

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В СКРУЧЕННЫХ ПОЛЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

С.В. Азизбекян, В.Г. Артюшенко, К.И. Калайджян, М.М. Миракян, И.Л. Пыльнов

*Рассмотрено влияние скрутки на величину пропускания полых металлических волноводов прямоугольного сечения. Показано, что дополнительные потери, обусловленные скруткой, не зависят от качества отражающей поверхности и практически одинаковы для излучений CO и CO<sub>2</sub> лазеров.*

Разработка гибких волноводных кабелей для передачи мощного излучения CO и CO<sub>2</sub> лазеров, широко применяемых в технологии и медицине, является актуальной задачей. В работах [1 – 4] продемонстрирована целесообразность использования для этих целей полых металлических волноводов (ПМВ) прямоугольного сечения, обладающих достаточной гибкостью и малыми оптическими потерями. В настоящей работе рассматривается распространение излучения в скрученных ПМВ с учетом некогерентного рассеяния на шероховатостях отражающих поверхностей волновода.

Конструкция волновода показана на рис. 1. Отражающими поверхностями являются две зеркально отполированные алюминиевые полоски шириной 10 мм, толщиной 0,25 мм и длиной до 1 м. Полоски обращены полированной поверхностью друг к другу и вставлены в пазы тефлоновых прокладок специальной конфигурации. Прокладки обладают достаточной гибкостью, обеспечивают постоянный интервал между полосками и предотвращают локальные изломы, которые возможны при изгибах или скрутке. Затем данная конструкция помещается в термоусадочную трубку и равномерно сжимается ею. Высота волновода задается расстоянием между пазами прокладки (рис. 1).

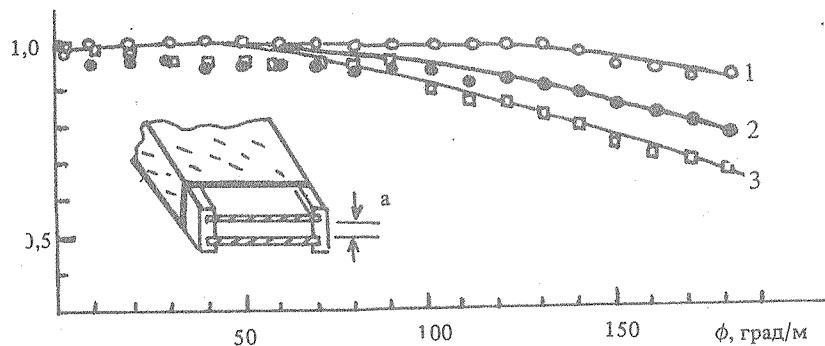


Рис. 1. Зависимость относительного пропускания ПМВ Т от угла крутки  $\phi$  для  $\lambda = 10,6$  мкм и значений  $a = 0,4$  мм (1), 1,0 мм (2) и 1,5 мм (3).

Лазерное излучение распространяется вдоль ПМВ путем многократных отражений от металлических поверхностей. Затухание излучения на единичном отражении обусловлено потерями на поглощение  $A_a(\theta)$  и рассеяние  $A_s(\theta)$ , а коэффициент полных потерь прямого волновода равен [3]:

$$\alpha = [A_a(\theta) + A_s(\theta)]N, \quad (1)$$

где  $N$  — число отражений на единицу длины,  $\theta$  — угол падения луча.

Полные потери ТЕ- и ТМ-мод можно представить в виде [3]:

$$A^{TE}(\theta) = A_s^{TE}(\theta) + A_a^{TE}(\theta) = 4\theta \text{Re}v^{-1} + (4\pi\sigma/\lambda)^2 \theta^2, \quad (2)$$

$$A^{TM}(\theta) = A_s^{TM}(\theta) + A_a^{TM}(\theta) = 4\theta \text{Re}v + (4\pi\sigma/\lambda)^2 \theta^2,$$

где  $\nu = n - ik$  — комплексный показатель преломления алюминия;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $\sigma^2$  — дисперсия, определяемая шероховатостями поверхности.

Скрутка волновода приводит к повороту плоскости падения луча между двумя последовательными отражениями на угол  $\phi/N$  ( $\phi$  — угол кручения на единицу длины), в результате чего некоторая часть излучения приобретает ТМ-поляризацию. С учетом отражения лучей от двух противоположных стенок ПМВ, средний коэффициент отражения имеет вид [1]:  $R = 1 - A(\theta) = R^{TE}(\theta) - (a\phi/\theta)^2 [R^{TE}(\theta) - R^{TM}(\theta)]$ , где  $R^{TE}$ ,  $R^{TM}$  — коэффициенты отражения ТЕ- и ТМ-мод,  $a$  — высота волновода.

Поскольку  $R^{TE}(\theta) = 1 - A^{TE}(\theta)$  и  $R^{TM}(\theta) = 1 - A^{TM}(\theta)$ , то, учитывая (1), (2), получим для коэффициента полных потерь скрученного волновода следующее выражение:

$$\alpha_t = \frac{m^2 \lambda^2}{4a^3} 4\text{Re}\nu^{-1} + \frac{m^3 \lambda^3}{8a^4} \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 + 4\text{Re}\nu a \phi^2 / \left[ 1 + 2\text{Re}\nu \frac{m\lambda}{2a} + |\nu|^2 \frac{m^2 \lambda^2}{4a^2} \right]. \quad (3)$$

Сумма двух первых членов в правой части (3) есть коэффициент потерь в прямом волноводе [3], а третий член представляет собой дополнительные потери при скрутке и, согласно (3), не зависит от шероховатостей поверхности ПМВ.

Зависимость величины пропускания от угла скрутки  $\phi$  и высоты волновода  $a$  измерялась на длинах волн СО ( $\lambda = 5, 6$  мкм) и СО<sub>2</sub> ( $\lambda = 10,6$  мкм) лазеров. С помощью цилиндрической линзы из ZnSe создавался линейно поляризованный пучок излучения прямоугольного сечения размером 0,5 × 6 мм и вводился в волновод так, чтобы вектор поляризации был параллелен алюминиевым поверхностям (возбуждение слабо затухающих ТЕ-мод).

На рис. 1 приведены расчетные и экспериментальные зависимости относительного пропускания  $T = T_1/T_0$  ( $T_0$  и  $T_1$  — пропускание прямого и скрученного ПМВ соответственно) от угла кручения для разных значений  $a$  при  $\lambda = 10,6$  мкм. С ростом высоты волновода наблюдается падение  $T$ . Эта зависимость объясняется тем, что с уменьшением  $a$  увеличивается число отражений  $N$  и тем самым уменьшается отношение  $\phi/N$ , т. е. уменьшается угол поворота плоскости падения между двумя последовательными отражениями. Тем не менее, пропускание скрученных ПМВ остается довольно высоким. Так, при угле кручения 180 град/м падение мощности по сравнению с прямым волноводом составляет всего 8% для  $a = 0,4$  мм, 22% для  $a = 1$  мм и 30% для  $a = 1,5$  мм.

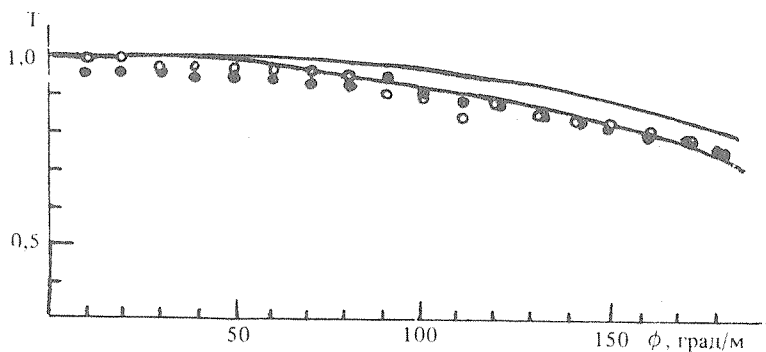


Рис. 2. Зависимость относительного пропускания ПМВ от угла кручения волновода высотой 1 мм для излучений СО (○) и СО<sub>2</sub> (●) лазеров.

На рис. 2 показаны расчетные и экспериментальные зависимости  $T(\phi)$  для излучений СО и СО<sub>2</sub> лазеров. Падение выходной мощности происходит практически одинаково для обеих длин волн.

Интересным свойством прямоугольных ПМВ является их способность выделять определенную поляризацию входного излучения и сохранять степень поляризации излучения при изгибе и скрутке. Вектор электрического поля на выходе из волновода всегда параллелен отражающим поверхностям (ТЕ-волна) и вращается вместе с волноводом при скрутке. Такое поведение вектора поляризации объясняется малым значением коэффициента затухания для ТЕ-волн и сильным затуханием ТМ-волн.

На рис. 3 приведена зависимость выходной степени поляризации от угла скрутки волновода. На вход ПМВ подавалось излучение со степенью поляризации  $\sim 0,9$ , а степень поляризации на выходе из волновода длиной 60 см была порядка 0,97 — 0,99 в широком диапазоне углов скрутки.

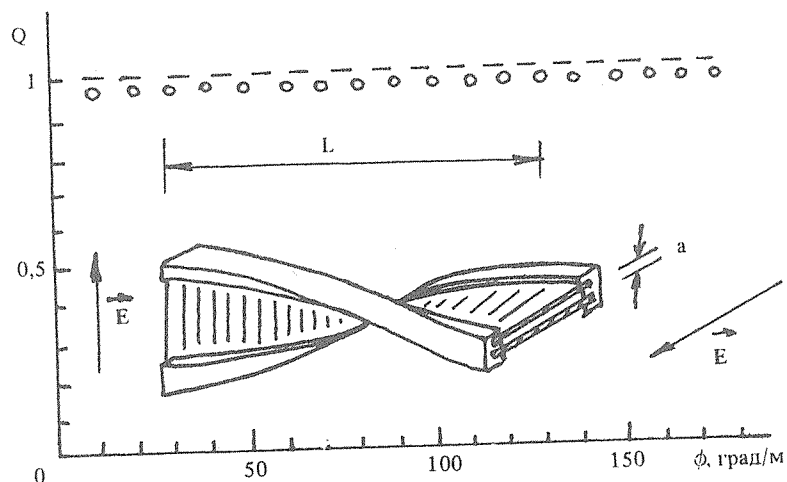


Рис. 3. Зависимость степени поляризации выходного излучения  $Q$  от угла кручения.

Таким образом, показано, что дополнительные потери при скрутке не зависят от шероховатости поверхности волновода; падение выходной мощности практически одинаково для излучений  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  лазеров; прямоугольные ПМВ могут выполнять роль как поляризаторов, так и вращателей поляризации распространяющегося излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Garmire E., McMahon T., Bass M. IEEE J. Quant. Electr., QE-16, 23 (1980).
2. Miyagi M., Hongo A., Kawakami S. IEEE J. Quant. Electr., QE-19, 136 (1983).
3. Азизбекян С. В. и др. ЖТФ, 59, 6 (1989).
4. Artjushenko V. G. et al. Proc. SPIE, v. 1067, Optical Fibers in Medicine IV, 233 (1989).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 1 июня 1989 г.