

ВАРИАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ТОКА НА СВЕТОВОДАХ ТИПА TWIST И SPUN

Ловчий И.Л.

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения
г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.
E-mail: lovchy@nioep.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16174

В волоконно-оптических датчиках тока (ВОДТ) используются специальные световоды типа *twist* и *spun*, отличающиеся поляризационными параметрами [1]. Оба световода характеризуются очень сильными внутренними двулучепреломлениями (ДЛП): первый – циркулярным, второй – линейным, со спиралевидной структурой. Наличие сильного упорядоченного ДЛП нивелирует влияние внешних упруго-оптических эффектов на проявление эффекта Фарадея – физического механизма измерения тока, однако ограничивает чувствительность датчика относительно чувствительности датчика с идеальным изотропным световодом, в котором имеет место только фарадеевское ДЛП.

Для моделирования параметров датчиков использовался формализм сферы Пуанкаре. Моделирование проводилось на основе анализа траектории изменения состояния поляризации (СП) света, распространяющегося вдоль чувствительного волоконного контура, при варьировании параметров световода, геометрии контура, величины магнитооптического (МО) эффекта [2, 3]. Волоконный световод представлялся в виде чередующейся совокупности предельно тонких сегментов - линейных (обусловленных встроенным или наведенными внешне упруго-оптическими эффектами) и циркулярных (обусловленных оптической активностью закрученного вокруг оси волокна или МО эффектом) фазовых пластин. Изменение СП после прохождения фазовых пластин определялось вращением на сфере начального положения поляризации на угол двулучепреломления, равный углу сдвига фаз ортогонально поляризованных компонент, вокруг быстрой оси двулучепреломления (оптической оси фазовой пластины). С выхода волокна излучение с измененным в соответствии с МО и упруго-оптическими эффектами состоянием поляризации умозрительно делилось анализатором – поляризационным делителем на две составляющие, обработка интенсивностей которых по определенному алгоритму позволяла оценить параметры чувствительности реального датчика. При численных расчетах использовалась среда графического программирования LabVIEW.

Поляризационные параметры *twist* световода определяются относительной величиной τ закрутки волокна вокруг оси и радиусом R изгиба волокна в контуре. Наиболее простая для реализации схема датчика – с однократным обходом светом чувствительного контура. Траектория изменения СП вдоль световода представляется на сфере Пуанкаре окружностью, пересекающейся или касающейся с экватором [4]. При этом диапазон изменения широты СП зависит от ориентации плоскости волоконных витков в пространстве относительно направления поляризации света на входе волокна и составляет от $-\nu \div +\nu$ до $0 \div \pm 2\nu$, где угол ν определяется выражением:

$$\nu = \tan^{-1}(\beta_R/2\rho). \quad (1)$$

Здесь ρ - наведенная оптическая активность закрученного волокна, β_R – разность фаз ортогонально поляризованных компонент линейного ДЛП, вызванного изгибом стекловолокна в пространстве при формировании чувствительного контура датчика ($\rho \approx 0,079\tau$ [5], $\beta_R \approx 0,005/R$ [6] – здесь и далее анализируется кварцевое волокно диаметром 125 мкм на длине волны света 0,66 мкм).

Результаты моделирования показали, что при небольших МО углах поворота средняя чувствительность η ВОДТ с *twist* световодом определяется выражением:

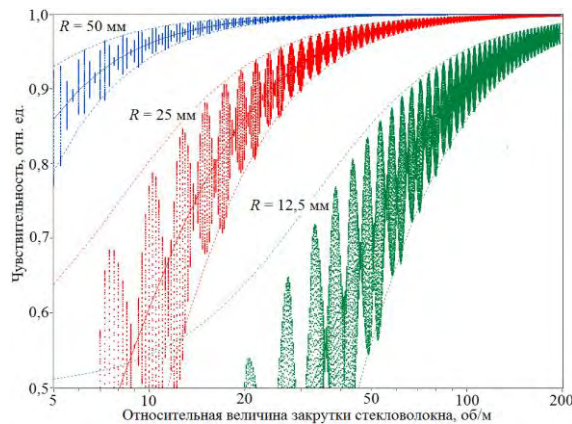
$$\bar{\eta} = \cos^2(\tan^{-1}(\beta_R/2\rho)), \quad (2)$$

При вращении плоскости чувствительного контура ВОДТ в пространстве вариации чувствительности относительно среднего значения лежат в диапазоне $\pm \Delta\eta$:

$$\Delta\eta = 0,5 \bar{\eta} (\beta_R/2\rho)^2. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены результаты моделирования чувствительности ВОДТ (вертикальные массивы точек) при вращении световодных витков в пространстве и расчета чувствительности по формулам (2) и (3) (сплошные и пунктирные кривые) в зависимости от величины закрутки стекловолокна. Диапазон вращения витков в пространстве при моделировании - $0 \div 90^\circ$ через 1° , шаг изменения закрутки волокна – четверть оборота на метр.

Анализ рисунка показывает, что при $2\rho \geq \beta R/2$ результаты расчета по формулам (3) и (4) полностью соответствуют вариациям чувствительности исходя из моделирования и анализа СП света на выходе волокна.



Поляризационные параметры *strip* световода определяются периодом биений L_β встроенного линейного ДЛП и периодом вращения L_τ его оси, а также радиусом изгиба волокна в контуре. При начальном положении оси ДЛП волокна $\pm \pi/4$ СП отклоняется от экватора сферы Пуанкаре на угол $\pm \chi$:

$$\chi = \tan^{-1}(L_\tau/2L_\beta), \quad (4)$$

с периодом колебаний T , достаточно точно удовлетворяющим эмпирическому выражению:

$$T = \pi \tan \chi \sin \chi (\cos \chi)^{1/2}. \quad (5)$$

При ином начальном положении оси ДЛП колебательная кривая («змейка») искажается по форме и смещается от экватора к одному из полюсов сферы.

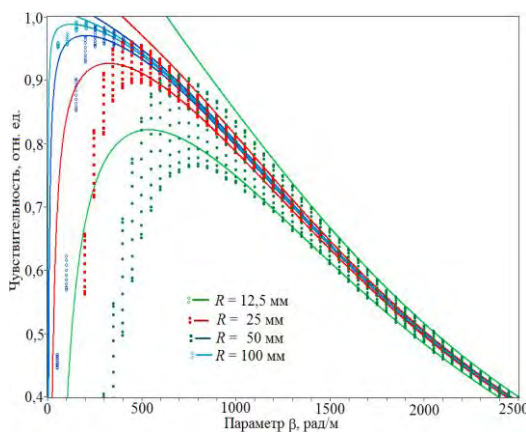
Для стабилизации рабочей точки поляриметрический датчик тока на *strip* световоде принципиально строится по двухпроходной схеме. Один из вариантов схемы подробно описан в [3]. Моделирование показывает, что средняя чувствительность ВОДТ в такой схеме определяется выражением:

$$\bar{\eta} = \cos^2 \chi = \cos^2(\tan^{-1}(L_\tau/2L_\beta)), \quad (6)$$

с диапазоном вариаций при вращении чувствительного контура в пространстве $\pm \Delta\eta$:

$$\Delta\eta = 2\bar{\eta} L_\beta/L_R = 2\bar{\eta} \beta R/\beta. \quad (7)$$

Здесь β - разность фаз встроенного ДЛП, L_R - длина биений ДЛП, наведенного изгибами волокна.



На рис. 2 для нескольких радиусов измерительного контура представлены результаты моделирования чувствительности датчика (точки) и расчета диапазонов возможных колебаний чувствительности по формулам (6) и (7) (кривые линии по границам диапазонов) при значении параметра $\gamma = 2\pi/L_\tau = 1000$ рад/м и варьировании параметра β . Вертикальные группы точек соответствуют вариациям чувствительности при вращении плоскости волоконных витков в пространстве в диапазоне $0 \div 90^\circ$ с шагом 9° , шаг изменения параметра β при моделировании - 50 рад/м.

Анализ рисунка показывает, что при выполнении условия $\beta^2 > 20\gamma\beta R$ результаты расчета и моделирования практически совпадают. Теоретические результаты хорошо коррелируют с результатами экспериментов на макетном образце ВОДТ [3].

Рис. 2. Чувствительность ВОДТ со *strip* световодом

Литература

1. Ulrich R., Simon A. *Appl. Opt.* 18, 2241-2251 (1979)
2. Lovchii I.L. *J. Opt. Technol.* 77, 376-386 (2010)
3. Lovchii I.L. *J. Opt. Technol.* 77, 755-761 (2010)
4. Rashleigh S.C., Ulrich R. *Appl. Phys. Lett.* 34, 768-770 (1979)
5. Smith A.M. *Appl. Opt.* 19, 2606-2611 (1980)
6. Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhoff W. *Opt. Lett.* 5, 273-275 (1980)