

УДК 621.373.535.8.

ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНОЙ СВЯЗИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ МОД НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ И КОЛЬЦЕВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

III. СДВИГ НУЛЯ В ВОЛОКОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ С ДЕПОЛЯРИЗАТОРАМИ НЕМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Г. Б. Малыкин, И. М. Нефёдов, В. И. Позднякова, И. А. Шерешевский

Предложен способ расчета сдвига нуля и фазингов интерференционного сигнала на выходе волоконного кольцевого интерферометра (ВКИ) с контуром из слабоанизотропного одномодового волоконного световода (ОВС), деполяризатором из анизотропного ОВС и с немонохроматическим источником излучения. Способ основан на разбиении длины волокна на отрезки, равные длине деполяризации излучения в ОВС. Впервые проведено теоретическое сравнение четырех схем ВКИ, все параметры которых одинаковы, за исключением места расположения деполяризатора. Сделаны численные оценки. Показано, что наиболее оптимальным, с практической точки зрения, является схема ВКИ с деполяризатором Лио, расположенным между поляризатором и контуром. При этом требования, предъявляемые к точности сборки элементов деполяризатора Лио, существенно ниже, чем в других схемах ВКИ.

Во второй части данной работы было показано, что сдвиг нуля в волоконном кольцевом интерферометре (ВКИ) с контуром из слабоанизотропного одномодового волоконного световода (ОВС) будет порядка десятков град/час даже при использовании в схеме ВКИ высококачественного поляризатора с коэффициентом экстинции по амплитуде $\epsilon = 10^{-3}$ и широколосного источника излучения со спектральной шириной $\Delta\lambda = 10$ нм, что является следствием значительной связь ортогонально поляризованных мод в слабоанизотропном ОВС. Отметим, что несмотря на то, что ВКИ с контуром из анизотропного ОВС позволяют получить существенно меньший сдвиг нуля [1, 2], в настоящее время значительная часть ВКИ создается на основе слабоанизотропных ОВС, поскольку создание цельноволоконного ВКИ на основе анизотропных ОВС технически очень сложно.

Для уменьшения сдвига нуля в ВКИ с контуром из слабоанизотропного ОВС применяются деполяризаторы немонохроматического излучения различных типов — простой, состоящий из одного отрезка анизотропного ОВС, или более сложный деполяризатор Лио [3, 4], состоящий из двух отрезков анизотропного ОВС с соотношением длин 1 : 2, сваренных под углом 45°. В литературе предлагались различные варианты расположения деполяризатора в схеме ВКИ: перед поляризатором [5], между поляризатором и контуром [6–8], в самом контуре, вблизи входного делителя [9, 10]. В работе [11] предлагается устанавливать деполяризатор в середине контура ВКИ (отметим, что в [11] рассмотрен деполяризатор монохроматического излучения Биллингса [4]). Как показано в работах [7, 8], деполяризатор приводит к уменьшению сдвига нуля в ВКИ, при прочих равных условиях, в $\sqrt{h\ell_{\text{деп}}}$ раз, где h — параметр случайной связи ортогонально поляризованных мод (м^{-1}), $\ell_{\text{деп}} = \lambda^2 / \Delta\lambda\Delta n$ — длина деполяризации излучения в ОВС, из которого изготовлен деполяризатор (λ — длина волны источника излучения, $\Delta\lambda$ — его спектральная ширина, Δn — разность показателей преломления для ортогональных мод ОВС).

В работе [12] показано, что для анизотропных ОВС, для которых выполняется условие $h\ell_{\text{деп}} \ll 1$, предельная степень поляризации излучения p , при его распространении через достаточно длинный отрезок ОВС, составляет $\sqrt{h\ell_{\text{деп}}}$, таким образом, деполяризатор приводит к уменьшению сдвига нуля в ВКИ обратно пропорционально остаточной степени поляризации излучения в волокне, из которого он изготовлен. В работах [13, 14] на выходе деполяризатора была получена очень малая степень поляризации излучения $p = 4 \pm 2 \cdot 10^{-4}$, что теоретически позволяет уменьшить сдвиг нуля в ВКИ в $2,5 \cdot 10^3$ раз.

В работе [8] показано, что в случае установки деполяризатора Лио между поляризатором и контуром ВКИ, он будет не только приводить к уменьшению сдвига нуля, но и существенно уменьшать фединги интенсивности интерференционного сигнала (полезного сигнала) на выходе ВКИ, которые, как показано во второй части данной работы, могут быть значительны.

Вместе с тем, в литературе отсутствует как теоретическое, так и экспериментальное сравнение сдвига нуля и изменения величины полезного сигнала ВКИ с одинаковыми параметрами, отличающимися только местом расположения деполяризатора. Из общих соображений можно только сделать вывод о том, что в случае расположения деполяризатора до поляризатора, он никоим образом не может привести к стабилизации величины полезного сигнала. Следует отметить, что проведение соответствующих расчетов методом "квазиосей" [8], для случая расположения деполяризатора внутри контура ВКИ, довольно трудоемко.

Целью настоящей работы является провести сравнение влияния деполяризатора на сдвиг нуля в ВКИ и стабилизацию величины полезного

сигнала для различных его расположений в схеме ВКИ с помощью методов, развитых в I и II частях данной работы, то есть путем численного моделирования. При этом, в соответствии с выводами I части данной работы, длина деполяризатора выбиралась такой, чтобы фазовая задержка в нем превышала фазовую задержку в контуре ВКИ, и, следовательно, восстановление поляризации в контуре ВКИ не могло возникнуть.

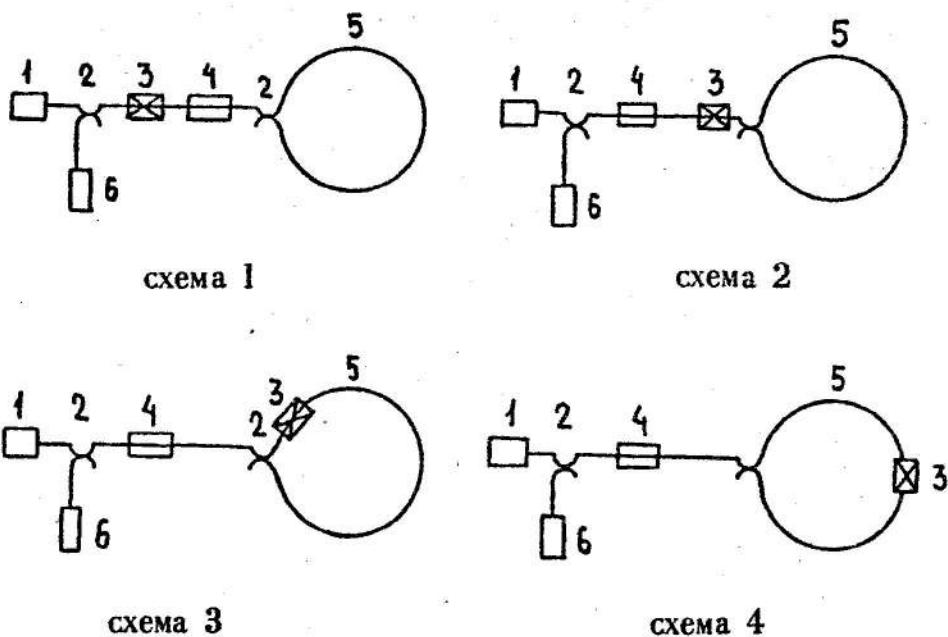


Рис. 1. Зависимость интенсивности I и дрейфа нуля ВКИ $\Delta\Omega$ от угла разворота направления одной из собственных осей ОВС α_1 на входе контура ВКИ относительно направления пропускания поляризатора ($\alpha_2 = 0$).

Расчет параметров ВКИ — математического ожидания сдвига нуля $\bar{\Omega}$ и величины полезного сигнала \bar{I} , их среднеквадратичных отклонений от среднего значения $\sigma\Omega$ и σI , а также максимального и минимального значений Ω_{\max} , Ω_{\min} и I_{\max} , I_{\min} проводился для четырех возможных схем ВКИ (см. рис. 1): 1 — деполяризатор расположен перед поляризатором; 2 — деполяризатор расположен между поляризатором и контуром; 3 — деполяризатор расположен внутри контура, вблизи входного делителя; 4 — деполяризатор расположен в середине контура. Параметры ВКИ выбраны следующие: источник излучения — $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$, $\Delta\lambda = 10 \text{ нм}$; поляризатор — $\epsilon = 10^{-3}$; контур длиной $L = 500 \text{ м}$ из слабоанизотропного ОВС с $\Delta n_2 = 10^{-6}$ и $h_2 = 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ ($\ell_{\text{деп}_2} = 64 \text{ м}$, $h_2 \ell_{\text{деп}_2} = 0,64$), диаметр намотки контура $D = 10 \text{ см}$; деполяризатор из анизотропного ОВС с

$\Delta n_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ и $h_1 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ ($\ell_{\text{деп}_1} = 20 \text{ см}$, $h_1 \ell_{\text{деп}_1} = 10^{-5}$). Поскольку для контура $N_2 = L/\ell_{\text{деп}_2} = 500 \text{ м}/64 \text{ м} = 8$, то, в соответствии с выводами I части данной работы, длина деполяризатора была выбрана $12\ell_{\text{деп}_1} = 2,4 \text{ м}$ для простого деполяризатора и $(12 + 24)\ell_{\text{деп}_1} = 7,2 \text{ м}$ для деполяризатора Лио.

Таблица 1

Схема ВКИ	1	2	3	4
Параметры ВКИ				
I_{\max}	0,9	0,72	0,485	0,485
I_{\min}	0,25	0,28	0,474	0,474
\bar{I}	0,56	0,50	0,479	0,479
σI	0,1	0,07	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\Omega$, град/час	1,5	0,5	0,5	0,5
$\sigma\Omega$, град/час	0,3	0,15	0,1	0,1

Ввиду того, что подстройку состояния поляризации излучения на входе ВКИ с деполяризатором осуществлять несколько сложнее, чем в ВКИ без деполяризатора, полагаем следующее состояние поляризации на входе ВКИ: $S_1 = 0,925$, $\sqrt{S_2^2 + S_3^2} = 0,4$ (при этом 4% от полной интенсивности излучения падает перпендикулярно оси пропускания поляризатора).

Поскольку для схемы 1 деполяризатор расположен до поляризатора и не может влиять на фединги величины полезного сигнала, то нет принципиальной разницы между воздействием на работу ВКИ простого деполяризатора и деполяризатора Лио в случае, если одна из осей анизотропии первого совпадает с направлением пропускания поляризатора. Поэтому для схемы 1 расчеты проводились для простого деполяризатора, для схем 2, 3, 4 — для деполяризатора Лио.

Результаты численного моделирования приводятся в таблице 1. Как и следовало ожидать, среднее значение сдвига нуля $\bar{\Omega} = 0$, а его максимально возможные отклонения $\Delta\Omega$ симметричны относительно нуля для

всех схем ВКИ. Отметим, что результаты нашего расчета по $\Delta\Omega$ для схемы 2 совпадают с результатами оценки для этой схемы, полученной в работе [8] с точностью 10%. Величины I_{\max} и I_{\min} для схемы 2 также довольно близки к результатам работы [8]. Это свидетельствует о том, что предложенная нами математическая модель описания ВКИ с деполяризатором вполне адекватна.

Результаты численного моделирования показывают, что сдвиг фазы ВКИ $\Delta\varphi$ для всех четырех схем пропорционален ε и величине $\sqrt{h_1 \ell_{\text{деп}_1}}$ для ОВС деполяризатора, что соответствует результатам работ [7, 8], и практически не зависит от величины $\sqrt{h_2 \ell_{\text{деп}_2}}$ ОВС контура, при условии $h_2 \ell_{\text{деп}_2} \sim 1$, и длины контура L , при условии $L/\ell_{\text{деп}_2} \geq 2$. Поскольку величина максимального дрейфа нуля ВКИ $\Delta\Omega = 2 \cdot 10^5 \frac{\Delta\varphi \lambda_c}{2\pi L D}$ град/час, то выгодно увеличивать длину контура. (Отметим, что в нашей модели ВКИ не учитываются потери излучения в ОВС и отношение полезного сигнала к дробовым и тепловым шумам фотоприемника. В реальном случае имеется оптимальная длина контура.) Результаты численного моделирования показывают также, что как изменение величины полезного сигнала, так и дрейф нуля ВКИ практически не зависят от углов ориентации собственных осей ОВС α_1 и α_2 на входе контура относительно направления пропускания поляризатора, а также, для схем 2 и 4, от угла ориентации деполяризатора Лио θ .

Из таблицы 1 видно, что, как и следовало ожидать, схема 1 обладает наихудшими параметрами: величина полезного сигнала может меняться в 3,6 раза, дрейф нуля в 3 раза больше, чем в схемах 2–4. Поэтому в дальнейшем схема 1 обсуждаться не будет. В схемах 3, 4 фединги (изменения интенсивности) полезного сигнала очень малы и составляют 2,5%. Однако, в схеме 3 величины \bar{I} , I_{\max} и I_{\min} сильно зависят от угла θ (в таблице 1 приведены параметры ВКИ для схемы 3 при $\theta = 0$). Так, при $\theta = 45^\circ$ эти величины уменьшаются в 2 раза, по сравнению со случаем $\theta = 0$, что можно объяснить наличием отрезка ОВС с сильным двупреломлением и собственными осями, ориентированными под углом 45° к направлению пропускания поляризатора, на входе контура ВКИ. В схеме 4, когда деполяризатор Лио расположен в середине контура, величина полезного сигнала не зависит от θ . Таким образом, в случае расположения деполяризатора Лио внутри контура ВКИ, он примерно в 40 раз лучше стабилизирует величину полезного сигнала, чем в случае, если он расположен между поляризатором и контуром.

Были проведены также расчеты по влиянию угла состыковки элементов деполяризатора Лио β , в случае его отличия от 45° , на параметры ВКИ. При $\beta = 40^\circ$ для схемы 2 дрейф нуля ВКИ $\Delta\Omega$ практически не возрастает по сравнению с $\beta = 45^\circ$, для схем же 3, 4 дрейф нуля возрастает примерно в 7 раз. Изменения величины полезного сигнала при $\beta = 40^\circ$ практически такие же, как и при $\beta = 45^\circ$ для всех схем 2–4.

Возникает вопрос, какая же схема ВКИ является оптимальной? С точки зрения стабилизации величины полезного сигнала оптимальной является схема 4. Но, если технология сборки деполяризатора Лио не позволяет с высокой точностью (порядка $0,5^\circ - 1^\circ$) контролировать угол $\beta = 45^\circ$, то следует остановиться на схеме 2, поскольку важнейшей характеристикой ВКИ является дрейф нуля. В настоящее время существуют системы обработки сигнала на выходе ВКИ, которые допускают изменение величины полезного сигнала в 10–20 раз без изменения масштабного коэффициента [15], что превышает изменение полезного сигнала в схеме 2 (в 2,5 раза).

Отметим, что при использовании предложенного В. Н. Листвиным многоэлементного деполяризатора, описание которого приводится в [8], требования к точности условия $\beta = 45^\circ$ существенно уменьшаются, что позволяет использовать схему 4.

Рассмотрим теперь влияние несовершенства светоделителя на входе контура на дрейф нуля в ВКИ. В работе [16] показано, что при наличии связи поляризационных мод, которой характеризуются делители из анизотропного ОВС [17], дрейф нуля в ВКИ существенно возрастает. Напомним, что в рассматриваемой в данной работе модели ВКИ, из анизотропного ОВС выполнен только деполяризатор, все остальные элементы ВКИ, в том числе и светоделители, выполнены из слабоанизотропного ОВС. Как показано в [18], полированные светоделители из слабоанизотропного ОВС имеют различный коэффициент деления (до 20%) в зависимости от азимута линейно поляризованного излучения на их входе. Экспериментальное исследование изготовленных в ИПФ РАН полированных светоделителей из слабоанизотропного ОВС, выполненные В. М. Геликовым, показали, что это различие составляет 1–2% и не превышает 5% для худших образцов.

Численное моделирование, проведенное для схем 2, 3, 4, с учетом различного коэффициента деления светоделителя на входе контура ВКИ, отличающегося на 5% для ортогональных линейных состояний поляризации излучения (в этом случае светоделитель эквивалентен "плохой" поляризационной призме, а его матрица Джонса (без учета связи ортогональных мод в делителе) для различных направлений разветвления имеет вид:

$$\frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 \pm e & 0 \\ 0 & 1 \mp e \end{vmatrix},$$

где в данном случае $e = 0,05$), показало, что при этом как дрейф нуля, так и изменения величины полезного сигнала не возрастают, по сравнению со случаем идеального светоделителя. В случае же различия коэффициента деления световодителя для ортогональных линейных поляризаций на 60% ($e = 0,6$), расчеты показывают, что сдвиг нуля в схемах 3, 4 возрастает в 2–3 раза, в схеме 2 заметного увеличения сдвига нуля нет, что можно объяснить в рамках данной модели тем, что в этих схемах сильно уменьшается величина I (в 2,5 раза в схеме 3 и в 5 раз

в схеме 4), а в схеме 2 *I* не изменяется. Такой результат можно объяснить следующим образом: равенство нулю недиагональных элементов матрицы Джонса светоделителя, а также отсутствие фазовых задержек в диагональных элементах приводят к тому, что в данной модели различие коэффициента деления светоделителей для ортогональных линейных поляризаций не может привести к дополнительному (аддитивному) сдвигу нуля ВКИ, а может лишь незначительно его изменить вследствие изменения полезного сигнала. Другое объяснение незначительного изменения сдвига нуля для схем 3 и 4 может быть следующим. Как показано в работе [19], наличие двух поляризаторов в схеме ВКИ, в данном случае основного, с коэффициентом экстинции $\epsilon \ll 1$, и "плохого" поляризатора — светоделителя — с $\epsilon \sim 1$, эквивалентно одному поляризатору, детерминант матрицы Джонса которого равен произведению детерминантов матриц обоих поляризаторов, и, как нетрудно показать, близок по величине к детерминанту основного поляризатора. Однако, в схеме 2 между поляризатором и светоделителем находится деполяризатор Лио, и, следовательно, наличие основного поляризатора и светоделителя нельзя свести к одному, эквивалентному двум. Тем не менее, как показывает расчет, для схемы 2 сдвиг нуля не возрастает до больших значений различия коэффициента деления светоделителя для ортогональных линейных поляризаций, чем для схем 3, 4.

Можно предположить, что учет того факта, что светоделитель является распределенной системой, может привести к результатам, показывающим влияние различия коэффициента деления для ортогональных линейных поляризаций на увеличение дрейфа нуля ВКИ. Этот вопрос требует дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, предложенный в ч. 1 и 2 данной работы метод численного моделирования находит применение и при расчете дрейфа нуля таких сложных интерферометров, как ВКИ с контуром из слабоанизотропного ОВС и деполяризаторами разных типов из анизотропного ОВС. Результаты численного моделирования показывают, что оптимальной является схема ВКИ с деполяризатором Лио, расположенным между поляризатором и контуром. В этом случае дрейф нуля ВКИ будет минимален.

В заключение авторы выражают благодарность И. А. Андроновой и В. Н. Листвину за обсуждение результатов работы, А. А. Бетину — за содействие работе, Л. А. Мельникову — за ряд полезных замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козел С. М., Листвин В. Н., Шаталин С. В., Юшкайтис Р. В. // Опт. и спектр., 1986. Т. 61. Вып. 6. С. 1295.
2. Малыкин Г. Б. // Изв. вузов. Радиофизика, 1991. Т. 34. № 6. С. 817.

3. Lyot B. // Annales d'observatoire d'astronomie de Paris. Mondon, 1929. V. 8. P. 102.
4. Billings B. H. // J. Opt. Soc. Amer., 1951. V. 41. N 12. P. 966.
5. Moeller R. P., Burns W. K. // Electron. Lett., 1983. V. 19. N 5. P. 187.
6. Jones J., Parker J. W. // Electron. Lett., 1986. V. 22. N 1. P. 854.
7. Листвин В. Н., Логозинский В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика, 1990. Т. 34. N 9. С. 1001.
8. Малыкин Г. Б. // Изв. вузов. Радиофизика, 1992. Т. 35. N 2. С. 189.
9. Fredricks R. J., Ulrich R. // Electron. Lett., 1984. V. 20. N 8. P. 330.
10. Bohm K., Marten P., Petermann K., Weidel E. // Electron. Lett., 1981. V. 17. N 10. P. 352.
11. Алексеев Э. И., Базаров Е. Н. и др. // ЖТФ, 1985. Т. 55. Вып. 8. С. 1648.
12. Залогин А. Н., Козел С. М., Листвин В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика, 1986. Т. 29. N 2. С. 243.
13. Burns W. K., Moeller R. P. // Optics Letters, 1983. V. 3. N 3. P. 195.
14. Moeller R. P., Burns W. K. // Electron. Lett., 1983. V. 19. N 5. P. 187.
15. Kim B. Y., Shaw H. J. // Optics Letters, 1984. V. 9. N 9. P. 263.
16. Фадеев А. В. // Изв. вузов. Приборостроение, 1990. Т. 33. N 8. С. 69.
17. Yokohama I., Noda J., Okamoto K. // J. Lightwave Techn., 1987. V. LT-5. N 7. P. 910.
18. Nayar B. K., Smith D. R. // Optics Letters, 1983. V. 8. N 10. P. 543.
19. Козел С. М., Колесов Ю. И., Листвин В. Н., Шаталин С. В. // Опт. и спектр., 1985. Т. 59. Вып. 1. С. 180.

Институт прикладной физики АН
России

Поступила в редакцию
24 июня 1992 г.

**THE EFFECT OF ORTHOGONAL MODE RANDOM COUPLING ON
POLARIZATION CHARACTERISTICS OF SINGLE-MODE FIBER
LIGHTGUIDES (SMFL) AND SMFL-BASED RING INTERFEROMETERS**

**PART III. ZERO DRIFT IN FIBER RING INTERFEROMETERS WITH
NONMONOCHROMATIC RADIATION DEPOLARIZERS**

G. B. Malykin, I. M. Nefedov, V. I. Pozdnyakova, I. A. Shereshevsky

The technique to calculate zero drift and Feeding interference signal at the output of a fiber ring interferometer (FRI) with a weakly anisotropic single-mode fiber lightguide (SMFL) as a contour and a source of monochromatic

radiation was suggested. This technique is based on dividing the fiber into the parts equal in length to SMFL radiation depolarization. Four schemes of FRI whose parameters are the same (except for the location of depolarizer) were theoretically compared. Numerical simulation was made. The scheme of FRI with a Lyot depolarizer placed between the polarizer and the contour was shown to be the most efficient. The requirements set to the accuracy of the unit assembly for Lyot depolarizer are much lower than those set for other FRI.