

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕЕМАНОВСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

*Артюхов С. А.*, майор, командир 4 роты (научной), Россия, Анапа, ФГАУ «Военный инновационный Технополис «ЭРА».

*Колузов А. В.*, капитан, командир 1-го взвода 4 роты (научной), Россия, Анапа, ФГАУ «Военный инновационный Технополис «ЭРА».

*Архипов Б. Г.*, рядовой, оператор 1-го взвода 4 роты (научной), arhipov.era2020@yandex.ru, Россия, Анапа, ФГАУ «Военный инновационный Технополис «ЭРА».

*Книжов К. И.*, рядовой, оператор 1-го взвода 4 роты (научной), kirillknizhov@mail.ru, Россия, Анапа, ФГАУ «Военный инновационный Технополис «ЭРА».

### **Аннотация**

В работе рассмотрено состояние существующих на сегодняшний день моделей зеемановских лазерных гироскопов, описано их строение, конструктивные особенности, принцип их работы, основные источники погрешностей и методы их устранения.

**Ключевые слова:** лазерный гироскоп, датчик угловой скорости, зеемановский кольцевой лазер, светодиодный модуль.

Лазерный гироскоп (ЛГ) – оптико-электронный прибор, построенный на оптическом квантовом генераторе, в основе которого лежит эффект Саньяка [1-2]. Первый образец такого прибора появился в 1963 году [3], однако массовое их производство удалось создать только в середине 1970-х годов, когда стало возможно решить проблемы слишком большого энергопотребления, долгого времени выхода на рабочий режим, высокой чувствительности к температуре окружающей среды и захвата частот [4-5].

На сегодняшний день ЛГ используются в инерциальных навигационных системах и системах управления корабельной, авиационной и ракетной техники [1,2,6,7], поскольку их достоинствами являются: малое время готовности, длительный срок службы, широкий диапазон измеряемых угловых скоростей, высокую точность, устойчивость к температурным и

механическим воздействиям [8]. Разработкой и производством ЛГ занимаются только в наиболее развитых странах (США, Франция, Россия, Китай и Израиль)

Существующие типы гироскопов различаются способом реализации частотной подставки, использующейся для борьбы с захватом встречных волн. [9]. В ЛГ с вибрационной подставкой резонатор механически покачивают вокруг оси чувствительности, для чего используется механический колебательный контур с упругим элементом [8]. Она характеризуется высокой долговременной стабильностью, позволяет применять высокодобротный резонатор с линейной поляризацией генерируемого излучения и обеспечивает максимально высокую точность гироскопов. Однако этот тип частотной подставки имеет существенный недостаток – наличие подвижных механических частей, резко снижающих устойчивость гироскопов к внешним механико-климатическим воздействиям [10].

В ЛГ с магнитной-оптической частотной подставкой проблема захвата частот решается наложением постоянного или переменного магнитного поля на активную среду лазера. Технически это реализуется намоткой соленоида на газоразрядный промежуток резонатора. Создание такого «вращения» основано, например, на эффекте Зеемана [11]. Параметры такой частотной подставки определяются электрическими сигналами, подаваемыми на невзаимные элементы, что обеспечивает большую гибкость в управлении частотной подставкой.

Лазерный резонатор (рис. 1) образуется тремя или четырьмя зеркалами, расположенными по углам полости в форме треугольника или квадрата. Два лазерных луча, генерируемые и усиливающиеся в полостях гироскопа, непрерывно циркулируют по резонатору в противоположных направлениях, условно обозначенных знаками «+» и «-».

В кольцевом лазере с периметром  $L$  условие генерации можно записать в виде:

$$m\lambda_{\pm} = L_{\pm} \quad (1)$$

$$v_{\pm} = mc/L_{\pm} \quad (2)$$

, где  $m$  – число, характеризующее продольный тип колебаний ( $m = 10^5 \dots 10^6$ ),

$\lambda_{\pm}$  и  $\nu_{\pm}$  — длины волн и частоты колебаний, соответствующие периметрам  $L_{\pm}$  соответственно.

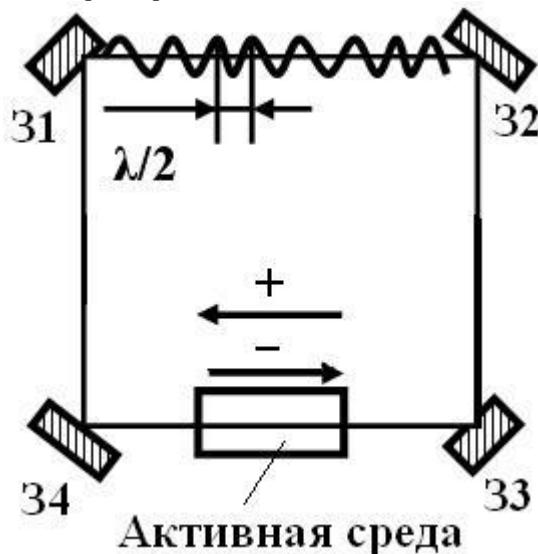


Рисунок 1 — Схема кольцевого лазера, образованного четырьмя зеркалами 31, 32, 33, 34

Для автоматической настройки кольцевого лазера в резонанс в состав схем его жизнеобеспечения входит система регулировки периметра (СРП).

В покоящемся лазере оптические пути  $L_+$  и  $L_-$  одинаковы и частоты встречных лучей  $\nu_+ = \nu_-$ . Ненулевая угловая скорость  $\Omega$  вращения резонатора приводит к неравенству оптических путей и соответственно к неравенству оптических частот, которые определяются в соответствии с отношением:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

В оптическом диапазоне частот ( $10^{14}$  Гц) малое изменение длины оптического пути приводит к значительному изменению частоты. В результате [1].

$$\Delta \nu = \frac{4S\Omega}{L\lambda} = k\Omega \quad (4)$$

, где  $S$  – площадь, охватываемая оптическим контуром;  
 $k$  – коэффициент пропорциональности.

В случае квадратного интерферометра со стороной квадрата  $a$  формула (9) примет вид:

$$\Delta\nu = a\Omega/\lambda \quad (5)$$

Для кольцевого лазера, работающего на длине волны 0,632 мкм (He-Ne лазер), с квадратным резонатором со стороной  $a=4$  см разность частот  $\Delta\nu$  составляет примерно 3 Гц при скорости вращения 10 °/ч. Эту разность частот, которая составляет  $10^{-14}$  от оптической частоты, можно измерить путем гетеродинирования встречных волн.

Измерения угловой скорости можно интерпретировать следующим образом. Стоячая волна, образующаяся в резонаторе суперпозицией встречных волн, сохраняет свое положение относительно инерциальной системы отсчета независимо от углового перемещения резонатора. В таком случае при угловых перемещениях гироскопа связанный с ним наблюдатель с помощью двух фотоприемников и счетчиков зафиксирует узлы или пучности стоячей волны электромагнитного поля, число которых в единицу времени даст разностную частоту  $\Delta\nu$ .

Информация о параметрах вращения получается измерением разности частот противоположно направленных волн, путем их гетеродинирования, которое заключается в пространственном совмещении волн и выделении частоты биений [1].

Для реализации гетеродинного метода используется оптический смеситель (рис. 2), выполненный в виде призмы, в котором встречные волны создают интерференционную картину. Интенсивности картины описываются следующим выражением

$$I = I_0 \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi \varepsilon x}{\lambda} + \Delta\omega t + \varphi \right) \right) \quad (6)$$

где  $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$  – угловая частота биений,  $\varepsilon = 2\pi\theta$ ,  $n$  – показатель преломления призмы,  $\theta$  – отклонение угла при вершине от 90°,  $\varphi$  – постоянный сдвиг фаз.

Расстояние между полосами интерференционной картины равно  $\lambda/\varepsilon$ . Для получения интерференционной картины с заданным расстоянием между полосами (1-3 мм) угол при вершине призмы должен отличаться от прямого на угол  $\theta$ , составляющий порядка 10-20 °.

Выходная информация считывается парой фотоприемников ФП1 и ФП2, две фоточувствительные площадки которых выполнены в виде параллельных полосок, помещенных в плоскость интерференционной картины и смещенных относительно друг друга на четверть периода интерференционной картины.

В идеальном покоящемся ЛГ ( $\Omega = 0$ ) частоты встречных волн равны ( $\Delta\nu = 0$ ), и интерференционная картина неподвижна. При вращении лазера вокруг оси, перпендикулярной плоскости контура резонатора, называемой осью чувствительности, интерференционная картина перемещается со скоростью, пропорциональной  $\Delta\nu$ , в результате чего на выходах фотоприемников появляются синусоидальные сигналы, сдвинутые по фазе на четверть периода. Эти сигналы иногда называются сигналами  $SIN$  и  $COS$ . Направление вращения определяется направлением перемещения интерференционной картины.

Затем синусоидальные сигналы с помощью электронных схем преобразуются в последовательность импульсов, число которых затем подсчитывается реверсивным счетчиком Сч. На выходе счетчика образуется число  $N$ , которое оказывается пропорциональным величине  $\Delta\nu$  и, соответственно, угловой скорости  $\Omega$ . Знак числа  $N$  указывает направление вращения – по или против часовой стрелки. ЛГ, таким образом, имеет цифровой выход.

ЛГ является интегрирующим устройством, измеряющим интегральный угол поворота резонатора лазера в инерциальном пространстве за время съема информации  $t$ :

$$N = \int_0^t \Delta\nu dt \quad (7)$$

Обычно частота съема информации лежит в диапазоне 10-100 Гц.

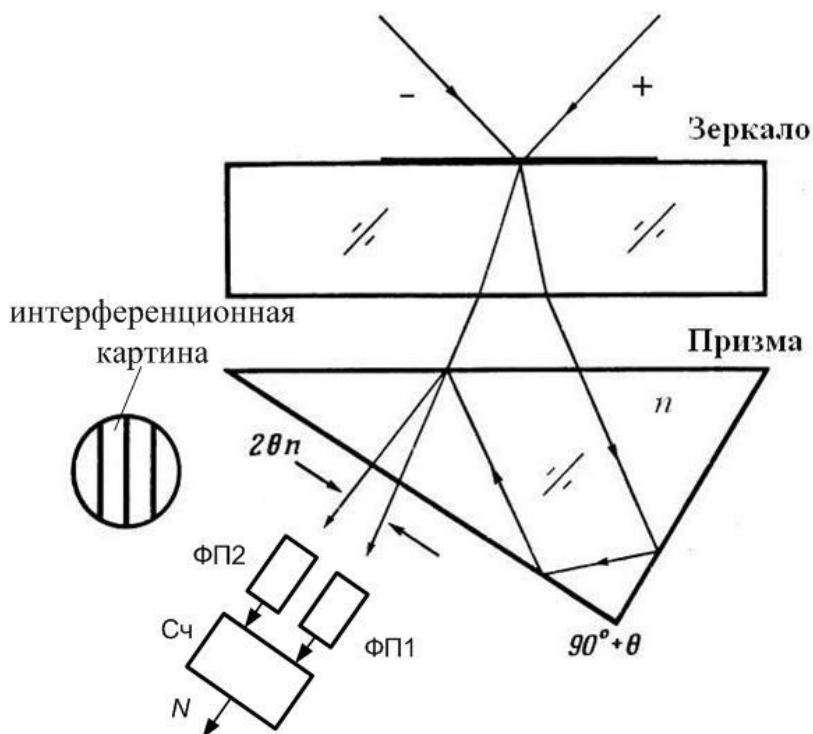


Рис. 2 — Схема получения информации о параметрах вращения с лазерного гироскопа [10].

В идеальном случае выходная характеристика ЛГ - это проходящая через ноль прямая линия. Однако в реальном случае гироскопам присущи погрешности, которые изменяют вид выходной характеристики (рис. 3).

Сдвиг нуля характеристики гироскопа обусловлен невзаимным изменением коэффициента преломления среды, который вызывается всеми другими причинами, кроме вращения. Таким образом, при сдвиге нуля можно получить сигнал даже без вращения.

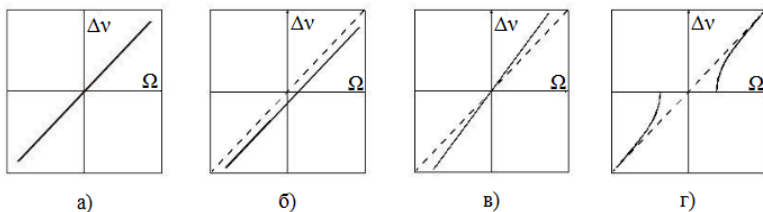


Рис. 3 — Погрешности выходной характеристики гироскопов:

- а) Идеальная характеристика
- б) Изменение частотной характеристики, вызванное смещением нуля
- в) Изменение частотной характеристики, вызванное изменением масштабного коэффициента
- г) Изменение частотной характеристики, вызванное захватом частот.

Для подавления сдвига нуля в резонаторе зеемановского лазера кольцевого (ЗЛК) встраивается диафрагма. Диафрагма деформирует поля встречных волн, причем деформирует их по-разному. За счет разного распределения по поперечной координате поля встречных волн могут иметь разные распределения в активной среде и, соответственно, разный вклад активной среды в разностную частоту.

При симметричном расположении активной среды и диафрагмы дифракционное расщепление отсутствует, так как в этих точках распределения полей встречных волн одинаковы и, соответственно, вклад активной среды в частоты генерации встречных волн также одинаков. Следствием подобной закономерности является необходимость симметричного расположения элементов в резонаторе кольцевого лазера при конструировании ЛГ [12].

Изменение масштабного коэффициента определяется нестабильностью коэффициента преломления оптической среды. Аномальная дисперсия, обусловленная атомными переходами, вызывает изменения масштабного коэффициента, зависящие от коэффициента усиления оптической среды [2].

Захват частот происходит из-за рассеивания, присущего всем зеркалам. Луч, распространяющийся в резонаторе по часовой стрелке, рассеиваясь на зеркалах, «навязывает» свою фазу встречному лучу, распространяющемуся против часовой стрелки, которой, рассеивающийся на тех же зеркалах точно также

навязывает свою фазу первому лучу. В результате при вращении в определённой зоне малых угловых скоростей, называемой зоной захвата, гироскоп генерирует встречные волны одинаковой частоты [1]. При увеличении скорости вращения частотная характеристика выходит на идеальную линейную зависимость.

Для уменьшения влияния захвата частот на работу ЛГ, используется метод описанной выше частотной подставки. Идея метода состоит в том, что при смещении рабочей точки выходной характеристики КЛ по периодическому закону лазер большую часть времени находится вне зоны захвата и чувствует в это время входную скорость вращения (рис. 4). И лишь малую часть периода изменения начального смещения КЛ находится в зоне захвата. При этом очевидно, что чем больше амплитуда изменения смещения и чем быстрее КЛ проходит через зону захвата, тем меньше влияние зоны захвата на ЛГ. Оптимальной с этой точки зрения является прямоугольная форма закона изменения начального смещения, так как в данном случае время нахождения в зоне захвата равно нулю [13].

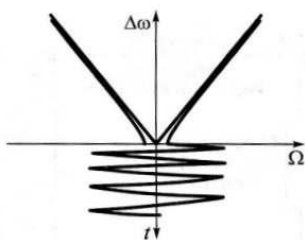


Рис. 4 — Знакопеременное смещение в ЛГ (частотная подставка) [11].

В ЗЛК проблема захвата частот решается наложением переменного магнитного поля на активную среду лазера. При наложении такого поля доплеровский контур усиления активной среды расщепляется на два, симметрично сдвинутых относительно центра исходного контура. Это явление называется эффектом Зеемана [11].

На базе эффекта Зеемана в конструкции ЗЛК реализована знакопеременная магнитооптическая подставка, сводящаяся к знакопеременной периодической модуляции параметров активной среды кольцевого лазера переменным магнитным полем. Такая параметрическая модуляция приводит к тому, что высокочастотный и низкочастотный контуры усиления



периодически меняются местами, вызывая тем самым периодическое изменение знака частотной подставки.

На рисунке 5 представлен резонатор ЗЛК [14], выполненный в ситалловом [15] моноблоке и образованный четырьмя зеркалами.

Катод (К) соединён газоразрядным промежутком (ГРП) с двумя анодами А1 и А2. Катод представляет собой цилиндр из алюминиевого сплава.

Для повышения надёжности пробоя промежутков К-А1 и К-А2 используются дополнительные электроды поджига П1 и П2, расположенные между К и А1, А2, соединённые с ГРП подводными каналами [14].

При включении кольцевого лазера на начальном этапе проходит пробой активной среды между цилиндрическим катодом К и поджигowymi электродами П1 и П2. Формирование разряда начинается при подаче на П1 и П2 положительного относительно катода импульса высокого напряжения.

Для повышения надёжности формирования электрического разряда в ЗЛК применяется подсветка резонатора лазера светодиодным модулем МС-331 с длиной волны излучения 450-470нм. Воздействие оптического излучения на активную среду лазера приводит к её предварительной ионизации [16], что в свою очередь облегчает условия развития пробоя в ГРП резонатора.

В связи с интересом разработчиков и создателей бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) к уменьшению энергопотребления необходимо установить минимальные значения питающего напряжения и токи потребления светодиодного модуля, обеспечивающие оптимальную мощность излучения для надежного включения ЗЛК.

Светодиодный модуль устанавливается под катодной полостью резонатора ЗЛК. Однако такое расположение модуля накладывает определенные ограничения, как на габариты ЗЛК, так и на размещение нераспыляемых твердотельных геттеров, необходимых для увеличения срока службы ЗЛК, а значит зеемановских лазерных гироскопов (ЗЛГ) и БИНС [17].

На рис. 7 и 8 представлен вид и электрическая схема светодиодного модуля МС-331, который применяется в ЗЛК для повышения надежности [18].

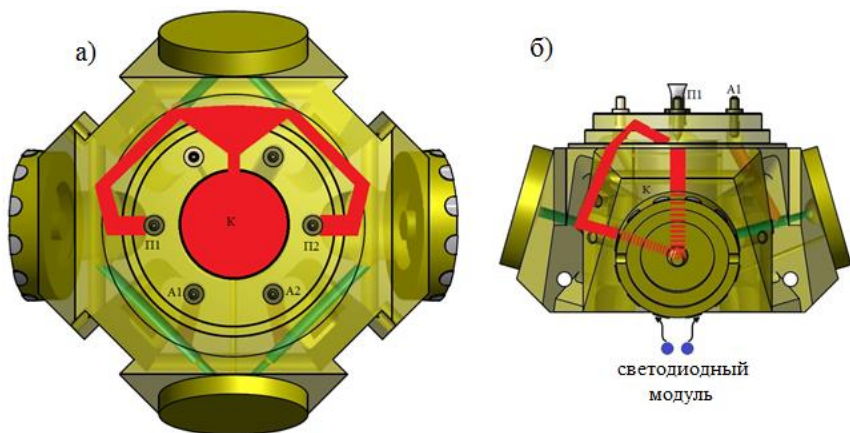


Рисунок 5 — Схема ЗЛК.

а) вид сверху, б) вид сбоку

К – цилиндрический катод;

А1, А2 – аноды; П1, П2 – поджиговые электроды;

Закрашенной областью отмечен тлеющий разряд в ГРП между катодом К и поджиговыми электродами П1 и П2.

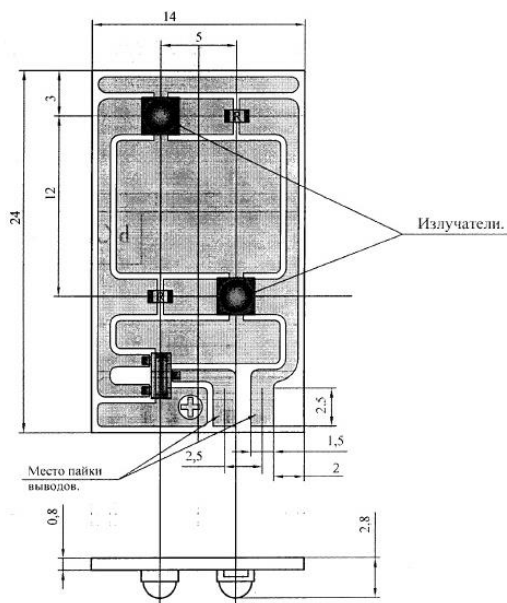


Рисунок 7 — Светодиодный модуль МС-331 [19]

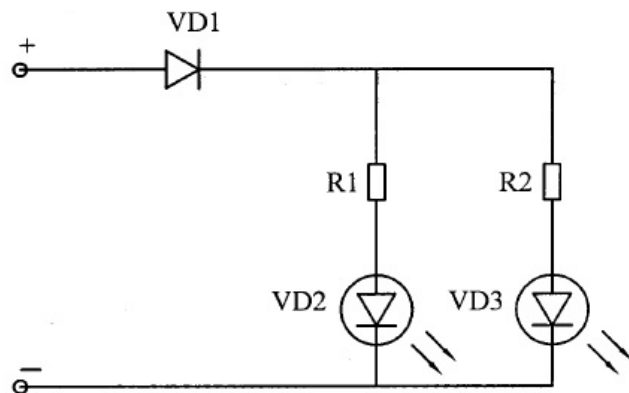


Рисунок 8 — Электрическая схема MC-331  
 VD1 – диод Шоттки блокировочный в корпусе SOT 23,  
 VD2, VD3 – излучающий элемент на основе InGaN  
 R1, R2 – резисторы номиналом 200 и 300 Ом. [18]

В современной конструкции ЗЛК увеличение срока хранения обеспечивается твердотельным геттером, расположенным в катодной полости резонатора (рис. 9). Геттер активно поглощает посторонние примеси в активной среде, что значительно продлевает срок службы ЗЛК.

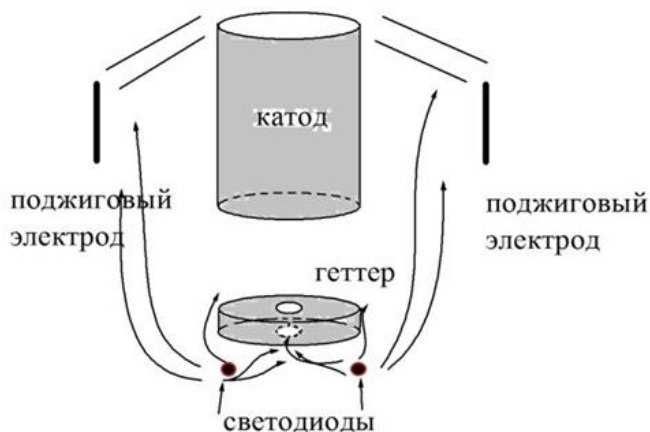


Рис. 9 — Схема установки твердотельного геттера и распространения света от светодиодного модуля в ЗЛК

## Выводы.

В данной работе приведены принципы работы и основные источники возникновения погрешностей ЗЛГ, а также наиболее распространённые методы их устранения.

Можно сделать вывод, что возможности повышения точности ЗЛГ за счёт конструкторских решений практически исчерпаны, поэтому актуальность представляют исследования зависимостей выходных параметров датчиков, а также совершенствование существующих, и разработка новых методов контроля выходных характеристик.

## Список литературы

1. Арановиц Ф. Лазерные гироскопы // В «Применения лазеров» пер. с английского под ред. Тычинского В. П. – М.: Мир. – 1974. – С. 182-270.
2. Aranowitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // In “Optical gyros and their application” RTO-AG-333. – 1999. – P. 3-45.
3. Macek W. M., Davis D. T. M. (Jr.). Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers // Applied physics letters. – 1963. – V. 2. – P. 67.
4. 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.
5. Фёдоров Б. Ф., Шереметьев А. Г., Умников В. Н. Оптический квантовый гироскоп. – М.: “Машиностроение”. – 1973. – 222 с.
6. Несенюк Л. П., Бесплатформенные инерциальные системы. Обзор состояния и перспектив развития // Гироскопия и навигация. – 2002. – №1 (36). – С. 13-22.
7. Лукьянов Д. П. Лазерные и волоконно-оптические гироскопы: состояние и тенденции развития // Гироскопия и навигация. – 1998. – №4 (23). – С. 20-45.
8. Матвеев В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». – 2009. – 280 с.
9. Савельев А. М., Соловьёва Т. И. Состояние лазерной гироскопии за рубежом // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – №8. – С.77-92.

10. Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Савельев И. И. Кольцевые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии // Квантовая электроника. – 2015. – № 2. – С. 96-104.
11. Панов М.Ф., Соломонов А.В., Филатов Ю.В. Физические основы интегральной оптики: Учебное пособие. – М.: Издательский центр «Академия». – 2010. – 432 с.
12. Филатов Ю. Ф., Оптические гироскопы, – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2005. – 139 с.
13. Бессонов А. С., Колбас Ю. Ю., Соловьева Т. И. Измерение характеристик лазерного гироскопа, – М.: МИЭМ НИУ ВШЭ. – 2014. – 31 с.
14. Петров О. А., Демиденков Ю. В., Горбунов И. С. Поджиг газового разряда в многоканальных газовых лазерах // Электронная техника, сер. лазерная техника и оптоэлектроника. – 1989. – № 4. – С. 49.
15. К. И. Арефьева, З. П. Дмитриева. Исследование свойств ситаллов системы  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$  // Оптико-механическая промышленность. – 1980. – № 9. – С. 26.
16. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – М.: Наука. – 1992. – 356 с.
17. Горелик С. С., Дашевский М. Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М.: Металлургия. – 1988. – 574 с.
18. Светодиодный модуль МС-331. Руководство по эксплуатации РКУШ.432228.178.ТУ. – 2012. – 12 с.