

50 ЛЕТ ЛАЗЕРНОМУ ГИРОСКОПУ

Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В.

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

e-mail: dplukyuanov@mail.ru, YVFilatov@mail.eltech.ru

Голяев Ю.Д., Курятов В.Н., Соловьева Т.И.

ОАО «НИИ «Полнос» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Россия

Васильев В.П.

НИИ прецизионного приборостроения, Москва, Россия

Бузанов В.И., Спекторенко В.П., Ключко А.И.

ЦКБ и завод «Арсенал», Киев, Украина

В.И. Виноградов

ОАО «Тамбовский завод «Электроприбор», Тамбов, Россия

К.-У. Шрайбер

Мюнхенский Технический Университет, Геодезическая обсерватория Ветцеля, Бад-Кёцтинг, 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 (лазер) – 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 Зеemanовских 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.

Введение

Эпоха «железных» гироскопов, открытая изобретением в 1851 г. Ж.Б.Л. Фуко (а на самом деле И.Г.Ф. Боненбергера в 1817 г.), дала человечеству ключи к открытию тайн космического пространства и глубин мирового океана, создала предпосылки для разработки нового поколения систем навигации и управления различных объектов гражданского и военного назначения. 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 гиперболюидов, высокоэффективных средств наведения, новых технологий и многое другое. Способность страны разрабатывать и развивать лазерные технологии говорила о её 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.

Этот доклад представляет краткую историю развития лазерной гироскопии. В нём

рассматриваются предпосылки и условия, в которых происходило зарождение лазерной гироскопии, формировались многочисленные концепции их оптико-физических схем, возникающих при этом проблемах, путях и средствах 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-го века, за распространение света. Результаты опытов, направленных на изучение свойств “эфира”, в значительной степени определили создание А. Эйнштейном специальной теории относительности, изложенной им в 1905 г. в работе “К электродинамике движущихся тел” [2].

Одним из опытов по изучению свойств эфира явился эксперимент, поставленный в 1913 г. 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. основополагающим открытием в развитии квантовой электроники явилось предсказание в 1916 г. А. Эйнштейном явления вынужденного излучения. Впервые индуцированное излучение было получено в 1950 г. американскими физиками Е. Парселлом и Р. Паундом в экспериментах по созданию инверсии населенностей ядерных спиновых систем. В 1953 – 1954 гг. 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 г. Басов и Прохоров предложили трехуровневый метод получения инверсной населенности молекулярных уровней. Действующие трехуровневые твердотельные квантовые усилители были созданы в 1957 – 1958 гг. в США и СССР. За полученные результаты Н. Г. Басов и 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 г. 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 г. 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. Поток информации об освоении все новых и новых усиливающих сред и длин волн, рождал 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 ещё 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 ещё не существовало. Тем

не менее приоритет Берштейна И.Л., предвосхитившего концепцию построения волоконно-оптического гироскопа, признают в России и в США.

В 1962 г. 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 4 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.



Рис. 1. В. Мацек с первым лазерным гироскопом (1963 г.)

Следует отметить, что в начале 60-х годов лазерная гироскопия завоевывала своё признание в условиях сложившейся за многие десятилетия разветвлённой 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 производственные базы. 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 «Полнос» (Генеральный директор Стельмах М.Ф.), 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 (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 г. 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 «Полнос» 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 (производившихся?) 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 остаётся до настоящего времени закрытой. Этот процесс усугублялся наличием «железного занавеса», разделявшего страны НАТО и участников Варшавского пакта. В этих условиях международное сотрудничество и научно-техническая кооперация исследователей и разработчиков ЛГ практически исключались. 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 большим.

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 гг. (рис. 2) [8].



Рис. 2. Исследования и разработки ЛГ фирмы Honeywell (1965 – 1994 гг.)

Как следует из рис. 2, первый этап исследований и разработок, занявший значительный период с 1965 по 1979 гг., 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 улучшаемыми массогабаритными характеристиками и увеличить количество единиц выпускаемой продукции при одновременном снижении ее стоимости. К началу 1992 г. соотношение гражданской продукции к военной составило более 10:1 при снижении единичной стоимости с 1981 по 1992 гг. 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).



Рис. 3. Исследования и разработки ЛГ в ЦКБ и на заводе «Арсенал» (1961 – 1994 гг.) (ХОН – хранитель опорного направления)

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].

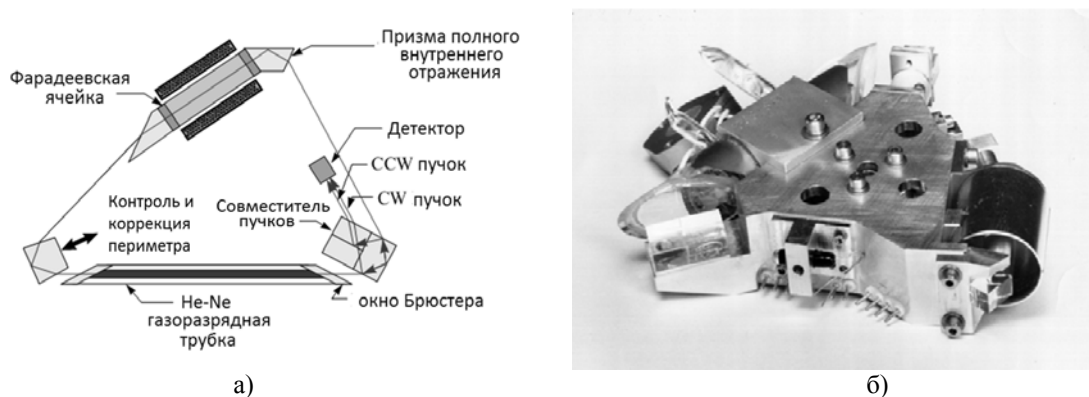


Рис. 4 Один из первых лазерных гироскопов: а) устройство; б) внешний вид.

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 температуру 65 °С, 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 навигационных 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, его 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 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].

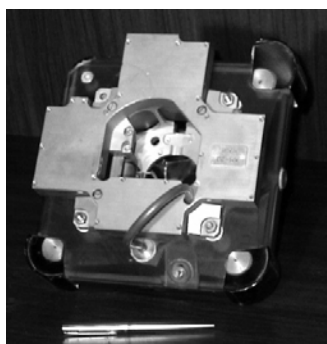


Рис. 5 Гироскоп КМ-22 производства НИИ «Полюс»

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 $8 \cdot 10^{-4}$ °/ч, 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.

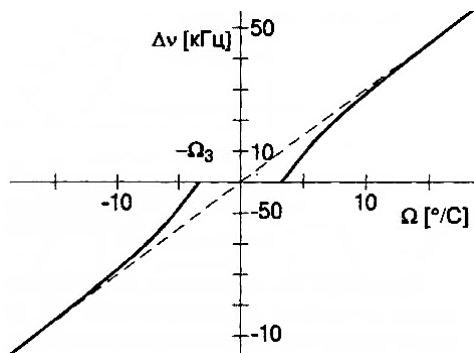


Рис. 6. Выходная характеристика ЛГ:

$$S = 0,017 \text{ м}^2, L = 0,6 \text{ м}, \lambda = 0,63 \text{ мкм.}$$

лучей приводит к их сильной связи. 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 образом, борьба с зоной захвата преследует, прежде всего, цель линейризации выходной характеристики.

Были предложены и апробированы несколько вариантов решения проблемы:

1. Вращение ЛГ с постоянной угловой скоростью.
2. Использование вводимых в резонатор невзаимных фазосдвигающих элементов (НФЭ), основанных на эффектах Физо, Фарадея, и др.
3. Применение вибрационного углового движения, которое получило название виброподставки.
4. Использование Зеемановского расщепления частот встречных волн в магнитном поле.
5. Многочастотные режимы работы.
6. ЛГ с естественными НФЭ [12].

В НИИ «Полнос» 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 др. развивались направления с НФУ различного типа, Зеемановским расщеплением встречных волн ЛГ (ЗЛГ), основу которых составляют резонаторы непланарного типа.

Технологии ЛГ в 70-е годы

Одним из недостатков, присущих ранним моделям ЛГ, являлось большое время выхода на рабочий режим. При этом большинство потенциальных применений требовало, чтобы датчик был готов к работе в течение нескольких минут после старта. Также неудовлетворительной была потребляемая мощность. Борьба с этими недостатками стала одной из ключевых задач для американских ученых в 70-е годы [9].

Основным компонентом, над которым велась работа, являлся резонатор. Его чувствительность к температуре приводила к большому времени готовности и требовала наличия нагревателей. Последние являлись основным потребителем энергии в ЛГ. Решением поставленной задачи стал переход от алюминия к стеклокерамике. Обладая практически нулевым коэффициентом температурного расширения, такой материал позволил регулировать периметр при помощи пьезопреобразователей на зеркалах и отказаться от нагревателей.

Другим элементом, подверженным температурной зависимости, были ППВО. На их место пришли многослойные диэлектрические зеркала. К тому времени технологии их производства сделали шаг вперед, и стало возможным изготавливать зеркала с коэффициентом отражения более 0,999.

Также была подвергнута замещению и фарадеевская ячейка. Вместо нее были применены специальные магнитооптические зеркала. Их принцип работы основывался на эффекте Керра [13]. Такое зеркало под воздействием магнитного поля вносило невзаимные фазовые сдвиги в падающие на него лучи. Внедрение всех вышеперечисленных новаций, а также совершенствование газоразрядной трубки позволили создать новое поколение ЛГ, время готовности которых было на уровне нескольких минут. Структурная схема и внешний вид одного из таких датчиков приведены на рис. 7.

Линейризация 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 играет роль синхронизатора, стремящегося к сближению частот встречных волн. Этот эффект наиболее сильно проявляется в области малых угловых скоростей, где синхронизация

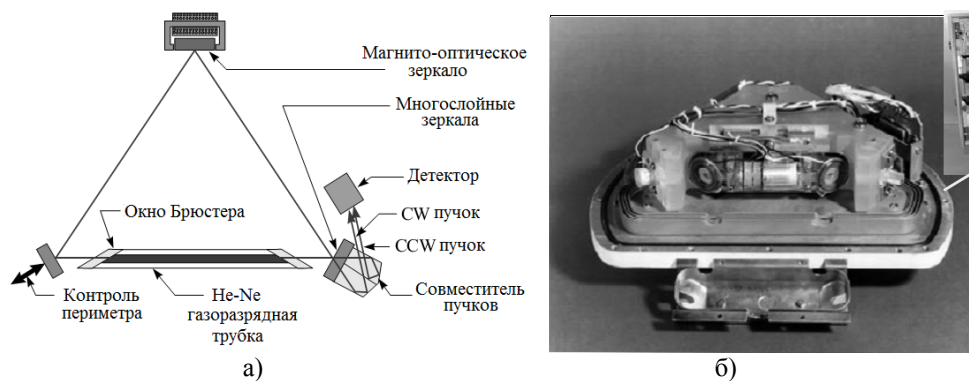


Рис. 7. ЛГ с минимальным временем выхода: а) устройство; б) внешний вид

Отдельно стоит выделить предложение де Ланга [14] по использованию четырехволнового режима в ЛГ для уменьшения связи встречных волн. Патент США [15], выданный на дифференциальный ЛГ (Differential Laser Gyro System), закрепил за четырехчастотными ЛГ общеизвестную аббревиатуру DILAG. Разработка одного из первых образцов DILAG относится к 1977 г. [16]. В дальнейшем этот гироскоп развивался в фирме Litton и в поглотившей ее Northrop Grumman, где получил название ZLG (Zero Lock Gyro) и снискал себе популярность во многих системах.

В середине 70-х усилиями компании Sperry (отделение Lockheed Martin) был разработан целый ряд ИИМ с тремя и более осями. Монолитная конструкция резонатора позволяла значительно уменьшить погрешность, вызванную неортогональностью осей по сравнению с конструкцией из трех одноосных ЛГ в одном корпусе, а также существенно уменьшить размеры блока. Некоторые примеры таких датчиков приведены на рисунке 8.

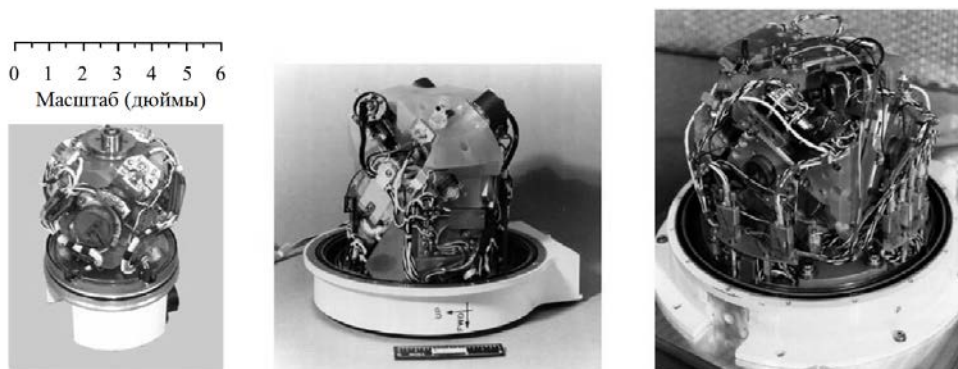


Рис. 8. Монолитные многоосные варианты ЛГ производства Sperry (конец 70-х)

В Советском Союзе в этот период в разработку ЛГ активно включается КБ «Арсенал», г. Киев. Обладая собственной производственной базой, они имели возможность как заниматься развитием теории ЛГ и разработкой новых концепций их построения, так и оттачивать технологический аспект производства. Эта работа велась в тесной кооперации с ведущими научно-исследовательскими и технологическими организациями Советского Союза по следующим основным направлениям:

- разработка многослойных зеркал;
- разработка невзаимных элементов на основе эффекта Фарадея;
- создание технологии вакуумной обработки резонаторов ЛГ;
- разработка специальных ситаллов со сверхнизким коэффициентом линейного расширения;
- разработка холодных катодов;
- создание исследовательской, производственной и испытательной базы на ПО «Арсенал»;
- разработка математического обеспечения и аппаратных средств для обработки информации ЛГ и др.

С 1974 г. начато серийное производство ЛГ типа КОГ-1 со следующими характеристиками:

- выход на режим – менее 60 мс;
- удароустойчивость – более 4g (с 1976 г. – более 60g);
- погрешность измерения – 0,5 °/ч.

Прибор выполнен в виде массивного ситаллового блока, в котором размещены три идентичных ЛГ, оси чувствительности которых совпадают. В каждом ЛГ используется дифференциальный невзаимный элемент. Внешний вид изделия КОГ-1 показан на рис. 9, а.

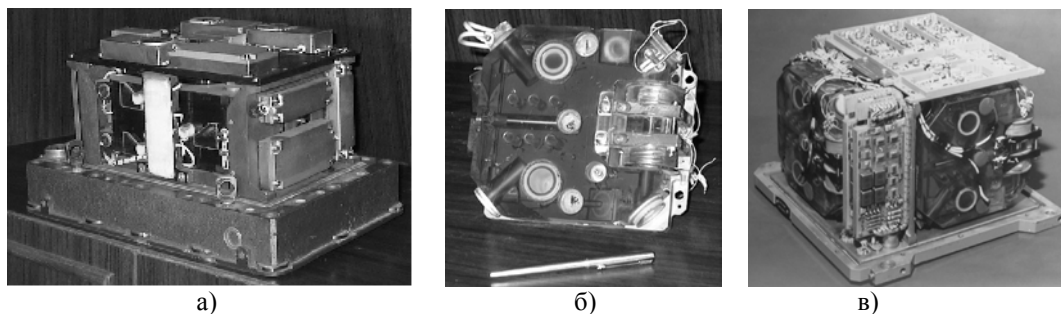


Рис. 9. ЛГ производства завода «Арсенал»: а) КОГ-1, б) Фанза и в) трехосный ИИМ на его основе.

В 1976 г. начаты серийные поставки хранителя опорного направления на базе КОГ-1. С 1978 г. Выпускается модифицированная серия КОГ-2, способных работать в условиях радиационных и сейсмических воздействий до 40-120g с погрешностью не хуже 0,01 °/ч и временем выхода на рабочий режим менее 20 мс.

В 1979 – 1981 гг. разработаны новые ЛГ “Фанза” для наземных подвижных объектов, которые обеспечивали режим гирокомпасирования. Как и в первых конструкциях использовался дифференциальный невзаимный элемент. ЛГ работал с реверсом вокруг вертикальной оси. Погрешность компасирования составила $\sigma \leq 8'$ за 10 мин работы. В режиме измерения текущей ориентации погрешность по углам курса, тангажа и крена составляла $\sigma = 0,3$ °/ч. Внешний вид прибора показан на рис. 9, б. На базе этого прибора в 1978 – 81 гг. был разработан трёхосный блок ЛГ (рис. 9, в).

В Европе развитие ЛГ происходило аналогично и в середине 70-х компании Sagem (Франция) и Marconi (Великобритания) начали разработку БИНС на ЛГ. Однако своего расцвета эти работы достигли только в следующем десятилетии, которое некоторые исследователи называют «декадой лазерной гироскопии» [10].

80-е годы

С годами системы на основе ЛГ находили себе все новые и новые применения. При этом некоторые из них требовали от датчиков высокой стойкости к вибрациям и ударам. Как показали исследования, применяемый резонаторный блок из стеклокерамики не выдержит расчетных нагрузок. (МТ-5 – до 500 g выдержали) Необходимыми прочностными характеристиками обладал металлический блок. Однако он имел ряд очевидных недостатков:

- металл является проводником, т.е. в нем невозможно организовать газоразрядную трубку.
- металлический резонатор обладает высоким температурным коэффициентом.

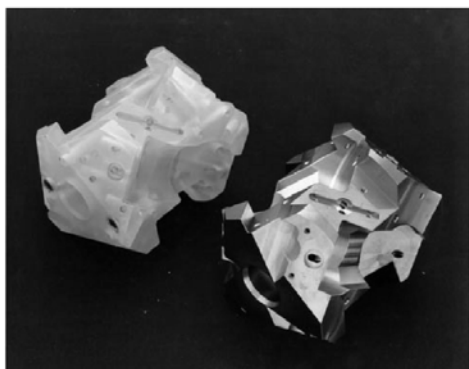


Рис. 10. Резонаторы ЛГ из стеклокерамики для обычных ЛГ и из металла для ЛГ, предназначенных для ракетной техники

принцип действия газоразрядной трубки требовал порядка нескольких минут для того, чтобы прошла первая искра [17]. Для решения этой задачи в газоразрядную трубку ЛГ был добавлен небольшой радиоизотоп, который служил источником постоянной ионизации среды. В результате время готовности ЛГ снизилось до нескольких миллисекунд.

В СССР в этот период одной из основных решаемых задач являлось повышение точности ЛГ. Этого удалось достичь за счет улучшения компоновки гироскопа и сопутствующей электроники, перехода к стеклокерамическим материалам (ситалл и др.). Не был исключением и завод «Арсенал» со своим ЦКБ. В Киеве с середины 80-х годов, разрабатывались ЛГ с «пустым» (без невзаимного элемента) резонатором для навигационных систем. Они использовали традиционную виброподставку и обеспечивали дрейф нуля до $0,03 \text{ }^\circ/\text{ч}$.

К началу 90-х годов ПО «Арсенал» и ЦКБ располагали всем спектром технологий, позволяющих выпускать различные модификации ЛГ. В качестве примера можно привести мелкосерийный выпуск специальных ЛГ треугольной конфигурации, на базе которых совместно с Ленинградским электротехническим институтом был организован выпуск динамических лазерных гониометров, получивших широкое применение не только в СНГ, но и за рубежом [18].

В Великобритании в начале 80-х вновь была проведена демонстрация ЛГ на полигоне в г. Фарнборо. На сей раз свои разработки демонстрировали уже 2 компании: British Aerospace и Ferranti. Каждая представила свою систему на основе ЛГ с периметром 30 и 43 см, соответственно. В результате правительство заключило с каждой из фирм по контракту на 1 млн. £. Компании должны были представить к январю 1986 по 2 новые БИНС для авиационного применения. Следует отметить, что компания British Aerospace опиралась на американские патенты, полученные при покупке отделения Sperry Gyroscope, в то время как в Ferranti занимались собственными разработками [19].

ЛГ второго поколения

Начало 1990-х годов ознаменовалось в первую очередь распадом Советского Союза и окончанием Холодной войны. Это привело к резкому снижению финансирования военных разработок с обеих сторон. Ключевым стал гражданский рынок. Американские компании активно реформировались, поглощая друг друга. Тем не менее, существующие и вновь разрабатываемые ЛГ уже могли обеспечить устойчивый выпуск продукции на их основе: инерциальные модули, БИНС, и интегрированные навигационные системы. На рынках сбыта начинают появляться законченные образцы управляющих и навигационных систем, примеры которых приведены на рис. 11.

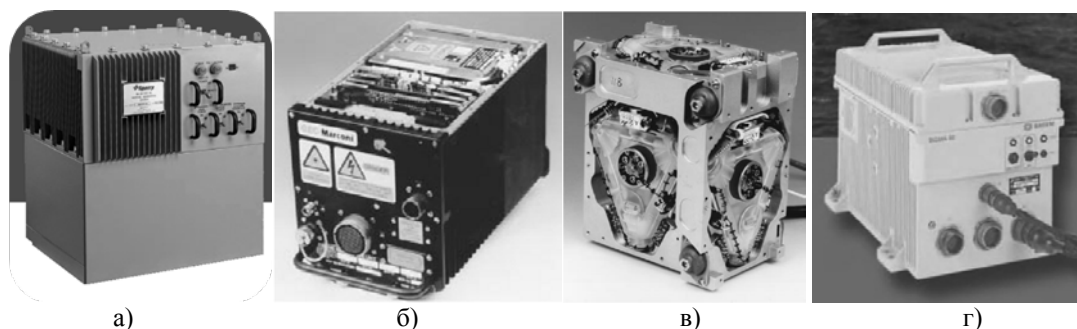


Рис. 11. ИНС на основе ЛГ 90-х годов: а) морская ИНС МК-39 (Northrop Grumman, США); б) FIN3110 (Marconi, Великобритания); в) внутреннее строение ИНС FIN 3110; г) SIGMA 40 (Sagem, Франция).

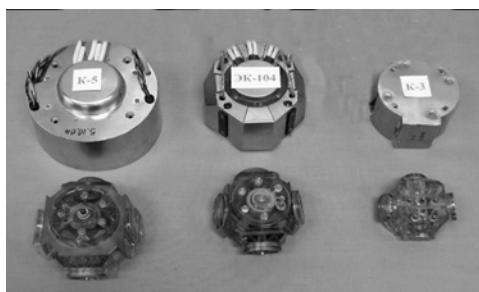


Рис. 12. Современные серийные ЗЛГ, выпускаемые научно-производственным комплексом НИИ «Полюс»

Многие из этих систем остаются актуальными и на сегодняшний день. В частности, ИНС SIGMA 40 установлена на кораблях 35 флотов стран Европы. Британская система FIN3110 (BAE Systems) планируется к установке на минометы Agrab Mk.2 для вооруженных сил ОАЭ в 2013 году [20].

В России, несмотря на сложную экономическую ситуацию, разработки ЛГ продолжались в направлении повышения точности, создания интегрированных навигационных систем и БИНС. В 1990-1994гг. продолжают развиваться разработки новых ударопрочных и двухрежимных ЛГ. Идет поиск новых концепций построения ЛГ для наземных подвижных объектов, решающих задачи гирокомпасирования и текущей ориентации. Одним из заметных достижений лазерно-гироскопического направления в 90-е годы является создание интегрированных БИНС НСИ-2000 на лазерных зеемановских гироскопах. Некоторые примеры серийных ЛГ, выпускаемых НИИ «Полюс», представлены на рис. 12. Характеристики наиболее

употребительных современных зарубежных и отечественных ЛГ, а также систем на их основе, приведены в таблицах 1–4.

Таблица 1. Современные ЛГ в США

Производитель	Honeywell			Northrop Grumman (Litton)		
Модель	GG-1342	GG-1320	GG-1308	LG-2728	LG-2717	ZLG
Периметр, см	32	15	6,1	28	17	18
Масса, кг	1,9	-	0,2	1,5	1,5	-
Габариты, см	15,7×14,7×5	-	-	14×17,7×5	14×11×6,5	-
Материал	Cervit			Zerodur		
Подставка	Виброподставка					Фарадеевская подставка, неплоский контур 4-частотный режим
Число отражателей	3	3	3	4	4	4
Макс. угловая скорость, °/с	800	500	1000	400	800	400
Стаб-ть сдвига нуля (1-10 ч), °/ч	0,007	0,002	1,0	0,005	0,02	-
Стаб-ть сдвига нуля от запуска к запуску, °/ч	0,01	-	1,0	0,01	0,04	0,003
Случайный дрейф, град/√ч	0,003	0,0018	0,1	0,003	0,015	0,0015
Масштабный коэффициент (МК), угл.с/имп.	2	4	9	1,8	3,0	0,75
Стаб-ть МК	5×10^{-5}	1×10^{-5}	$1,5 \times 10^{-4}$	5×10^{-6}	5×10^{-5}	2×10^{-7}
Температурная зависимость сдвига нуля, (°/ч)/°С	0,002	-	-	-	-	0,002

Таблица 2. Современные ИНС на ЛГ в США и Европе

Производитель	Sagem			Northrop Grumman	Honeywell	Kearfott
Модель	SIGMA 40	SIGMA 40 XP	SIGMA 95 N	МК-39	HG-1700	KI-4939
Применение	Морское		Авиационное	Морское	Ракетное	
	Надводное	Подводное				
Габариты, мм	285x225x410		209x200x385	444x491x621	объем 541 см ³	97x89
Масса, кг	24		<15	-	<0,9	0,9
Погрешность позиц-я, м.мили/ч	0,06	0,04	<0,5	0,125	-	-
Известные потребители	Более 35 флотов стран Европы, а также ОАЭ, Индии и		ВВС Франции и других стран Европы, МиГ-29	Корабли флотов стран НАТО	-	-

	Южной Кореи		(экспортная версия)			
--	----------------	--	------------------------	--	--	--

Таблица 3. Современные ЛГ в России (данные на 1 ось и 3 оси - !)

Фирма Параметр	НПК «Электрооптика»		НИИ «Полюс»	ОАО МИЭА	ОАО «ТЕМП- АВИА»	ОАО «Раменский приборостроит ельный завод»	
	ГЛ-1	ГЛ-2	МТ-401	ЛГ-2	ЛГ-2	ГЛ-1	ЛЧЭ
Периметр, см	44	28	16	28	16	–	
Масса, кг	4	2	5,5	1,8	1,5	4	
Габариты, см	∅20,6×10	15,4×11,6×9	∅18×14	145×130×47	–	∅206× 105	∅176× 166
Материал	Ситалл		Ситалл	Ситалл	–	–	–
Подставка	Виброподставка		Зеэмановская знакопереме нная	Виброподстав ка	–	–	–
Число отражателей	4	4	4	4	4	4	3×3
Разряд	ВЧ разряд		Постоянный ток	Постоянный ток	–	–	–
Мощность, Вт	24 В/0.6 А	30 В/0.6 А	68	–	13	–	–
Максимальная угловая скорость, °/с	360	500	600	–	200	90	400
Стаб-ть сдвига нуля (1-10 ч), °/ч	0,07	0,01	0,5-1,0	0,01	0,4	0,05	–
Стаб-ть сдвига нуля от запуска к запуску, °/ч	0,01	0,01	0,3	–	–	0,02	0,1
Случайный дрейф, град/√ч	0,003	0,005	–	–	–	–	–
Масшт. коэфф. (МК), угл.с/имп.	1,3	2,24	3,33	2,2	–	–	–
Линейность МК	5×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁶	2×10 ⁻⁴	–	–	–	–
Стаб-ть МК	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁶	–	1×10 ⁻⁵	7×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
Температурная зависимость сдвига нуля, (°/ч)/°С	0,003	0,002	–	–	–	–	–

Таблица 4. Современные ИНС на ЛГ в России

Производитель	ОАО «ТЕМП-АВИА»		ОАО «Раменский приборостроительный завод»			НИИ «Полюс»
	БЧЭ-ТКЛ	БИНС-ЛГ	БИНС-СП	БИНС-ЛЧЭ	БЧЭ-М40	АИС-402
Габариты, мм	–	–	190×198×400	190×190×340	100×100×120	∅18×240
Масса, кг	4,5	10	15	15	1,4	8,5
Максимальная угловая скорость, °/с	600	300	400	400	1000	600
Мощность, Вт	27	40	70	80	15	45
Погрешность определения углов тангажа	–	0,005	0,1	0,1	–	–

и крена, °						
Погрешность определения истинного курса, °	–	1	0,1+0,01t	0,05	–	–

Современное состояние рынка ИИМ на ЛГ

Сегодня производители ЛГ редко поставляют на рынок отдельные ЛГ. Как правило, конечным продуктом является инерциальный измерительный модуль (ИИМ) или готовая система. Рассмотрим подробнее рынок ИИМ, опираясь на исследования Yole Développement [21]. Производство инерциальных измерительных модулей является крупным сектором промышленности, где традиционно доминируют оборонные и аэрокосмические применения. 2011 год был стабильным годом для ИИМ с объемом рынка 1,75 млрд. \$ (рис. 13).

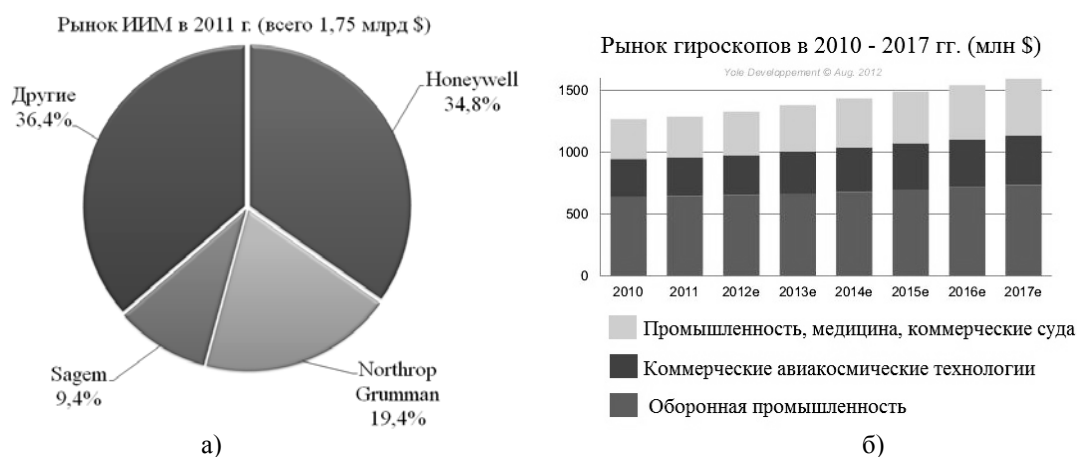


Рис. 13. а) Доля различных производителей на рынке ИИМ; б) объем рынка гироскопов по годам

Как видно из рис. 13, а, наибольшая часть современного рынка ИИМ обеспечивается небольшим числом ведущих зарубежных компаний: Honeywell, Northrop Grumman и Sagem, которые являются явными лидерами. Однако выходят на рынок и другие новые производители, предлагая, прежде всего, недорогие ИИМ на базе МЭМС.

Класс высокоточных инерциальных датчиков, к которым относится в первую очередь ЛГ, является динамичным сегментом рынка, так как все большее число конечных приложений требует наличия систем стабилизации, наведения или навигации. В 2011 году рынок высокоточных гироскопов был оценен в 1,29 млрд. \$, показав рост на 4,3% годовых, и, как ожидается, он достигнет 1,66 млрд. \$ к 2017 году (рис. 13, б). Стоит отметить, что такой прирост во многом обеспечивается популярностью ВОГ и МЭМС-гироскопов, которые из года в год улучшают свои характеристики. Для того чтобы определить место ЛГ среди всего многообразия сенсоров, предлагаемых на рынке, обратимся к гистограмме на рис. 14.

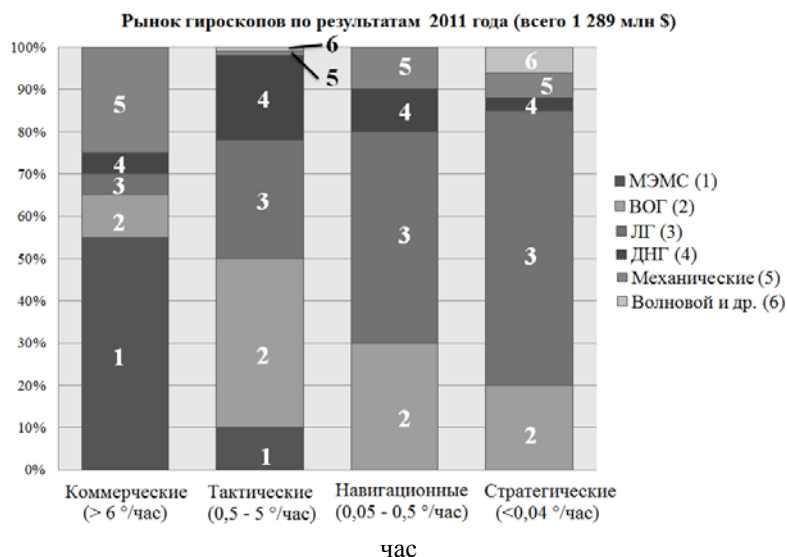


Рис. 14. Объемы продаж различных типов гироскопов в 2011 году.

Как видно, в настоящее время оптические гироскопы по-прежнему доминируют на рынке с большим отрывом. В частности, ЛГ широко используются в навигационных системах и системах тактического наведения. При этом с повышением класса точности доля ЛГ значительно возрастает. Если в области сенсоров низкой точности доминируют МЭМС-датчики в силу их дешевизны и компактности, то в области стратегической навигации доля ЛГ составляет более 60%.

Сверхбольшие лазерные гироскопы

Несмотря на то, что большие усилия инженеров-гироскопистов связаны с уменьшением размеров датчиков, существует и противоположное направление – разработка и создание сверхбольших ЛГ, открывающих совершенно новые области их использования.

В середине 80-х годов группа ученых из Кентерберийского Университета (г. Крайстчерч, Новая Зеландия) занялась разработкой лазерного гироскопа, способного улавливать различные эффекты, проявляющиеся при вращении Земли. Для достижения требуемых значений чувствительности было решено увеличить периметр резонатора по сравнению с обычными гироскопами. Первый образец такого датчика был изготовлен к 1989 году. Он назывался С-1 и имел квадратный резонатор со стороной 85 см. С его помощью удалось измерить скорость вращения Земли, а также показать возможность построения ЛГ с большим периметром.

В дальнейшем было построено еще несколько установок с различными периметрами. Наиболее успешным является проект, реализованный в геофизической обсерватории, г. Ветцель, Германия. Структура установки, расположенной в этой лаборатории приведена на рис. 15[22].



Рис. 15. Устройство геофизической обсерватории в г. Ветцель, Германия.

Здесь гироскоп имеет квадратный резонатор со стороной 4 м, выполненный из церодура. Конструкция в сборе размещается на массивном бетонном основании на глубине нескольких метров под

Землей (рис. 16, а).

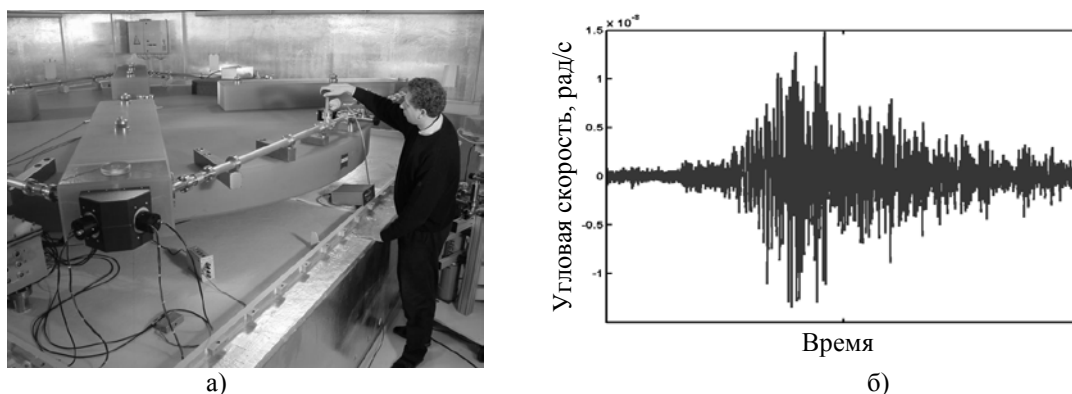


Рис. 16. а) внешний вид гироскопа Grossring G; б) сигнал большого лазерного гироскопа от удаленного землетрясения (Алжир, 21.05.2003)

В лаборатории приняты все меры для исключения паразитного влияния на ЛГ внешних факторов. В результате получился сверхпрецизионный прибор, способный измерять вращение Земли с высокой точностью. С его помощью удалось зафиксировать суточные колебания земной оси (период ~ 24 часа, амплитуда 5–60 см), чандлеровские колебания (период 433 дня, амплитуда ~ 9 м), приливные колебания. Особую роль устройства подобного рода играют в сейсмологии. Благодаря высокой чувствительности, большие лазерные гироскопы способны улавливать сигнал от удаленных землетрясений (рис 16, б).

Сегодня существует целый ряд подобных устройств, расположенных в различных странах и преследующих различные цели: обнаружение сейсмической активности, исследование движения Земли, оценка колебаний опор здания, обнаружение смещений в конструкции детектора гравитационных волн и др. Наибольшим периметром (39,7×21 м) сегодня обладает гироскоп UG-2, расположенный в Кашмирской пещерной лаборатории (Новая Зеландия). Данный проект направлен на оценку возможности дальнейшего увеличения периметра лазерных гироскопов. Как отмечают исследователи, такие макеты показали, что при увеличении размеров нестабильность масштабного коэффициента растет значительно быстрее, чем чувствительность.

Заключение

ЛГ своим появлением в 1962 г. не только открыл новую эру волновых гироскопов, но и создал условия для бурного развития бесплатформенных инерциальных и, в последствии, интегрированных навигационных систем. За 50 лет ученые всего мира проделали большую работу для того, чтобы сегодня мы могли смело заявить: «Лазерный гироскоп – ключевое звено в современных системах навигации, ориентации и стабилизации». К сожалению, невозможно в одном докладе упомянуть всех ученых и фирм, причастных к развитию ЛГ, поэтому в работе в качестве примеров приводятся компании, информация о которых присутствует в открытых источниках.

Вот уже много лет лазерная гироскопия удерживает звание «критических технологий». Приведенный обзор рынка показывает, что, несмотря на активную конкуренцию со стороны ВОГ и микромеханических гироскопов, ЛГ сохраняют сегодня лидирующие позиции в области высокоточных БИНС. Полностью оправдывается прогноз, сделанный академиком В.Г. Пешехоновым в работе [1]: «Высокоточные и среднеточные БИНС будут строиться на оптических волновых гироскопах и выпускаться крупными партиями».

Лазерные гироскопы по праву относятся к числу самых наукоемких и уникальных лазерных приборов, производство которых аккумулирует и стимулирует развитие новейших технологий, включая нанотехнологии. Сегодня ведущим отечественным предприятием в области лазерной гироскопии является ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стальмаха». Руководитель НПК-470, ответственного за разработку Земаповских ЛГ, Ю.Д. Голяев отмечает рост как спроса на ЛГ, так и объемов их производства. Существующее отставание России в области производственной базы постепенно ликвидируется. Этот процесс может быть ускорен за счет привлечения зарубежных технологий, как это делается в области МЭМС или в автомобильной промышленности. Уже сегодня предприятия, объединяя усилия оптических, электронных и других производств, обеспечивают индустрию ЛГ лучшими образцами современной технологической и испытательной аппаратуры для кардинального перевооружения производственной базы. Эти шаги и имеющийся научный задел по созданию и совершенствованию новых образцов ЛГ должны обеспечить повышение качества выпускаемых

приборов и систем на их основе.

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 physik. – 1905. – Т. 322. – №. 10. – С. 891-921.
3. G. Sagnac, G.Compt.rend., 157, 708, 1410, 1913.
4. Берштейн И.Л. Опыт Саньяка на радиоволнах, Доклады Аакадемии наук СССР, 1950, Том LXXV, №5, с. 635.
5. A. Rosenthal, J.Opt.Soc.Amer., 52, 1143, 1962.
6. Macek W. M., Davis J. D. T. M. Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers //Applied Physics Letters. – 1963. – Т. 2. – №. 3. – С. 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. – С. 225-237.
8. Д.П. Лукьянов. 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. – С. 176-187.
10. King A. D. Inertial navigation-forty years of evolution //GEC review. – 1998. – Т. 13. – №. 3. – С. 140-149.
11. Бычков С. И., Лукьянов Д. П., Бакаляр А. И. Лазерный гироскоп. – 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. F. A. Jenkins and H. E. White, Fundamentals of Optics, Fourth Edition, McGraw-Hill Inc., New York, NY, p 691, (1976)
14. De Lang H. Eigenstates of polarization in lasers //Phillips Res. Repts. – 1964. – Т. 19. – С. 429-440.
15. Yntema G. B. Differential Laser Gyro System : пат. 3862803 США. – 1975.
16. Aronowitz F. The laser gyro(Laser gyro operational principles, discussing passive Sagnac and active ring laser interferometers, readout, errors due to null shift, lock-in and mode pulling, etc) //Laser applications. – 1971. – Т. 1. – С. 133-200.
17. J. M. Meek and J. D. Craggs, Electrical Breakdown of Gases, Oxford University Press, London, pp 111-118, 348-349, 355-359, (1953)
18. Loukianov D. et al. Optical Gyros and their Application (Gyroscopes Optiques et leurs Applications). – NATO RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANIZATION NEUILLY-SUR-SEINE (FRANCE), 1999. – №. RTO-AG-339.
19. Warwick G. UK follows laser path //Flight International. – 1985. – Т. 127. – С. 25-7.
20. <http://www.army-guide.com/eng/product4037.html>
21. L. Robin, M. Perlmutter. Gyroscopes and IMUs for Defence Aerospace and Industrial. Report by Yole Développement 2012.
22. Klügel T. et al. Realisierung des Großringlasers G auf der Fundamentalstation Wettzell. – 2001.