

## ВЛИЯНИЕ ИЗГИБА МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА РАЗНИЦУ ОПТИЧЕСКИХ ЗАДЕРЖЕК МЕЖДУ СЕРДЦЕВИНАМИ

М. С. Астапович, О. Н. Егорова, С. Л. Семенов

*С помощью интерференционного метода с использованием интерферометра Маха–Цандера и низкокогерентного источника излучения исследовано различие величин групповых задержек мод сердцевин многосердцевинного оптического волокна. Полученные данные показали, что разница величин групповых задержек между сердцевинами многосердцевинного оптического волокна связана с изгибом световода и возрастает с уменьшением радиуса намотки.*

**Ключевые слова:** многосердцевинное оптическое волокно, групповая задержка, интерференционный метод измерения задержки, измерение задержки в многосердцевинном оптическом волокне.

Многосердцевинные оптические волокна (МОВ) [1] в последние несколько лет являются объектом активного исследования и находят новые применения в различных областях. Одним из возможных применений МОВ являются задачи радиофотоники, такие, как создание многоканальных линий задержки сигнала [2] и многорезонаторных оптоэлектронных генераторов [3]. Для ряда задач важным параметром является величина разности групповой временной задержки (РГЗ) между сердцевинами МОВ. К нежелательному изменению величины РГЗ между сердцевинами МОВ может приводить изгиб световода, особенно при создании компактных устройств, для которых необходима намотка световода с достаточно малым диаметром. В связи с этим настоящая работа посвящена исследованию влияния изгиба МОВ на РГЗ мод соседних сердцевин. Исследуемое в работе семисердцевинное МОВ было изготовлено в НЦВО РАН.

На рис. 1(а) показан торец МОВ с семью одинаковыми сердцевинами, расположенными в гексагональном порядке, а также профиль показателя преломления вдоль оси  $X$  (рис. 1(г)) в неизогнутом световоде (рис. 1(б)). Как известно [4], изогнутый световод

оптически эквивалентен прямому световоду, профиль показателя преломления которого определяется формулой (рис. 1(д)):

$$n_{\text{bend}} = n_{st} \left( 1 + \frac{r}{R} \cos(\theta) \right), \quad (1)$$

где  $r$  и  $\theta$  – координаты в локальной цилиндрической системе координат,  $n_{st}$  – показатель преломления в точке с координатами  $r$  и  $\theta$  в неизогнутом световоде (рис. 1(а)),  $R$  – радиус изгиба. Как видно из рис. 1(г) и 1(д) при изгибе МОВ будет происходить изменение фазовых  $n_{\text{eff}k}$  и групповых  $n_{gk}$  эффективных показателей преломления мод сердцевин (где  $k$  – номер сердцевины,  $k = 1..6$ ), а также их разности. Согласно [5] в случае, если сердцевин одинаковые, фазовые показатели преломления мод центральной и боковой сердцевин связаны соотношением:

$$n_{\text{eff}k} = n_{\text{eff}0} \left( 1 + \frac{D}{R} \cos \phi_k \right), \quad (2)$$

где  $D$  – расстояние между центрами соседних сердцевин,  $\phi_k$  – угол между радиальным направлением изгиба и радиус-вектором, проведенным к центру сердцевины с номером  $k$ .

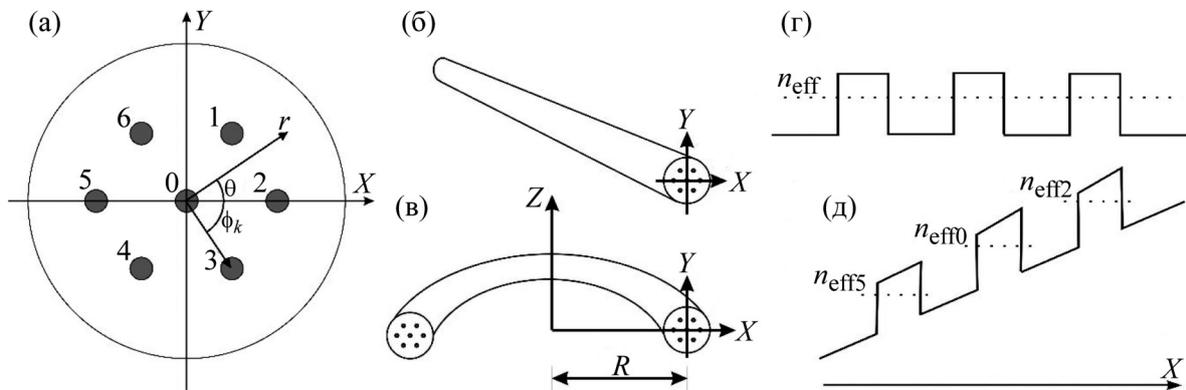


Рис. 1: (а) торец МОВ, (б) прямое МОВ, (в) изогнутое МОВ, (г) профиль показателя преломления вдоль оси  $X$  прямого МОВ, (д) эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси  $X$  изогнутого МОВ.

Для сердцевин 5 и 2 с центрами, лежащими на оси  $X$ ,  $\phi_k = 0$ , и разница фазовых и групповых показателей преломления мод этих сердцевин и центральной сердцевины будет максимальна. Поскольку групповой показатель преломления моды  $n_{gk} = n_{\text{eff}k} - \lambda \frac{dn_{\text{eff}k}}{d\lambda}$ , то, используя (1), для разности групповых показателей преломления мод сердцевин 5

и 0 и 0 и 2 получим:

$$\Delta n_{k-0} = n_{gk} - n_{g0} = \pm \frac{D}{R} n_{g0}. \quad (3)$$

Выражение 3 определяет максимальную (по модулю) разницу между групповыми индексами соседних мод МОВ данной конструкции, вызванную изгибом (знак плюс в (3) соответствует случаю  $\phi_k = 0$ , знак минус –  $\phi_k = \pi$ ). Максимальная РГЗ в соседних сердцевинах МОВ длиной  $L$  равна:

$$\Delta \tau_{k-0} = \tau_k - \tau_0 = \frac{L}{c} \Delta n_{gk-0} = \frac{L D}{c R} n_{g0}. \quad (4)$$

Для измерения РГЗ между модами соседних сердцевин применен интерферометрический метод с использованием интерферометра Маха–Цандера и низкокогерентного источника излучения [6–8]. В одно из плеч (измерительное) интерферометра Маха–Цандера путем стыковки с торцами односердцевинных световодов помещалась одна из сердцевин исследуемого МОВ. В другое плечо помещался односердцевинный световод, оптическая длина которого примерно совпадала с оптической длиной центральной сердцевины исследуемого МОВ. РГЗ определялась, исходя из разницы длин воздушной части измерительного плеча интерферометра  $\Delta x$  при измерениях для центральной и боковой сердцевины МОВ, при которых наблюдалась интерференционная картина –  $\Delta \tau_{k-0} = \Delta x n_{\text{gair}} / c$ , где  $n_{\text{gair}}$  – групповой показатель преломления воздуха  $n_{\text{gair}} \approx 1$ .

Относительную РГЗ между сердцевинами  $\delta \tau$  можно оценить по формуле:

$$\delta \tau_{k-0} = \frac{\Delta \tau_{k-0}}{\tau_k} = \Delta x n_{\text{gair}} / (L n_{gk}) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $L$  – длина измеряемого МОВ,  $\tau_k$  – величина групповой задержки в сердцевине  $k$  МОВ,  $n_{gk}$  – групповой показатель преломления основной моды сердцевины  $k$  МОВ.

Фотография торца семисердцевинного МОВ, изготовленного в НЦВО РАН, полученная с помощью электронного микроскопа, представлена на рис. 2(а). Все сердцевинные световода одинаковые. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки составляла 0.0055, диаметры сердцевин – 8.2 мкм, расстояние между центрами соседних сердцевин 47 мкм. Длина волны отсечки первой высшей моды в каждой из сердцевин находилась в диапазоне 1340–1380 нм.

Измерение РГЗ между сердцевинами проводилось при намотке на катушки радиусом 25, 80 и 160 мм отрезка световода длиной 94 м. На рис. 2(а) приведены значения величин относительной РГЗ  $\delta \tau_{k-0}$  боковой и центральной сердцевины для каждой из сердцевин при радиусе намотки МОВ 25 мм. Сердцевинные с отрицательной РГЗ расположены слева от оси  $Y$ , с положительной – справа. Модули разностей задержек с

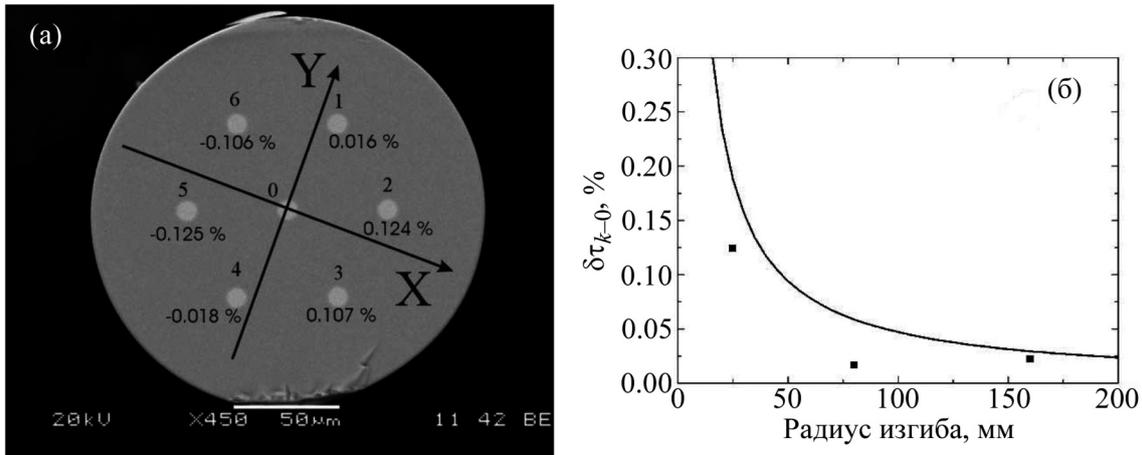


Рис. 2: (а) ЭМ-фотография торца семисердцевинного МОВ. Над каждой сердцевинной обозначен номер сердцевинной. Ниже отмечены величины относительных разностей задержек  $\delta\tau_{k-0}$  боковой и центральной сердцевин для радиуса намотки 25 мм; (б) расчетная (сплошная кривая) и измеренная (точки) зависимости максимальной относительной разности задержек боковой и центральной сердцевин  $\delta\tau_{k-0max}$  от радиуса намотки световода.

различными знаками попарно совпадают (угол  $\phi_k$  для сердцевин с отрицательной и положительной  $\delta\tau_{k-0}$  различается на  $\pi$ ). Это свидетельствует о том, что различие групповой задержки в сердцевинах связано с изгибом. Примерное радиальное направление изгиба (ось  $X$ ) также показано на рис. 2(а). При намотке МОВ с радиусом 80 и 160 мм характер распределения величин РГЗ в различных сердцевинах не изменялся (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Относительная РГЗ в сердцевинах МОВ  
при различных радиусах намотки

Номер сердцевинной, $k$	1	2	3	4	5	6
$\delta\tau_{k-0}, \%(R = 25 \text{ mm})$	0.016	0.124	0.107	-0.018	-0.125	-0.106
$\delta\tau_{k-0}, \%(R = 80 \text{ mm})$	0.008	0.016	0.010	-0.007	-0.018	-0.010
$\delta\tau_{k-0}, \%(R = 160 \text{ mm})$	0.010	0.022	0.014	-0.007	-0.022	-0.013

Максимальная относительная РГЗ  $\delta\tau_{k-0\max}$  наблюдалась между сердцевинами, центры которых лежат наиболее близко к радиальному направлению изгиба (сердцевины 2 и 5 на рис. 2(а) и в табл. 1). На рис. 2(б) представлены максимальные (по модулю) измеренные значения РГЗ для трех радиусов изгиба МОВ. Сплошной кривой показана рассчитанная по формуле (3) зависимость максимально возможной для данного радиуса изгиба световода относительной РГЗ между центральной и боковой сердцевинами  $\delta\tau_{k-0\max}$  (то есть между сердцевинами 2 и 0 на рис. 1(а)).

Измеренные значения  $\delta\tau_{k-0\max}$  меньше расчетных. Это связано с тем, что поперечное сечение световода при намотке на катушку по всей длине световода или на определенных участках было ориентировано относительно радиального направления изгиба не так, как показано на рис. 1(а), то есть центры сердцевин с максимальной  $\delta\tau_{k-0}$  не лежали точно на оси  $X$ . Тем не менее, измеренные значения  $\delta\tau_{k-0\max}$  для радиуса изгиба 25 мм существенно превышают значения для больших радиусов намотки.

Для борьбы с нежелательным возрастанием РГЗ при намотке световода с меньшим радиусом в процессе перемотки МОВ с катушки на катушку может быть применено закручивание световода вокруг его оси. Это приведет к изменению углов  $\phi_k$  для шести боковых сердцевин по длине световода от 0 до  $2\pi$ , что позволит подавить или даже полностью избежать нежелательного роста РГЗ.

Таким образом, в работе исследована разница величин оптических задержек между боковыми и центральной сердцевинами МОВ. Характер распределения РГЗ в боковых сердцевинах свидетельствует о том, что наличие этой разницы связано с изгибом световода. При снижении радиуса изгиба происходит возрастание РГЗ. Для устранения нежелательного возрастания РГЗ при намотке МОВ с меньшим радиусом при перемотке световода необходимо применять закручивание вокруг его оси для того, чтобы ориентация поперечного сечения изменялась по длине световода.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI60715X0138).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. Inao, T. Sato, S. Sentsui, et al., in: *Proceedings of Optical Fiber Communication, Washington, D. C., United States, 1979*, WB1; <http://doi.org/10.1364/OFC.1979WB1>.
- [2] I. Gasulla, J. Capmany, *IEEE Photonics Journal* **4**, 877 (2012).
- [3] S. Garcia and I. Gasulla, *Opt. Express* **23**, 2403 (2015).

- [4] D. Marcuse, *Appl. Opt.* **21**, 4208 (1982).
- [5] S. Li, D. L. Butler, M-J. Li, et al., in: *Proceedings of IEEE Photonics Conference, Bellevue, Washington United States, 2013*, TuF3.2; doi 10.1109/IPCon2013.6656545.
- [6] А. В. Белов, Е. М. Дианов, А. С. Курков, *Квантовая электроника* **13**(8), 1680 (1986).
- [7] X. Zhang, C. Zhang, S. Hu, et al., *Optik* **122**, 928 (2011).
- [8] А. Е. Левченко, А. С. Курков, С. Л. Семенов, *Квантовая электроника* **35**(9), 835 (2005).

Поступила в редакцию 15 июня 2016 г.