

Метод определения поляризационной невязимности в волоконном кольцевом интерферометре

И.А.Андропова, В.М.Геликонов, Г.В.Геликонов

Предложен метод обнаружения поляризационной невязимности волоконных кольцевых интерферометров (ВКИ) с использованием вращающегося поляризатора на выходе интерферометра перед фотоприемником. Теоретически и экспериментально показано, что критерием поляризационной невязимности является отсутствие сигнала при любом положении оси пропускания поляризатора на выходе ВКИ. Предложено проводить контроль соосной юстировки анизотропных элементов ВКИ в процессе сборки для обеспечения поляризационной невязимности по отсутствию сигнала на выходе вращающегося поляризатора. Показано также, что при выполнении условий поляризационной невязимности сигнал с выхода светоделиителя, расположенного непосредственно на выходе волоконного контура, несет информацию о фазовых характеристиках светоделиителя.

Ключевые слова: волоконный кольцевой интерферометр, поляризационная невязимность, фазовые характеристики светоделиителя.

К настоящему времени хорошо известно использование эффекта Саньяка в волоконных кольцевых интерферометрах (ВКИ) для измерения скорости вращения. Разность фаз Φ_s на выходе интерферометра связана с угловой скоростью вращения Ω_s соотношением [1]

$$\Phi_s = \frac{4\pi^2 ND^2}{\lambda_0 c_0} \Omega_s, \quad (1)$$

где D – диаметр катушки; N – число витков; λ_0 и c_0 – длина волны и скорость света соответственно. Одной из основных причин появления дополнительной (паразитной), не связанной с вращением разности фаз в сигнале интерференции встречных волн на выходе кольцевого интерферометра является поляризационная невязимность. Она возникает вследствие отклонения от соосной юстировки осей анизотропии элементов кольцевого интерферометра. Расчету и экспериментальному исследованию поляризационной невязимности для различных схем ВКИ посвящен ряд работ [2–4]. Рассмотрены пути уменьшения влияния этих эффектов на выходной сигнал за счет введения в схему поляризатора либо деполаризатора излучения (рис. 1), качество которых определяет степень подавления нежелательных эффектов.

В наиболее общем виде выражение для невязимной поляризационной фазы через элементы матрицы Джонса ВКИ приведено в работе [4]. Из анализа результатов этой работы следует, что эффекты поляризационной невязимности отсутствуют в двух случаях. В первом случае схема интерферометра удовлетворяет условию поляризационной невязимности, т. е. имеет место равенство недиагональных элементов матрицы Джонса ВКИ, и любое изменение поляризации излучения на входе интерферомет-

ра не приводит к появлению паразитного сигнала. Во втором случае матрица Джонса ВКИ не удовлетворяет условию поляризационной невязимности, недиагональные элементы матрицы не равны ($M_{12} \neq M_{21}$), но поляризация излучения на входе интерферометра такова ($A_x = A_y$ и $\langle A_x A_y \rangle = 0$), что невязимные эффекты не наблюдаются. Однако любое изменение поляризации на входе, возникшее в процессе прогрева либо механического воздействия, может повлечь за собой появление паразитного сигнала. Поэтому при сборке схемы необходимо проводить юстировку элементов таким образом, чтобы схема удовлетворяла условию поляризационной невязимности ($M_{12} = M_{21}$), что соответствует выполнению условия соосности всех анизотропных элементов ВКИ. Поскольку отсутствие паразитного сигнала на выходе не всегда является критерием невязимности, то представляет интерес рассмотрение методов контроля поляризационной невязимности ВКИ в процессе сборки и тестирования готовых образцов.

Целью данной работы является рассмотрение и экспериментальная демонстрация метода, позволяющего определять отклонение от условий поляризационной невязимности схемы ВКИ независимо от величины паразитного сигнала на его выходе, а также рассмотрение воз-

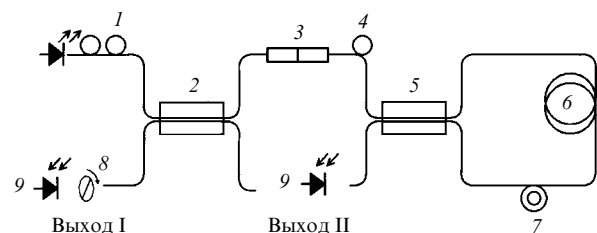


Рис. 1. Экспериментальная схема ВКИ:

1, 4 – элементы для управления поляризацией; 2, 5 – волоконные светоделиители; 3 – деполаризатор; 7 – фазовый модулятор; 6 – волоконный контур; 8 – вращающийся поляризатор; 9 – фотоприемники.

возможности измерения фазовых характеристик светоделителей с использованием ВКИ.

Метод, о котором пойдет речь, связан с влиянием поляризатора, размещенного перед фотоприемником, регистрирующим выходной сигнал ВКИ. Влияние такого поляризатора на выходной сигнал ВКИ впервые было обнаружено в [5]. В настоящей работе исследовались выходные характеристики ВКИ, собранного по схеме, показанной на рис. 1. В эксперименте изменялись поляризация излучения на входе волоконного контура и взаимный разворот осей анизотропии элементов ВКИ, что позволило более полно, чем в [5], исследовать влияние на выходной сигнал ВКИ положения выходного поляризатора и его вращения при различных поляризациях встречных волн и взаимных разворотах элементов ВКИ.

Исследованная схема интерферометра (рис. 1) отличалась от таковой, описанной в работах [6, 7], заменой поляризатора на деполяризатор. В схеме интерферометра были размещены два светоделителя 2, 5, деполяризатор 3 из анизотропного волокна, фазовый модулятор 7 и два поляризационных элемента 1, 4, с помощью которых можно было изменять поляризацию излучения на входе волоконного контура. Элемент 4 – это стандартный поляризационный элемент Лефевра [8]. В упрощенном виде он представлял собой волоконное колечко (аналог четвертьволновой пластинки), разворот оси которого приводил к изменению поляризации. Сдавливание и скручивание волокна на внутреннем выходе контура перед светоделителем позволяли изменять взаимное положение осей анизотропии контура и светоделителя. Контур ВКИ длиной 200 м из одномодового изотропного волокна был намотан на катушку радиусом 2 см, что создавало анизотропию контура, при которой излучение от суперлюминесцентного источника, распространяющееся по взаимно ортогональным осям анизотропии, на выходе становилось практически некогерентным.

При монтаже интерферометра были приняты меры для уменьшения исходной разъюстировки осей анизотропии контура и светоделителя. Регистрация интерференционного сигнала встречных волн на выходе ВКИ проводилась по амплитуде первой гармоники на частоте f_m фазовой модуляции, осуществляемой с помощью фазового модулятора 7. Сигнал модуляции после фотодетектирования и усиления наблюдался визуально на экране осциллографа. Сигнал на выходе был связан главным образом с эффектами поляризационной невязимности (вклад остальных невязимных эффектов был пренебрежимо мал).

Эксперименты состояли в следующем. Регулировкой поляризационных элементов и деформацией концов волоконного контура удавалось достичь «зануления» паразитного сигнала на выходе ВКИ (рис. 2, а), что соответствует выполнению соответствующих условий (см. [5])

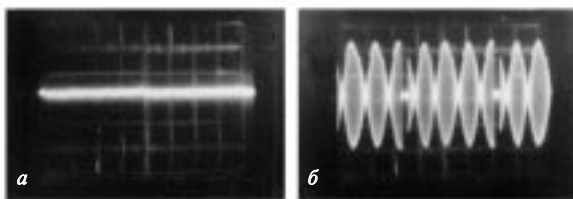


Рис. 2. Осциллограммы сигнала ВКИ без поляризатора на частоте фазовой модуляции (сигнал равен нулю) (а) и после установки на выходе ВКИ вращающегося поляризатора (б).

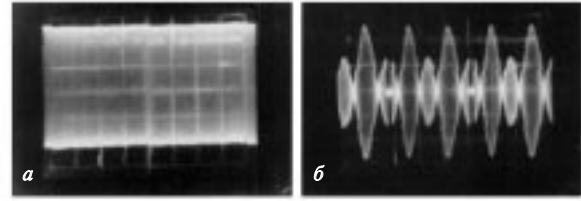


Рис. 3. Осциллограммы сигнала ВКИ без поляризатора на частоте фазовой модуляции (сигнал не равен нулю) (а) и после установки на выходе ВКИ вращающегося поляризатора (б).

для компонент полей на входе ВКИ ($A_x = A_y$ и $\langle A_x A_y \rangle = 0$). Размещение поляризатора на выходе ВКИ перед фотоприемником приводило к появлению сигнала на частоте f_m , амплитуда которого зависела от положения оси поляризатора таким образом, что вращение оси поляризатора с частотой Ω вызывало модуляцию амплитуды выходного сигнала на частоте 2Ω (рис. 2, б). В том случае, когда в отсутствие поляризатора на выходе ВКИ наблюдался сигнал на частоте фазовой модуляции (рис. 3, а), вращение оси поляризатора приводило к изменению амплитуды этого сигнала также с частотой, равной частоте вращения поляризатора Ω (рис. 3, б). Несмотря на регулировку поляризационных элементов вне контура, внесение поляризатора вызывало появление сигнала фазовой модуляции. Чтобы «занулить» этот сигнал, необходимо было изменить положение осей анизотропии одного из концов волокна внутри волоконного контура перед светоделителем за счет его деформации. Этот способ позволял уменьшить до нуля сигнал как без поляризатора, так и при размещении вращающегося поляризатора на входе фотоприемника.

Анализ экспериментальных результатов позволяет предложить качественное объяснение этого эффекта, которое состоит в том, что в первом случае изменение положения элементов, управляющих поляризацией, приводило к изменению поляризации излучения на входе, обеспечивавшему условия «зануления» выходного сигнала. Во втором случае скручивание или сдавливание волокна на одном из концов контура перед светоделителем позволяло изменять взаимное положение осей анизотропии контура и светоделителя и добиваться выполнения условий поляризационной взаимности интерферометра, т. е. равенства недиагональных коэффициентов. Таким образом, критерием поляризационной взаимности ВКИ является отсутствие на его выходе сигнала на частоте фазовой модуляции при любом положении наружного поляризатора перед фотоприемником.

Для подтверждения качественных объяснений результатов эксперимента был проведен расчет сигнала интерференции ВКИ с выхода I светоделителя после прохождения поляризатора перед фотоприемником. Расчет проводился методом матриц Джонса [4]. В общем случае матричное уравнение для компонент полей на выходе ВКИ после поляризатора на входе фотоприемника в заданной системе координат имеет вид

$$E^{\pm} = \hat{M}_p \hat{M}_k^{\pm} A, \quad (2)$$

где \hat{M}_k^{\pm} – матрицы ВКИ для встречных волн ($\hat{M}_k^{-} = \hat{M}_k^{+T}$); \hat{M}_p – матрица наружного поляризатора в заданной системе координат; $A = \{A_x, A_y\}$ и $E = \{E_x, E_y\}$ – век-

торы полей на входе и выходе соответственно. Матрицы имеют вид

$$\hat{M}_k^+ = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix}, \quad \hat{M}_p = \begin{vmatrix} \cos^2 \theta & \frac{\sin 2\theta}{2} \\ \frac{\sin 2\theta}{2} & \sin^2 \theta \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $M_{ij} = M'_{ij} + iM''_{ij}$ – элементы матрицы ВКИ; θ – угол между осью пропускания выходного поляризатора и осью ординат лабораторной системы координат; $M_{12} = M_0 + \Delta M$ и $M_{21} = M_0 - \Delta M$. Как следует из [2], сигнал на выходе фотоприемника на первой гармонике частоты фазовой модуляции, связанный с невязимными эффектами в ВКИ, определяется величиной $\text{Re } U_1$, а разность фаз на выходе ВКИ при $\Omega_s = 0$ есть $\Phi = \arctan(\text{Im } U_1 / \text{Re } U_1)$, где $U_1 = E_x^+ E_x^{-*} + E_y^+ E_y^{-*}$ – сигнал интерференции. Выражение для выходного сигнала ВКИ при отсутствии вращения после выходного поляризатора на первой гармонике частоты модуляции, полученное из решения уравнения (2) через элементы матриц \hat{M}^+ , имеет вид

$$\begin{aligned} \text{Im } U_1 &= (A_x^2 - A_y^2)(M_0'' \Delta M' - M_0' \Delta M'') \\ &+ A_x A_y \gamma \{ \cos \psi [\Delta M'' (M'_{11} - M'_{22}) + \Delta M' (M''_{22} - M''_{11})] \\ &- \sin \psi [\Delta M' (M'_{11} + M'_{22}) + \Delta M'' (M''_{22} + M''_{11})] \} \\ &+ \cos 2\theta \{ (A_x^2 + A_y^2)(M_0' \Delta M'' - M_0'' \Delta M') \\ &+ A_x A_y \gamma \cos \psi [\Delta M'' (M'_{11} + M'_{22}) - \Delta M' (M''_{11} + M''_{22})] \\ &+ A_x A_y \gamma \sin \psi [\Delta M'' (M'_{22} - M'_{11}) + \Delta M' (M''_{22} - M''_{11})] \} \\ &+ \sin 2\theta \{ A_x^2 (M''_{11} \Delta M' - M'_{11} \Delta M'') + A_y^2 (M''_{22} \Delta M'' \\ &- M''_{22} \Delta M') - 2A_x A_y \gamma \sin \psi (\Delta M' M'_0 + \Delta M'' M''_0) \}. \quad (4) \end{aligned}$$

где ψ – разность фаз между компонентами полей A_x и A_y на входе.

Выражение (4) получено для одной спектральной компоненты. Для демонстрации влияния на выходной сигнал широкополосности спектра излучения источника в (4) формально введен коэффициент γ , который характеризует степень когерентности компонент A_x , A_y . Коэффициент γ обращается в нуль при некогерентности полей. Анализ этого выражения показывает, что амплитуда сигнала на частоте модуляции на выходе ВКИ обращается в нуль только в том случае, когда матрица кольцевого интерферометра удовлетворяет условию поляризационной взаимности $M_{12} = M_{21}$, т. е. когда $\Delta M' = \Delta M'' = 0$.

В случае, когда $M_{12} \neq M_{21}$, сигнал на выходе ВКИ состоит из двух частей, каждая из которых зависит от разности недиагональных коэффициентов матрицы ВКИ. Выражение для $\text{Im } U_1$ содержит две части – U_1 и U_2 . Первая часть (U_1) не зависит от положения входного поляризатора (т. е. не зависит от θ) и является сигналом поляризационной невязимности без внешнего поляризатора (см. выражение (13) из работы [4]). Вторая часть (U_2) зависит от положения поляризатора и содержит члены, пропорциональные $\cos 2\theta$ и $\sin 2\theta$. При $U_1 = 0$ амплитуда выходного сигнала изменяется при вращении поляризатора ($\theta = \Omega t$) с частотой, равной удвоенной частоте вра-

щения 2Ω . При $U_1 \neq 0$ сложение U_1 и U_2 дает изменение амплитуды сигнала также и на первой гармонике частоты вращения поляризатора. Для сравнения с экспериментом был проведен расчет выходного сигнала на выходе вращающегося поляризатора для ВКИ с контуром из анизотропного волокна и с анизотропным светоделителем, рассмотренного в работе [4]. Фазовые характеристики светоделителя определяются параметрами $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_p$, $\Delta\psi = \psi_s - \psi_p$, характеризующими фазовую анизотропию при отражении и прохождении светоделителя. Оси анизотропии волокна на входе и выходе контура составляют с осями анизотропии светоделителя углы α и β ($\alpha \neq \beta$). Следуя работе [4], матричные элементы ВКИ из анизотропного волокна с линейным двулучепреломлением (с учетом характеристик светоделителя) в системе координат, связанной с осями анизотропии светоделителя, запишем в виде

$$\begin{aligned} M'_{11} &= \cos \frac{kL}{2} \cos(\alpha + \beta) \cos(\Delta\varphi + \Delta\psi) \\ &- \sin \frac{kL}{2} \cos(\alpha - \beta) \sin(\Delta\varphi + \Delta\psi), \\ M''_{11} &= \sin \frac{kL}{2} \cos(\alpha - \beta) \cos(\Delta\varphi + \Delta\psi) \\ &+ \cos \frac{kL}{2} \cos(\alpha + \beta) \sin(\Delta\varphi + \Delta\psi), \\ M'_0 &= \cos \frac{kL}{2} \sin(\alpha + \beta) \cos(\Delta\varphi + \Delta\psi) \\ &- \sin \frac{kL}{2} \sin(\alpha - \beta) \sin(\Delta\varphi - \Delta\psi), \\ \Delta M'' &= \sin \frac{kL}{2} \sin(\alpha - \beta) \cos(\Delta\varphi - \Delta\psi) \\ &+ \cos \frac{kL}{2} \sin(\alpha + \beta) \sin(\Delta\varphi - \Delta\psi), \end{aligned} \quad (5)$$

где L – длина волокна; $k = (k_x + k_y)/2 = (\pi n_x + \pi n_y)/\lambda$; n_x и n_y – показатели преломления вдоль быстрой и медленной осей волокна; $M_{22} = -M_{11}^*$. Подставляя (5) в (4), получаем выражение для огибающей сигнала на выходе I на частоте фазовой модуляции, который согласно [4] определяется $\text{Im } U_1$. Это выражение при условии $\langle E_x E_y \rangle = 0$ записывается в виде

$$\text{Im } U_1 = (A_x^2 - A_y^2)S + (A_x^2 + A_y^2)(S \cos 2\theta + R \sin 2\theta), \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin 2(\Delta\varphi - \Delta\psi), \\ R &= \sin 2\beta \cos 2\alpha \sin 2\Delta\varphi - \sin 2\alpha \cos 2\beta \sin 2\Delta\psi. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) видно, что оба коэффициента S и R обращаются в нуль при $\alpha = \beta = 0$, т. е. при соосной юстировке осей анизотропии светоделителя и волоконного контура. Без этой юстировки ($\alpha \neq \beta \neq 0$) дополнительным условием для «зануления» коэффициента S является отсутствие потерь в светоделителе ($\Delta\varphi - \Delta\psi = 0$); для «зануления» коэффициента R этого условия недостаточно, необхо-

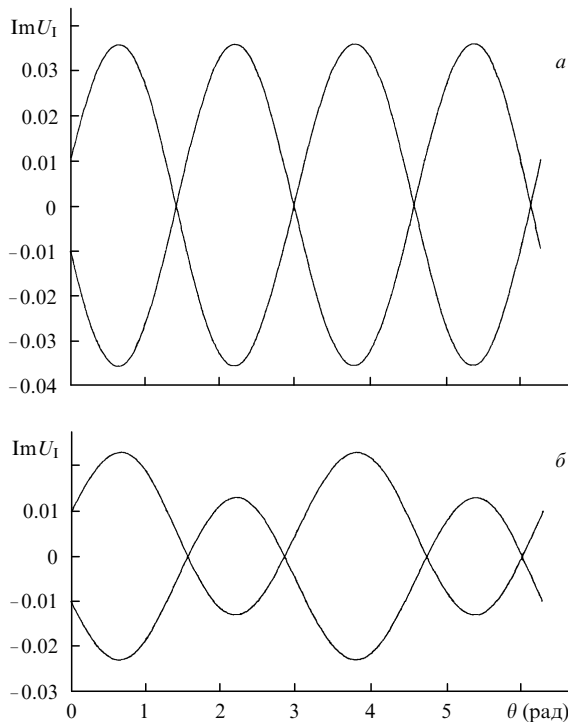


Рис.4. Огибающие сигнала фазовой модуляции на выходе ВКИ после вращающегося поляризатора $\text{Im}U_I$, полученные из расчета по формуле (6) для $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\Delta\varphi = 1.28^\circ$, $\Delta\psi = 0.83^\circ$ при $E_x = E_y$, $R = 0.017$, $S = 0.005$ (без поляризатора сигнал равен нулю) (а) и при $E_x = 1$, $E_y = 0.1$, $R = 0.017$, $S = 0.005$ (без поляризатора сигнал не равен нулю) (б).

дим также отсутствие фазовой анизотропии светоделиителя ($\Delta\varphi = \Delta\psi = 0$) [4].

С использованием ЭВМ было проведено численное табулирование выражения (6) в зависимости от угла θ , определяющего положение поляризатора. Для оценок были использованы параметры дискретного светоделиителя с потерями 2%, для которого отклонения разностей $\varphi_s - \psi_s$ и $\varphi_p - \psi_p$ от $\pi/2$ составили соответственно 0.57 и 0.4 угловых градуса на процент потерь. Остальные параметры, принятые при расчете, приведены в подписи к рис.4. Сравнение расчетных (рис.4) и экспериментальных (рис.2, 3) зависимостей показывает хорошее качественное согласие. Проведение количественных сравнений эксперимента и расчета весьма затруднено. Таким образом, расчет подтвердил, что критерием поляризационной взаимности ВКИ может служить отсутствие сигнала фазовой модуляции при любом положении оси поляризатора, расположенного перед фотоприемником. В связи с этим может быть предложен метод контроля поляризационной невязимости с использованием вращающегося поляризатора на выходе ВКИ перед фотоприемником. Этот метод состоит в том, что правильную стыковку элементов ВКИ, соответствующую поляризационной взаимности, надо оценивать не по отсутствию сигнала фазовой модуляции на выходе при $\Omega_s = 0$, а по отсутствию сигнала при вращении поляризатора. Следует отметить, что для схем ВКИ с внутренним поляризатором предложенный метод обнаружения поляризационной невязимости также применим. До сих пор рассмотрение относилось к выходу I светоделиителя 2 (см. рис.1), для которого влияние светоделиителя 5 для каждой из встречных волн одинаково, поскольку каждая из волн один раз

отражается от светоделиителя и один раз проходит через него.

Перейдем к рассмотрению сигнала на выходе II светоделиителя 5. Особенность сигнала с выхода светоделиителя 5 в этом случае состоит в том, что наряду с сигналом, связанным с невязимой фазой ВКИ, в нем присутствует также сигнал, связанный со светоделиителем, поскольку одна волна дважды отражается от него и приобретает удвоенную фазу отражения $2\Delta\varphi$, а встречная волна дважды проходит через светоделиитель и приобретает удвоенную фазу прохождения $2\Delta\psi$. Разность этих двух фаз и дает дополнительный вклад в измеряемый сигнал на выходе II:

$$\text{Im}U_{II} = A_x^2 \sin 2(\varphi_s - \psi_s) + A_y^2 \sin 2(\varphi_p - \psi_p). \quad (8)$$

Как показано в [4], при отсутствии потерь разность $\varphi_s - \psi_s = \varphi_p - \psi_p = \pi/2$ и не дает вклада в измеряемый сигнал $\text{Im}U_{II}$. В том случае, когда сигнал поляризационной невязимости уменьшен до нуля на выходе I ($\text{Im}U_I = 0$), сигнал с выхода II определяется выражением (8), т.е. потерями в светоделиителе. Для раздельного измерения потерь светоделиителя вдоль осей анизотропии (x и y) с использованием поляризатора на выходе II отсутствия сигнала фазовой модуляции на выходе I ($\text{Im}U_I = 0$) недостаточно, необходимо выполнение условия взаимности ВКИ ($M_{12} = M_{21}$), т.е. отсутствия сигнала на выходе I после вращающегося поляризатора.

Таким образом, при установлении поляризационной взаимности ВКИ в случае контроля выходных характеристик с помощью вращающегося поляризатора на выходе I, сигнал с выхода II может быть использован для сравнительной оценки качества и фазовой анизотропии светоделиителей. Калибровочную разность фаз можно определить из выражения (1), если известны длина волокна и периметр контура ВКИ.

Работа частично поддержана РФФИ (грант № 96-15-96742).

1. Vali V., Shorthill R.W. *Appl. Optics*, **15**, 1099 (1976).
2. Листвин В.Н., Логазинский В.Н. *Изв вузов. Сер. Радиофизика*, **34**, 1001 (1991).
3. Малькин Г.Б. *Оптика и спектроскопия*, **76**, 540 (1994).
4. Андропова И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В. *Изв вузов. Сер. Радиофизика*, **41**, 1448 (1998).
5. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н., Герасимов Г.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **21**, № 19, 21 (1995).
6. Bergh R.A., Lefevre H.C., Shaw H.J. *Optics Letts*, **6**, 198 (1981).
7. Андропова И.А., Геликонов В.М., Гусовский Д.Д. и др. *ЖТФ*, **60**, 216 (1990).
8. Lefevre H.C. *Electron. Letts*, **16**, 778 (1980).

I.A.Andronova, V.M.Gelikonov, G.V.Gelikonov. Method for determination of the polarisation nonreciprocity in a fibre ring interferometer.

A method is proposed for observation of the polarisation nonreciprocity of fibre ring interferometers (FRIs) by placing a rotating polariser at the output of an interferometer ahead of a photodetector. It is demonstrated theoretically and experimentally that the absence of a signal for any position of the transmission axis of the polariser at the FRI output is a criterion of the appearance of the polarisation nonreciprocity. It is suggested that the coaxial alignment of the anisotropic FRI components be monitored during assembly to ensure the polarisation nonreciprocity on the basis of the absence of a signal at the output of a rotating polariser. It is also shown that, when the conditions for the polarisation nonreciprocity are fulfilled, the signal from the output of a beam splitter located flush against the fibre loop output carries information about the phase characteristics of the beam splitter.