

РК1 ПО ОПТИЧЕСКИМ ГИРОСКОПАМ

Лекция №3

Классификация лазеров

- Систематизация лазеров по различным параметрам.

Она помогает определить подходящий тип лазера для конкретных задач и условий использования.



По типу активной среды

Лазеры в первую очередь классифицируются по типу активной среды.

Они бывают:

- Твердотельные и волоконные;
- Полупроводниковые;
- Жидкостные;
- Газодинамические;
- Газовые.

Твердотельные лазеры

В твердотельных лазерах АС представляет собой твердый материал (кристалл или стекло с примесями). Благодаря своим свойствам имеют самое разнообразное применение.

Примеры – рубин, Nd:YAG (неодимовый), титан-сапфир и т.д.

Обычно используют оптическую накачку (вспышка или лазерные диоды).

Резонатор состоит из двух зеркал.

+ Высокая мощность, долговечность, компактность, широкий диапазон длин волн;

- Тепловыделение, сложность изготовления.

Применение – промышленность, медицина, наука, военная техника.

Волоконные лазеры

- подтип твердотельных лазеров, где АС – оптоволокно, легированное редкоземельными элементами.

Волокно имеет сердцевину, где распространяется свет, и оболочку для удержания света.

Накачиваются лазерными диодами. Резонатор формируется брэгговскими решетками в роли зеркал. Эффективно рассеивают тепло.

+ Высокий КПД, компактность, надежность, мощность (до неск. кВт), гибкость;

- Ограниченный диапазон волн (ближний ИК)

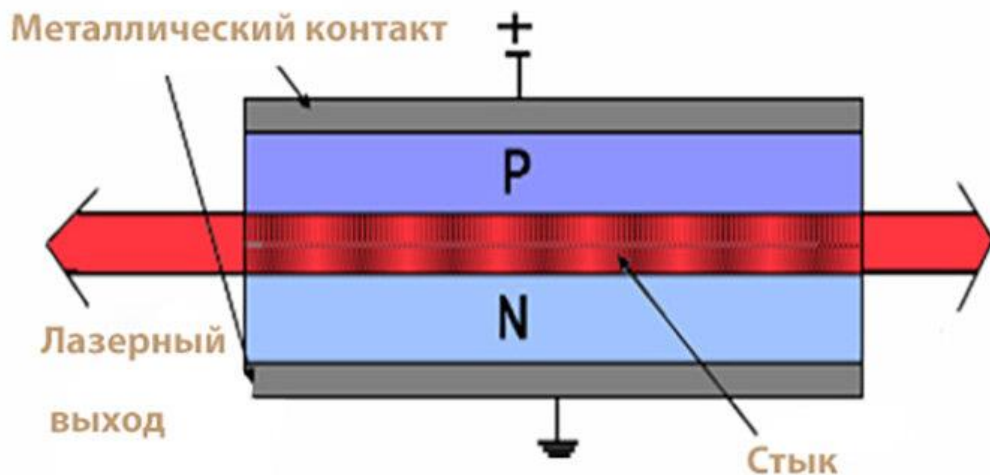
Применение – промышленность, медицина, наука, телекоммуникации, военная техника.

Полупроводниковые лазеры

- тип лазера, где АС – полупроводниковый материал (арсенид галлия GaAs, фосфид индия InP, нитрид галлия GaN). Самый распространенный тип лазеров.

АС формируется в виде p-n перехода, где рекомбинация электронов-дырок сопровождается излучением фотонов.

Накачивается электрическим током, который инжектируется в p-n переход. Резонатор формируется за счет отражающих граней кристалла.



+ Компактность, высокий КПД, низкая цена, широкий диапазон волн, простота управления;

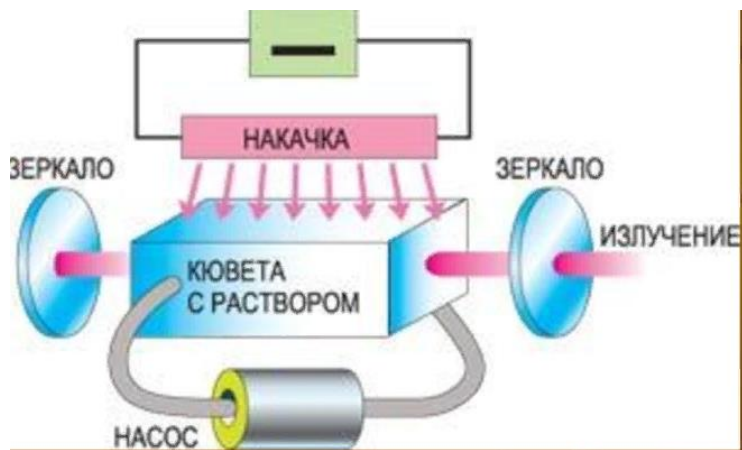
- Малая мощность (до неск. Вт), тепловыделение, высокая расходимость.

Применение – телекоммуникации, потребительская электроника, военная техника.

Жидкостные лазеры

- тип лазеров, где АС – жидкость. Мало распространены, но могут перестраивать длину волны и создавать мощные импульсы.

Представляют собой растворитель с красителями, способными к люминесценции (кумарин, родамин). Накачиваются оптическим или электрическим способом. Резонатор – два зеркала, одно – полупрозрачное.



+ Генерация в широком диапазоне волн от УФ до ИК, высокая энергия импульса, однородность АС;

- Сложность эксплуатации, токсичность, низкий КПД, малый срок службы.

Применение – наука, лазерная химия, биомедицина.

Газовые лазеры

- тип лазеров, где АС – газ или газовая смесь. Первый разработанный тип лазеров.

Примеры – He-Ne, аргоновый, эксимерный и т.д.

Накачиваются электрическим разрядом, оптической накачкой или химической. Резонатор состоит из 2 зеркал (в ЛГ – 3-4), одно полупрозрачное.

+ Широкий диапазон длин волн, высокое качество пучка, надежность;

- Низкий КПД, необходимость герметизации и соблюдения отсутствия примесей;

Применение – промышленность, военная техника, наука, медицина.

Газодинамические лазеры

- тип лазеров, в котором активная среда (например, углекислый газ CO_2) приводится в возбужденное состояние за счет адиабатического расширения в сверхзвуковом потоке.

В камере сгорания газ нагревается до высоких температур. Газ проходит через сопло Лавалья, где расширяется и ускоряется до сверхзвука. При расширении газ охлаждается и молекулы переходят в возбужденное состояние. Резонатор – два зеркала, одно – полупрозрачное.

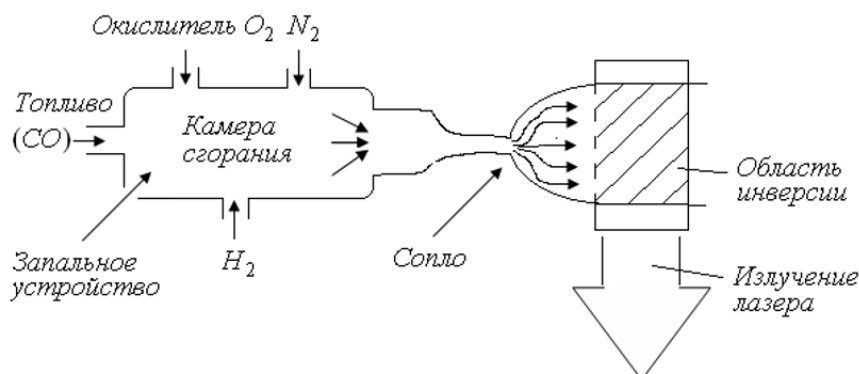


Рис. 28 Конструктивная схема газодинамического лазера

+ Высокая мощность;

- КПД до 20%, крупные габариты, малый диапазон волн.

Применение – военная техника, промышленность.

По методу накачки

Лазеры во вторую очередь классифицируются по методу накачки.

Основные типы накачки:

- Электрическая;
- Оптическая;
- Химическая;

Электрическая накачка

- метод накачки лазера, при котором возбуждение АС происходит при помощи электрической энергии.

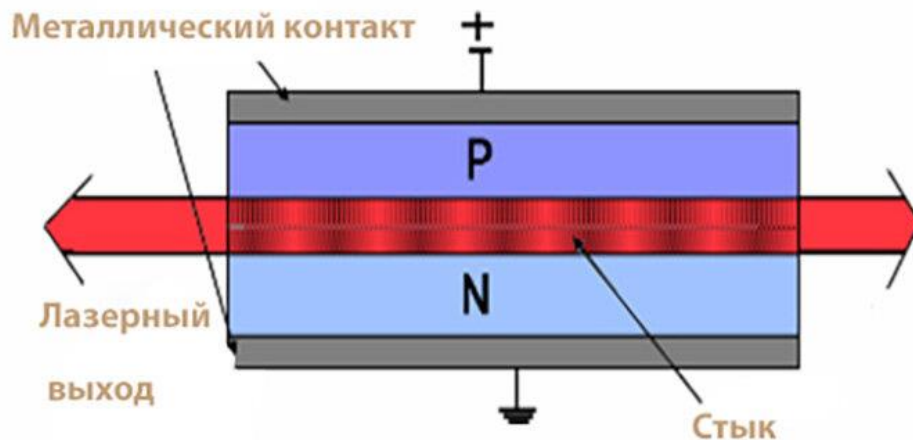
Принципы:

- Электрический разряд в газах или твердых телах:

Разряд создается между двумя электродами в среде. Электроны, ускоренные электрическим полем, сталкиваются с атомами или молекулами и переводят их в возбужденное состояние.

- Инжекция тока в полупроводниках:

Пропускание тока через р-п переход, создающее высокие концентрации инжектированных носителей заряда;



+ Высокий КПД, надежность;

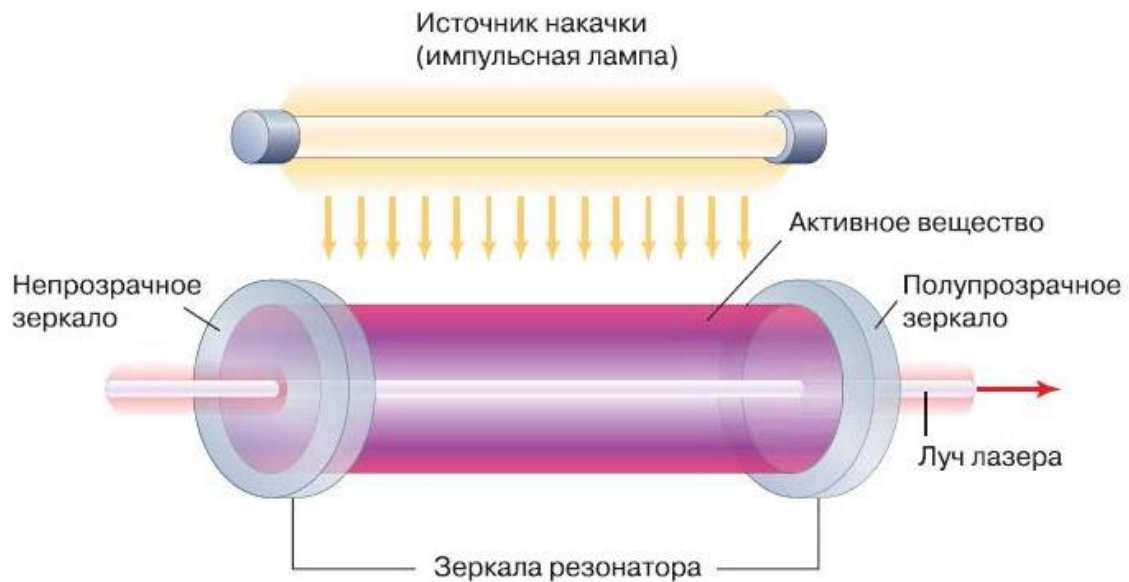
- Тепловыделение.

Оптическая накачка

- метод накачки лазера, при котором возбуждение АС происходит при помощи света, поглощаемым атомами и молекулами, что приводит их в возбужденное состояние.

Бывают:

- Накачка когерентными источниками (лазерными диодами);
- Накачка некогерентными источниками (лампы-вспышки и т.д.);



- + Высокая мощность, широкий спектр применений;
- Тепловыделение, сложность системы

Химическая накачка

- метод накачки лазера, при котором возбуждение АС происходит за счет энергии экзотермических химических реакций.

Основные примеры лазеров с химической накачкой:

- Фтороводородный лазер HF;
- COIL-лазер;
- Лазеры на парах щелочных металлов (натрий, калий)

- + Высокая мощность, компактность;
- Взрывоопасность, сложность эксплуатации.

По длине волны

Классификация лазеров по длине волны основана на диапазоне спектра, в котором они генерируют излучение. Длина волны определяет области применения лазера.

Ультрафиолетовые (УФ)

Диапазон: 100-400 нм

Примеры: Эксимерные лазеры, лазеры на азоте.

Применение: фотолитография, коррекция зрения.

Видимые лазеры

Диапазон: 400-700 нм

Примеры: He-Ne-лазер, ПП-лазеры, аргоновый лазер.

Применение: лазерные указки, медицина, наука, военная техника.

Ближние ИК

Диапазон: 0,7-3 мкм

Примеры: Nd:YAG, диоды, волоконные

Применение: телекоммуникации, промышленность, медицина

Средние ИК

Диапазон: 3-30 мкм

Примеры: CO₂-лазер, КК-лазеры.

Применение: промышленность, медицина, спектроскопия.

Дальние ИК

Диапазон: 30-1000 мкм

Примеры: лазеры на свободных электронах, молекулярные

Применение: изучение молекулярных структур, медицина, сканеры

По мощности

Мощность лазера определяет интенсивность излучения и выбирает спектр его задач.

- Маломощные – до 1 мВт

Применение: лазерные указки, оптические мыши, приводы CD-DVD

- Низкой мощности – 1-100 мВт

Применение: лазерные уровни, малые дальномеры, физиотерапевтические устройства;

- Средней мощности – 100 мВт – 1 Вт

Применение: гравировка, проекторы, косметология;

- Высокой мощности – 1-100 Вт

Применение: резка, сварка, хирургия, научные эксперименты;

- Сверхвысокой мощности – 100 Вт – 1 МВт

Применение: резка, сварка, лазерное оружие, наука;

- Экстремально высокой мощности – более 1 МВт

Применения: термоядерный синтез, ПРО, лазерное оружие, лазерные двигатели.

По режиму работы

Лазеры бывают:

- Непрерывные, генерирующие излучение постоянно и имеющие постоянную мощность излучения;
- Импульсные, излучающие энергию в виде коротких импульсов, длительность которых может варьироваться от нано- до фемтосекунд (наносекундные, пикосекундные, фемтосекундные)
- Модулированные – с излучением с модуляцией мощности, частоты или фазы.

По назначению

1. Промышленные;
2. Медицинские;
3. Научные;
4. Телекоммуникационные;
5. Военные;
6. Бытовые;

7. Для искусства и развлечений;
8. Для экологии и безопасности;
9. Космические;
10. Метрологические;

Лекция №4

Основы лазерного гироскопа

Лазерный гироскоп - оптико-электронный прибор, в основе которого лежит кольцевой лазер, способный измерять угловую скорость и угловую ориентацию объекта в инерциальном пространстве.

Активной средой ЛГ является газовая смесь He-Ne в различных пропорциях, с помощью которой генерируется излучение красного видимого света на длине волны $\lambda=632,8$ нм.

Инициация инверсии населенностей происходит на этапе **накачки** при помощи электродов в газоразрядной трубке, на которые подается высокое напряжение (до неск. кВ).

Излучение распространяется и усиливается в 3-х или 4-х зеркальном **резонаторе**, имеющим форму треугольника или квадрата.

Активная среда

Газоразрядные трубки ЛГ заполнены смесью He-Ne в пропорции 10:1 (в среднем) под давлением около 700 Па.

Гелий – вспомогательный газ, а неон – излучающий.

Атомы гелия переходят в возбужденное состояние после столкновения с электронами при накачке и передают энергию атомам неона при неупругих столкновениях.

Атомы неона возбуждаются, создавая инверсию населенностей, переходят с верхнего уровня на нижний и излучают фотоны, многократно отражающиеся от зеркал.

Система накачки, состоящая из двух анодов, катода и вспомогательных электродов, необходима для поддержания **тлеющего разряда** внутри ЛГ.

На катод и аноды подается высокое напряжение, достаточное для ионизации газа и создания плазмы. Электроны, испускаемые катодом, ускоряются электрическим полем, сталкиваются с атомами газа, ионизируют их и создается плазма.

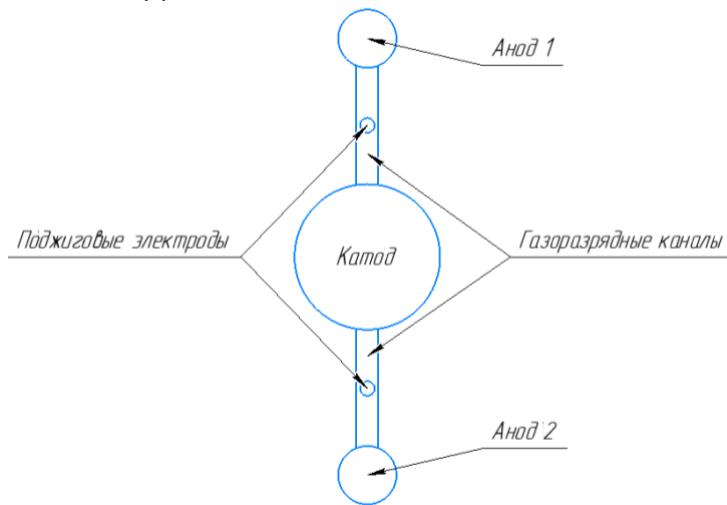
После ионизации устанавливается стабильный тлеющий разряд, который поддерживается значительно меньшим напряжением (по сравнению с поджигом). Оно называется напряжением горения – $U_{гор}$.

Вспомогательные (поджиговые) электроды создают локальный разряд, ионизирующий основной объем газа и облегчающий существование тлеющего разряда.

Возможна схема с одним анодом, но с двумя – наиболее правильное инженерное решение, способствующее равномерному распределению разряда.

Иногда применяется предварительная накачка УФ-излучением или светодиодом для создания свободных электронов и облегчения процесса поджига.

Схема поджига ЛГ



Резонатор ЛГ

Резонатор ЛГ обеспечивает генерацию и усиление излучения. Он представляет собой замкнутый оптический контур, в котором световые волны циркулируют, многократно отражаясь от зеркал в его углах. Внутри формируются две волны, бегущие в направлениях:

- По часовой стрелке (CW – clockwise);
- Против часовой стрелки (CCW – counter-clockwise).

Из-за его симметричности и отсутствии выделенного направления, как в линейном контуре, появляются именно две волны, необходимые для работы эффекта Саньяка.

Эффект Саньяка

Представим замкнутый оптический контур, внутри которого от внешнего источника поместили две бегущие волны светового излучения. Волны распространяются в разных направлениях (CW и CCW).

Часть излучения обеих волн возвращаются в точку входа после прохождения контура через полупрозрачное зеркало, где совмещаются на фотоприемном устройстве – возникает интерференционная картина.

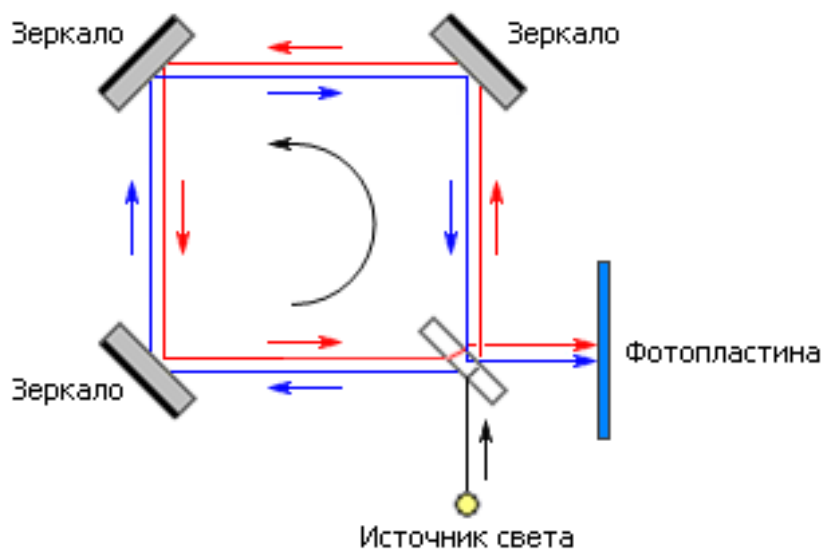
В отсутствие вращения волны проходят контур за одинаковое время при соблюдении одинаковых условий распространения.

При вращении системы волнам приходится проходить разный путь – одна волна движется навстречу контуру, а другой приходится его догонять. Это приводит к возникновению разности фаз между волнами $\Delta\phi$ и движению интерференционной картины.

Разность фаз выражается формулой:

$$\Delta\phi = \frac{8\pi S}{\lambda c} * \Omega,$$

Где S – площадь контура, λ – длина волны света, c – скорость света, Ω – угловая скорость вращения системы.



Разность фаз приводит к появлению разностной частоты между двумя волнами:

$$\Delta f = \frac{4S}{\lambda L} * \Omega = K * \Omega,$$

Где L – длина оптического контура, K – масштабный коэффициент кольцевого интерферометра.

Для описания эффекта Саньяка чаще всего используется пример с оригинальной установкой Саньяка, где волны внутри контура помещаются туда при помощи внешнего источника и светоделителя. Такая установка называется **пассивным интерферометром Саньяка** и применяется в волоконно-оптическом гироскопе.

Кольцевой лазер лазерного гироскопа генерирует волны сам, при помощи внутренней активной среды, поэтому называется **активным интерферометром Саньяка**.

Как мы видим, и разность фаз, и разностная частота прямо пропорциональны угловой скорости вращения установки, и выражаются через **масштабный коэффициент** – основное связующее звено между выдаваемой информацией датчиком и измеренной угловой скоростью. В реальном приборе очень важно поддерживать его стабильность для обеспечения точности.

Разностная частота Δf выражается как частота биений интерференционной картины, которая фиксируется счетчиком.

Представим кольцевой резонатор с параметрами:

Площадь контура $S = 0,01 \text{ м}^2$, длина контура $L = 0,3 \text{ м}$;

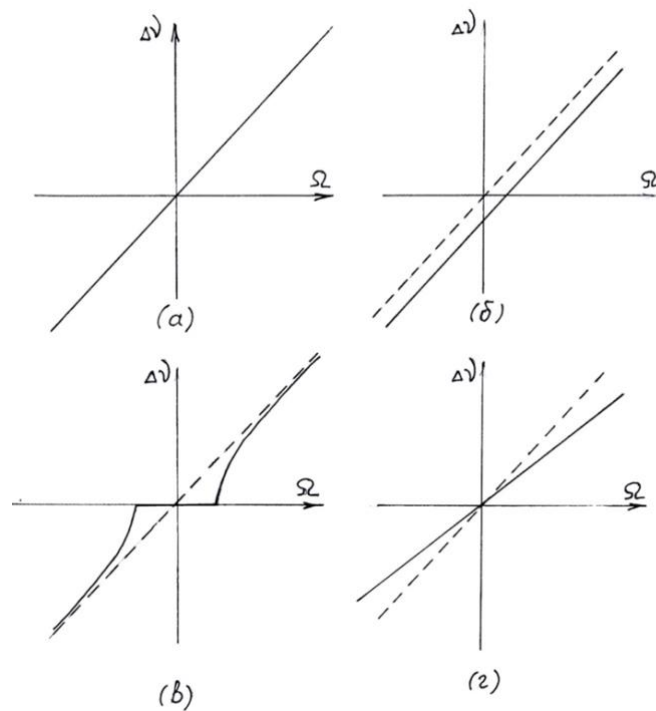
Угловая скорость вращения – 1 рад/с .

Рассчитайте разностную частоту.

Модель погрешностей ЛГ

В настоящее время не существует полной формулы, описывающей поведение ошибок ЛГ, по аналогии, например, с ДНГ.

Наиболее часто модель погрешностей предстает в виде графиков, отражающих отклонение выходной характеристики от идеальной (линейной зависимости разностной частоты и угловой скорости).



Зависимость разности частот датчика от угловой скорости - выходная характеристика лазерного гироскопа:

- (а) - идеальная выходная характеристика без наличия паразитных эффекта
- (б) - характеристика со смещением нуля, вызванным направленным движением атомов активной среды вдоль стенок рабочих каналов лазера и т.д.
- (в) – характеристика, обусловленная зоной нелинейности вблизи малых угловых скоростей (зоной захвата), вызванной обратным рассеянием излучения на зеркалах резонатора
- (г) – характеристика, обусловленная нестабильностью масштабного коэффициента.

Синхронизация встречных волн, или захват, является наиболее серьезным недостатком ЛГ. Он проявляется в том, что при вращении ЛГ со скоростью, меньшей некоторого критического значения Ω_0 (порог захвата), частоты противоположно направленных волн синхронизируются и частота биений на выходе фотоприемника становится равной нулю, то есть гироскоп перестает чувствовать вращение. На выходной характеристике образуется зона нечувствительности к скорости вращения – «зона захвата» – dead zone, lock-in zone.

Рассмотрим происходящие при захвате физические процессы более подробно. Наличие очень слабой шероховатости поверхности зеркал кольцевого резонатора приводит к рассеянию части излучения (рис. 1.5). Как видно на рисунке, небольшая часть излучения r_2E_2 рассеивается в направлении распространения встречной волны E_1 . Следствием рассеяния является то, что в резонаторе появляется слабая связь между встречными волнами.

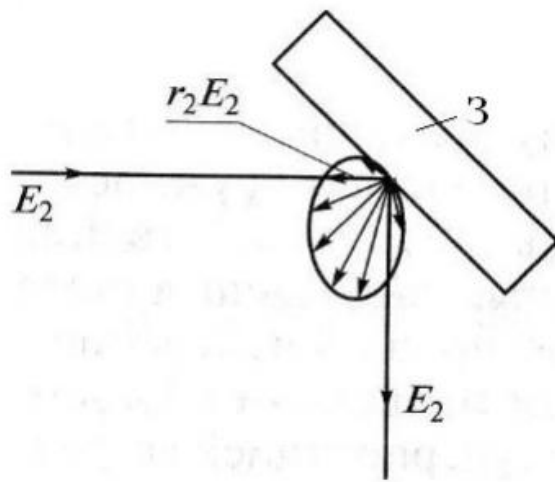
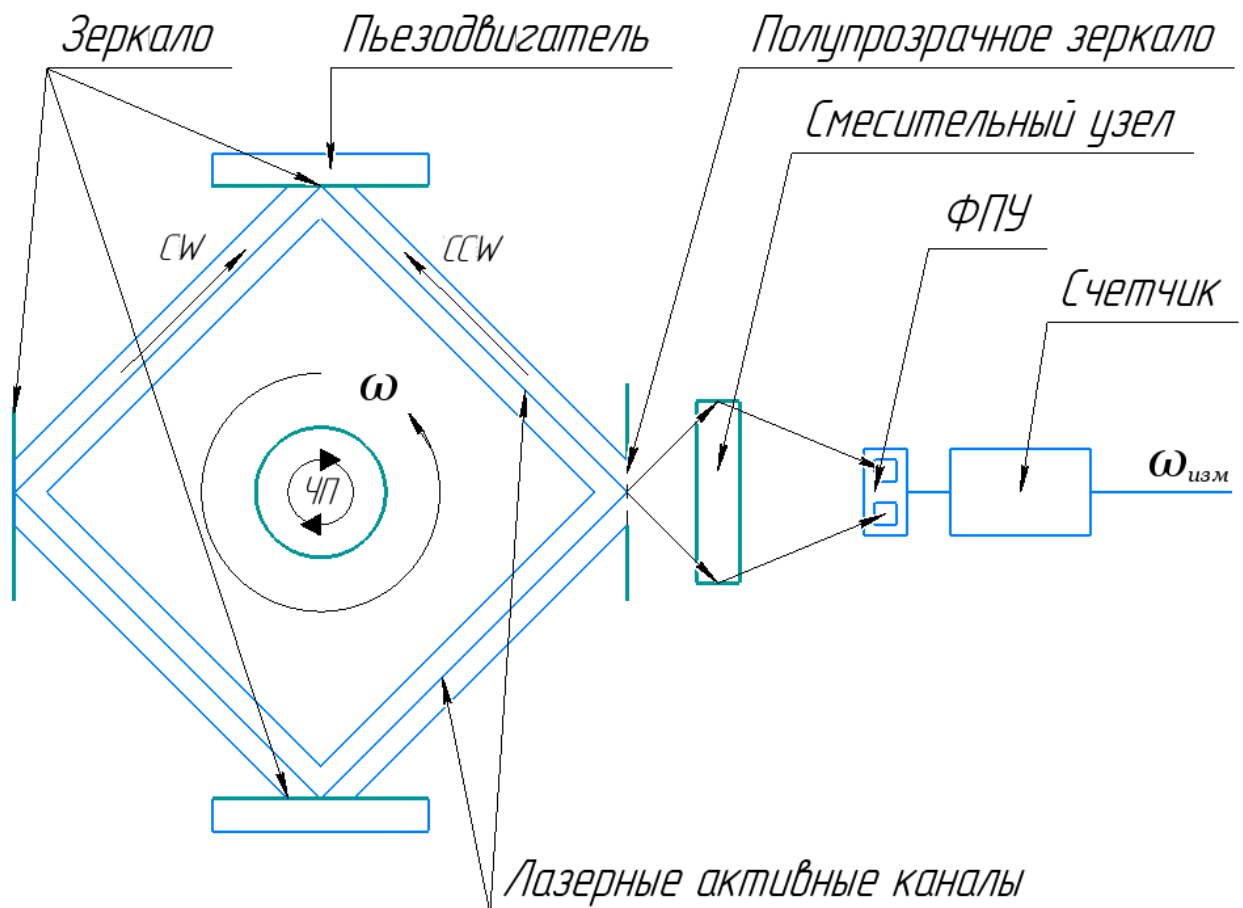


Рис. 1.5. Рассеяние световых волн

Рядом с зоной захвата выходная характеристика нелинейна и имеет гиперболический вид.

При интегральном рассеянии от всех четырех зеркал для лазера с периметром $L = 16$ см получим $\Delta f_0 = 10\text{--}300$ Гц, что превышает расщепление частот встречных волн, вызванное вращением Земли (4,6 Гц). Отметим, что возможности уменьшения зоны захвата сугубо технологическими приемами практически исчерпаны, поэтому применяется принудительный выход из зоны синхронизации при помощи частотных подставок, о которых будет рассказано далее.

Структурная схема ЛГ



Основными элементами любой структурной схемы ЛГ являются:

- Зеркала (или элементы полного отражения типа призм);
- Одно полупрозрачное зеркало;
- Лазерные активные каналы;
- Частотная подставка;
- Пьезодвигатели;
- Смесительный узел;
- Фотоприемное устройство;
- Счетчик биений (импульсов)

Процесс работы ЛГ

ЛГ находится на объекте, угловую скорость и угловое положение которого необходимо измерять.

ЛГ подключен к системам, обеспечивающим непрерывную подачу электроэнергии в его узлы и съем его выходных данных.

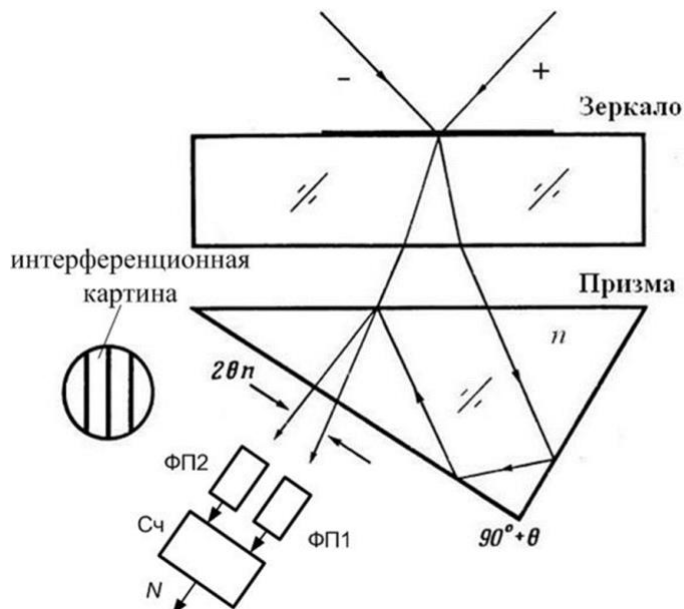
До инициализации процесса измерений на катод подается напряжение (до кВ). Осуществляется преднакачка лазера светодиодом и создаются свободные электроны. Мощным (до неск. кВ) разрядом гелий-неоновая смесь ионизируется, электроны движутся от катода к анодам, возбуждая атомы газа и провоцируя лазерное излучение. После этого лазер работает и готов к прямому использованию.

Внутри контура формируется две волны CW и CCW, распространяющиеся в противоположных направлениях, и многократно отражающиеся от зеркал резонатора. Часть излучения обеих волн выводится через полупрозрачное зеркало, где смешивается на смесительном узле и попадают на фотоприемные устройства (или одно ФПУ с двумя площадками), формируя интерференционную картину. Если объект неподвижен и частотная подставка не учитывается, интерференционная картина статична.

При вращении объекта вокруг оси чувствительности ЛГ, перпендикулярной плоскости оптического контура, интерференционная картина начинает двигаться.

Схема получения выходной информации

Интерференционная картина перемещается со скоростью, пропорциональной Δf , в результате чего на выходах фотоприемников появляются синусоидальные сигналы, сдвинутые по фазе на четверть периода. Эти сигналы 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. На его выходе образуется число N, пропорциональное величине Δf и угловой скорости Ω . Знак числа N указывает направление вращения (по или против часовой стрелки). ЛГ, таким образом, имеет цифровой выход.



Выходным сигналом устройства является число импульсов за время измерения (с учетом возможного изменения направления вращения за это время). Таким образом, ЛГ является интегрирующим устройством, измеряющим интегральный угол поворота резонатора лазера в инерциальном пространстве за время съема информации. Обычно частота съема информации лежит в диапазоне от 10 до 100 Гц.

Для ЛГ существует понятие моды – одного из возможных устойчивых состояний электромагнитного поля в резонаторе. В общем понимании, мода символизирует настройку на максимум усиления или устойчивую настройку лазера. Для такого состояния необходимо, чтобы на всей длине контура укладывалось целое количество длин волн.

Исходя из особенностей работы He-Ne лазера и системы его накачки, конструкция ЛГ непрерывно нагревается, что приводит к изменению длины оптического пути, по которому распространяется волны.

В рабочем режиме это постоянство поддерживают пьезоблоки – активные элементы системы регулировки периметра.

Как уже было отмечено, вследствие неидеальности поверхности отражающих элементов – зеркал, ЛГ не может детектировать разностные частоты, меньшие порога захвата. Для этого применяются частотные подставки механических или оптических принципов действия, выводящие рабочую точку выходной характеристики за пределы этих зон. Смещение по частоте алгоритмически вычитается на постобработке сигналов.

Принципы работы системы регулировки периметра и частотной подставки, а также прочих ключевых узлов прибора будут подробно рассмотрены в следующей лекции.

Выводы

ЛГ является активным интерферометром Саньяка, детектирующим интегральный угол поворота объекта в инерциальном пространстве, и позволяет измерять ориентацию и угловую скорость вращения.

По своим характеристикам он значительно превосходит другие типы гироскопов, но имеет очень сложную схему построения, а значит, конструкцию, а также подвержен влиянию различных особых эффектов внутри и снаружи его контура.

Достоинства

1. Высокая точность;
2. Отсутствие подвижных частей;
3. Малое время готовности;
4. Широкий диапазон измеряемых скоростей;
5. Малое время готовности;
6. Долговечность;
7. Относительная компактность;

Недостатки

1. «Зона захвата»;
2. Сложность конструкции;
3. Сложность изготовления;
4. Высокая стоимость;
5. Чувствительность к температурам;