



50 ЛЕТ ЛАЗЕРНОМУ ГИРОСКОПУ

Д. Лукьянов, Ю. Филатов, Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, dplukyanov@mail.ru, yvfilatov@mail.eltech.ru;

Ю. Голяев, В. Курятов, ОАО "НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха", Москва;

В. Виноградов, ОАО "Тамбовский завод "Электроприбор", Тамбов; К.-У. Шрайбер, Мюнхенский Технический Университет, Геодезическая обсерватория Ветцеля, Бад-Кецтинг, Германия;

М. Перлмуттер, Civitanavi Systems Ltd, Цуг, Швейцария

Рассматривается предыстория создания лазерного гироскопа (ЛГ), которая берет свое начало с одного из фундаментальных направлений физики – оптики движущихся сред и, в частности, эффекта Саньяка. Анализируются предпосылки прогнозирования и создания первого твердотельного ЛГ, который открыл новую эру волновых гироскопов. Ее научным фундаментом явилась теория вынужденного излучения Эйнштейна, которая была развита лауреатами Нобелевской премии Н.Г. Басовым, А.М. Прохоровым и Ч. Таунсом, создавшими первый в мире квантовый генератор (мазер) – предшественник оптического когерентного излучения – лазера. Этого оказалось достаточно для создания в 1962 году первого лабораторного макета лазерного гироскопа. В докладе рассматривается поэтапная история развития концепций построения ЛГ от их первых образцов минимальной конфигурации до многочастотных зеемановских модификаций с непланарными резонаторами. Показана главенствующая роль лазерной гироскопии в создании инерциальных модулей, бесплатформенных инерциальных и интегрированных навигационных систем. Особое внимание уделяется современному состоянию рынка гироскопов в целом и месту ЛГ среди них, выделяются основные тенденции в развитии рынка инерциальных датчиков. Представлены основные производители как непосредственно ЛГ, так и систем на их основе. Приводится информация о развитии области сверхбольших лазерных гироскопов.

LASER GYROSCOPE IS 50 YEARS OLD

*D.P. Lukyanov, Y.V. Filatov, Y.D. Golyaev,
V.N. Kuryatov, V.I. Vinogradov, K.-U.
Schreiber, M. Perlmutter*

The history of laser gyroscope (LG) creation is considered in this paper; it originates from one of the fundamental schools of physics – moving media optics and, particularly, Sagnac effect. Preconditions for forecasting and creation of the first solid-state LG which started the new era of wave gyroscopes are analyzed. Einstein's theory of induced radiation was its scientific foundation; this theory was developed by N.G. Basov, A.M. Prokhorov and C. Townes, Nobel Prize winners, who created the first quantum generator (maser) in the world, predecessor of optical coherent radiation – laser. It turned out to be enough for the creation of the first laboratory model of laser gyroscope in 1962. Stage-by-stage history of the development of LG construction concepts is considered in the report starting from their first samples with minimum configuration and finishing with multi-frequency Zeeman modifications with non-planar resonators. Dominating role of the laser gyroscopy is shown in the creation of inertial modules, strapdown inertial and integrated navigation systems. Particular attention is paid to the modern condition of gyroscope market in general and role of LGs among gyroscopes; the main tendencies of inertial sensor market development are marked out. The main manufacturers of LGs as well as systems based on them are specified. Information on the development of very large laser gyroscopes is given.

INTRODUCTION

Age of "iron" gyroscopes which started from the invention of Léon Foucault in 1851 (in reality, Johann Bohnenberger in 1817) gave to the humankind the keys to the revealing of outer space secrets and depths of the World Ocean, formed the preconditions for the development of navigation systems of new generation and control of different civil and military facilities. During cold war years "iron" gyroscopic technologies reached their peak from the height of which the capacity of military confrontation and deterrence of two world systems was evaluated [1].

By the middle of the 20th century academic science in the USSR and USA developed the theory



ВВЕДЕНИЕ

Эпоха "железных" гироскопов, открытая изобретением в 1851 году Ж.Б.Л. Фуко (а на самом деле И.Г.Ф. Боненбергера в 1817 году), дала человечеству ключи к открытию тайн космического пространства и глубин мирового океана, создала предпосылки для разработки нового поколения систем навигации и управления различными объектами гражданского и военного направления. В годы холодной войны "железные" гироскопические технологии достигли своей вершины, с высоты которой оценивалась способность военного противостояния и сдерживания двух мировых систем [1].

К середине XX столетия академическая наука в СССР и США разработала теорию квантовых молекулярных генераторов, которая явилась основой нового поколения приборов – лазеров. С их появлением в недрах военно-промышленных комплексов стали разрабатываться и реализовываться фантастические проекты лазерных гиперолоидов, высокоэффективных средств наведения, новых технологий и многое другое. Способность страны разрабатывать и развивать лазерные технологии говорила о ее величии и могуществе не меньше, чем обладание ядерным оружием и космосом. Начиная с 1961 года лазеры разных типов занимают прочное место в оптических лабораториях. Появление первых оптических гироскопов было предопределено.

Эта статья представляет краткую историю развития лазерной гироскопии. В ней рассматриваются предпосылки и условия, в которых происходило зарождение лазерной гироскопии, формировались многочисленные концепции их оптико-физических схем, возникающие при этом проблемы, пути и средства их решения.

ИСТОКИ ЛАЗЕРНОЙ ГИРОСКОПИИ

Предпосылкой к созданию лазерного гироскопа послужили исследования в области оптики движущихся тел, рассматривающей физические явления в тех случаях, когда имеется движение среды, в которой распространяется световая волна. Практически все эффекты, составляющие основу оптики движущихся тел, были открыты при проведении исследований, направленных на изучение свойств "эфира" – некоей среды, ответственной, по мнению большинства ученых в конце XIX века, за распространение света. Результаты опытов, направленных на изучение свойств "эфира", в значительной степени

of quantum molecular generators which was the basis of the devices of new generation – lasers. When they were designed, fantastic projects of laser hyperboloids, high-efficiency guidance systems, new technologies etc. were being developed and implemented in the military industrial establishments. Country ability to design and develop laser technologies showed its greatness and power not less than the possession of nuclear weapons and outer space. Starting from 1961, lasers of different types had been holding strong positions in optical laboratories. Occurrence of the first optical gyroscopes was predetermined.

This report gives short history of the laser gyroscopy development. It considers the backgrounds of and conditions under which the laser gyroscopy origin took place, many concepts of their optical and physical schemes formed, as well as occurring problems, methods and means for their solution.

LASER GYROSCOPY ORIGINS

Research activities in the area of optics of moving bodies, considering the physical phenomena in the cases when there is movement of the medium in which the light wave propagates, served as the backgrounds for the laser gyroscope creation. Practically all effects which are the basis of the physics of moving bodies were discovered during the research activities intended for the study of properties of "aether" – certain medium which was responsible for the light propagation according to the opinion of the majority of scientists at the end of the 19th century. Results of the experiments aimed at the study of properties of "aether" to considerable degree determined the creation of the special theory of relativity by A. Einstein which he set forth in the paper "On the Electrodynamics of Moving Bodies" in 1905 [2].

One of the first tests on the study of aether properties was the experiment set up by Georges Sagnac, French physicist, in 1913. During the study on the detection of "aether" drag by the rotary apparatus he discovered the "swirling optical effect" which allows measuring the object rotating velocity relative to the inertial reference point using the optical methods [3]. During Sagnac experiment the interrelation between the value of interference pattern shift formed at the output of interferometer with closed optical loop (ring interferometer) by the counter-propagating light beams and its angular velocity was established. Later the experiments of A. Michelson and H. Gale



определили создание А.Эйнштейном специальной теории относительности, изложенной им в 1905 году в работе "К электродинамике движущихся тел" [2].

Одним из опытов по изучению свойств эфира явился эксперимент, поставленный в 1913 году французским физиком Жоржем Саньяком. При исследованиях по обнаружению увлечения эфира вращающейся установкой, он открыл "вихревой оптический эффект", позволяющий оптическими методами измерять скорость вращения объекта относительно инерциальной системы отсчета [3]. В эксперименте Саньяка была установлена взаимосвязь между величиной смещения интерференционной картины, образованной на выходе интерферометра с замкнутым оптическим контуром (кольцевого интерферометра) встречно распространяющимися световыми лучами, и его угловой скоростью. Позднее эксперименты А. Майкельсона и Х. Гейля продемонстрировали возможность измерения скорости вращения Земли с использованием кольцевого интерферометра с периметром 1,9 км. В области навигации перед гироскопом, не имеющим механических деталей, открывались широкие перспективы. Тем не менее, эффект Саньяка долгое время оставался невостребованным, в первую очередь из-за низкой чувствительности. В его опыте интерферометр вращался со скоростью 2,3 об/с. При площади интерферометра 866 см² смещение интерференционной картины составило всего лишь 0,04 полосы. Поэтому в течение многих десятилетий оптический гироскоп не был востребован.

Ситуация кардинальным образом изменилась с началом развития квантовой электроники и созданием первых лазеров. Основопологающим открытием в развитии квантовой электроники явилось предсказание в 1916 году А. Эйнштейном явления вынужденного излучения. Впервые индуцированное излучение было получено в 1950 году американскими физиками Е. Парселлом и Р. Паундом в экспериментах по созданию инверсии населенностей ядерных спиновых систем. В 1953-1954 годы Н.Г. Басов и А.М. Прохоров (СССР) и, независимо от них, Ч. Таунс (США) получили генерацию в сантиметровом диапазоне на молекулах аммиака. Так был создан первый квантовый генератор – мазер (maser – microwave amplification by stimulated emission of radiation). В 1955 году Басов и Прохоров предложили

demonstrated the capability of the Earth rotation velocity measurement using the ring interferometer with the perimeter of 1.9 km. In the navigation area before the gyroscope which did not have mechanical parts, big challenges were offered. Nevertheless, Sagnac effect remained unused for a long time, first of all, due to low sensitivity. In his experiment interferometer rotated with the velocity of 2.3 turns per second. With the interferometer area of 866 cm² the interference pattern shift was only 0.04 band. Therefore, during many decades the optical gyroscope was not needed.

This situation has changed considerably with the beginning of quantum electronics development and creation of the first lasers. The fundamental discovery in the quantum electronics development was A. Einstein prediction of induced radiation phenomenon in 1916. For the first time the induced radiation was obtained in 1950 by E. Purcell and R. Pound, American physicists, during the experiments on the generation of population inversion of nuclear spin systems. In 1953-1954 N.G. Basov and A.M. Prokhorov (USSR) and independently of them C. Townes (USA) obtained the generation within the centimeter range on ammonia molecules. This is how the first quantum generator – maser (maser – microwave amplification by stimulated emission of radiation) was made. In 1955 Basov and Prokhorov offered three-level method of obtaining of population inversion of molecular levels. Operating three-level solid-state quantum amplifiers were created in 1957-1958 in the USA and USSR. For the obtained results N.G. Basov and A.M. Prokhorov and C. Townes were awarded to the Nobel Prize in Physics in 1964.

Further development of quantum electronics was guided to the transfer to the optical range. In 1958 A.M. Prokhorov and R. Dicke (USA) advanced the concept of open resonator which was the important factor for the creation of solid-state and gas optical quantum generators – lasers (laser – light amplification by stimulated emission of radiation). The first laser was created by T. Maiman (USA) in 1960 using the open resonator and crystal of synthetic ruby as the actuating medium (radiation wavelength was 0.7 μm). In 6 months A. Javan, V. Bennett and D. Herriott (USA) constructed the first gas laser based on the mixture of helium and neon.

Then, during the years of quantum-optical engineering origins the scientific world was constantly disturbed by many effects, discoveries and hypotheses. Information flows

трехуровневый метод получения инверсной населенности молекулярных уровней. Действующие трехуровневые твердотельные квантовые усилители были созданы в 1957–1958 годы в США и СССР. За полученные результаты Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и Ч.Таунс были удостоены в 1964 году Нобелевской премии в области физики.

Дальнейшее развитие квантовой электроники было направлено на переход в оптический диапазон. В 1958 году А.М. Прохоровым и Р. Дике (США) была выдвинута идея открытого резонатора, который явился важным фактором создания твердотельных и газовых оптических квантовых генераторов – лазеров (laser – light amplification by stimulated emission of radiation). Первый лазер был создан Т. Мейманом (США) в 1960 году с использованием открытого резонатора и кристалла искусственного рубина в качестве рабочего тела (длина волны излучения составляла 0,7 мкм). Через полгода А. Джаваном, В. Беннетом и Д. Эрриотом (США) был сконструирован первый газовый лазер на смеси гелия и неона.

Тогда, в годы зарождения квантово-оптической техники, научный мир постоянно будоражили многочисленные эффекты, открытия и гипотезы. Потоки информации об освоении все новых и новых усиливающих сред и длин волн рождали смелые прогнозы создания сверхмощных "гиперолоидов", голографического телевидения и т.д. и т.п.

Неудивительно, что на этом фоне для многих осталось незамеченным сообщение о возможности создания на основе лазеров принципиально новых измерительных приборов – лазерных гироскопов, сделанное в конце 1962 года будущим лауреатом Нобелевской премии А.М. Прохоровым в Физическом институте АН СССР. Но группа молодых инженеров НИИ Прикладной физики (В. Курятов, Е. Наседкин, Г. Кошкин) со всей серьезностью отнеслась к идее создания таких приборов. К этому следует добавить, что еще за 10 лет до появления первых лазеров в Советском Союзе И.Л. Берштейном были проведены экспериментальные исследования эффекта Саньяка в радиодиапазоне по схеме, которая по существу соответствует современной архитектуре построения волоконно-оптических гироскопов [4]. Однако предпосылок для перенесения этих исследований в оптический диапазон тогда еще не существовало. Тем не менее приоритет И.Л. Берштейна, предвосхитившего

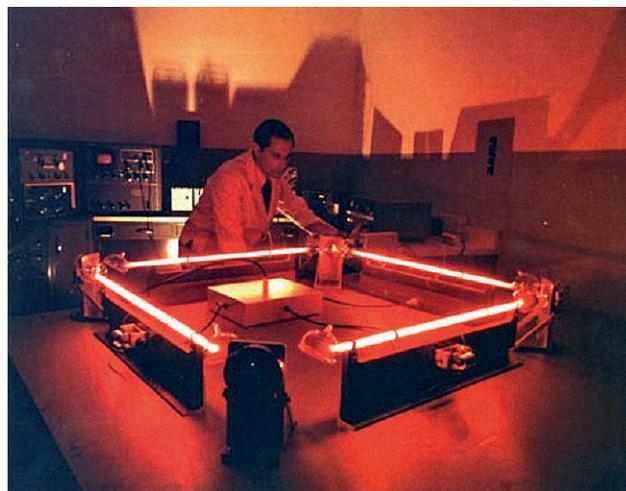


Рис.1. В.Мацек с первым лазерным гироскопом (1963 год)
Fig. 1. V. Matsek first laser gyroscope (1963)

on the application of new amplifying media and wavelengths gave rise to the bold forecasts of the creation of superpower "hyperboloids", holographic television etc.

It is not surprising that against this background many people did not notice the report on the capability of creation of the fundamentally new measuring instruments based on lasers – laser gyroscopes; this report was made by A.M. Prokhorov, future winner of the Nobel Prize, at the Physical Institute of the Academy of Sciences of the USSR at the end of 1962. But the group of young engineers of the Research Institute of Applied Physics (V. Kuryatov, E. Nasedkin, G. Koshkin) seriously considered the idea of creation of such devices. In addition, even 10 years before the occurrence of the first lasers in the Soviet Union, I.L. Bernstein carried out the experimental study of Sagnac effect within the radio-frequency band on the basis of the scheme which essentially complies with the modern architecture of fiber-optic gyroscopes construction [4]. However, there were no preconditions for the transfer of this study to the optical range at that time. Nevertheless, the priority of I.L. Bernstein who anticipated the concept of fiber-optic gyroscope construction is recognized in Russia as well as in the USA.

In 1962 A. Rosenthal (USA) suggested [5] and V. Macek and D. Davis (USA) implemented the first He-Ne laser with ring resonator (ring laser) from which the development of laser gyroscopy has started (Fig. 1) [6]. Mixture of He-Ne was used as the actuating medium; 4 discharge tubes were filled



концепцию построения волоконно-оптического гироскопа, признают в России и в США.

В 1962 году А. Розенталь (США) предложил [5], а В. Мацек и Д. Девис (США) реализовали первый He-Ne лазер с кольцевым резонатором (кольцевой лазер), с которого началось развитие лазерной гироскопии (рис.1) [6]. В качестве рабочей среды была использована смесь He-Ne, которой заполнялись четыре газоразрядных трубки. Вместе с отражающими зеркалами эта конструкция представляла собой замкнутый резонатор прямоугольной формы со стороной около 1 м. Рабочая частота резонатора выбиралась из соображений получения максимального коэффициента усиления, который достигался на длине волны 1152,3 нм. Лабораторным макетом была продемонстрирована возможность измерения угловых перемещений относительно инерциального пространства с достаточно высокой чувствительностью.

Следует отметить, что в начале 60-х годов лазерная гироскопия завоевывала свое признание в условиях сложившейся за многие десятилетия разветвленной индустрии производства механических ("железных") гироскопов. Они вполне соответствовали царившей в то время идеологии платформенных инерциальных систем. Имелась развитая теория, необходимая производственная база и, что особенно важно, проверенные временем традиции, опирающиеся на непререкаемые авторитеты. Поэтому робкие попытки энтузиастов развить исследования в области лазерной гироскопии, как правило, не имели успеха, а в ряде министерств и не начинались.

Больше "повезло" лазерной гироскопии на предприятиях, где не было давящего авторитета традиционных гироскопистов, но была оптическая и электровакуумная производственная база. Поэтому наиболее эффективно разработка ЛГ началась в НИИ Прикладной физики (научный руководитель НИИ ПФ Курбатов Л.Н.), а наибольший размах получила в дальнейшем в НИИ "Полюс" (генеральный директор М.Ф. Стельмах), где было организовано серийное производство ЛГ.

В середине 1963 года первый в СССР макет ЛГ был собран и (как маятник Фуко) подвешен к потолку комнаты для создания угловых перемещений (частотной подставки) и развязки от фундамента здания, испытывающего сейсмические воздействия. Несмотря на ряд технологических ограничений и неудобств

with this mixture. Together with reflecting mirrors this construction represented closed resonator with squared shape and side of approximately 1 m. Resonator operating frequency was selected for the reasons of obtaining of maximum amplification coefficient which was reached on the wavelength of 1152.3 nm. Laboratory model demonstrated the capability of measurement of angular displacements relative to the inertial space with quite high sensitivity.

It should be noted that in early 60s laser gyroscopy was winning its recognition under the conditions of divided industry of mechanical ("iron") gyroscopes production which had been formed for many decades. They completely complied with the ideology of platform inertial systems which dominated at that time. There were developed theory, necessary production base and particularly important time-proven traditions which relied upon the indisputable authorities. That is why, as a rule, timid attempts of enthusiasts to develop research activities in the area of laser gyroscopy were not successful and in a number of ministries they were not even commenced.

Laser gyroscopy was more "lucky" at the enterprises which did not have the pressing authority of traditional scientists but had the optical and electro-vacuum production base. Therefore, the most efficient LG development began at the Research Institute of Applied Physics (L.N. Kurbatov was the research supervisor of the Research institute of Applied Physics) and subsequently it obtained the widest scope at Polyus Research Institute (M.F. Stelmakh, General Director) where the batch production of LG was organized.

In the middle of 1963 the first model of LG in the USSR was assembled and (as Foucault's pendulum) suspended to the room ceiling for the generation of angular displacements (dithering) and isolation from the building foundation which experienced the seismic loads. Despite a number of technological restrictions and inconveniences (limited lifetime of discharge tubes, infrared radiation band invisible for eyes, semiconductor radiation detector from the exotic materials - indium-stibium which requires the regular cooling by liquid nitrogen and compels to be under constant stress due to the construction fragility, use of powerful 300 W high-frequency pump oscillators which are hazardous for health etc.) the model functioned successfully! Many interesting characteristics and effects were detected on it which led to the new technical terminology: "capture", unidirectional emission,





(ограниченный срок службы газоразрядных трубок, невидимый для глаза инфракрасный диапазон излучения, полупроводниковый приемник излучения из экзотических материалов индий-сурьма, требующий регулярного охлаждения жидким азотом и заставляющий пребывать в постоянном напряжении из-за хрупкости конструкции, использование небезопасных для здоровья мощных 300-Вт высокочастотных генераторов накачки и т.д.), макет успешно функционировал! На нем был обнаружен целый ряд интересных особенностей и эффектов, приведших к появлению новой технической терминологии: "захват", однонаправленная генерация, "подставка", дифракционная невзаимность, квантовые шумы и т.д. [7].

Через полгода, на следующем макете, работающем в видимом диапазоне спектра, уже можно было обнаружить вращение Земли, детально изучить синхронизацию встречных волн, почувствовать влияние магнитного поля, опробовать различные способы линеаризации выходной характеристики ЛГ (механическое вращение, эффекты Фарадея, Физо, Зеемана и др.).

В 1965 году была защищена первая в СССР прикладная кандидатская диссертация по ЛГ (В.Н. Курятов), главные положения которой не потеряли актуальности до настоящего времени. Дальнейшее развитие работы в области лазерной гироскопии получили в ряде организаций Москвы и Киева. В НИИ "Полюс" работы шли по двум направлениям. Одно, под руководством В.Н. Курятова, развивало создание моноблочного ЛГ на призмах полного внутреннего отражения (ППВО), второе под руководством Б.В. Рыбакова - создание ЛГ на эффекте Зеемана. В НПО "Астрофизика" под руководством В.А. Зборовского прорабатывались моноблочные ЛГ на зеркалах с фарадеевским невзаимным элементом, ставшие прообразом приборов, серийно производимых на киевском заводе "Арсенал" под руководством В.И. Бузанова.

Не секрет, что наиболее значительные научные и практические результаты в области лазерной и волоконно-оптической гироскопии были получены в недрах военно-промышленных комплексов ведущих государств. Детальная информация о технологических процессах, испытаниях и практических применениях ЛГ была и во многом остается до настоящего времени закрытой. Этот процесс усугублялся наличием "железного занавеса", разделявшего

"dithering", diffraction non-reciprocity, quantum noises etc. [7].

In 6 months on the following model operating within the visible spectrum range it was possible to detect the Earth rotation, study in details the synchronization of counter-propagating waves, feel the influence of magnetic field, test different methods of linearization of LG output characteristic (mechanical rotation, Faraday effect, Fizeau effect, Zeeman effect etc.).

In 1965 the first applied candidate's dissertation on LG was defended (V.N. Kuryatov) main provisions of which have not lost their topicality up to the present day. Activities in the area of laser gyroscopy received the following development in a number of organizations in Moscow and Kiev. At Polyus Research Institute the works were carried out in two areas, one area was under the supervision of V.N. Kuryatov and developed the creation of monoblock LG based on totally reflecting prisms (TRPs), the second area was under the supervision of B.V. Rybakov and worked on the creation of LG based on Zeeman effect. Astrophysica Scientific Production Association under the supervision of V.A. Zborovsky worked on the creation of monoblock LG based on mirrors with Faraday nonreciprocal element which became the prototype of the devices manufactured in batches by Kiev Arsenal Factory under the supervision of V.I. Buzanov.

It is not a secret that considerable scientific and practical results in the area of laser and fiber-optic gyroscopy were received in the military industrial establishments of leading states. Detailed information on the technological processes, tests and practical applications of LGs was and in many aspects has been staying confidential up to the present day. This process worsened due to "iron curtain" which separated NATO countries from Warsaw Pact countries. Under these conditions the international collaboration and scientific and technical cooperation of LG researchers and developers were practically eliminated. Therefore, despite the large amount of open publications which, first of all, reflected the issues of optical gyroscopes theory many essential details connected with the industrial development and application of new technologies turned out to be confidential and the period from the demonstration of the first laboratory models to the batch production turned out to be quite long.

In addition, the development history of one of the leading world firms in the area of laser gyroscopy - Honeywell - convincingly testifies of



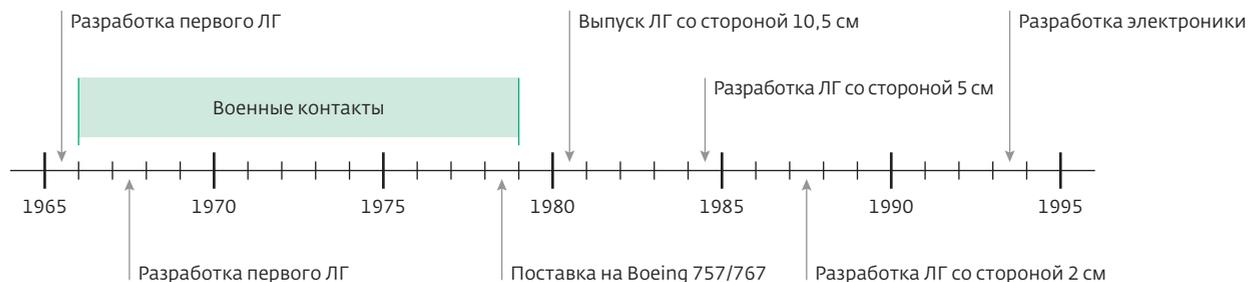


Рис.2. Исследования и разработки ЛГ фирмы Honeywell (1965–1994)
Fig. 2. Research and development firm LG Honeywell (1965-1994)

страны НАТО и участников Варшавского пакта. В этих условиях международное сотрудничество и научно-техническая кооперация исследователей и разработчиков ЛГ практически исключалась. Поэтому, несмотря на большое количество открытых публикаций, посвященных прежде всего вопросам теории оптических гироскопов, многие принципиальные детали, связанные с промышленной разработкой и освоением новых технологий, оказались закрытыми, и период от демонстрации первых лабораторных макетов до выпуска серийной продукции оказался достаточно продолжительным.

Вместе с тем, история развития одной из ведущих мировых фирм в области лазерной гироскопии – Honeywell убедительно свидетельствует о том, что серьезный коммерческий успех может быть достигнут через эффективное освоение военного и гражданского рынков или, другими словами, через общие технологические процессы двойного применения. Одновременная разработка и внедрение большого числа приборов и систем обеспечивают резкое снижение их стоимости, что, в свою очередь, ведет к расширению рынка сбыта. Это может быть проиллюстрировано результатами деятельности фирмы Honeywell в период с 1965 по 1994 годы (рис.2) [8].

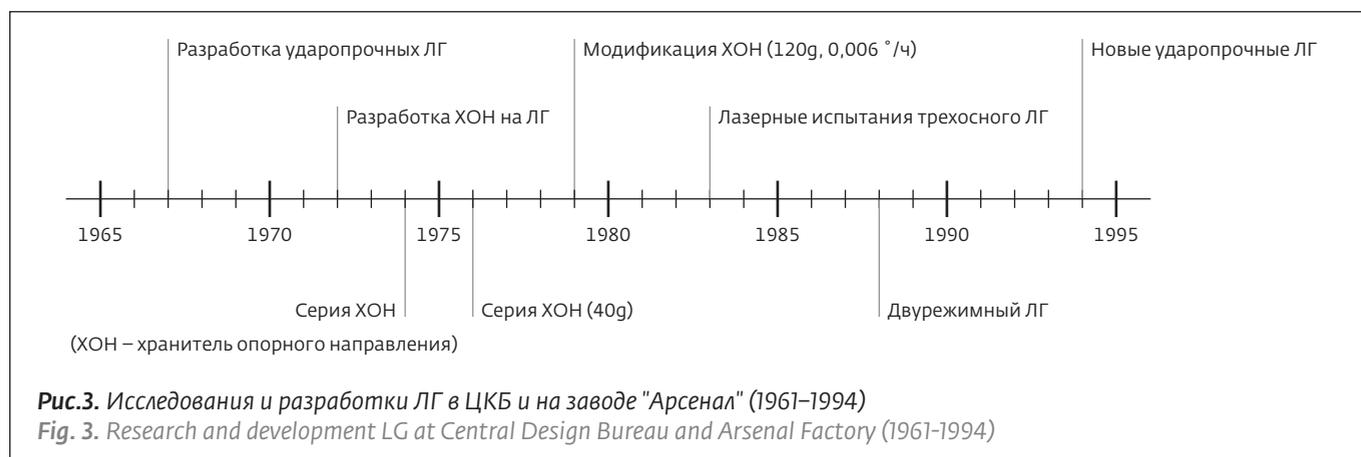
Как следует из рис.2, первый этап исследований и разработок, занявший значительный период с 1965 по 1979 годы, мог быть выполнен только при государственном финансировании, которое, очевидно, продолжалось до первых поставок лазерного навигационного оборудования на самолеты Boeing 757/767. Полученные результаты позволили затем в течение сравнительно короткого интервала времени разработать серию новых ЛГ с последовательно

the fact that considerable commercial success can be achieved through the efficient development of military and civil markets or, in other words, through the common technological processes of dual application. Simultaneous development and implementation of large amount of devices and systems provide the sharp reduction in value which, in turn, leads to the marketing development. It can be illustrated through the performance results of Honeywell for the period from 1965 to 1994 (Fig. 2) [8].

As it is seen from Fig. 2, the first stage of research and development activities which took the considerable period from 1965 to 1979 could be performed only on the basis of the government financing which, obviously, continued up to the first deliveries of laser navigation equipment for the airplanes Boeing 757/767. Then, obtained results made it possible to develop the series of new LGs with the sequentially improved weigh-size characteristics during relatively short period of time and increase the amount of production units with the simultaneous reduction in its value. By the beginning of 1992, the ratio of civil products to military products was more than 10:1 with the reduction in unit value by 6.5 times from 1981 to 1992.

The development history of laser gyroscopy in the former Soviet Union looks differently at one of the leading enterprises – Central Design Bureau and Arsenal Factory (Fig. 3).

Here the development of prototypes and output of batch products were performed at all stages upon the systematic government financing of orders which almost did not provide the development of equipment samples for civil application. Plan nature of the production and tight control were aimed for the reduction of necessary research and



улучшаемыми массогабаритными характеристиками и увеличить количество единиц выпускаемой продукции при одновременном снижении ее стоимости. К началу 1992 года соотношение гражданской продукции к военной составило более 10:1 при снижении единичной стоимости с 1981 по 1992 годы в 6,5 раз.

Несколько иначе выглядит история развития лазерной гироскопии в бывшем Советском Союзе на одном из ведущих предприятий – ЦКБ и заводе "Арсенал" (рис.3).

development terms, improvement of tactical and technical characteristics of products, as it is seen from Fig. 3.

FIRST SAMPLES OF LASER GYROSCOPES

Soon after the first demonstration of laser gyroscope the development of its semi-industrial samples has begun. One of the first models was demonstrated by Lockheed Martin Company in the middle of 60s. Photo and construction of the offered device are shown in Fig. 4 [9].

Здесь разработка опытных образцов и выпуск серийной продукции осуществлялись на всех этапах при систематическом государственном финансировании заказов, которое почти не предусматривало разработки образцов техники гражданского применения. Плановый характер производства и жесткий контроль были направлены на сокращение необходимых сроков исследований и разработок, улучшение тактико-технических характеристик изделий, как это следует из рис.3.

ПЕРВЫЕ ОБРАЗЦЫ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Вскоре после первой демонстрации лазерного гироскопа началась разработка его полупромышленных образцов. Одну из первых моделей продемонстрировала компания Lockheed Martin уже в середине 60-х годов. Фотография и конструкция предложенного устройства показаны на рис.4 [9].

ЛГ был построен по модульной схеме и включал в себя He-Ne лазер с длиной волны 1152,3 нм, треугольный контур со сторонами 7,62 мм, образованный призмами полного внутреннего отражения, фарадеевскую ячейку для искусственного создания невзаимности и пьезоэлектрический привод на одной из призм для контроля и управления периметром. Резонатор был выполнен из алюминия и дополнительно оснащен датчиком температуры и набором обогревателей. Они поддерживали постоянную

LG was constructed according to the module scheme and included He-Ne laser with the wavelength of 1152.3 nm, triangular circuit with the sides of 7.62 mm formed by totally reflecting prisms, Faraday cell for the simulation of nonreciprocity and piezoelectric actuator on one of the prisms for the control and direction of perimeter. Resonator was made of aluminum and additionally equipped with the temperature sensor and heating set. Heaters maintained the constant temperature of 65 °C providing at the same time the constancy of resonator geometry. General assembly was put into the case equipped with thermal and magnetic screens for the maintenance of stable operating conditions. This is how the first demonstrated laser gyroscope sample looked like; it did not have rotating rotor.

By its characteristics LG turned out to be the most suitable for the usage in strapdown inertial systems (SIS) development of which started rapidly; it was caused by the occurrence of quick operating computer technology. The idea of installation of the sensors triad in the case appeared attractive for the creation of inertial measuring modules. Despite the number of shortcomings (tube lifetime was less than 1000 h, long readiness time, high energy consumption) developed gyroscopes were in demand. Particularly, their testing was carried out in NASA as well as in laboratories of naval and air forces of the USA.

Approximately during the same period Europe showed interest in laser gyroscope too.

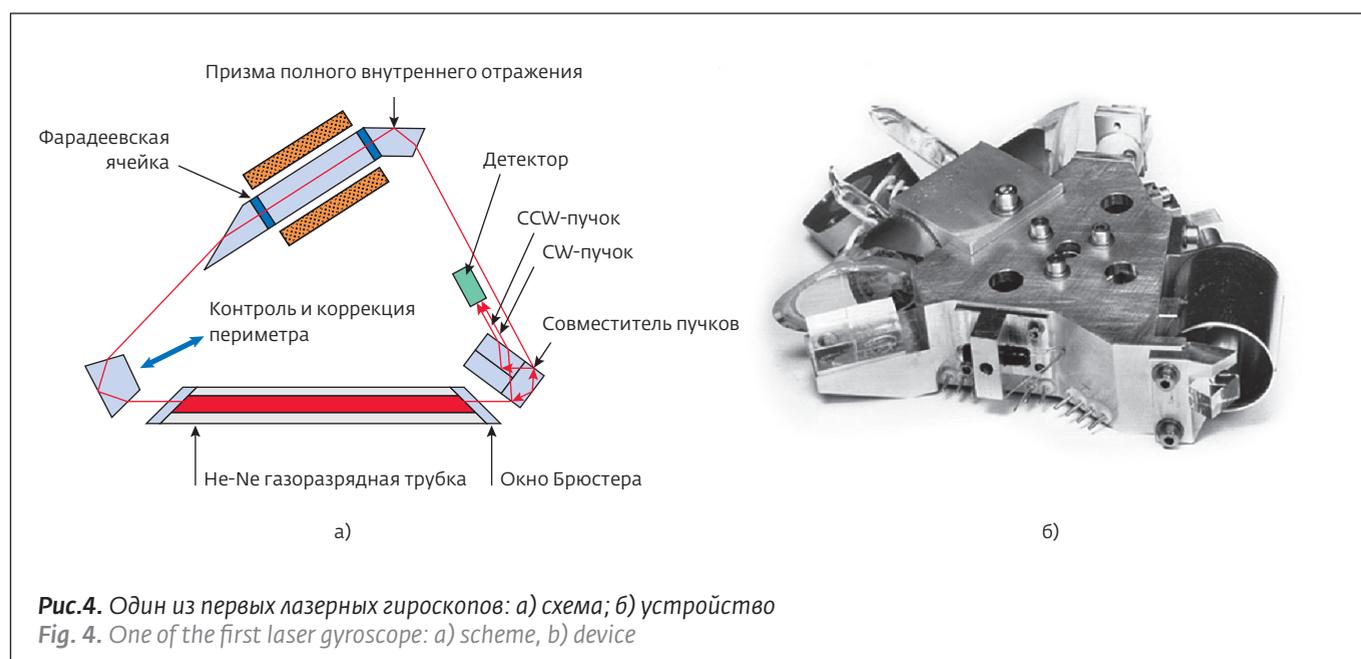


Рис.4. Один из первых лазерных гироскопов: а) схема; б) устройство
 Fig. 4. One of the first laser gyroscope: a) scheme, b) device

температуру 65°C, обеспечивая тем самым постоянство геометрических размеров резонатора. Конструкция в сборе помещалась в корпус, снабженный термо- и магнитным экранами для сохранения стабильных условий эксплуатации. Так выглядел представленный впервые образец лазерного гироскопа, в котором отсутствовал вращающийся ротор.

По своим характеристикам ЛГ оказался наиболее пригодным для использования в бесплатформенных инерциальных системах (БИНС), развитие которых началось бурными темпами, чему в немалой степени содействовало появление быстродействующей вычислительной техники. Заманчивой представлялась установка в корпус триады датчиков для создания инерциальных измерительных модулей. Несмотря на ряд недостатков (срок службы трубки менее 1000 ч, большое время готовности, высокое энергопотребление) разработанные гироскопы пользовались спросом. В частности, их испытаниями занимались в NASA, а также в лабораториях морских и военно-воздушных сил США.

Примерно в те же годы лазерным гироскопом заинтересовались и в Европе. В 1967 году в г. Фарнборо, Великобритания, состоялась

In 1967 in Farnborough, Great Britain, the first demonstration of laser gyroscope capabilities was performed. Sensor constructed on the basis of order of the Ministry of Defense of the United Kingdom was shown in all its beauty but for some reason the government did not take interest in it. As a result, the development activities on LG systems in Great Britain recommenced only in 10 years [10].

During this time in the USSR the development activities on LG were carried out by the employees of Polyus Research Institute in the most intensive manner. One of the first problems which the developers faced was the absence of high-quality optical mirrors. For that matter it was decided to use the totally reflecting prisms which by that time had loss of less than 0.01% and it insured the value of capture area of about 100 Hz. Carried out research activities made it possible to reach the record measurement accuracy of the absolute angular Earth rotation velocity of $8 \cdot 10^{-4}$ °/hour by the monoblock prism LG by 1969 and develop the precision maritime navigation complex using these LGs in several years. The first sample of LG with totally reflecting prisms developed at Polyus Research Institute by V.N. Kuryatov is shown in Fig. 5.

первая демонстрация возможностей лазерного гироскопа. Датчик, сконструированный по заказу министерства обороны Соединенного Королевства, показал себя во всей красе, но почему-то он не заинтересовал правительство. В результате разработки систем на ЛГ в Великобритании возобновились только спустя 10 лет [10].

В это время в СССР наиболее интенсивно разработкой ЛГ занимались сотрудники НИИ "Полюс". Одной из первых проблем, с которыми столкнулись разработчики, было отсутствие высококачественных оптических зеркал. В связи с этим было решено использовать призмы полного внутреннего отражения, которые к тому времени имели потери менее 0,01%, что обеспечивало величину области захвата порядка 100 Гц. Проведенные исследования позволили уже к 1969 году достигнуть моноблочным призмным ЛГ рекордную по тем временам точность измерения абсолютной угловой скорости вращения Земли $8 \cdot 10^{-4}$ град/час, а через несколько лет разработать прецизионный морской навигационный комплекс с использованием этих ЛГ. Первый образец ЛГ с призмами полного внутреннего отражения, разработанный в НИИ "Полюс" Курятовым В.Н., показан на рис.5.

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛГ

Следует отметить, что с первых шагов развития лазерной гироскопии встал вопрос о способах борьбы с зоной захвата или взаимной синхронизацией встречных волн. Согласно общепринятой модели ЛГ он состоит из двух квазиавтономных генераторов, возбуждающих встречно-бегущие волны, на пути которых в резонаторе неизбежно возникают неоднородности, рассеивающие встречные пучки. Рассеянное излучение создает связь между этими генераторами и играет роль синхронизатора, стремящегося к сближению частот встречных волн. Этот эффект наиболее сильно проявляется в области малых угловых скоростей, где связь генераторов приводит к их синхронизации. В результате встречно-бегущие волны приобретают одинаковую частоту, при которой разностная частота становится равной нулю. Типичная выходная характеристика ЛГ приведена на рис.6 [11].

Здесь отчетливо наблюдается зона нечувствительности и области нелинейности. Таким



Рис.5. Гироскоп КМ-22 производства НИИ "Полюс"
Fig. 5. LG KM-22 developed at Polyus Research Institute

LINEARIZATION OF LG OUTPUT CHARACTERISTIC

It should be noted that from the first steps of laser gyroscope development the issue of the methods of struggle against the capture zone or mutual synchronization of counter-propagating waves arouse. According to the generally accepted LG model it consists of two quasiautonomous generators exciting the counter-progressive waves, on their way in resonator the inhomogeneities which scatter the counter-propagating beams inevitably occur. Scattered radiation plays the role of synchronizer which tends to the approximation of counter-propagating waves frequencies. This effect is shown in the greatest manner in the area of low angular velocities where the synchronization of beams causes

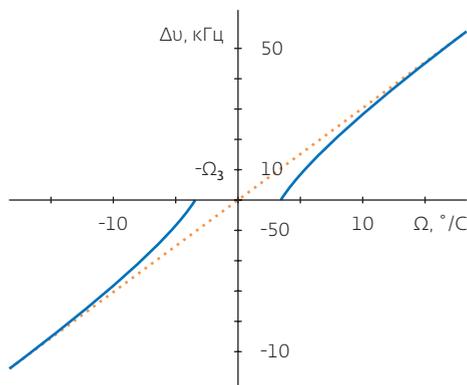


Рис.6. Выходная характеристика ЛГ: $S=0,017 \text{ м}^2$, $L=0,6 \text{ м}$, $\lambda=0,63 \text{ мкм}$
Fig. 6. Output characteristic LG: $S=0,017 \text{ м}^2$, $L=0,6 \text{ м}$, $\lambda=0,63 \text{ мкм}$

DILAS

Среди потребителей лазерных диодов и модулей на их основе изделия компании DILAS пользуются спросом. Дело в том, что хотя на рынке диодных лазеров присутствует продукция многих производителей диодных чипов, но каждый из них ориентирован на узкий класс задач. За двадцать лет своего существования мы хорошо изучили весь этот рынок. DILAS выступает интегратором оборудования для промышленных, медицинских и научных задач, выбирая и покупая у производителей самые эффективные и самые надежные чипы для конкретных задач, делая из них стеки и модули больших диапазонов мощностей и длин волн (450–2200 нм). Мы делаем устройства для накачки твердотельных лазеров и вертикально-излучающие матрицы диодных лазеров. Устройства состоят из нескольких чипов, а каждый чип в свою очередь состоит из многих эмиттеров. Так, на одном чипе может содержаться

от 10 до 75 эмиттеров. Сейчас DILAS производит модули, содержащие до 70 чипов. Пользователям известно, что лазерные диоды обладают неравномерностью распределения излучения по направлению. Компания DILAS владеет секретами решения задачи выравнивания плотности мощности луча. При этом можно сформировать луч в малое пятно, например для ввода излучения в оптическое волокно, или в большое пятно для накачки определенных мощных лазеров, или в тонкую полоску – что необходимо при печати газет и журналов для быстрой зашивки красок полиграфии. DILAS производит устройства для подсветки при работе в тумане или ночью. Производимые компанией устройства способны работать в жестких климатических условиях. Надежность устройств, изготовленных DILAS, обеспечена высокой наработкой на отказ. Компания владеет разными методиками ускоренных



Хейко Киссель, инженер компании DILAS

испытаний, которые эквивалентны тестовым испытаниям, проводимым при высоких мощностях и температурах.

[С.Гарсиа, глава отдела маркетинга,](#)
[Х.Киссель, инженер, DILAS, \[www.DILAS.COM\]\(http://www.DILAS.COM\)](#)

образом, борьба с зоной захвата преследует, прежде всего, цель линейаризации выходной характеристики.

Были предложены и опробованы несколько вариантов решения проблемы:

- Вращение ЛГ с постоянной угловой скоростью.
- Использование вводимых в резонатор невзаимных фазосдвигающих устройств (НФУ), основанных на эффектах Физо, Фарадея и др.
- Применение вибрационного углового движения, которое получило название виброподставки.
- Использование зеемановского расщепления частот встречных волн в магнитном поле.
- Многочастотные режимы работы.
- ЛГ с естественными невзаимными фазосдвигающими элементами (НФЭ) [12].

На первых этапах развития ЛГ проблема линейаризации решалась в основном посредством введения искусственного "начального" расщепления частот встречных волн. С этой точки зрения наиболее перспективным представлялось использование невзаимных фазосдвигающих устройств.

Одна из возможных схем НФУ – устройства для начального разноса частот, которое иногда называют ячейкой Фарадея, изображена на рис.7 [13]. Здесь четвертьволновые пластинки 1 и 3, размещаемые на торцах магнитооптической среды 2, играют роль трансформаторов поляризации, превращая линейно поляризованное колебание вне магнитооптической среды в колебание, поляризованное циркулярно внутри нее. Для световой волны, бегущей слева направо, как показано на рис.7, пластинка 1 является входной, превращающей линейно поляризованное колебание E в циркулярное, вращающееся, например, по часовой стрелке. Внешнее магнитное поле H , создаваемое с помощью соленоида или постоянного магнита, вызывает изменение показателя преломления $n_{1,2}$ изотропной среды 2, как было показано выше, что приводит к дополнительному приращению фазы $\Delta\phi$. Пройдя путь длиной l , световая волна круговой поляризации проходит через преобразователь поляризации 3, восстанавливая исходную линейную поляризацию E . Аналогичным преобразованиям подвергается встречно бегущая волна. Отличие состоит в том, что для нее входным трансформатором является преобразователь 3, после которого линейная поляризация

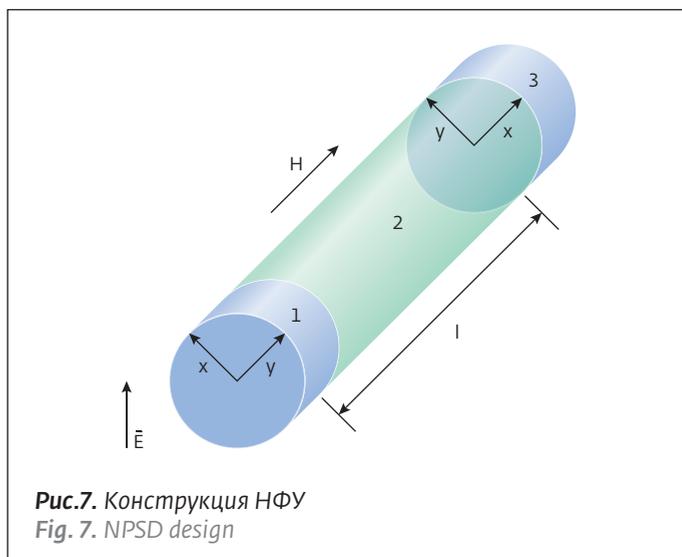


Рис.7. Конструкция НФУ
Fig. 7. NPSD design

their strong bond. As a result, counter-progressive waves obtain the same frequency at which the difference frequency becomes equal to zero. The typical LG output characteristic is given in Fig. 6 [11].

Here the dead zone and nonlinearity areas are clearly observed. Thus first of all, the struggle against capture zone is aimed at the linearization of output characteristic.

Several variants of the problem solution were suggested and tested:

- LG rotation with the constant angular velocity.
- Use of nonreciprocal phase-shifting devices (NPSD) introduced into the resonator and based on Fizeau effect, Faraday effect etc.
- Application of vibratory angular motion which is called dither.

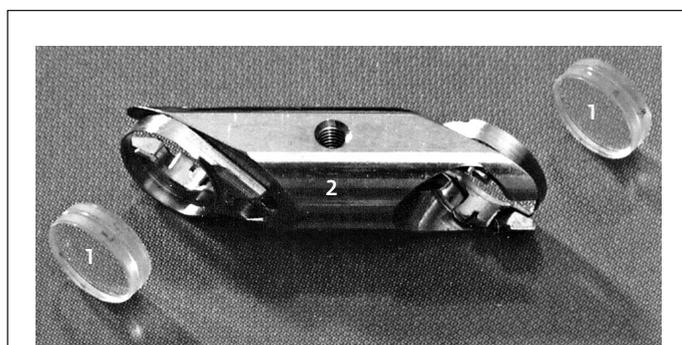


Рис.8. Конструкция дифференциального НФУ: 1 – невзаимные элементы; 2 – втулка для установки НФЭ под углом Брюстера
Fig. 8. NPSD-differential design: 1 – nonreciprocal elements; 2 – bushing for installation NPSE at Brewster angle



трансформируется в круговую, но с вращением против часовой стрелки. В результате встречная волна на выходе НФУ приобретает противоположный по знаку фазовый сдвиг (в рассматриваемом случае отрицательный $-\Delta\varphi$) и на выходе сохраняет исходную линейную поляризацию. Внешний вид классической фарадеевской ячейки приведен на рис.8.

Очевидно, что применение НФУ, основанного на эффекте Фарадея, повышает магниточувствительность ЛГ. Для ее снижения применяются дифференциальные НФУ (рис.9) [14]. Устройство состоит из двух магнитооптических секций 3, разделенных полуволновой пластиной 2, кристаллографические оси которой ориентированы произвольно. Ориентация кристаллографических осей трансформаторов поляризации 1 ортогональная. Полуволновая пластина играет роль внутреннего трансформатора поляризации, превращающая левоциркулярную поляризацию в одной из секций НФУ в правоциркулярную в другой. Четвертьволновые пластинки 1 играют роль трансформаторов линейно поляризованных колебаний в циркулярные и обратно.

Как правило, нестабильность дрейфа ЛГ с НФУ оказывалась в лучшем случае на уровне 0,1 град/ч. Причинами такой нестабильности дрейфа являлась чувствительность НФУ к изменению температуры, нестабильность магнитного поля, неточность преобразования поляризации фазовыми пластинками и ряд других эффектов. Поэтому чаще всего для уменьшения влияния связи встречных волн на работу ЛГ стали использовать метод вибрационного углового движения, который получил название виброподставки.

При использовании виброподставки ЛГ приобретает знакопеременное начальное смещение. В результате рабочая точка находится в зоне захвата в течение очень малых промежутков времени. Такой метод стал наиболее популярным. Конструкция механического виброподвеса активно развивалась, предлагались различные методы для устранения "полочек" в выходной характеристике, свойственных ЛГ с виброподставкой, и многие другие инновации. Одним из высокоточных вариантов знакопеременного механического начального смещения стала система с "карусельным" приводом, когда гироскоп совершает несколько оборотов в одну сторону, после чего практически мгновенно (менее чем за 0,1 с) останавливается

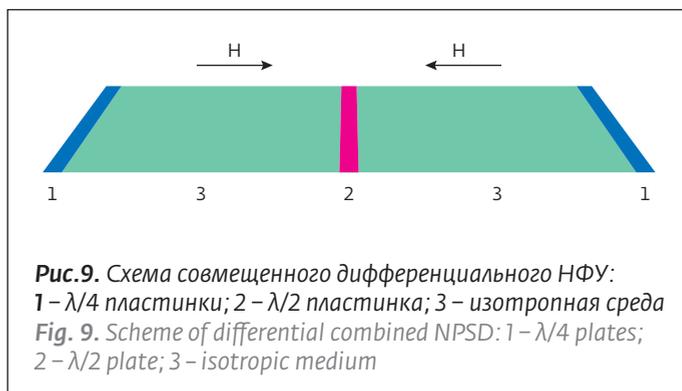


Рис.9. Схема совмещенного дифференциального НФУ:
1 – $\lambda/4$ пластинки; 2 – $\lambda/2$ пластинка; 3 – изотропная среда
Fig. 9. Scheme of differential combined NPSD: 1 – $\lambda/4$ plates;
2 – $\lambda/2$ plate; 3 – isotropic medium

- Use of Zeeman splitting of counter-propagating waves frequencies in magnetic field.
- Multi-frequency operating modes.
- LG with natural NPSEs [12].

When using the dither device LG obtains the alternating-sign initial shift. As a result, the operating point is located within the capture zone during very short time intervals. At the early stages of laser gyroscope development such method became the most popular. Construction of the mechanical dithering suspension was being actively developed and different methods for the removal of "shelves" in the output characteristic which are inherent to LG with dither and many other innovations were being suggested. As a result, the system with "carousel" drive became the most suitable when the gyroscope performs several turns in one direction and afterwards practically instantly (less than in 0.1 s) stops and repeats its motions in opposite direction. Despite the obvious advantages of dithering as the method of LG output characteristic linearization long-term operational experience allowed detecting a number of serious shortcomings:

- Considerable tangential accelerations of LG construction elements which approximate to 30 g;
- Excitation of associated mechanical oscillations;
- Considerable level of random walk which does not make it possible to approximate the potential accuracy of LG;
- Increasing of weigh-size characteristics.

Besides, introduction of the element which creates the similar "mechanical shivering" into LG construction causes the return to the age of "iron" gyroscopes depriving the optical gyroscopes of their main advantage – solid state. Use of nonreciprocal phase devices (NPD) appears to be prospective from this point of view.

One of the possible schemes of nonreciprocal phase-shifting device (NPSD), device for the initial frequency spacing, which sometimes is



и повторяет свое движение в противоположном направлении.

Несмотря на очевидные достоинства виброподставки как способа линеаризации выходной характеристики ЛГ, многолетний опыт работы позволил выявить и ряд серьезных недостатков:

- значительные тангенциальные ускорения элементов конструкции ЛГ, приближающиеся к 30 g;
- возбуждение сопутствующих механических колебаний;
- значительный уровень случайного дрейфа, не позволяющий приблизиться к потенциальной точности ЛГ;
- увеличение массогабаритных характеристик.

Кроме того, внедрение элемента, создающего подобный "механический озноб", в конструкцию ЛГ отбрасывает нас обратно в эпоху "железных" гироскопов, лишая оптические гироскопы их основного преимущества - твердотельности.

Другим эффективным методом борьбы с синхронизацией частот встречных волн явилось использование четырехволнового режима генерации, предложенное Де Лангом [15]. Патент США [16], выданный на дифференциальный ЛГ (Differential Laser Gyro System), закрепил за четырехчастотными ЛГ общеизвестную аббревиатуру DILAG. Разработка одного из первых образцов DILAG относится к 1977 году. Промышленное производство четырехчастотных ЛГ начато фирмой Litton в 1991 году после приобретения ею технологии создания таких ЛГ, разработанной фирмой Raytheon Corporation [17]. В фирме Litton четырехчастотный ЛГ получил название Zero Lock Laser Gyro (ZLG) - ЛГ с нулевой зоной захвата. С 1991 по 1998 гг. фирмой Litton (впоследствии вошедшей в фирму Northrop Grumman) произведено более 1500 промышленных навигационных систем на основе ZLG.

В НИИ "Полюс" развивались сразу несколько направлений. В.Н. Курятов руководил группой по разработке гироскопов серии КМ, использующих виброподставку, а параллельно усилиями А.В. Мельникова, Б.В. Рыбакова и других развивались направления с НФУ различного типа, с Зеемановским расщеплением встречных волн ЛГ (ЗЛГ), основу которых составляют резонаторы непланарного типа.

Продолжение обзора в следующем номере.

called Faraday cell, is shown in Fig. 7 [13]. Here the quarter-wave plates 1 and 2 located on the ends of magneto-optic medium 2 play the role of polarization transformers turning the linearly polarized oscillation outside the magneto-optic medium into the oscillation polarized circularly inside of it. For the light wave progressing from left to right, as it is shown in Fig. 7, the plate 1 is the input plate which transforms the linearly polarized oscillation E into the circular oscillation rotating clockwise, for example. External magnetic field H generated with the help of solenoid or permanent magnet causes the change of refraction index $n_{1,2}$ of isotropic medium 2, as it was shown above, which results in the additional phase increment $\Delta\phi$. Passing the way with the length of l the light wave of circular polarization passes through the polarization transformer 3 restoring the initial linear polarization E . Counter-progressive wave is subjected to the analogous transformations. The difference consists in the fact that for it the transformer 3 serves as input transformer after which the linear polarization is transformed into the circular one but with counterclockwise rotation. As a result, counter-progressive wave at NPSD output obtains the phase shift opposite in sign (in the considered case negative $-\Delta\phi$) and at the output keeps the initial linear polarization. Appearance of the classic Faraday cell is shown in Figure 8.

It is obvious that the application of NPSD based on Faraday effect increases the magnetic sensitivity of LG. For its reduction the differential NPSD is applied (Fig. 9) [14]. It consists of two magneto-optic sections 3 divided by the half-wave plate 2 crystallographic axes of which are randomly oriented. Orientation of crystallographic axes of polarization transformers 1 is orthogonal. Half-wave plate plays the role of internal polarization transformer which turns the left-circular polarization in one of NPSD sections into the right-circular polarization in the other section. Quarter-wave plates 1 play the role of transformers of linearly polarized oscillations into the circular oscillations and inversely.

Simultaneously several areas were developed at Polyus Research Institute. V.N. Kuryatov supervised the group on the development of gyroscopes of KM series which use the dither device and simultaneously the areas with NPSD of different types, Zeeman splitting of LG (ZLG) counter-propagating waves based on the non-planar resonators were developed by the efforts of A.V. Melnikov, B.V. Rybakov and others.

To be continued.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Пешехонов В. Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем. Гироскопия и навигация, 2011, №. 1, с. 72.
2. **Einstein A.** Zur elektrodynamik bewegter körper. – Annalen der physic, 1905, т. 322, № 10, с. 891– 921.
3. **Sagnac G.** Compt.rend., 1913, v.157, № 708, p.1410,.
4. **Берштейн И.Л.** Опыт Саньяка на радиоволнах, Доклады Аакдемии наук СССР, 1950, Т. LXXV, №5, с. 635.
5. **Rosenthal A.** – J.Opt.Soc.Amer., 1962, v.52, p.1143.
6. **Macek W. M., Davis J. D.** Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers. –Applied Physics Letters,1963, v. 2, №. 3, p. 67– 68.
7. **Loukianov D. P. et al.** The History of Laser Gyro Development in the Former Soviet Union. – Proceedings of the 57th Annual Meeting of The Institute of Navigation, 2001, p. 225-237.
8. **Лукьянов Д.П.** Лазерные и волоконно-оптические гироскопы: состояние и тенденции развития. – Гироскопия и Навигация, 1998, №4(23), с.23-45.
9. **Abdale J., Benischek V., Macek W.** History of Ring Laser Gyroscope Development at Lockheed Martin (Formerly Sperry). – Proceedings of the 57th Annual Meeting of The Institute of Navigation. 2001, p. 176– 187.
10. **King A. D.** Inertial navigation-forty years of evolution. – GEC review, 1998, v. 13, №. 3, p. 140– 149.
11. **Бычков С. И., Лукьянов Д. П., Бакаляр А. И.** Лазерный гироскоп. – М.: Сов. радио, 1975.
12. **Виноградов В. И., Захаров М. А., Таушан Б. А.** Лазерный гироскоп с естественным невзаимным элементом. – Авиакосмическое приборостроение, 2006, №. 10, с. 23– 27.
13. **Лукьянов Д.П.** Устройство для создания начального сдвига частот в кольцевом оптическом квантовом генераторе. Авт. свид. № 274871 – "БИ", 1970, №21.
14. **Лукьянов Д.П. Рогачев А.Ф.** Устройство для создания невзаимного фазового сдвига линейно поляризованных колебаний. Авт. свид. № 373806. – "БИ", 1973, №14.
15. **De Lang H.** Eigenstates of polarization in lasers. – Phillips Res. Repts, 1964, v. 19, p. 429– 440.
16. **Yntema G. B.** Differential Laser Gyro System : пат. 3862803 США. – 1975.
17. **Volk С.Н., Gillespie S.C., Mark J.G., Tazartes D.A.** Multioscillator ring laser gyroscopes and their applications. – Optical Gyros and their Applications. NATO RTO AGARDograph 339, May 1999.



ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МОДУЛИ КОМПАНИИ LIMO

Группа компаний LIMO производит оптические элементы и модули для накачки волоконных и твердотельных лазеров. Производственные площадки и штаб-квартира компании находятся в Германии, в Дортмунде. Коллектив сотрудников LIMO численностью в 240 человек связывают теплые дружеские отношения. Наша компания имеет русско-немецкие корни (Lissotchenko MicroOptic), ведь ее основатель – ученый из России доктор Лиссотченко. LIMO обладает опытом двухсторонних научных связей, в числе наших партнеров по многим проектам есть и Институт общей физики им.А.Прохорова РАН, и Технический государственный университет им К.Баумана.

Мы начали свой бизнес 20 лет назад, стартовав с производства оптических элементов для лазеров, а перешли на производство законченных лазерных продуктов под определенные цели заказчиков. Мы так входим в их технологию, настраиваясь под заказчика, что нам кажется, мы лучше них понимаем, в каком лазерном инструменте они нуждаются. Но по-прежнему основной частью нашего бизнеса остается изготовление оптики сверхмалых размеров. Представьте себе – мы изготовили оптический элемент для эндоскопии диаметром менее 1 мм, он заменяет 5 приборов стандартной продукции и используется в различных медицинских задачах. Дело в том, что по мере развития техники неинвазивной медицинской диагностики обозначилась проблема – зачастую врач, желая получить максимально информативные данные об исследуемых органах, вынужден последовательно использовать достаточно много волоконно-оптических датчиков с разным угловым полем зрения. Мы изготовили оптический элемент, закрепленный на одном волокне. Причем заметьте, его поверхность асферическая, к тому же в разных плоскостях, то есть в одном объекте существуют одновременно три различных варианта асферики.

Еще одно направление нашего производства – маленькие лазерные модули для накачки более мощных диодных лазеров, мощностью в несколько десятков ватт. Наши модульные диодные решения эксплуатируются в устройствах накачки волоконных и твердотельных лазеров. Затем уже эти лазеры используют в медицинских целях, для измерительной техники и для маркировки. Мы знаем, как создать равномерную засветку кристалла, исключить разнонаправленность излучения диода, владеем секретами создания специальных оптических устройств. Эти устройства миллиметровых размеров представляют собой скорее комбинацию дифракции и рефракции. Для их изготовления компания LIMO спроектировала и построила специальный станок, но использует его только для собственных нужд ввиду секретности технологии. Казалось бы, принцип реализуемого процесса чрезвычайно прост и основан на эффекте раскалывания стекла, но станок уникальный. На вопрос, а как же у вас получаются такие маленькие детали, мы отвечаем, перефразируя слова знаменитого скульптора Микелянжело: "Отсекаем все лишнее, оставляя только нужное", – хотя с творческим процессом Микелянжело нас различают размеры объектов и инструменты.

Мы анонсируем планы развития LIMO в направлении индустриальных приложений. Логика нашего движения такова – сначала оптические элементы, затем – устройства накачки, от них – к разработке и созданию лазера, завершающий этап – изобретение на его основе технологии создания нового продукта. LIMO участвует в разных проектах, связанных с производством мощных лазеров. Компания уже приступила к разработке нового многофункционального технологического лазера мощностью 150 кВт, длина волны излучения 1 мкм, предназначенного для обработки крупных объектов. Техническим заданием планируется довести производительность этого



Пауль Хартен, начальник отдела коммуникаций и развития бизнеса компании LIMO

лазера до 10 миллионов квадратных метров в год термически обработанных поверхностей. Операции термической обработки, предусмотренные к выполнению на разрабатываемой установке, разнообразны: это и наплавка, и упрочнение, и придание поверхностям новых фрикционных и антикоррозионных свойств, и изменение электрических свойств, и увеличение твердости, и полировка.

Мы связываем свое будущее с созданием новых установок, поэтому уделяем большое внимание опытно-конструкторским разработкам. Ведем собственные НИОКР, выполняем ОКР по заказам потребителей. Плюс к этому имеем государственный заказ, участвуя в проекте по термоядерному синтезу, где наша часть – это создание модулей для накачки диодных лазеров. Наш анализ рынка технологических лазеров показывает, что промышленные лазеры по-прежнему будут активно развиваться, а лидерами среди них станут лазеры для резки материалов, наплавки, улучшения и изменения свойств поверхностей.

П.Хартен, LIMO (Lissotchenko Microoptik)