

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП

Л.Прокофьева, к.т.н., В.Сахаров, к.ф.-м.н., В.Щербаков, к.т.н.  
ООО «Центр ВОСПИ», info@centervospi.ru

Как известно, полупроводниковый лазерный гироскоп (ПЛГ) пытались сделать практически с момента появления полупроводниковых лазеров, но до сих пор ничего не получалось. Предложен новый подход, открывающий реальный путь к его созданию. ПЛГ включает оптический усилитель и кольцевой резонатор, выполненный в виде световода большой длины; используется инжекция внешнего одночастотного излучения и последующая циркуляция в кольцевом резонаторе встречных волн. Устройство продемонстрировало чувствительность к угловому вращению  $0,01^\circ/\text{с}$ .

Принцип работы полупроводникового лазерного гироскопа (ПЛГ) основан на представлении о процессе захвата частот в кольцевом лазере как о развивающемся и устанавливаемом в пределах конечного времени, в течение которого возникает фазовая невязанность циркулирующих волн. Известно, что захват (синхронизация) частот в лазерном гироскопе вызван обратным рассеянием циркулирующего излучения. Для преодоления захвата частот используют методы частотной подставки и He-Ne-гироскоп [1], который и по сей день остается единственным типом ЛГ, имеющим практическое применение. Все усилия по созданию твердотельного (полупроводникового) ЛГ, который без использования методов частотной подставки мог бы обеспечить присущие твердотельным лазерам более высокие надежность и долговечность, а следовательно мог быть более простым и дешевым в изготовлении, не привели к желаемому результату.

Сигнал – частота биения выводимых волн – измерялся лишь при весьма больших угловых скоростях вращения. Минимальная измеряемая угловая скорость вращения составляла  $50^\circ/\text{с}$  при использовании в качестве среды усиления структуры InGaAsP/InP [2] и  $15^\circ/\text{с}$  при использовании

структуры  $1/2$  VCSEL (half-vertical-cavity semiconductor-emitting laser) [3]. Причиной низкой чувствительности ПЛГ являлся захват частот циркулирующих волн, связанный с большим уровнем обратного рассеяния в полупроводниковом оптическом усилителе (ПОУ). Таким образом, захват частот циркулирующих волн был и пока остается главной проблемой при создании твердотельного (полупроводникового) ЛГ, для решения которой требуется искать новые пути.

В настоящей работе рассматривается подход к созданию ПЛГ без частотной подставки, основанный на новой модели захвата частот в кольцевом лазере. В отличие от известной модели, построенной на аналогии между явлением захвата частот и взаимодействием двух связанных колебательных контуров [4], данная модель связана непосредственно с обратным рассеянием циркулирующих волн.

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА ЧАСТОТ В ЛГ

Представим ЛГ, включающий среду усиления и кольцевой резонатор в виде световода длиной  $L$ , смотанного в катушку радиуса  $R$ . В кольцевом резонаторе ЛГ циркулируют встречные волны, совершающие за время  $t_L = Ln/c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме и  $n$  – показатель преломления све-

товода, очередную циркуляцию, т.е. прогреб по полной длине кольцевого резонатора.

При вращении ЛГ с угловой скоростью  $\Omega$  в результате эффекта Саньяка фазы обеих волн после каждой новой циркуляции изменяются – для одной волны фаза возрастает, а для другой волны убывает на одну и ту же величину:

$$\delta = 2\pi R n l \Omega / c \lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $N = L / \lambda$  и  $l = 2\pi R$ . Тогда частота биения волн на выходе ЛГ должна быть пропорциональна угловой скорости вращения  $\Omega$ :

$$\nu = 2\delta / 2\pi t_L = M \Omega, \quad (2)$$

где  $M = 2R / \lambda n$  – масштабный коэффициент для кольцевого резонатора. Выражение (2) справедливо в случае отсутствия обратного рассеяния, учет которого кардинально изменяет ситуацию. Комплексные амплитуды циркулирующих волн примем  $A_k = a_k \exp(i\phi_k)$ ,  $B_k = b_k \exp(i\psi_k)$ , где  $a_k$ ,  $b_k$  – модули,  $\phi_k$ ,  $\psi_k$  – фазы комплексных амплитуд и  $k$  – номер циркуляции, отсчитываемый относительно начала, выбираемого произвольным образом или из физических соображений.

Будем полагать, что обратное рассеяние возникает внутри ПОУ, и каждая из двух волн  $A_k$  и  $B_k$  порождает «обратные волны»,

комплексные амплитуды которых  $A'_k$  и  $B'_k$  зависят от коэффициента обратного рассеяния по амплитуде  $\alpha$ :

$$A' = \alpha B_k \text{ и } B' = \alpha A_k. \quad (3)$$

При этом коэффициент  $\alpha$  полагаем действительным, а поляризации «обратных волн» линейными и совпадающими с поляризацией порождающих волн  $A_k$  и  $B_k$ . Примем во внимание, что сумма интенсивностей двух волн  $A_k$  и  $B_k$  остается неизменной в силу динамического равновесия между инверсной населенностью и оптическим полем в активной среде. Пренебрежем флуктуациями фаз обеих волн, вызываемыми спонтанным испусканием при многократном пробеге волн через ПОУ, и будем также считать, что внешние наводки – температурные нестабильности, вибрации и прочие – не оказывают воздействия на фазы циркулирующих волн. В результате процесс циркуляции волн в ЛГ можно описать с помощью системы рекуррентных уравнений:

$$\begin{aligned} A_k &= e^{i\delta} A_{k-1} + \alpha \cdot e^{-i\delta} B_{k-1}, \\ A_k &= \alpha \cdot e^{i\delta} A_{k-1} + e^{-i\delta} B_{k-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $k \geq 1$ , заданы начальные комплексные амплитуды  $A_0$ ,  $B_0$  и выполняется условие для интенсивностей циркулирующих волн  $|A_k|^2 + |B_k|^2 = 1$ .

Как следует из численного расчета, при достаточно малых значениях саньяковской фазы  $\delta$  в ходе циркуляций фазы  $\phi_k$  и  $\psi_k$  сначала весьма быстро изменяются – одна фаза возрастает, а другая убывает, или наоборот, в зависимости

от направления вращения. Но затем изменение фаз  $\phi_k$  и  $\psi_k$  замедляется, а по достижении некоего числа циркуляций  $K_0$  прекращается вовсе. В приведенной картине динамики фазы  $\phi_k$  (рис.1) показаны три случая: полное отсутствие обратного рассеяния, а также случаи, когда коэффициент рассеяния по интенсивности  $\alpha_1$  равен 30 и 40 дБ. Начальные условия для амплитуд и фаз выбраны следующие:  $a_0=b_0=1$  и  $\psi_0=\phi_0=0$ . Видно, что в отсутствие обратного рассеяния, т.е. при  $\alpha_1=0$  дБ, фаза возрастает по линейному закону, в то время как в двух других случаях она изменяется лишь в пределах ограниченного числа циркуляций  $K_0$ . Для обоих выбранных значений коэффициента  $\alpha_1$  число циркуляций составляет примерно 50 и 100, соответственно; во всех трех случаях фаза  $\psi_k$  отличается от фазы  $\phi_k$  только знаком.

Подобный характер, разумеется, имеет динамика разности фаз  $\Delta\phi_k=\phi_k-\psi_k$  – быстрый рост, замедление и, наконец, устанавливающийся после  $K_0$  циркуляций уровень  $\Delta\phi_0$ . Этот уровень определяется коэффициентом обратного рассеяния  $\alpha_1$ , параметрами кольцевого лазера, направлением и скоростью вращения. Можно также проверить, что устанавливающаяся разность фаз  $\Delta\phi_0$  не зависит от начальных значений фаз  $\phi_0$  и  $\psi_0$ .

Показанная динамика фаз циркулирующих волн (при сравнительно небольшой угловой скорости вращения  $\Omega$  и, соответственно, небольшой саньяковской фазе  $\delta$ ) есть ни что иное, как про-

цесс формирования захвата частот волн в ЛГ. При этом следует понимать, что явление захвата частот – это весьма быстро развивающийся и устанавливающийся процесс. В ходе него происходит синхронизация частот двух волн, циркулирующих в противоположных направлениях, или, другими словами, имеет место частотная взаимность для встречных волн. Однако фазовой взаимности при этом не возникает – каждый раз при изменении скорости вращения, сколь ни была бы она малой, разность фаз циркулирующих в кольцевом резонаторе волн принимает новое значение. Оно зависит как от уровня обратного рассеяния, так и от направления и величины угловой скорости вращения.

### ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛГ

При возрастании угловой скорости вращения, как известно, режим захвата частот в ЛГ исчезает и возникают биения частот выводимых волн. Расчет динамики фаз с помощью системы уравнений (4) также показывает, что если угловая скорость вращения увеличивается и, соответственно, увеличивается саньяковская фаза  $\delta$ , то появляется монотонное и непрекращающееся изменение фаз циркулирующих волн, что означает возникновение биения частот.

Представим частотную характеристику ЛГ в виде функции  $v(\Omega, M, \alpha_1)$  или, в более удобном виде, как  $v(v^*, \alpha_1)$ , где  $v^*=M\Omega$  – параметр, объединяющий масштаб-

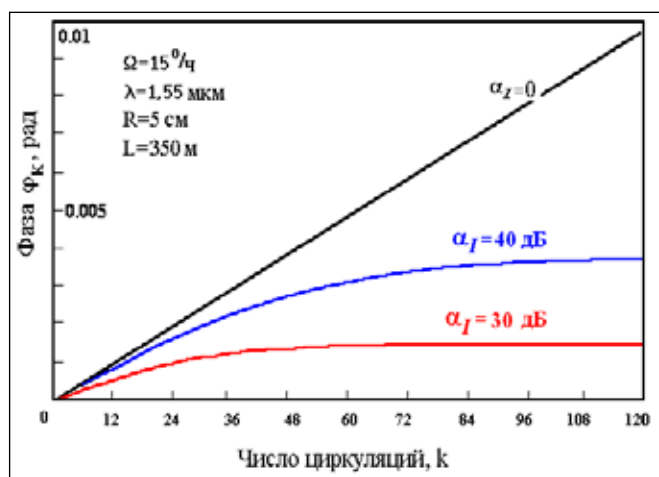


Рис.1. Зависимость фазы от числа циркуляции

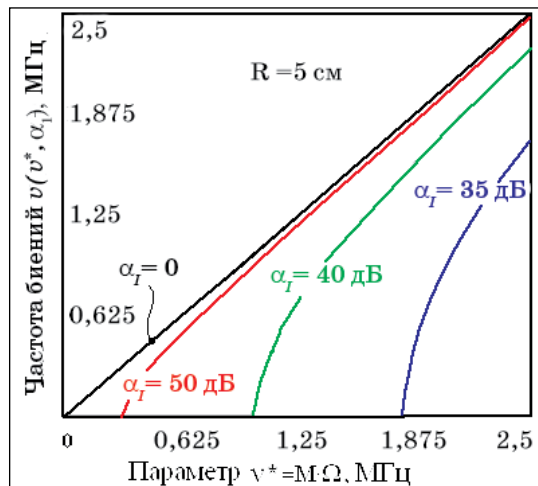


Рис.2. Результат расчета частотной характеристики ПЛГ

ный коэффициент  $M$  и угловую скорость вращения  $\Omega$ . Он имеет смысл частоты биения волн в отсутствие обратного рассеяния. В соответствии с (2) запишем сальняковские фазы для волн противоположных направлений как  $\delta_{1,2} = \pi t_L - v^*$ . Тогда расчет частоты биений  $\nu(v^*, \alpha_1)$  сводится к варьированию частоты при вычислении разности фаз, накапливаемой в процессе достаточно большого числа циркуляций  $P$ :

$$\nu^*(v, \alpha_1) = \Delta\phi(p) / 2\pi T, \quad (5)$$

где  $\Delta\phi(p) = \Sigma\phi_k$ . Результат расчета частотной характеристики ЛГ с радиусом кольцевого резонатора  $R = 5$  см и уровнем обратного рассеяния в диапазоне 50–35 дБ (рис.2) характерен для ПОУ, выполненном на структуре InGaAsP/InP. По оси ординат отложена частота биений  $\nu(v^*, \alpha_1)$  на выходе ЛГ, а по оси абсцисс – параметр  $\nu^* = M\Omega$ . Можно видеть, что граница области захвата находится в диапазоне 0,3–1,8 МГц. Для сравнения, аналогичный параметр для He-Ne-гироскопа составляет 0,5–1,7 КГц [4].

### УСТРОЙСТВО И РАБОТА ПЛГ

Основная идея работы описываемого ПЛГ состоит в том, что в качестве сигнала, несущего информацию о вращении, используется не частота биения, а разность фаз циркулирующих волн, сначала быстро возрастающая, а затем замедляющаяся и устанавливающаяся на некотором уровне  $\Delta\phi_0$ .

На рис.3 приведена блок-схема устройства [5] с поочередным пробегом двух волн через ПОУ. Так как число циркуляций, в процессе которых образуется

и устанавливается разность фаз волн, ограничено, то длину кольцевого резонатора  $L$  выбираем достаточно большой. Для обеспечения когерентности циркулирующих волн используем инжекцию внешнего одночастотного излучения. Кольцевой лазер образован с помощью ПОУ на структуре InGaAsP/InP [6]. Резонатор кольцевого лазера выполнен из изотропного одномодового световода длиной  $L \approx 350$  м, смотанного в катушку радиусом 5 см. Задающий лазер – одночастотный ЛД с длиной волны излучения, совпадающей с центром эмиссии ПОУ. Кольцевой лазер и задающий одночастотный лазер составляют пару – ведомый и ведущий лазеры. ПЛГ содержит также волоконные разветвители, контроллеры поляризации, фотоприемник, цифровой осциллограф, систему накачки и ПК. Все устройство, кроме ПК, размещено на вращающемся столе.

Излучение задающего ЛД в виде импульса длительностью  $\tau_{in} \leq \Delta t_L / 2$ , где  $\Delta t_L$  – время пробега света по длине кольцевого резонатора  $L$ , делится на две волны и инжектируется в резонатор кольцевого лазера, по которому волны начинают пробег в противоположных направлениях. Одновременно на ПОУ подается ток накачки также в виде импульса длительностью  $T_{SOA} \gg \tau_{inv}$  в течение которого волны совершают конечное число циркуляций по протяженному кольцевому резонатору. Части световода  $5'$  и  $5''$ , связывающие зону инжекции волн с ПОУ, имеют различные длины, поэтому волны пробегают через ПОУ поочередно, но на фотоприемни-

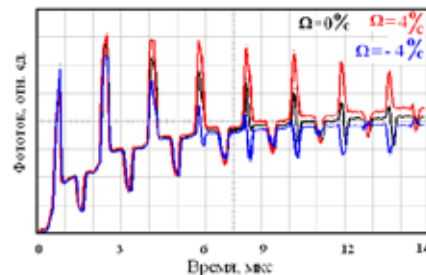


Рис.4. Наложение трех осциллограмм фототока; скорость развертки 1 мкс/дел

ке они всегда оказываются в одно время. По окончании импульса накачки и небольшой паузы производится новая инжекция излучения ЛД и все повторяется. В процессе циркуляции часть мощности обеих волн выводится из кольцевого лазера, волны объединяются и поступают на фотоприемник.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛГ

Поочередный пробег двух волн через ПОУ обеспечивает в начале циркуляций большую интенсивность каждой из волн и уменьшает влияние волн друг на друга. Отметим, что даже в этом случае, когда волны начинают циркулировать, поочередно пробегая через ПОУ, обратное рассеяние через весьма короткое время приводит к возникновению «обратных» волн, пробегающих через ПОУ одновременно с порождающими их волнами. Это можно наблюдать при регистрации временной структуры излучения, а также следует из расчета с помощью системы уравнений (4). Таким образом, при инжекции внешнего одночастотного излучения происходит навязывание волнам, циркулирующим в кольцевом лазере, частоты инжектируемого излучения. Но циркуляция одночастотного излучения сохраняется в течение ограниченного времени. На рис.4 показаны три осциллограммы фототока: одна получена в случае покоящегося ПЛГ (эюра черного цвета), две другие – при вращении с угловой скоростью  $\Omega = 4^\circ/\text{с}$  по направлению хода часовой стрелки (красный цвет) и в противоположном направлении (синий цвет). Осциллограммы иллюстрируют характер выходного

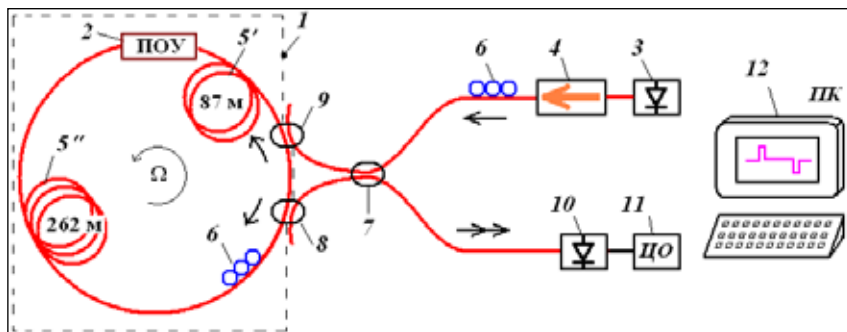


Рис.3. Блок-схема ПЛГ: 1 – кольцевой лазер, 2 – ПОУ, 3 – задающий лазер, 4 – оптический изолятор, 5 – две части световода длиной 87 и 262 м, 6 – контроллеры поляризации, 7–9 – оптические разветвители, 10 – фотоприемник, 11 – цифровой осциллограф, 12 – ПК

излучения и демонстрируют чувствительность описываемого устройства к угловому вращению.

По осциллограммам видно, что в выходном излучении кольцевого лазера присутствуют импульсы «положительной и отрицательной полярности». Подобный же характер в виде импульсов «положительной и отрицательной полярности» имеют по отдельности каждая из циркулирующих волн независимо от наличия вращения и его отсутствия, что наблюдалось при подключении свободных полюсов разветвителей 8 и 9 к фотоприемнику (см. рис.3). Длительность импульсов обеих «полярностей» равна длительности инжектируемого излучения  $\tau_{in} \approx 250$  нс, а период повторения равен времени пробега волн по кольцевому резонатору  $\Delta t$ .

Сравнивая три осциллограммы, можно увидеть, что амплитуда импульсов «положительной полярности» при вращении зависит как от направления вращения – амплитуда импульсов возрастает или уменьшается, так и от величины скорости углового вращения – изменение амплитуд тем больше, чем выше скорость вращения. Эти изменяющиеся при вращении импульсы «положительной полярности» являются результатом интерференции волн, выводимых из кольцевого лазера, и несут информацию о вращении.



Рис.5. Экран интерфейса системы обработки сигнала

### ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

С помощью системы обработки сигнала, включающей АЦП, систему синхронизации и ПК, по выходному сигналу определяли направление и величину угловой скорости. Согласно алгоритму обработки сигнала результат измерения на экран монитора выводят в виде эшоры, представляющей зависимость измеряемых параметров вращения от времени. Картина (рис.5), зафиксировала экран монитора в эксперименте, когда периодически в течение интервалов времени 10–15 с задавалось вращение по часовой стрелке и против нее с угловой скоростью  $\Omega = 4^\circ/\text{с}$ . По предварительной оценке чувствительность к угловому вращению описываемого ПЛГ составила  $0,01^\circ/\text{с}$ , т.е. превышала на три поряд-

ка чувствительность, полученную в работах [2, 3]. Очевидно, что развитие изложенного подхода требует дальнейших исследований. Авторы благодарны В.Дураеву за предоставленные образцы ПОУ и полезные обсуждения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аронович Ф. В кн. Примененные лазеры/Пер.с англ. под ред. М.Росса. – М. : Мир.1971.
2. Inagaki K., Tamura S., Noto H. et al. – Physical Review. A, 2008, v. 78.
3. Mignot A., Feugnet G., Schwartz S. et al. – Optics Letters, 2009, v. 34.
4. Азарова В., Голяев Ю., Дмитриев В. – Квантовая электроника, 2000, т.30.
5. Сахаров В., Дураев В. – Твердотельный лазерный гироскоп. Патент РФ № 90895.
6. Дураев В., Казаков А., Медведев С. – Фотоника, 2010, №1.