

Полупроводниковый кольцевой лазер и исследование его характеристик в режиме датчика вращения

В.В.Акпаров, В.Г.Дмитриев, В.П.Дураев, А.А.Казаков

Представлены результаты разработки и исследований характеристик полупроводникового кольцевого лазера (ПКЛ) с длиной волны излучения 1540 нм и волоконно-оптическим кольцевым резонатором в некоторых основных режимах генерации. Рассмотрена конструкция ПКЛ на базе полупроводникового оптического усилителя бегущей волны и кольцевого резонатора, состоящего из одномодового волокна с сохранением поляризации. Проведены исследования ПКЛ в режиме датчика угловой скорости, в котором сдвиг частот встречных волн ПКЛ пропорционален угловой скорости его вращения. Минимальная обнаружимая с помощью созданного ПКЛ скорость вращения зависит от длины резонатора, и в данном эксперименте она составила 1 град/с. При замыкании и размыкании кольцевого резонатора ПКЛ, а также при изменении его радиуса исследованы изменения порогового тока, спектра излучения и его центральной длины волны.

Ключевые слова: полупроводниковый кольцевой лазер, полупроводниковый оптический усилитель, эффект Саньяка, лазерный датчик вращения, кольцевой резонатор.

1. Введение

Полупроводниковые кольцевые лазеры (ПКЛ) относятся к классу полупроводниковых лазеров с внешним (как правило, волоконно-оптическим) кольцевым резонатором [1, 2] и представляют собой сложные нелинейные автоколебательные системы с распределенными параметрами, в которых возможно возбуждение большого числа различных режимов генерации (однонаправленные и двунаправленные режимы, режим биений частот встречных волн, режим автомодуляций, режим динамического хаоса и т. д. [3–9]).

Интерес к ПКЛ связан с более широким, чем у традиционного полупроводникового лазерного диода, спектром возможных оптических явлений, с большим числом режимов генерации, более широкими возможностями управления излучением сравнительно простыми методами за счет размещения во внешнем кольцевом резонаторе различных управляющих элементов. Использование в ПКЛ волоконно-оптических резонаторов с весьма малыми потерями позволяет реализовать кольцевые лазеры со сверхдлинными резонаторами, представляющие отдельный как научный, так и практический интерес. ПКЛ могут применяться в оптических линиях связи, в составе различных устройств оптической обработки информации, в навигационных и управляющих системах в качестве датчика угловых параметров движения объектов, в ВЧ и СВЧ генераторах в качестве задающего генератора [10–26] и во многих других устройствах.

При создании ПКЛ с волоконно-оптическим резонатором используется активный элемент усилителя бегущей волны с клиновидным активным каналом и просветленными гранями резонатора [25, 26]. Ввод и вывод оптического излучения осуществляется с помощью одномодовых световодов.

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследований характеристик ПКЛ с длиной волны излучения $\lambda = 1540$ нм и волоконно-оптическим кольцевым резонатором в некоторых основных режимах генерации, в том числе в режиме датчика угловой скорости.

2. Экспериментальная часть

Конструкция ПКЛ представлена на рис.1. Лазер состоит из металлокерамического корпуса типа 14-pin DIP («Баттерфляй») 1, активного элемента 2, микроохлаждителя 3, термистора 4 и одномодового оптического волокна 5 с сохранением поляризации, закольцованного и состыкованного с активным элементом ПКЛ. На концах волокна, соединяющихся с активным элементом, сформированы цилиндрические микролинзы 6. Для регистра-

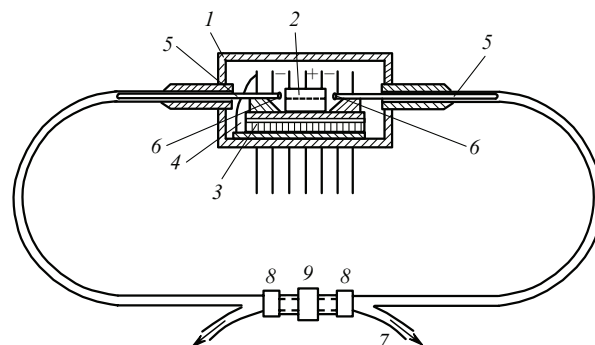


Рис.1. Элементы конструкции ПКЛ (см. текст).

В.В.Акпаров. ЗАО «Нолатех», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

В.Г.Дмитриев, В.П.Дураев, А.А.Казаков. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: nolatech@mail.ru

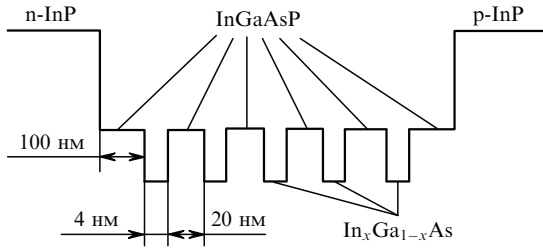


Рис.2. Геометрия квантоворазмерной лазерной структуры InGaAsP/InP на длину волны излучения $\lambda = 1540$ нм.

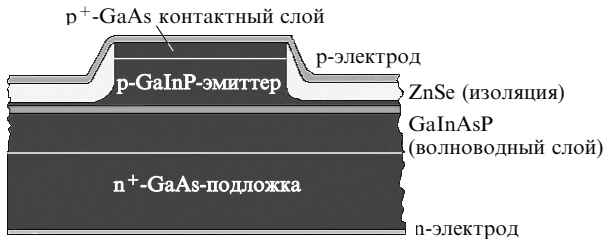


Рис.3. Поперечное сечение активного элемента с гребневидной конструкцией.

ции параметров оптического излучения в кольцевой резонатор с помощью коннекторов 8 и соединительной розетки 9 помещается X-образный оптический разветвитель 7.

С целью повышения эффективности накачки, увеличения фактора оптического ограничения, уменьшения температурной зависимости и ширины спектра излучения, а также увеличения коэффициента ввода лазерного излучения в одномодовый световод нами была использована гетерозитаксиальная структура на основе InGaAsP/InP с пятью квантовыми ямами (рис.2). Состав структуры $In_xGa_{1-x}As$ соответствовал генерации на $\lambda = 1540$ нм. Барьерные слои четверного твердого раствора InGaAsP отвечали $\lambda = 1250$ нм. Активный элемент ПКЛ имел гребневидную конструкцию (рис.3). Длина активного элемента составляла 1600 мкм, а ширина мезаполоски – 3 мкм. Мезаполоска была сформирована под углом 7° к просветленным граням активного элемента методом фотолитографии.

Температура активного элемента поддерживалась постоянной с точностью $0.01^\circ C$ с помощью микроохладителя. Цилиндрические линзы на концах световода обеспечивали ввод лазерного излучения в световод с эффективностью до 70 %. X-образный оптический разветвитель обеспечивал вывод 50 % излучения из кольца резонатора.

3. Результаты экспериментальных исследований ПКЛ

Ватт-амперные характеристики ПКЛ на длину волны 1540 нм до и после замыкания кольца резонатора показаны на рис.4. Мощность суперлюминесцентного излучения, т. е. до замыкания кольца (режим усилителя бегущей волны), составляла 1.9 мВт при токе накачки 250 мА. В режиме замыкания кольца пороговый ток генерации ПКЛ был равен 70 мА, в режиме генерации при токе накачки 140 мА мощность излучения составила 12 мВт.

Оптические спектры излучения ПКЛ, измеренные на оптическом спектроанализаторе типа ANDA до и после

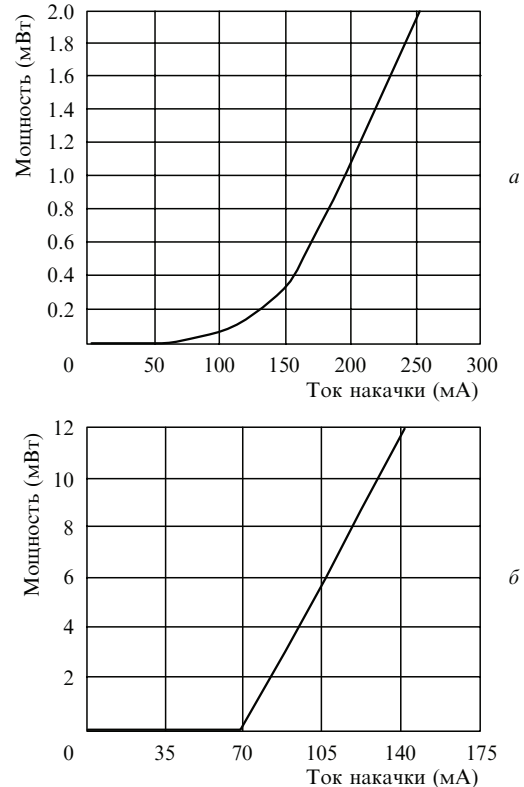


Рис.4. Ватт-амперные характеристики ПКЛ до (а) и после (б) замыкания кольца резонатора.

замыкания кольца, показаны на рис.5. Спектр суперлюминесцентного излучения усилителя бегущей волны (до замыкания кольца) имел полуширину 30 нм на $\lambda = 1536.4$ нм, в то время как спектр генерации ПКЛ – полуширину 0.1 нм на $\lambda = 1540.2$ нм. Таким образом, наблюдаются увеличение длины волны излучения с 1536.4 нм (в режиме суперлюминесцентного излучения) до 1540.2 нм (в ре-

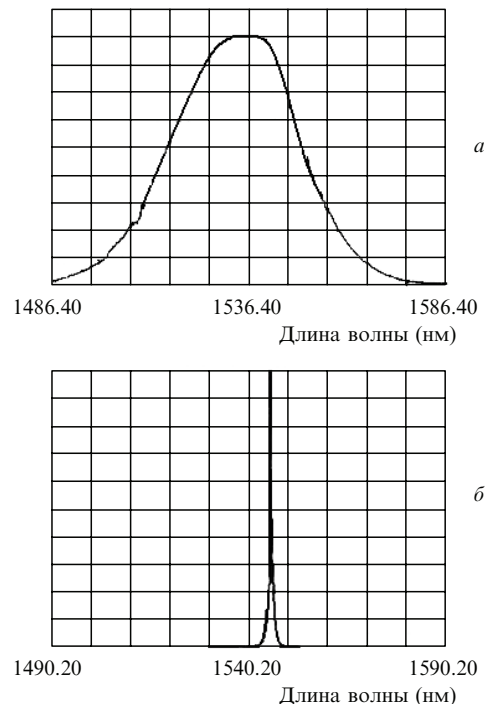


Рис.5. Оптические спектры излучения полупроводникового оптического усилителя (а) и ПКЛ (б).

жиме генерации) и резкое сужение спектра в режиме генерации.

Предпринята попытка экспериментального обнаружения влияния невязности на параметры генерации в ПКЛ. Как известно, кольцевой резонатор лазера чувствителен к невязности, поскольку вследствие эффекта Саньяка частоты встречных волн в отсутствие захвата расщепляются и разность этих частот оказывается пропорциональной величине невязности [4]. Простейшим способом ввести невязность в кольцевой резонатор является вращение кольцевого контура вокруг оси чувствительности. С этой целью ПКЛ был установлен на вращающемся столе и вращался со скоростью от 1 до 100 об./мин. Изменение саньяковской частоты биений Δf определялось по формуле:

$$\Delta f = \frac{2R\Omega}{n\lambda},$$

где R – радиус кольца; Ω – угловая скорость вращения стола; n – показатель преломления среды.

На рис.6 представлена схема экспериментальной установки для измерения отклика ПКЛ на вращение вокруг оси чувствительности, перпендикулярной плоскости резонатора лазера. Резонатор ПКЛ имел радиус 15 см и включал в себя катушку одномодового световода длиной 800 м.

Направленный ответвитель использовался для вывода части излучения встречных волн из резонатора. Две встречные волны интерферировали в ответвителе 2 и попадали на фотоприемник. Сигнал с фотоприемника подавался на радиочастотный анализатор спектра. Все волоконные компоненты состояли из сохраняющего поляризацию волокна, для их соединения применялись коннекторы типа FC/APC.

На рис.7 показан радиочастотный спектр сигнала с фотоприемника, регистрирующего излучение неподвижного ПКЛ, для которого оптические частоты встречных волн совпадают. Фотоприемник обладает квадратичной нелинейностью и выделяет спектр биений большого числа оптических мод, попадающий в радиочастотный диапазон. Расстояние между оптическими модами $\Delta f = c \times (Ln)^{-1}$ при длине кольцевого резонатора ПКЛ $L = 800$ м равно 250 кГц. На спектре видны эквидистантные линии с

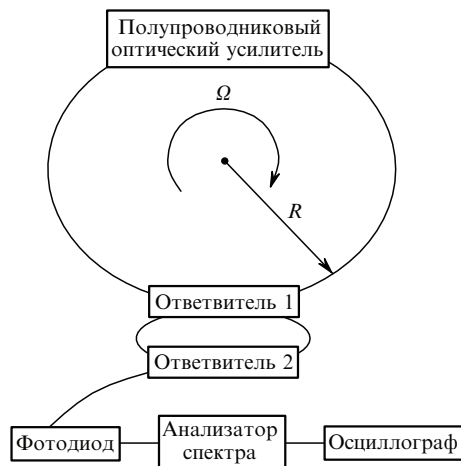


Рис.6. Схема экспериментальной установки для измерения отклика ПКЛ на вращение.

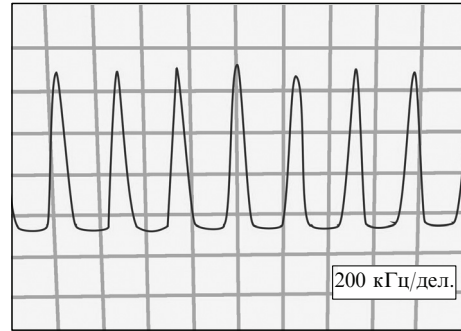


Рис.7. Радиочастотный спектр биений оптических мод кольцевого лазера.

интервалом, соответствующим межмодовому расстоянию, ширина линии составляет менее 3 кГц.

При наличии невязности, например при вращении ПКЛ, оптические частоты в отсутствие захвата частот должны расщепляться. Разумеется, вследствие весьма значительного рассеяния в активном элементе ПКЛ следует ожидать большой области захвата частот встречных волн, что и было обнаружено (в данном эксперименте ширина этой области составила примерно 1 град/с). При некоторой угловой скорости вращения ПКЛ можно выйти из зоны захвата и обнаружить расщепление частот встречных волн.

На рис.8 приведен радиочастотный спектр биений частот встречных волн при вращении ПКЛ вне области захвата со скоростью ~ 5 град/с. Этот спектр содержит три частотные компоненты – центральную и две боковых. Центральная компонента точно соответствует частоте межмодовых биений двух соседних оптических мод при неподвижном ПКЛ, но при его вращении каждая из мод расщепляется на две оптические компоненты (назовем их «нижней» и «верхней») с расстоянием между ними, равном саньяковской частоте биений. В этом случае центральная частота радиочастотного спектра остается на месте и равна разности оптических частот «нижних» (или «верхних») компонент двух соседних расщепленных мод. Низкочастотная (левая) радиочастотная компонента спектра на рис.8 соответствует разности частот «верхней» оптической компоненты более низкочастотной оптической моды и «нижней» оптической компоненты более высокочастотной оптической моды. Соответственно высокочастотная (правая) радиочастотная компонента спектра на рис.8 соответствует разности частот «нижней» оптической компоненты более низкочастотной оптической моды и «верхней» оптической компоненты

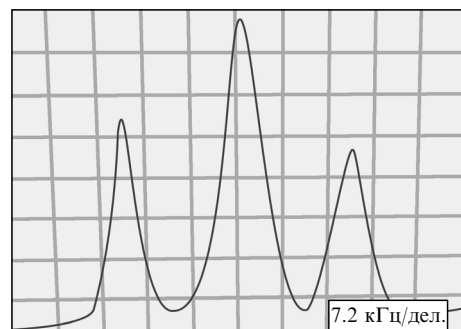


Рис.8. Радиочастотный спектр биений расщепленных встречных волн при угловой скорости вращения ПКЛ ~ 5 град/с.

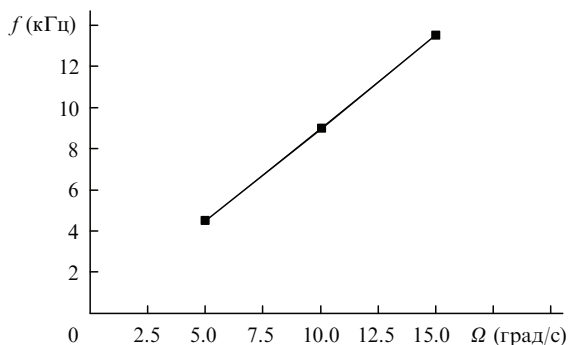


Рис.9. Зависимость частоты биений расщепленных встречных волн от угловой скорости вращения ПКЛ.

более высокочастотной оптической моды. Очевидно, что расстояние между соседними компонентами радиочастотного спектра точно равно саньяковской частоте биений, пропорциональной угловой скорости вращения ПКЛ.

На рис.9 приведена зависимость саньяковской частоты биений от угловой скорости вращения ПКЛ. Эта зависимость имеет линейный характер, коэффициент пропорциональности (масштабный коэффициент) равен 900 кГц·град⁻¹·с. Было установлено, что минимальная скорость вращения, обнаруживаемая с помощью ПКЛ в данном эксперименте, уменьшается с увеличением длины резонатора. В частности, при длине резонатора 800 м удалось измерить скорость вращения 1 град/с.

4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследований характеристик ПКЛ с длиной волны излучения ~ 1540 нм и волоконно-оптическим кольцевым резонатором в некоторых основных режимах генерации. Рассмотрена конструкция ПКЛ на базе полупроводникового оптического усилителя бегущей волны и кольцевого резонатора, состоящего из одномодового волокна с сохранением поляризации. При замыкании и размыкании кольцевого резонатора ПКЛ, а также при изменении его радиуса исследованы изменения порогового тока, длины волны и спектра излучения.

С помощью измерения радиочастотного спектра биений встречных волн проведены исследования ПКЛ в режиме датчика угловой скорости. Установлено, что сдвиг частот встречных волн ПКЛ пропорционален угловой скорости его вращения. Минимальная обнаруживаемая с помощью созданного ПКЛ угловая скорость вращения

зависит от длины резонатора и составила в данном эксперименте 1 град/с. Масштабный коэффициент равен 900 кГц·град⁻¹·с.

Приведенные результаты являются предварительными, и исследования параметров ПКЛ, в том числе в режиме, при котором в резонатор вносится невзаимность, будут продолжены.

1. Богатов А.П., Елисеев П.Г., Охотников О.Г. *Письма в ЖТФ*, **8** (13), 799 (1982).
2. Богатов А.П., Елисеев П.Г., Охотников О.Г. *Письма в ЖТФ*, **10** (7), 397 (1984).
3. Takahashi Y., Sekiya S., Iwai N. *Opt. Rev.*, **10** (4), 315 (2003).
4. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **21** (10), 903 (1994).
5. Show W.W., Gea-Banacioche J., et al. *Rev. Mod. Phys.*, **57** (1), 61 (1985).
6. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н. *Квантовая электроника*, **27** (2), 98 (1999).
7. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. *УФН*, **72** (2), 161 (1960).
8. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А. *Фотон-Экспресс*, № 6, 20 (2005).
9. Акпаров В.В., Дураев В.П., Логгинов А.С., Неделин Е.Т. *Вестник Моск. ун-та. Сер. Физика, астрономия*, № 3, 45 (2006).
10. Ву Ван Лык, Дураев В.П., Елисеев П.Г. и др. *Препринт ФИАН № 47* (М., 1989).
11. Дмитриев В.Г., Дураев В.П., Казаков А.А., Неделин Е.Т. *Фотоника*, № 4, 18 (2008).
12. Дураев В.П., Казаков А.А., Медведев С.В. *Фотоника*, № 1, 16 (2010).
13. Дураев В.П., Дмитриев В.Г., Казаков А.А. *Обзорные прикладной и промышленной математики*, **16** (4), 647 (2009).
14. Donati S., Giuliani G., Sorel M. *Alta Frequenza – Rivista di Elettrotecnica*, **9** (6), 61 (1997).
15. Sunada S., Tamura S., Inagaki K., Narayama T. *Phys. Rev. A*, **78**, 053822 (2008).
16. Tamura S., Inagaki K., Noto H., Narayama T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6770**, 677014 (2007).
17. Taguchi K., Fukushima K., Ishitani A., Ikeda M. *Opt. Quantum Electron.*, **31**, 1219 (1999).
18. Ishida T., Tamura S., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7004**, 700450 (2008).
19. Yao X.S., Maleki L. *Opt. Lett.*, **22** (24), 1867 (1997).
20. Yao X.S., Maleki L. *Opt. Lett.*, **21** (7), 483 (1996).
21. Ikeda M., Taguchi K. *Proc. Conf. CLEO/Europe* (Glasgow, Scotland, UK, 1998, p. CW2).
22. Taguchi K., Fukushima K., Ishitani A., Ikeda M. *IEICE Trans. Electron.*, **E82-C** (4), 659 (1999).
23. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А. Патент РФ № 41924 (2004).
24. Дураев В.П. *Lightwave*, № 2, 45 (2004).
25. Дураев В.П. *Lightwave*, № 4, 56 (2005).
26. Голикова Е.Г., Дураев В.П., Козиков С.А., Кригель В.Г., Лабутин О.А., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **22** (2), 105 (1995).