

## **Выявление Причин возникновения синхронизации встречных мод в малогабаритном Зеemanовском лазерном гироскопе**

П.В. Огарков

Московский технологический университет МИРЭА

### **Введение**

#### **Принцип работы лазерного гироскопа**

Рассмотрим принцип работы кольцевого лазерного гироскопа. Лазерный гироскоп представляет собой лазер с кольцевым резонатором, который образован тремя и более зеркалами. По этому резонатору в противоположных направлениях распространяются два луча (по часовой стрелки и против часовой стрелки). На рисунке 1 приведена принципиальная схема гироскопа. При неподвижном резонаторе два встречных луча одинаковы. При вращении резонатора наблюдается эффект Саньяка, который заключается в том, что одна встречная волна приобретает фазовый сдвиг относительно другой встречной волны. Это эффект, в специальной теории относительности, является следствием релятивистского сложения скоростей. Таким образом, при прохождении контура резонатора встречные волны затрачивают разное время на его прохождение, создавая разность фаз.

Для регистрации изменения частоты или разности фаз встречных лучей используется интерференция. Оба луча выводятся через выходное зеркало резонатора и с помощью оптических элементов сводятся и образуют интерференцию. Зная направление и скорость движения интерференционных полос, можно определить какой луч увеличил свою частоту, а какой уменьшил, тем самым можно узнать направление движения резонатора.

#### **Выходная характеристика лазерного гироскопа и его погрешности**

В идеальном гироскопе зависимость изменения частоты к угловой скорости линейно и изображена на рисунке 1.а. Реально же существуют три основных вида погрешности приводящих к искажениям характеристики лазерного гироскопа. Эти характеристики изображены на рисунке 1.б - рисунке 1.г

1. Смещение нуля характеристик изображенное на рисунке 1.б. Это искажение обусловлено движениями атомов в активной среде, например, Ленгмюровским дрейфом или тепловым градиентом стенок канала. Ленгмюровский дрейф это движение заряженных частиц от анода к катоду вблизи оси канала и обратное движение атомов вблизи стенок канала. Так как лазерное излучение распространяется вблизи оси канала, то для луча активная среда всегда движется в одном направлении. Для лучей разных направлений, движущихся по часовой и против часовой стрелки, среда движется в разных направлениях, что приводит к анизотропии встречных волн, то есть к разности частот между этими волнами. По этому в отсутствии вращения лазерного резонатора, на выходе будут наблюдаться биения. Смещение нуля может так же происходить при наличии внешнего магнитного поля.

Для исключения смещения нуля используют резонаторы с двумя разрядными каналами, а именно с двумя анодами и одним катодом. Использование двух разрядов с различными направлениями токов происходит взаимная компенсация смещающих факторов.

Так как скорость дрейфа рабочих атомов непостоянна и неодинакова по сечению канала полной компенсации дрейфа нуля добиться невозможно. Также смещение нуля будет меняться при изменении положения луча внутри канала, например, при перемещении зеркал на пьезоэлементах.

2. Синхронизация встречных волн или захват частот встречных волн изображена на рисунке 3.в. Захват и методы исправления погрешности данного вида будут рассмотрены ниже

3. Изменение масштабного коэффициента при изменении скоростей вращения изображено на рисунке 1.г. Этот эффект приводит к тому что меняется наклон частотной характеристики.

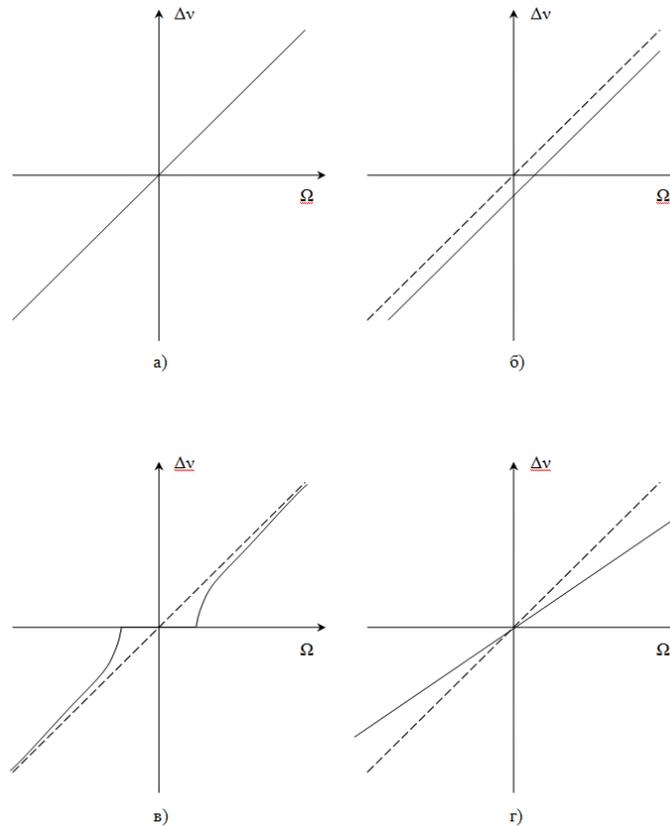


Рисунок 1. Характеристика лазерного гироскопа

- а) идеальная
- б) со смещением нуля
- в) с зоной захвата
- г) с измененным масштабным коэффициентом

### 1.3 Синхронизация встречных волн «Захват»

Захват частот встречных волн это эффект при котором разность частот встречных волн при малых скоростях вращения становится равной нулю. В результате этого полностью утрачивается информация о вращении резонатора.

Физическая сущность захвата. Генерация двух встречных волн в кольцевом лазерном резонаторе подобна двум колебательным системам. И наличие связи между этими двумя системами (обмен энергиями) приводит к синхронизации колебаний этих двух систем. Таким образом, даже ничтожно малая связь между контурами приводит к полной потере чувствительности лазерного гироскопа к угловому вращению в некоторой зоне малых угловых скоростей. Это зона называется зоной синхронизации встречных волн или зоной «захвата».

Причины захвата можно условно разделить на две группы «физическую» и «технологическую». К технологическим причинам возникновения синхронизации мод относятся ошибки на производстве и технологические недостатки конструкции зеркал и самого резонатора, приводящие к связи контуров, например:

1. Рассеяние на диафрагме резонатора
2. Отражение на загрязнениях оптических поверхностей
3. Дефекты оптических покрытий
4. Ошибки в изготовлении корпуса (каналов резонатора)
5. Рассеяние от «задней» поверхности оптических элементов

К первой группе относятся причины, не зависящие от качества производства зеркал, каналов, качества их обработки и сборки. К этим причинам относятся:

1. Рассеяние электромагнитных волн на заряженных частицах
2. Синфазное сложение отражений от зеркал. Интерференция.
3. Рассеяние на зеркалах в нулевую моду

Устранение или уменьшение захвата является одной из основных задач, так как высокая точность измерения является одной из самых главных достоинств кольцевого лазерного гироскопа и поэтому наличие зоны нечувствительности в области нуля сужает возможности применения данного прибора.

Одной из наиболее очевидных причин возникновения захвата это рассеяние на диэлектрических зеркалах. Но в настоящее время коэффициент отражения на зеркалах составляет 99.995-99.9995%, и каждая «девятка» после запятой дается ценой больших технологических и финансовых затрат. Другой эффект возможной уменьшение зоны синхронизации мод является подбор взаимных фаз рассеянных на зеркалах волн, чтобы суммарная интенсивность всех рассеянных волн была минимальна. То есть использовать интерференцию отраженных волн, и сведение их воздействия к минимуму. Это можно реализовать при прецизионной регулировке положения зеркал.

### Данные по синхронизации мод в лазерном гироскопе и их анализ

Задачей данной работы является сбор и анализ данных по ширине статической зоны захвата выпущенных с 2012 по 2016 год кольцевых лазерных датчиков К-5 и ЭК-104. На рисунке 2 приведены данные по отбраковке резонаторов «по захвату», большая зона нечувствительности лазерного гироскопа.

Видно, что за период с 2008 по 2010 гг. отбраковка по захвату составляла 15 % от всех приборов поступивших на пост измерения захвата. Такая величина очень велика. Анализ причин приводящих к большой зоне захвата лазерного гироскопа показал что основными причинами являются:

- Посторонние частицы попавшие в резонатор (загрязнения)
- Дефекты отражающего покрытия

Из этих двух причин наиболее существенным является попадание посторонних частиц на отражающее покрытие зеркала в зоне генерации лазерного луча. Таких резонаторов около 90%.

Загрязнения которые могут попасть в резонатор можно разделить на две группы:

1. Частицы стекла
2. Микрочастицы не стеклянной природы (пыль, ворс от салфеток и)

Появление частиц стекла в лазерном резонаторе связано с моментом когда резонатор, в котором низкое давление, вскрывается на атмосферу, такая операция иногда проводится при напae резонатора на вакуумный пост. Снизить риск пропадания таких микрочастиц в резонатор удалось контролем над соблюдением технологии при вскрытии на атмосферу.

Появление частиц не стеклянной природы происходит:

1. При сборке (в основном ворса от салфеток). Вероятность попадания ворса была снижена за счет уменьшения операций при сборке, в которой используется салфетка
2. Так же источником загрязнений являются комплектующие участвующие в сборке лазерного гироскопа – «ножка», катод.



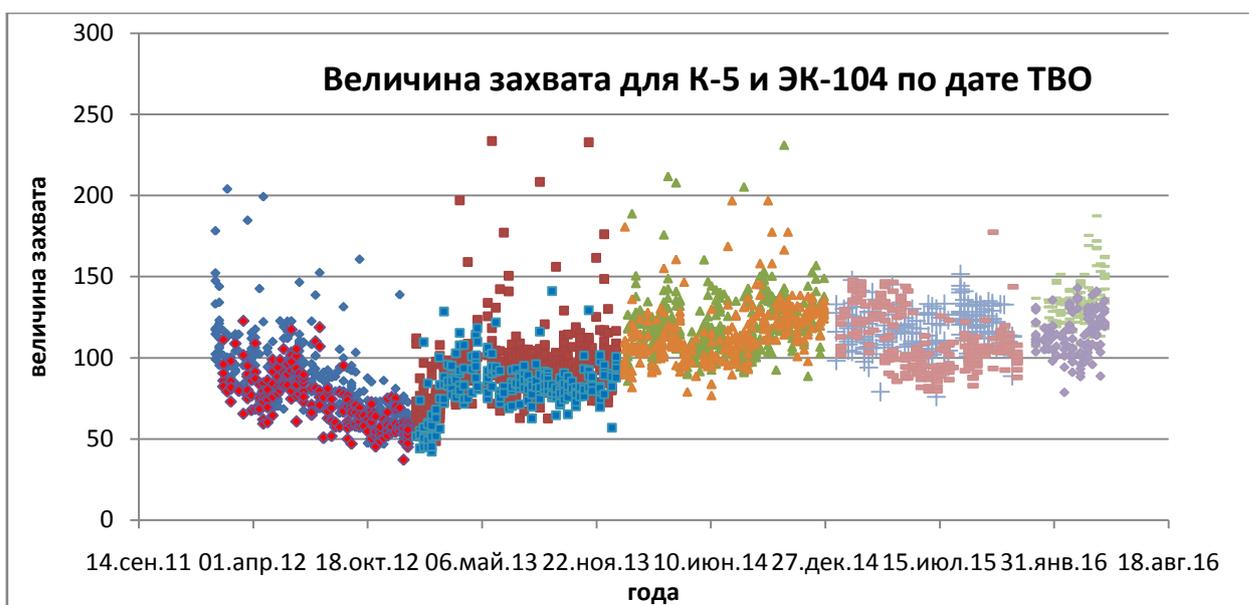
Рисунок 11 Процент брака приборов по захвату по годам

Ножка это составляющая гироскопа, на которой находятся электроды, запитывающие лазер, и через которую происходит наполнение газовой смесью. В настоящее время ножка проходит тщательный контроль и очистку, но из-за долгого и сложного технологического маршрута все равно является наиболее загрязненным элементом. Сам корпус так же является источником загрязнения. Сложная форма и расположение узких каналов, делают затруднительным тщательную очистку резонатора изнутри.

При анализе захватных приборов на катоде было найдено большое количество обгоревшей на ТВО пыли. Для предотвращения попадания загрязнения с катода в резонатор был в 2012 году предварительный контроль чистоты под микроскопом и последующая очистка.

Таким образом основной причиной отбраковки датчиков по захвату являются загрязнения комплектующих элементов и наличие при сборке «пыльных» технологических процессов которые вносят микрочастицы в резонатор. во избежание попадания загрязнений с комплектующих нужно вводить дополнительные этапы контроля и очистки комплектующих. А избежать попадание микрочастиц, попадающих в резонатор в «пыльных» технологических процессах, возможно сокращением таких процессов или их заменой на аналогичные которые не будут вносить в резонатор загрязнения.

Для отслеживания точностных характеристик за длительный период времени был составлен график изображенный на рисунках 12 и 13, на котором представлены зоны звхвата всех приборов произведенных за период с 2012 по 2016 г



Так как тенденция по увеличению захватов на обоих датчиках совпадают то можно сделать выводы, что все причины связаны либо с технологическими процессами происходящими с гироскопами при сборке либо с качеством комплектующих которые производятся на «Полюсе» (зеркала, ножка т.д) или поставляются от поставщиков (ситалловые корпуса).

Анализируя данный график можно увидеть резкий скачек величины захвата в период начала 2013 года. Скачкообразное изменение величины захвата можно связать с изменением какого либо технологического процесса или замены оборудования проведенного в данный период времени.

Плавное же изменение величины захвата в сторону увеличения за больший период времени с середины 2013 г до нынешнего времени можно связать с качеством зеркал и качеством материала из которого изготовлены корпуса.

## Вывод

В ходе данной работы были получены и проанализированы данные по величине захвата т.е. области статической синхронизации мод в Зеемановском лазерном гироскопе. По итогам данной работы можно сделать следующие выводы:

1. По полученным данным было показано, что период 2008-2016 гг. количество отбракованных по захвату зеемановского гироскопа сократилось с 16 до 8%
2. Выявлены основные причины брака по захвату, а именно, попадание в резонатор посторонних частиц (загрязнения) и несовершенство изготовления зеркал резонатора.
3. Рассмотрены возможные причины увеличения статической зоны захвата
4. Предложены пути возможного уменьшения вероятности попадания посторонних частиц в резонатор. Дополнительный контроль чистоты и очистка комплектующих лазерного гироскопа, сокращение количества загрязняющих технологический операций (с использованием салфеток).
5. Собраны данные о величине области статического захвата приборов произведенных в период с 2012 по 2016 г из которых выявлена незначительная тенденция к увеличению захвата лазерных гироскопов

## Литература

1. *Ландсберг Г.С.* Оптика. 6-е изд., стереот.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 848 с.
2. *Ароновиц Ф.*, Лазерные гироскопы, в кн.: Применения лазеров, пер. с англ. – М., 1974, 446 с.
3. *Угаров В.А.* специальная теория относительности - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1977. — 384 с.
4. *Ищенко Е. Ф, Климков Ю. М.* Оптические квантовые генераторы – М. : Советское радио, 1968 . – 472 с.
5. *Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И.* Лазерный гироскоп Москва «Советское радио» 1975 424с.
6. *Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г.* Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии. – Квантовая электроника, 2000, № 2, 30, с. 96.
7. *Доценко А. В., Ларионцев Е. Г.* Режим биений в кольцевом лазере на твердом теле «Квантовая электроника», 4, № 5 (1977)