

# Полупроводниковый лазерный гироскоп с частотной подставкой

Л.П.Прокофьева, В.К.Сахаров, В.В.Щербаков

*Описан полупроводниковый лазерный гироскоп, в котором частотная подставка, создаваемая с помощью внутррезонаторной фазовой модуляции, подавляет захват частот и обеспечивает интерференцию многомодового излучения. Чувствительность устройства составила 10–20 °/ч.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазерный гироскоп, захват частот, частотная подставка.

Возможность измерения скорости вращения с помощью полупроводникового лазерного гироскопа (ПЛГ) была впервые показана в работах [1, 2]. В качестве усиливающей среды использовался полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) на структуре InGaAsP/InP, а кольцевой резонатор был выполнен с помощью световода длиной 3 м. Генерация была многомодовой, в результате чего слабый сигнал в виде биений измерялся только при весьма больших скоростях вращения. Исследования были продолжены, но чувствительность поднялась лишь до 1°/ч [3].

Основными причинами невысокой чувствительности ПЛГ, как можно было заключить, являются захват частот и многомодовый режим генерации. Захват частот связан с обратным рассеянием оптического излучения, уровень которого в ПЛГ на несколько порядков выше, чем в He–Ne-гироскопе, а многомодовый режим обусловлен малым межмодовым спектральным интервалом в лазере с резонатором даже сравнительно небольшой длины.

Решение одной из этих проблем было продемонстрировано нами в [4], где использовалось устройство в виде пары лазеров – ведущего и ведомого. Ведущим являлся одночастотный лазерный диод, излучение которого периодически инжектировалось в ведомый лазер, собственно в ПЛГ, с резонатором в виде многовитковой катушки. Разность фаз двух волн, накапливаемая в ходе большого числа циркулирующих одночастотного излучения в резонаторе ПЛГ, была значительной. В той же работе была предложена модель захвата частот в кольцевом лазере, непосредственно связанная с уровнем обратного рассеяния и параметрами кольцевого лазера.

В качестве следующего шага планировалось в ПЛГ с инжекцией одночастотного излучения использовать частотную подставку, смысл которой состоит во внесении постоянного или переменного частотного смещения между циркулирующими волнами, выводящего частоту биений за пределы зоны захвата.

Как известно, частотная подставка в технике He–Ne-гироскопов является проверенным средством преодоления захвата частот, но в ПЛГ из-за большой ширины зоны захвата частот и многомодового характера генерации она до сих пор не применялась.

Однако из расчета частотной характеристики кольцевого лазера с помощью модели захвата частот [4] следует, что при значительном уровне обратного рассеяния большая (порядка нескольких сотен метров) длина кольцевого резонатора позволяет уменьшить ширину зоны захвата до уровня 1–2 кГц. В этом случае можно использовать частотную подставку, весьма просто реализуемую с помощью волоконного фазового модулятора, который размещается в кольцевом резонаторе.

Уже первые эксперименты показали, что частотная подставка, даже без использования инжекции одночастотного излучения, приводит к появлению на выходе многомодового ПЛГ биений с большой амплитудой, или, другими словами, к интерференции выводимого излучения с высоким контрастом. Это был неожиданный, впервые наблюдаемый, но стабильно воспроизводимый эффект.

На рис. 1 показана схема ПЛГ с реверсивной частотной подставкой. Использовался ПОУ на структуре InGaAsP/InP,

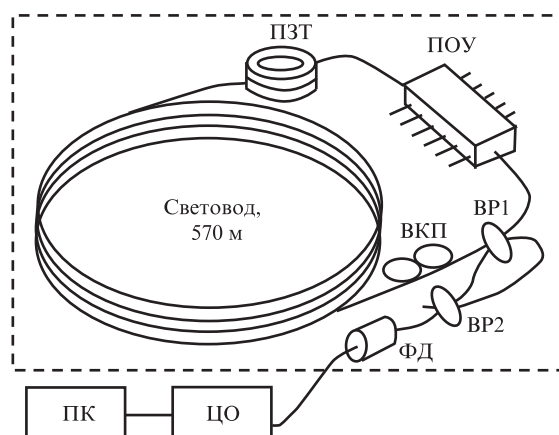


Рис. 1. Схема устройства: ПОУ – полупроводниковый оптический усилитель; ВР1, ВР2 – волоконные разветвители; ФД – фотоприемник; ВКП – волоконный контроллер поляризации; ПЗТ – фазовый модулятор; ЦО – цифровой осциллограф; ПК – компьютер.

Л.П.Прокофьева, В.К.Сахаров, В.В.Щербаков. ЗАО «Центр ВОСПИ», Россия, 117432 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: info@centervosp.ru

Поступила в редакцию 18 ноября 2013 г., после доработки – 4 февраля 2014 г.

кольцевой резонатор был выполнен в виде катушки из одномодового световода SM-28, длина световода  $L = 570$  м, радиус катушки  $R = 5$  см. Два волоконных разветвителя служили для вывода части мощности волн, циркулирующих навстречу друг другу, а также для объединения и подачи выводимого излучения на фотоприемник. Ток накачки, подаваемый на ПОУ, составлял 150–250 мА. Регистрация и обработка сигнала производились с помощью цифрового осциллографа и компьютера.

В качестве фазового модулятора, расположенного вблизи ПОУ, использовался световод длиной 10 м, намотанный на боковую поверхность пьезокерамического цилиндра. Частота гармонического напряжения модуляции  $f$  устанавливалась в диапазоне 0.8–3.0 кГц. Знакопеременная частотная подставка возникла в той части кольцевого резонатора, где расположен ПОУ и, следовательно, локализовано обратное рассеяние. За счет запаздывания одной волны по отношению к другой на время  $\tau = Ln/c$  и характера модуляции частотная подставка имела синусоидальный характер ( $n$  – показатель преломления сердцевины волокна).

Оптический спектр излучения представлял собой одну или две спектральные линии (шириной около 1 нм каждая) в области 1.55 мкм. Радиочастотный спектр фототока имел вид частотной гребенки с интервалом 345 кГц, что соответствует расстоянию между продольными модами кольцевого резонатора  $\Delta\nu = c/nL$ . Таким образом, число продольных мод в излучении было не менее  $10^5$ .

На рис.2 приведены осциллограммы фототока и напряжения модуляции при вращении ПЛГ. Можно видеть, что число осцилляций фототока различно на двух полупериодах модулирующего напряжения – число осцилляций во время спада напряжения модуляции больше, чем во время нарастания. При вращении в противоположном направлении ситуация изменялась – число осцилляций становилось больше во время нарастания, чем во время

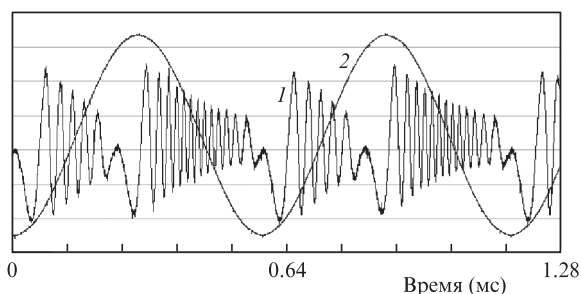


Рис.2. Осциллограммы с экрана монитора, соответствующие сигналу на выходе ФД (1) и напряжению синусоидальной модуляции с частотой  $f \approx 1.6$  кГц (2).

убывания напряжения модуляции. В состоянии покоя число осцилляций на двух полупериодах было равным.

Это свидетельствовало о формировании сигнала с помощью эффекта Саньяка и делало возможным измерение угловой скорости  $\Omega$ . Цифровая обработка выходного сигнала была основана на представлении фототока в виде

$$i(t) = i_0[1 + V(t)\cos(2\pi\nu_s t \pm 2\pi\Phi(t))], \quad (1)$$

где  $i_0$  – амплитуда фототока;  $V(t)$  – контраст интерференции;  $\nu_s = M\Omega$  – частота биений волн в отсутствие обратного рассеяния;  $M = 2R/\lambda n$  – масштабный коэффициент;  $\lambda$  – длина волны;  $\Phi(t) = \Phi_0 \sin(2\pi ft)$  – реверсивная частотная подставка;  $\Phi_0$  – амплитуда частотной подставки.

Алгоритм обработки сигнала включал определение моментов времени, соответствующих максимальным значениям осцилляций фототока на соседних участках подставки. При этом каждой паре определяемых времен соответствовало изменение аргумента косинуса в формуле (1) на величину  $2\pi k$  со знаком «+» или «-» ( $k$  – целое число). В конечном итоге это позволяло вычислять частоту биений  $\nu_s$  и угловую скорость  $\Omega$ , а еще раньше – при обработке сигнала покоящегося устройства – амплитуду частотной подставки  $\Phi_0$ .

Оценка чувствительности производилась с помощью измерений частоты биений  $\nu_s$  в положениях ПЛГ с различной ориентацией относительно направления оси вращения Земли. Минимально измеряемая скорость вращения в результате многократно повторяемых измерений составила 10–20 °/ч.

В заключение отметим, что предложенный подход требует дальнейших исследований. Использование световода, сохраняющего поляризацию, как представляется, позволит существенно увеличить чувствительность ПЛГ. Что касается механизма интерференции многомодового излучения, то пока можно лишь предположить, что значительную роль в этом играет захват частот. В короткие интервалы времени между периодами частотной подставки с разным знаком смещения частоты захват частот обеспечивает равенство мгновенных частот встречных волн, сохраняющееся далее в течение ограниченного времени. В это время частотная подставка подавляет захват частот, позволяя формировать сигнал, несущий информацию о направлении и величине угловой скорости.

1. Taguchi K., Fukushima K., Ishitani A., Ikeda M. *Opt. Quantum Electron.*, **31**, 1219 (1999).
2. Inagaki K., Tamura S., Noto H., Narayama T. *Phys. Rev. A*, **78**, 53822 (2008).
3. Акпаров В.В., Дмитриев В.Г., Дураев В.П., Казаков А.А. *Квантовая электроника*, **40** (10), 851 (2010).
4. Сахаров В.К. *ЖТФ*, **81**, 76 (2011).