

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ НА ДЕПОЛЯРИЗОВАННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

М.И. КОПТЕНКОВ, *асп. каф. систем автоматического управления МГУЛ, вед. инженер-конструктор филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,
 Е.В. ШАХОВЦЕВ, *асп. каф. экономики, управления и оценки МАОК, вед. инженер-технолог филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,
 А.И. БАЛАНДИН, *асп. каф. ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, вед. инженер филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,
 К.О. БАРЫШНИКОВ, *асп. кафедры ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, нач. сектора филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*

mkoptenkov@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
 141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»,
 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

НОУ ВПО «Международная академия оценки и консалтинга» (МАОК),
 117418, Москва, ул. Новочеремушкинская, д. 65, к. 1

ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» – «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова», 111123, Москва, ул. Авиамоторная, д. 55

Проведен ретроспективный анализ волоконно-оптических гироскопов, использующих деполяризованное излучение, от первых технических решений до настоящего времени. Широко известно, что одной из важных проблем при разработке ВОГ является поддержание поляризации излучения. Это влечет за собой разработку и применение дорогостоящего волокна и включение в схему дополнительных элементов. В то же время, фирмой Honeywell International был создан гироскоп на деполяризованном излучении, по чувствительности превосходящий «поляризованные» аналоги. Рассмотрев принцип действия и устройство деполяризатора Лию, его оптимальное расположение в оптическом контуре, можно сделать вывод, что волоконно-оптический гироскоп на деполяризованном излучении, в составе оптико-физической схемы которого применена интегрально-оптическая схема и два деполяризатора в оптическом контуре, является наиболее совершенным. Интегрально-оптическая схема позволила объединить в одном элементе модулятор и разветвитель. Стыковка оптоволоконна к интегрально-оптической схеме под определенным углом дает возможность получить деполяризованное излучение. Это позволяет значительно упростить монтаж и снизить стоимость компонентов, уменьшить количество элементов в оптическом контуре и число сварных соединений.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, деполяризованное излучение, оптико-физическая схема, деполяризатор Лию, интегрально-оптическая схема.

Широко известно, что одной из важных проблем при разработке волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) является поддержание поляризации излучения. Это влечет за собой разработку и применение дорогостоящего волокна, включение в схему дополнительных элементов, таких как поляризаторы, пространственные фильтры и т. п. В то же время в американской фирме Honeywell International был создан гироскоп на деполяризованном излучении [1], по чувствительности превосходящий «поляризованные» аналоги, а по стоимости – существенно дешевле них.

Проведя ретроспективный анализ существующих гироскопов на деполяризованном излучении, можно выявить их особенности и сделать вывод о целесообразности их разработки и применения.

Рассмотрим для начала физические основы поляризации.

Поляризация волн – явление нарушения симметрии распределения возмущений в поперечной волне относительно направления ее распространения. Для электромагнитных волн это явление направленного колебания векторов напряженности электрического поля E или напряженности магнитного поля H .

Причиной возникновения поляризации волн может быть:

- несимметричная генерация волн в источнике возмущения;
- анизотропность среды распространения волн;
- преломление и отражение на границе двух сред.

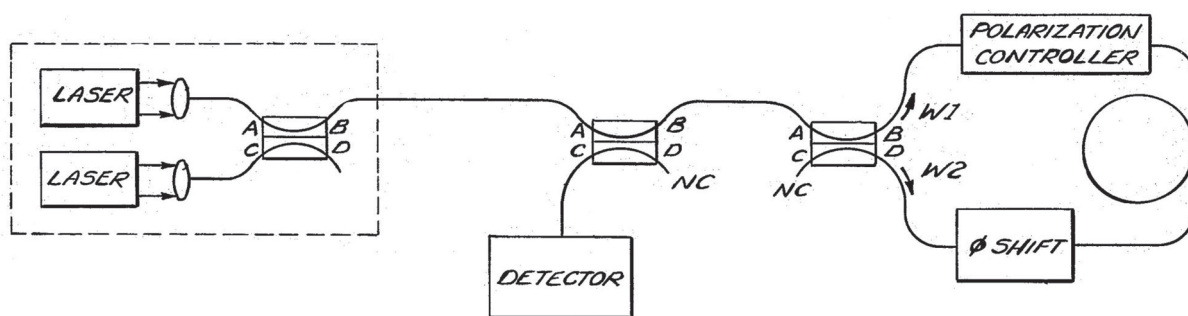


Рис. 1. БОГ G. Pavlath и H. Shaw на деполаризованном излучении
Fig. 1. G. Pavlath and H. Shaw FOG at depolarized radiation

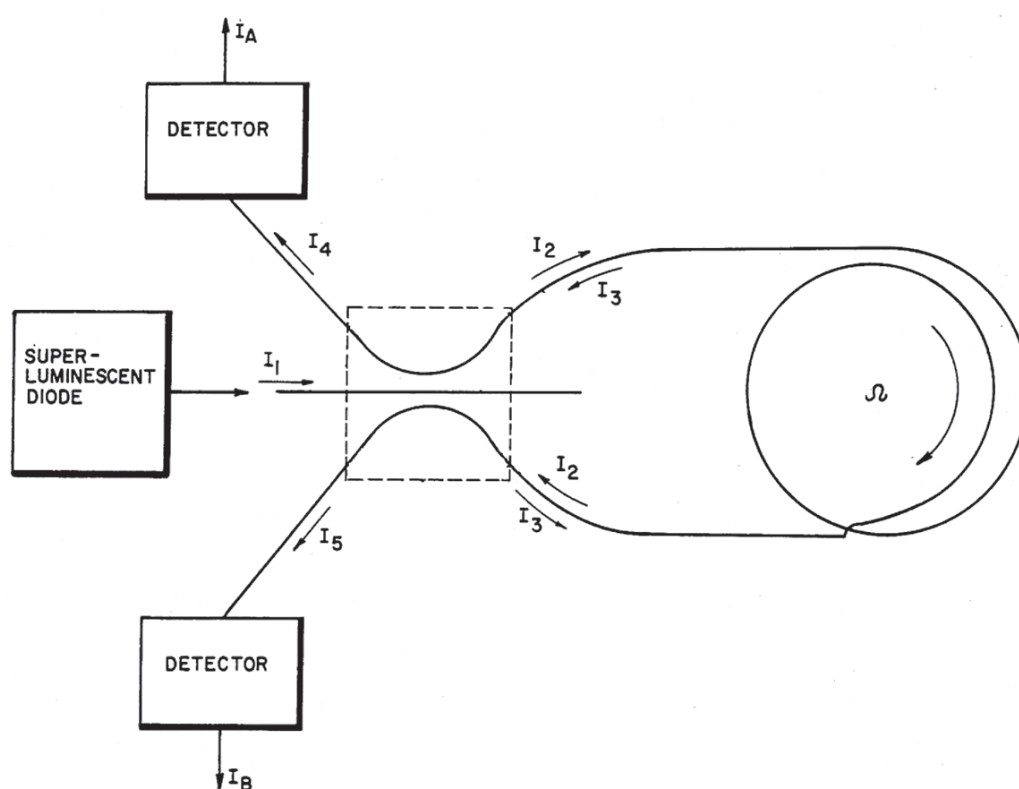


Рис. 2. Вторая схема БОГ на деполаризованном излучении R. Moeller и W. Burns
Fig. 2. The second scheme for FOG at depolarized radiation by R. Moeller and W. Burns

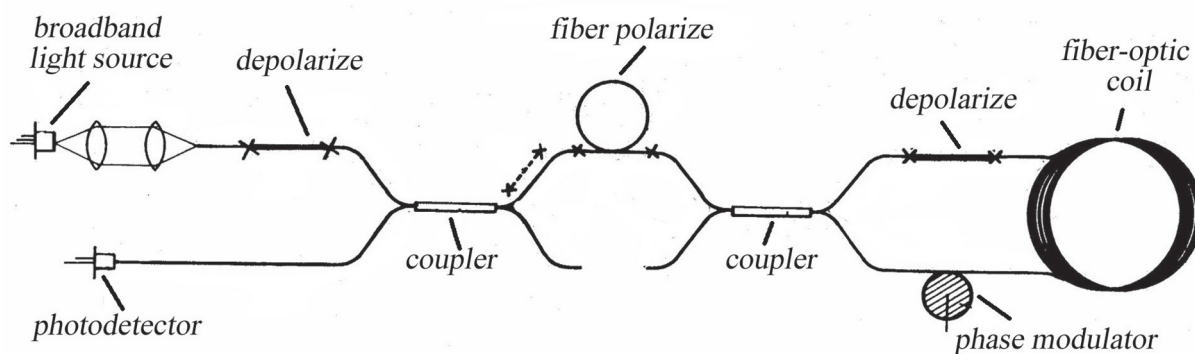


Рис. 3. Схема БОГ Y. Nishiura и T. Iwashita на деполаризованном излучении
Fig. 3. FOG scheme by Y. Nishiura and T. Iwashita at depolarized radiation

Основными поляризациями, используемыми в ВОГ, являются два вида:

– линейная – колебания возмущения происходит в какой-то одной плоскости. В таком случае говорят о «плоско-поляризованной волне»;

– круговая – конец вектора амплитуды описывает окружность в плоскости колебаний. В зависимости от направления вращения вектора может быть правой или левой.

Если рассеянный свет поляризовать, то, используя поляризационный фильтр с иной поляризацией, можно ограничивать прохождение света. Интенсивность света, прошедшего через поляризаторы, подчиняется закону Малюса.

Закон Малюса (1) – физический закон, выражающий зависимость интенсивности линейно-поляризованного света после его прохождения через поляризатор от угла ϕ между плоскостями поляризации падающего света и поляризатора

$$I = k_a I_0 \cos^2 \phi, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего на поляризатор света;

I – интенсивность света, выходящего из поляризатора;

k_a – коэффициент прозрачности поляризатора.

Деполаризатор на таком принципе впервые был создан Бернаром Лио (1897–1952) – французским астрономом, членом Парижской академии наук. Его основные научные работы посвящены изучению планет и Солнца [2]. Он первым выполнил большие ряды поляриметрических измерений излучения планет (1921–1929), создал коронограф – устройство для наблюдения солнечной короны. Деполаризатор Лио представляет собой две кварцевые плоскопараллельные пластины (в общем случае два участка среды с большим двулучепреломлением), оптические оси в которых нормальны входному излучению и развернуты друг относительно друга в азимутальной плоскости на 45° . Соотношение между толщинами пластин обычно равно 2:1.

Первая попытка создать ВОГ на деполаризованном излучении предпринята

G. Pavlath и H. Shaw в Стенфорде, 1981–1985 г. [3]. В предложенной ими схеме нет деполаризатора как такового, авторы предлагают использовать в качестве источника света два линейно поляризованных лазера с вертикальным и горизонтальным направлением поляризации. Объединяя свет двух источников при помощи линзы, можно получить деполаризованный свет. Степень поляризации подобного источника света может достигать величины менее 0,1 %. К слову, наиболее совершенный на тот момент деполаризованный He-Ne лазер имел степень линейной поляризации около 5 %. Все оптические элементы в данной схеме являются изотропными. В результате ее точность невелика, а стоимость возрастает вследствие использования двух источников света.

Второй прототип ВОГ на деполаризованном излучении создали R. Moeller и W. Burns, в 1983–1987 г. [4]. В данном случае предлагалось использовать Супер Люминесцентный Диод со степенью линейной поляризации в 16 %, которая теоретически может быть снижена до 2 % с помощью использования соответствующих селективных отражателей или поглотителей. Другим важным новшеством является использование в этой схеме разветвителя 3x3 и двух детекторов, что позволяет не использовать фазовый модулятор и сократить погрешности. Оптические элементы также изотропны. Разумеется, данную схему также нельзя считать совершенной ввиду низкой точности прибора и большой остаточной поляризации света в контуре.

Первый ВОГ с полноценным деполаризатором был создан в Японии в 1991 г. [5]. В схеме, предложенной Y. Nishiura и T. Iwashita, использовано изотропное волокно катушки, анизотропные разветвители, поляризатор в виде кольца из анизотропного волокна и фазовый модулятор.

Деполаризаторы типа Лио получены в результате соединения двух кусков анизотропного волокна, были рассмотрены также и другие варианты, например, две части кристалла с высоким двулучепреломлением или поляризованный источник света, повернутый относительно волокна на 45° . В результате

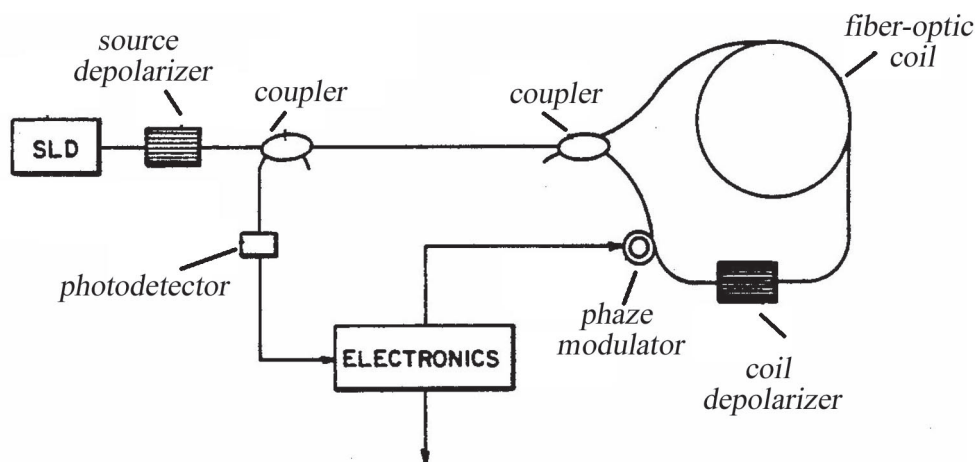


Рис. 4. Новая схема ВОГ R. Moeller и W. Burns на деполаризованном излучении
Fig. 4. The FOG new scheme by R. Moeller and W. Burns at depolarized radiation

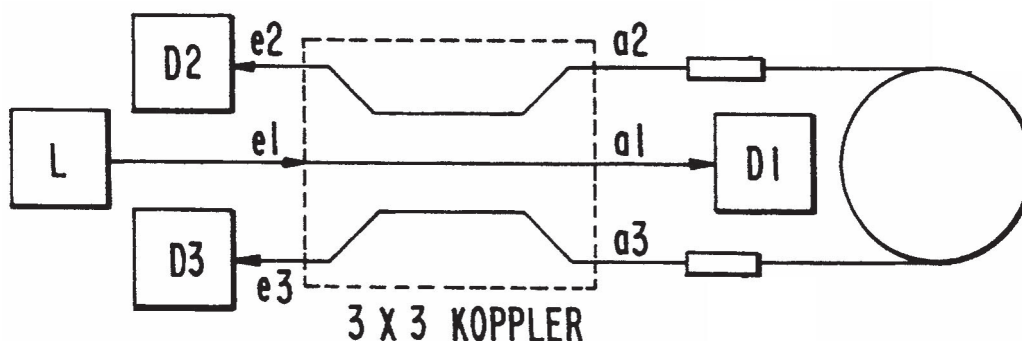


Рис. 5. R. Muller и E. Hartl на деполаризованном излучении
Fig. 5. R. Muller and E. Hartl scheme at depolarized radiation

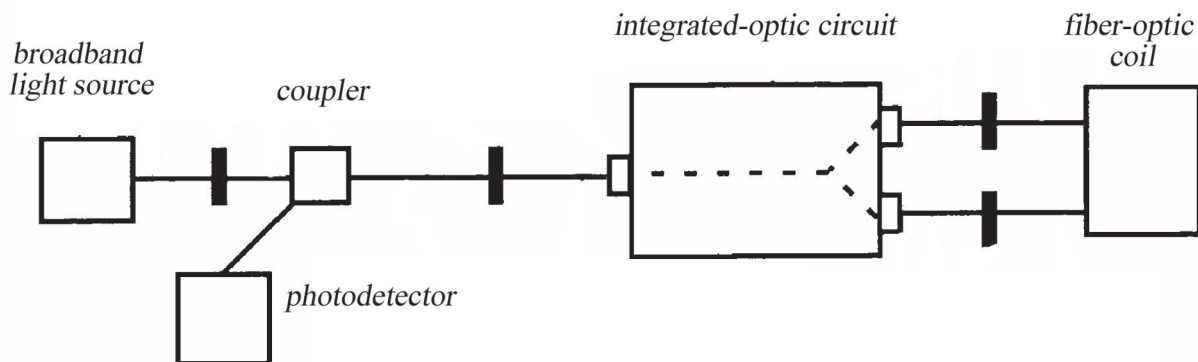


Рис. 6. Схема ВОГ с применением ИОС
Fig. 6. FOG scheme using ITS

применения изотропного волокна в оптическом контуре достигнуто снижение цены, а низкая степень поляризации повышает точностные характеристики. Особо стоит отметить, что в данной работе японские ученые выдвинули идею «двойной деполаризации». Деполаризованный свет источника поляризуется, а затем снова деполаризуется. По их мне-

нию, это позволяет достичь особенно низкой остаточной поляризации. В дальнейшем Y. Nishiura усовершенствовал схему, устранив интерференцию между деполаризаторами.

Опыт японских ученых был использован в новой работе A. Kersey, R. Moeller и W. Burns [6]. С помощью деполаризатора Лио им удалось стабилизировать СЛД и перерабо-

тать схему, сохранив изотропность основных элементов.

Существенным отличием от японской схемы является отсутствие поляризатора. По утверждению авторов, это устраняет зависимость прибора от магнитных полей и повышает мощность выходного сигнала на 6 дБ. Отказ от «двойной деполяризации» не играет существенной роли, так как в предложенной японскими учеными она не актуальна. Моэллер использует один деполяризатор для источника света и другой для устранения наведенной поляризации в оптическом контуре, которая существенно больше, чем остаточная поляризация. Также авторы представили свою классическую схему разветвителя 3×3 с новым СЛД и деполяризатором в оптическом контуре.

Следующий шаг в развитии деполяризованных ВОГ сделали R. Muller и E. Hartl из Мюнхена [8]. Усовершенствовав схему R. Moeller, они добавили к разветвителю 3×3 второй деполяризатор в оптическом контуре, длина которого в 4 раза больше, чем первого (это необходимо для закономерности Ли).

Теперь величина ошибки, которая возникает от остаточной поляризации (в том числе полученной от наведенной поляризации) зависит только от количества самих поляризаторов.

Достаточно оригинальное решение проблемы остаточной поляризации было предложено в 1995 г. группой из Института прикладной физики РАН [10]. В их схеме с одним деполяризатором между двумя разветвителями предлагается анизотропный волоконный контур выполнить из изотропного волокна, при этом необходимая анизотропия контура создается за счет наведенного двойного лучепреломления при намотке изотропного волокна радиуса r на катушку с радиусом R , удовлетворяющим соотношению, приведенному ниже (7)

$$R < r \sqrt{\frac{C_3 \Delta \lambda L}{\lambda}}, \quad (7)$$

где $C_3 = 1,34 \cdot 10^6$ рад/м;

$\Delta \lambda$ – ширина линии волны СЛД;

λ – длина волны СЛД;

L – длина намотанного волокна на катушку.

Самым совершенным на сегодняшний день является использование принципа R. Muller с двумя деполяризаторами и применение развивающихся интегральных оптических схем (ИОС). В некоторых случаях используют деполяризованный свет на входе в ИОС, в других случаях – поляризованный, но в оптическом контуре он деполяризован в любом случае. В первую очередь, применение таких систем позволило объединить в одном элементе модулятор и разветвитель, затем упростить монтаж и сократить количество компонентов, используя ИОС как часть деполяризатора. Такое возможно, поскольку ИОС представляет собой кристалл ниобата лития, по сути являющийся поляризованной средой с высоким двулучепреломлением. Для получения деполяризатора достаточно стыковать к ИОС отрезки анизотропного волокна под углом 45° .

В перспективе возможно включение всех деполяризаторов в состав ИОС. Если учесть, что еще до появления ИОС (в 1997 г.) японцами были предприняты попытки создать ВОГ с комбинированным источником-приемником, включающим в себя также и деполяризатор, то можно получить предельно упрощенную схему, состоящую из источника, ИОС и оптического контура [9].

Подводя итог, можно сделать следующие заключения.

Использование схем ВОГ на деполяризованном излучении позволяет значительно упростить монтаж и снизить стоимость компонентов без потерь в точности.

Существует несколько групп, которые на протяжении многих лет ведут исследования в области ВОГ на деполяризованном свете, используя опыт конкурентов для совершенствования своей схемы. Это группы George Pavlath (Stanford, Litton Systems); Robert Moeller (The USA Navy); Yozo Nishiura (Sumitomo Electric Industries); Reinhard Muller (Deutsh Aerospace) и в последнее время Honeywell International и Nortrop Grumman Corporation.

В настоящий момент достигнута точность, которая позволяет применять ВОГ на деполяризованном свете в авиации. Прово-

дятся работы по повышению точности для решения задач навигации в космических аппаратах.

Наиболее совершенной оптико-физической схемой на деполаризованном излучении на сегодняшний день является схема с использованием ИОС и двух деполаризаторов в оптическом контуре.

Библиографический список/References

1. G. A. Sanders, B. Szafraniec, R.-Y. Liu, M. S. Bielas, L. K. Strandjord Fiber-optic gyro development for a broad range of applications Honeywell Technology Center, Phoenix, AZ 85027-2708
2. Лию Бернар. Биография «ПомниПро» виртуальный мемориал. <http://www.pomnipro.ru/memorypage37491/biography>. Загл. с экрана. Lio Bernar. Biography: «PomniPro» virtual'nie memorial. Available at: <http://www.pomnipro.ru/memorypage37491/biography/> (accessed 15 Mach 2014)
3. Pat. 4529312 USA, G01B 9/02. Fiber optic rotation sensor utilizing unpolarized light / George A. Pavlath; Herbert J. Shaw (Stanford, Calif); The Board of Trustees Leland Stanford Junior University – № 288212; filed 29.07.1984; data of patent 16.07.1985. – 20p.
4. Pat. 4653917 USA, G01/64; G01B; G01B 9/02. Fiber optic gyroscope operating with unpolarized light source / Robert P. Moeller, (Fort Washington); William K. Burns (Alexandria); The United States of America as represented by the Secretary of the Navy – № 478593; filed 24.03.1983; data of patent 31.03.1983. 4 p.
5. Pat. 5245407 USA, G01C 19/72. Fiber-optic gyroscope with depolarizers in a fiber coil located between a light source and a polarizer / Yozo Nishiura; Takaki Iwashita (Japan); Sumitomo Electric Industries – № 748541; filed 22.08.1991; data of patent 14.09.1993. 11 p.
6. Pat. 5365339 USA, G01C 19/64. Two depolarizer fiber-optic gyroscope that eliminates interference between the depolarizers / Yozo Nishiura; Yasuhito Nishi (Japan); Sumitomo Electric Industries – № 2060; filed 8.01.1993; data of patent 15.11.1994. 21 p.
7. Pat. 5319440 USA, G01C 19/64. Fiber optic gyroscopes with depolarized light / Alan D. Kersey (Springfield); William K. Burns (Alexandria); Robert P. Moeller (Fort Washington); The United States of America as represented by the Secretary of the Navy – № 934221; filed 25.08.1992; data of patent 07.06.1994. 24 p.
8. Pat. 5347354 USA, G01C 19/72. Sagnac-type optical fiber gyroscope having depolarizers of differing lengths / Reinhard Miller (Puchheim); Engelbert Hartl; Gert Trommer (Munchen); Deutsch Aerospace – № 902237; filed 22.06.1992; data of patent 13.09.1994. 5 p.
9. Pat. 5526115 USA, G01C 19/72. Light source-detection fiber-optic gyroscope using depolarized beam propagation / Yozo Nishiura (Japan); Sumitomo Electric Industries – № 348089; filed 25.11.1994; data of patent 11.06.1996. 11 p.
10. Pat. 2098762 Rossijskaja Federacija, G01C 19/72. «VoloKonno-opticheskiy giroskop / Anrokov I.A., Gelikonov V.M., Gelikonov G.V., Stepanov D.P.; Institut prikladnoj fiziki RAN – № 95109968/28; filed 14.06.1995; data of patent 10.12.1997, B116/2006. 4 p.
11. Pat. 7085441 USA, G02B 6/00. Fiber-optic gyroscope with depolarizer using integrated optic waveguide / Valery A. Kozlov (Foxboro); Northrop Grumman Corporation. № 11/072737; filed 4.03.2005; data of patent 01.08.2006. 13 p.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF A FIBER- OPTIC GYROSCOPE WITH A DEPOLARIZED RADIATION

Koptenkov M.I., pg. MSFU, a leading design engineer branch, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»; **Shahovtsev E.V.**, pg. IAAC, a leading engineer technologist, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»; **Balandin A.I.**, pg. BMSTU, chief engineer, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»; **Baryshnikov K.O.**, pg. BMSTU, head of sector, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»

mkoptenkov@gmail.com

Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischy, Moscow reg., Russia

Bauman Moscow State Technical University, st. Baumanskaya 2-ya, 5, Moscow, 105005, Russia

International Academy of Appraisal and Consulting (IAAC), st. Novocheryomushkinskaya, 65, k. 1 Moscow, 117418, Russia

«Center for Operation of Space Ground-Based Infrastructure»—«Scientific and Research Institute of Applied Mechanics named after Academician V.I. Kuznetsov», Aviamotornaya st., house 55, Moscow, 111123, Russia

A retrospective analysis of fiber-optic gyroscopes using polarized radiation from the first technical solutions to the modern ones has been performed. It is widely known that one of the important problems of the development of FOG is polarization maintenance. This entails the development and application of expensive fiber and the inclusion in the scheme certain additional elements. At the same time, the Honeywell International company has created a gyroscope with a depolarized radiation sensitivity surpassing «polarized» counterparts. Having considered the principle of operation and the organization of the Leo depolarizer device and its optimal location in the optical circuit, it can be concluded that the fiber-optic gyroscope with a depolarized radiation the optical-physical scheme of which applied integrated optical circuit and two depolarizers in the optical circuit is the most convenient. Integrated optical scheme brought together element modulator and coupler. Linking fiber to the optic integrated scheme at a certain angle makes it possible to obtain depolarized radiation. This allows to considerably simplify the installation and reduce the cost of components, reduce the number of elements in the optical path and the number of welded joints.

Keywords: Fiber-optic gyroscope, depolarized radiation, optical-physical scheme, Leo depolariser, integrated-optical circuit.