



УДК 629.7.054.07
ГРНТИ 78.25.31

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЬЦЕВОГО МОНОБЛОЧНОГО ГИРОСКОПА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ НА ОСНОВЕ СИММЕТРИЧНОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

*Н.А. УС, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
С.П. ЗАДОРЖНИЙ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье исследована модель кольцевого моноблочного гироскопа с лазерным диодом на основе симметричной треугольной оптической схемы с внешним оптическим разветвителем в виде трехгранной призмы, позволяющей проектировать устойчивую схему гироскопического датчика навигационной системы по критерию чувствительности и линейности динамической характеристики и температурной стабильности. Рассмотрены возможности данного базиса при создании инерциальных навигационных систем подвижных объектов с резервированием гироскопических датчиков.

Ключевые слова: кольцевой моноблочный гироскоп, эффект Саньяка, оптический расщепитель, модель, внутренний взаимный фазовый сдвиг, термокомпенсация.

MATHEMATICAL MODEL OF A RING MONOBLOCK GYROSCOPE WITH A SEMICONDUCTOR LASER DIODE BASED ON A SYMMETRICAL TRIANGULAR OPTICAL SCHEME

*N.A. US, Doctor of Technical sciences, Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
S.P. ZADOROZHNIY, Candidate of Technical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article studies a model of a ring monoblock gyroscope with a laser diode based on a symmetrical triangular optical scheme with an external optical splitter in the form of a three-sided prism, which allows designing a stable scheme of the gyroscopic sensor of the navigation system according to the criterion of sensitivity and linearity of the dynamic characteristic and temperature stability. The possibilities of this basis for creating inertial navigation systems for moving objects with redundant gyroscopic sensors are considered.

Keywords: ring monoblock gyroscope, Sagnac effect, optical splitter, model, internal mutual phase shift, thermal compensation.

Введение. Выполнение главной боевой задачи в современных условиях возлагается на подвижные объекты военного назначения. Применительно к авиации под такими объектами понимаются пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (ЛА) самолетного и вертолетного типа. Учитывая большую стоимость современных ЛА и высокую ответственность за выполнение возложенных на них боевых задач, они в обязательном порядке в качестве авиационного оборудования оснащены навигационными системами различной сложности, надежности и точности.



Для военных объектов в условиях боевых действий принципиальным являются автономные возможности навигационной системы, обеспечивающей скрытный полет для достижения поставленной боевой задачи. Наиболее распространенными являются современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) различного типа. Как правило, это системы на основе оптических гироскопов. Их главным достоинством является автономная работа в полете. Однако за автономность приходится платить накопленной в полете навигационной ошибкой, связанной с физическими процессами в оптических гироскопических датчиках [1–3].

В мирное время повышенную точность навигации достигают путем комплексирования БИНС со спутниковыми навигационными системами (СНС), что сводит на нет автономность полета.

Актуальность. Оптический гироскоп в качестве высокоточного чувствительного элемента (ЧЭ) современных БИНС – мировая практика построения навигационных систем такого типа. В качестве ЧЭ БИНС получили распространение оптические лазерные гироскопы следующих типов: кольцевые лазерные газовые (КЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [3]. Дальнейшие поиски в развитии оптической гироскопии позволили объединить основные достоинства основных типов лазерных гироскопов, что привело к созданию нового конструктивно-технологического решения ЧЭ, получившего название – кольцевой моноблочный гироскоп с лазерным диодом (КМГ с ЛД) [4]. Техническое решение объекта исследования реализуется новой оптической схемой на основе симметричного треугольника с оптической осью «внешний оптический расщепитель – смеситель – фотоприемник» (ОР – СМ – ФП) [5].

Обоснование применения предложенной оптической схемы лазерного гироскопа требует разработки ее математической модели, оценки параметров устройства и его поведение при наличии дестабилизирующих факторов в условиях эксплуатации [4, 5].

Цель работы – разработка математической модели КМГ с ЛД на основе симметричной треугольной оптической схемы в виде оптически прозрачной усеченной призмы с пассивным оптическим резонатором и внешним расщепителем оптического сигнала накачки на основе трехгранной призмы.

При решении поставленной задачи выдвигается следующая гипотеза: ЧЭ на основе новой оптической схемы лазерного гироскопа в качестве датчика измерения угловых скоростей подвижных объектов для автономной БИНС военного назначения, обладая высокой степенью компоновки и надежности, позволит достичь приемлемую для навигации воздушных судов чувствительность, расширенный линейный динамический диапазон информационных сигналов и возможность термокомпенсации внешнего воздействия.

Достижение поставленной цели позволит обосновать создание новой элементной базы с возможностью многократного резервирования объектов в бортовых системах навигации ЛА. Данный подход обеспечит гарантированное выполнение боевых задач разведывательно-ударными беспилотными ЛА (БЛА) в необслуживаемый период.

Конструктивно-технологическое решение объекта исследования. В конструктивном плане исследуемый лазерный гироскоп является моноблочной конструкцией, оптический контур которого реализован с помощью оптически прозрачной усеченной призмы 1 (рисунок 1). В варианте исследования моноблок реализуется на основе органического стекла для достижения оптимального соотношения «цена-качество». В ответственных подвижных объектах военного назначения возможно применение ситаллов. Оптический канал 2 объединяется в оптический контур с помощью системы обвязки на основе зеркал полного отражения 3 и полупрозрачного зеркала оптического смесителя 4. Зеркальная система принципиальных ограничений на технологию изготовления не имеет. Требуется создание зеркал полного отражения с коэффициентом отражения не менее 0,9 и наличием защитного покрытия типа монооксида кремния. В полусферической зеркальной системе оптического



смесителя 4 для отвода информационного сигнала из измерительной схемы рекомендуется создание полупрозрачного зеркала с коэффициентом пропускания не более 10 %.

Накачка оптического контура излучением достигается последовательным прохождением лазерного луча от микромощного полупроводникового лазерного диода 5 через оптический канал 6. Рекомендуется использовать микромощный полупроводниковый лазер с термостабилизацией рабочего режима на основе элемента Пельтье. Далее, за счет внешнего оптического расщепителя лазерного излучения 7 в виде треугольной призмы со светоотражающими гранями формируются два взаимно противоположенных и когерентных измерительных излучения в оптическом канале накачки оптического контура 8.

Рабочие боковые грани треугольной призмы образуют рабочий угол при вершине 89–91 град. В зависимости от ограничений на технологию оптического расщепителя светоотражающее покрытие должно обеспечивать коэффициент отражения в пределах 0,9–0,99. Конструктивно треугольная призма расщепителя размещена в соответствующем посадочном месте основания моноблока и перекрывает своими рабочими гранями 94–96 % диаметра оптического канала накачки 8 оптического контура гироскопа.

Ограничения на применение конструкционных материалов при изготовлении оптического расщепителя 7 определяются рабочей оптической мощностью излучения лазерного диода 5. Допускается использование материалов, начиная от оптических стекол до металлов.

Канал накачки 8 оптического контура моноблока выполнен параллельно одному из оптических каналов 2 контура моноблока и взаимодействует с зеркалками полного отражения лучистой энергии, а двунаправленный оптический сигнал направляется в зону апертуры сопрягаемых оптических каналов оптического контура моноблока. Разделение канала накачки с оптическим контуром достигается за счет объемных резонаторов оптического излучения 9 и 10. Лазерный диод 5 фиксируется в моноблочном основании относительно плоскости оптического контура. Допустимо применение двухкоординатного юстировочного устройства. Источник лазерного излучения 5, канал источника лазерного излучения 6, внешний оптический расщепитель 7, оптический смеситель 4 и фотоприемник (ФП) находятся на главной оси симметрии лазерного гироскопа.

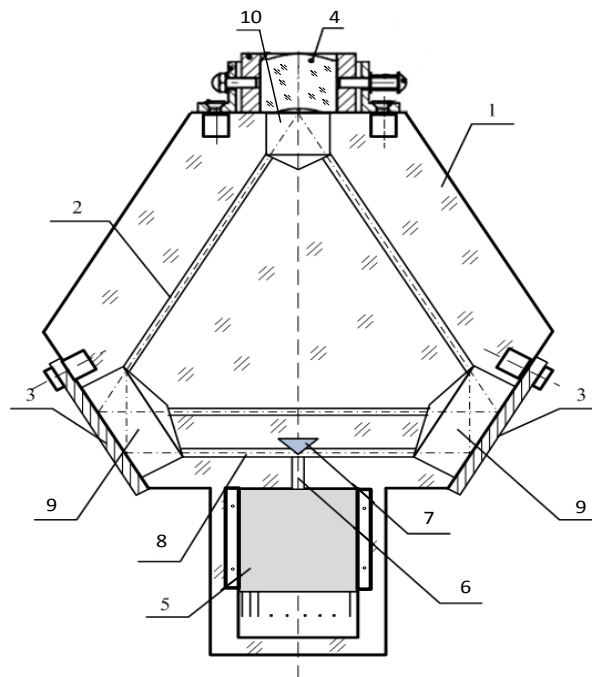


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическое решение кольцевого моноблочного гироскопа с лазерным диодом (вариант оптической схемы с внешним оптическим расщепителем на основе трехгранной призмы)



Часть лучистой энергии, ответвленная через полупрозрачное зеркало оптического смесителя 4 для случая встречных лучей, создает интерференционную картину по пространственной координате и фокусируется на внешнем фотоприемном устройстве – ФП на основе двухплощадного полупроводникового фотодиода. Формируемый при этом электрический сигнал подвергается дальнейшей обработке для выделения информационной составляющей о величине угловой скорости объекта, на котором установлен гироскоп.

Математическая модель классического оптического гироскопа. Оптический гироскоп является высокочувствительным квантовым интерферометром, реализация которого осуществляется соответствующей оптико-электронной системой. Реализуемый метод измерения угловых перемещений объекта основан на известном эффекте Саньяка [6]. Сформированный двунаправленный оптический луч от лазерного диода в замкнутом оптическом контуре гироскопа создает стоячую волну, которая неподвижна относительно него. Фактически эффект Саньяка позволяет создать измерительную схему, в основе которой для инерциальной системы лежит известный постулат Эйнштейна. Характерные узлы и пучности стоячей волны обладают информационной составляющей об угловом перемещении объекта при его нахождении в инерциальном пространстве. При этом динамическая интерференционная картина на входе фотоприемного устройства отражает чередующиеся узлы и пучности стоячей волны. Экспериментально наблюдаемая интенсивность выходного оптического сигнала пропорциональна его среднему значению квадрата напряжения $\langle u^2(t) \rangle$ за время интегрирования, определяемое инерционностью используемого ФП.

Однако для оптических схем такого гироскопа характерно присутствие двух существенных недостатков. Рассмотрим их более детально.

Во-первых, изменение углового перемещения гироскопа относительно своей вертикальной оси в процессе обхода оптического контура за счет набега фаз прямого и обратного лучей на выходе системы приводит к появлению разности оптических длин волн, получившей название фазы Саньяка и описываемая выражением [6]:

$$\Delta\varphi_c = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega = \frac{8\pi S}{\lambda c} \Omega = K\Omega, \quad (1)$$

где λ – длина волны источника излучения; c – скорость света; Ω – угловая скорость объекта, K – масштабный коэффициент оптического гироскопа.

Учитывая гармонический характер одномодового лазерного излучения и формируемую интенсивность опорного оптического сигнала I_0 , оценка точности классического оптического гироскопа по информационному сигналу при предельном коэффициенте расщепления оптического сигнала накачки равном 0,5 может быть получена из следующего выражения:

$$(dI / d\Delta\varphi_c) = 0,5I_0 \cdot \sin \Delta\varphi_c, \quad (2)$$

где I – интенсивность оптического сигнала поступающего на ФП.

Анализ данной оценки свидетельствует о низкой точности оптической схемы классического гироскопа при малых угловых перемещениях подвижного объекта. Приемлемая точность измерительной схемы достигается при значительных значениях фазы Саньяка. Для подвижных объектов военного назначения необходима высокая и одинаковая точность во всем диапазоне измерений угловых перемещений, особенно в условиях автономного беспилотного управления.

Во-вторых, учитывая неидеальный характер юстировки оптического контура при прохождении оптических сигналов по оптическим каналам и функционирования системы обвязки оптического контура (системы зеркал) в классической оптической схеме наблюдается



обратное рассеивание циркулирующих волн. Это приводит к появлению эффекта «захвата частот циркулирующих волн», обусловленного частотной взаимосвязью двух встречных волн. Явление отражается во временной нестабильности чувствительности измерительной схемы при малых значениях фазы Саньяка за счет нарушения фазовой взаимности циркулирующих волн [7]. В худшем случае, имеет место нулевая чувствительность схемы за время интегрирования информационного сигнала. Данный эффект в наименьшей степени проявляется в оптических схемах пассивного типа.

Для устранения явления захвата частот в классических лазерных гироскопах (КЛГ и ВОГ) используются различные методы частотной подставки, приводящей к возникновению в резонаторе, на основе оптического контура, частотной невязимости. Частотная подставка может достигаться различными техническими решениями путем создания: механических крутильных колебаний (виброподвеса); немеханических невязимых эффектов на основе эффекта Зеемана и Фарадея, реализуемых внешними электрическими или оптическими модуляторами [3, 7, 9, 10].

Математическая модель кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом на основе симметричной треугольной оптической схемы с пассивным оптическим контуром. Достижение требуемой точности ЧЭ на основе оптического гироскопа потребует изменить синусоидальную составляющую фазы Саньяка в выражении (2) на косинусоидальный вид. Тривиальное решение поставленной задачи состоит в формировании фазового сдвига на угол $\pi/2$ для измерительных потоков лучистой энергии замкнутого оптического контура. Рассмотрим вариант, когда заданы ограничения на неизменность конструктивно-технологического решения моноблочной части КЛГ с ЛД. Приемлемы модификации только электронной/механической части измерительной схемы.

Рассмотрим возможности устранения эффекта захвата частот в вариационных схемах КМГ с ЛД. Функциональная схема такого гироскопа содержит полупроводниковый лазерный диод, характерный в качестве источника оптического излучения для ВОГ, а моноблочная схема на основе многоугольной призмы, характерная для КЛГ, позволяет реализовать жесткую конструкцию оптического контура. Тем самым достигается вибрационная стойкость и надежность конструкции, а также ее универсализм при вариативном исполнении объекта с целью достижения различных классов точности путем масштабирования моноблока за счет применения открытой оптической схемы. Температурная стабильность может достигаться известными способами.

Геометрическое решение оптического контура ограничивается треугольной или четырехугольной схемами. Другие варианты сопряжены с увеличением количества зеркал в схеме обвязки и неоднозначностью решения задачи юстировки оптических трасс, сформированных зеркалами оптического контура в единой плоскости [5, 8].

Четырехугольная оптическая схема характерна для КЛГ и содержит три зеркала полного отражения, одно зеркало полупрозрачное и совмещенное с ним интерференционный преобразователь, сопрягаемый с ФП. К недостаткам данной оптической схемы следует отнести низкую степень жесткости конструкции, которая компенсируется возможностью автоматического управления длиной оптического контура при использовании системы регулирования периметра (СРП) в диапазоне рабочих температур [2]. При этом полный вносимый фазовый сдвиг при полном обходе оптического контура составляет 2π . Избежать применения дополнительных технических решений в поставленной задаче не представляется возможным. Это приведет к усложнению схемы гироскопа, увеличению температурной нестабильности объекта, и к уменьшению его надежной работоспособности.

Треугольная оптическая схема содержит два зеркала полного отражения, а третье зеркало полупрозрачное и совмещенное с интерференционным преобразователем, сопрягаемым с ФП. Схема обладает высокой степенью жесткости и не использует схему СРП. При этом площадь треугольной схемы меньше площади четырехугольной оптической схемы в 2, 3 раза, что



уменьшает масштабный коэффициент оптического гироскопа. Полный вносимый фазовый сдвиг в такой конфигурации оптической схемы составляет π . Данные показатели качества фактически исключают применение данной оптической схемы в современных КЛГ, ориентированных на максимальный масштабный коэффициент устройства.

Практический интерес представляет треугольная равнобедренная оптическая схема, которая в плоскости симметрии «оптический расщепитель – интерференционный смеситель – фотоприемник» (ОР – СМ – ФП) при полном обходе реализует фазовый сдвиг равный $\pi/2$.

Проведем исследование оптической схемы лазерного гироскопа моноблочного типа представленной на рисунке 2, в которой учитывается наличие плоскости симметрии ОР – СМ – ФП, приведенной на рисунке 1.

Будем учитывать, что элемент ОР фактически обеспечивает оптическую развязку между оптическим контуром моноблока и источником лазерного излучения в виде полупроводникового лазерного диода (ЛД). Непосредственно оптический контур будет являться пассивным. Следовательно, стабильность ЛД не зависит от режима работы оптического контура, а применение микромощного ЛД с термостабилизацией создает определенную гарантию термостабильной оптической мощности сигнала накачки. Представленное техническое решение ОР на основе призмы со светоотражающими поверхностями рабочих граней позволяет достигать предельного коэффициента расщепления равного 0,5 без усложнения технологии создания данной детали, например, как это имело место при создании резонатора-расщепителя оптического типа [4].

Предположим, что конструктивно-технологическое решение оптического контура создает некоторое обратное рассеивание в оптическом контуре. Это может приводить к возникновению эффекта захвата частот.

Используем режим накачки оптического контура лазерным источником излучения, оптический поток которого дополнительно модулируется прямоугольной импульсной последовательностью с частотой, соизмеримой с резонансной частотой оптического контура. Современные конструкции микромощных лазерных диодов допускают создание такого режима излучения. Возникающая относительная фаза для оптических потоков лучистой энергии в зоне ФП будет составлять $\pm\pi/2$ на частоте $0,5\tau$, где τ – время полного прохождения луча через оптический контур.

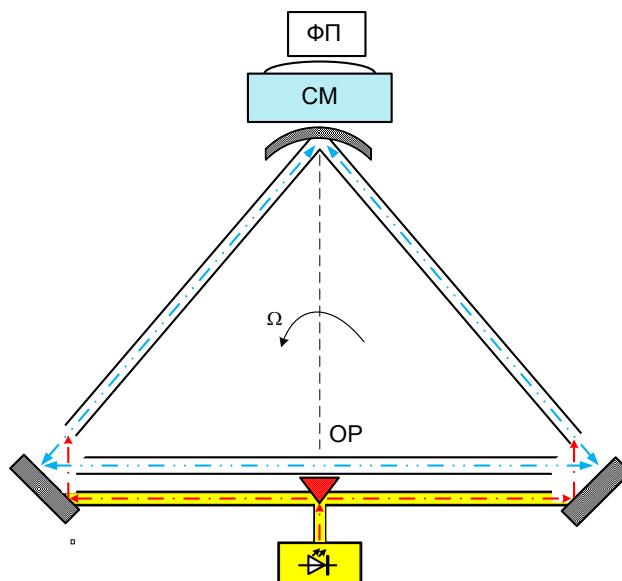


Рисунок 2 – Оптическая схема кольцевого моноблочного гироскопа с лазерным диодом и внешним оптическим разветвителем на основе трехгранной призмы



Без внесения конструктивных изменений в оптический контур в измерительной схеме формируется внутренний взаимный фазовый сдвиг $\pm \pi/2$. Точность исследуемого оптического гироскопа по информационному сигналу возрастает и определяется по сравнению с выражением (2) уравнением следующего вида:

$$(dI / d\Delta\varphi_c) = 0,5I_0 \cos \Delta\varphi_c. \quad (3)$$

Интенсивность на выходе гироскопа в зоне ФП при малых угловых перемещениях объекта при модуляции задающего оптического потока уже описывается нечетной функцией:

$$I = 0,5I_0(1 - \sin \Delta\varphi_c). \quad (4)$$

В результате достигается практически линейный характер динамического рабочего диапазона входного сигнала. При этом в контуре такой оптической схемы при полном циклическом обходе лучей наблюдается явление автоматической внутренней взаимной фазовой модуляции результирующей стоячей волны [3, 8, 10].

Данный режим, характерный только для оптического контура треугольного типа с указанной симметрией относительно плоскости ОР–СМ–ФП, одновременно позволяет существенно снизить и температурную зависимость квантового интерферометра за счет явления температурной взаимной компенсации между площадью оптического контура и длиной периметра его оптического контура. Дело в том, что возникающий в процессе эксплуатации температурный градиент окружающей среды синфазно влияет как на изменение площади оптического контура за счет линейного расширения конструкционного материала, так и на линейное изменение длины оптического канала, т.е. его периметра. Данное положение подтверждается производной по температуре от фазы Саньяка (1), имеющей следующий вид:

$$\frac{d\varphi_c}{dT^0} = \frac{8\pi\Omega}{\lambda c} \frac{dS}{dT^0} = k\Omega \frac{dS}{dT^0}. \quad (5)$$

В оптической гироскопии это влияние является критическим. Оно требует организацию специальных мер, например, на основе СРП для ее компенсации практически во всех лазерных гироскопах.

Но изменение площади оптического контура однозначно приводит к синфазному изменению и периметра оптического контура. Это, в свою очередь, синфазно влияет на время τ и изменяет в противофазе частоту взаимной модуляции оптических потоков $\omega_m = 1/\tau$. С учетом симметрии оптического контура температурная зависимость изменения частоты взаимной модуляции будет иметь следующий вид:

$$\frac{d\omega_m}{dT^0} = \frac{1}{\rho\Omega} \frac{dT^0}{dS}. \quad (6)$$

Откуда следует, что при температурном влиянии площадь оптического контура S и частота взаимной модуляции оптических потоков ω_m в нем являются взаимными компонентами. Это позволяет обосновать применение оптических материалов с различными температурными коэффициентами для изготовления моноблочного основания гироскопа. Возможно использование конструкционных как кремниевых материалов типа ситалл, так и полимерных материалов типа органическое стекло. Оптические полимеры позволяют создавать



лазерные гироскопы с приемлемыми техническими характеристиками, но обладающими существенно лучшим соотношением «цена-качество».

Анализ достигаемых параметров разработанной оптической схемой КЛГ с ЛД и возможности ее конструктивно-технологического исполнения позволяют определить ее перспективные возможности при решении задачи повышения масштабного коэффициента за счет упрощенной технологии возможного масштабирования моноблока при наличии открытых оптических каналов и создания универсальной электронной схемы ее управления.

Термостабилизация вариативного моноблока за счет взаимных компонентов автоматически снимает ограничения на индивидуальность такого подхода. В существующих лазерных гироскопах данная задача решается для конкретно взятого блока и базируется на установлении его температурной функциональной зависимости. Следует отметить, что старение конструкционных материалов приводит к изменению их физических свойств, что требует и коррекции таких функциональных зависимостей. Это, в свою очередь, определяет периодичность в повторной перенастройке такой системы.

Комплексное сочетание данных показателей определяет возможность осуществлять резервирование ЧЭ такого типа в БИНС при создании единой электронной составляющей обработки информационных сигналов в рамках функционирования системы контроля бортового авиационного оборудования при управлении его избыточностью с целью обеспечения надежности объекта управления в необслуживаемый период.

Выводы. Предлагаемое конструктивно-технологическое решение КМГ с ЛД обладает существенной новизной и приемлемыми параметрами высокоточного ЧЭ оптической БИНС.

Максимизация чувствительности и линеаризация ее динамической составляющей опирается только на электронную часть интерференционной схемы, что определяет универсализм лазерного гироскопа данной конструкции при решении задачи резервирования чувствительных элементов БИНС.

Температурная стабильность гироскопической схемы достигается за счет ее внутрисистемных параметров и определяет перспективу применения широкого спектра конструкционных материалов, в том числе и оптических полимерных материалов, при создании одноразовых навигационных систем подвижных военных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии // Квантовая электроника. 2000. № 2 (30). С. 96–104.
2. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники / Киев: Выща школа, 1988. 388 с.
3. Филатов Ю.В. Оптические гироскопы. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. 139 с.
4. Ус Н.А., Задорожний С.П. Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом: особенности конструктивно-технологического решения // Вестник Воронежского гос. техн. универ. 2016. Т. 12 (2). С. 65–72.
5. Лазерный гироскоп: пат. 2 655 626 Российская Федерация, МПК G01C19/66 / Ус Н.А., Задорожний С.П., Авершин А.А., Склярова О.Н.; заявитель патентообладатель Ус Н.А. (RU). №2016110364/28; заявл. 28.03.2017; опубл. 29.05.2018; Бюл. № 16.
6. Иванов В.В., Новиков М.А., Геликонов В.М. Наблюдение эффекта Саньяка в кольцевом резонаторном интерферометре с низкокогерентным источником света // Квантовая электроника. 2000. № 2 (30). С. 119–124.
7. Сахаров В.К. Модель захвата частот в кольцевом лазере и полупроводниковый лазерный гироскоп // Журнал технической физики 2011. Т. 81. В. 8. С. 76–82.



8. Ус Н.А., Задорожний С.П. Модель треугольной оптической схемы с повышенной симметрией лазерного гироскопа // Вестник воронежского института ФСИН России. 2018. № 2 апрель-июнь. С. 15–24.
9. Прокофьева Л., Сахаров В., Щербаков В. Полупроводниковый лазерный гироскоп // Фотоника. 2010. № 5. С. 12–15.
10. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 151 с.

REFERENCES

1. Azarova V.V., Golyaev Yu.D., Dmitriev V.G. Kol'cevye gazovye lazery s magnitoopticheskim upravleniem v lazernoj girokopii // Kvantovaya `elektronika. 2000. № 2 (30). pp. 96–104.
2. Bajborodin Yu.V. Osnovy lazernoj tehniki / Kiev: Vyscha shkola, 1988. 388 p.
3. Filatov Yu.V. Opticheskie giroscopy. SPb.: GNC RF CNII «`Elektroprigor», 2005. 139 p.
4. Us N.A., Zadorozhnij S.P. Kol'cevoj monoblochnyj girokop s poluprovodnikovym lazernym diodom: osobennosti konstruktivno-tehnologicheskogo resheniya // Vestnik Voronezhskogo gos. tehn. univer. 2016. T. 12 (2). pp. 65–72.
5. Lazernyj girokop: pat. 2 655 626 Rossijskaya Federaciya, MPK G01C19/66 / Us N.A., Zadorozhnij S.P., Avershin A.A., Sklyarova O.N.; zayavitel' patentoobladatel' Us N.A. (RU). №2016110364/28; zayavl. 28.03.2017; opubl. 29.05.2018; Byul. № 16.
6. Ivanov V.V., Novikov M.A., Gelikonov V.M. Nablyudenie `effekta San'yaka v kol'cevom rezonatornom interferometre s nizkokogerentnym istochnikom sveta // Kvantovaya `elektronika. 2000. № 2 (30). pp. 119–124.
7. Saharov V.K. Model' zahvata chastot v kol'cevom lazere i poluprovodnikovyj lazernyj girokop // Zhurnal tehnicheckoj fiziki 2011. T. 81. V. 8. pp. 76–82.
8. Us N.A., Zadorozhnij S.P. Model' treugol'noj opticheskoj shemy s povyshennoj simmetrije lazernogo girokopa // Vestnik voronezhskogo instituta FSIN Rossii. 2018. № 2 april'-iyun'. pp. 15–24.
9. Prokof'eva L., Saharov V., Scherbakov V. Poluprovodnikovyj lazernyj girokop // Fotonika. 2010. № 5. pp. 12–15.
10. Sheremet'ev A.G. Volokonnyj opticheskij girokop. M.: Radio i svyaz', 1987. 151 p.

© Ус Н.А., Задорожний С. П., 2020

Ус Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, us_n@mail.ru.

Задорожний Сергей Павлович, доцент кафедры управления инженерно-авиационным обеспечения ВВС, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, sergejzadorozhnij@yandex.ru.