимальной интенсивности в падающем пучке равно 5.1, 4.9, 4.7, 3.0, 5.6, 3.9, 3.3 соответственно (см. рисунок, а). При фокусировке линзой с фокусным расстоянием, равным $L = g \frac{a^2}{\lambda} > g \in [1.4-2]$, указанное отношение меньше примерно вдвое, чем в случае фокусирующего волновода с тем же g . При $g > 2$ (фокусное расстояние больше расстояния Рэлея) линза перестает служить фокусирующим устройством, в то время как волновод дает хорошую локализацию поля.

Проведена экспериментальная проверка полученных результатов, рис. 1б. Использовано излучение CH_3OH лазера ($\lambda = 118.8$ мкм) с накачкой пучком CO_2 лазера ($\lambda = 10.6$ мкм). Построены результаты записи самописцем интенсивности поля на входе ($g=0$) и на

выходе волноводов при $2a = 36.6$ мм, $L = 3890$ мм, ($g = 1.4$); $2a = 19$ мм, $L = 1670$ мм ($g = 2.2$); $2a = 9$ мм, $L = 757$ мм ($g = 4.45$); $2a = 9$ мм, $L = 1350$ мм ($g = 7.92$). Волноводы выполнены из стекла с измеренным показателем преломления $n = 4.1$ (эта же величина n использована при проведении расчетов). Подчеркнем отсутствие интерференционных лепестков в сфокусированном пятне.

Таким образом, в работе показана возможность фокусировки поля в многомодовых волновых каналах без необходимости формирования сложного входного поля. Области локализации расположены вдоль оси апериодически. Фокальные пятна не содержат значительного интерференционного фона. Предложено длиннофокусное устройство в виде отрезка волновода типа канал в диэлектрике. Фокальное пятно может быть расположено в несколько раз дальше от входного торца волновода, чем от линзы. При равенстве фокусного расстояния линзы расстоянию до местоположения области локализации поля в волноводе концентрация интенсивности для последнего вдвое больше.

Л и т е р а т у р а

- [1] Маркузе Д. Оптические волноводы, М.: Мир, 1974. 576 с.
- [2] Даргейко М.М., Кравцов Ю.А., Петников В.Г., Петросян А.С., Самойленко Ю.И., Славинский М.М. - Изв. вузов, Радиофизика, 1984, т. 27, № 6, с. 746-752.
- [3] Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. А.с. № 1190338 (СССР). Оpubл. в Б.И., 1985, № 41, с. 206.
- [4] Абельситов Г.А., Голубев В.С. В кн.: Труды Всесоюзной конференции „Применение лазеров в народном хозяйстве“, М.: Наука, 1986, с. 3-23.
- [5] Бережный В.Л., Епишин В.А., Кононенко В.И. и др. Препринт ХФТИ АН УССР, 82-48, Харьков, 1982. 57 с.
- [6] Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. А.с. № 1354156 (СССР). Спубл. в Б.И., 1987, № 43, с. 171.
- [7] Marcattily E.A.J., Scheltzer R.A. - Bell System Techn. J., 1964, v. 43, N 7, p. 1783-1809.
- [8] Казанцев Ю.Н., Харлашкин О.А. - Радиотехника и электроника, 1984, т. 29, № 8, с. 1441-1450.
- [9] Хермен Г.В. Восстановление изображений по проекциям, М.: Мир, 1983. 349 с.

Харьковский
государственный
университет им. А.М. Горького

Поступило в Редакцию
21 декабря 1987 г.
В окончательной редакции
28 марта 1988 г.