

УДК 535.2

ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

© 2013 г. В. В. Акпаров, В. П. Дураев, С. В. Медведев

ЗАО “Новая лазерная техника”
Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3
E-mail: nolatech@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2012 г.
После доработки 25.06.2012 г.

Представлены результаты исследований полупроводниковых оптических усилителей, полупроводниковых кольцевых лазеров и датчиков вращения, изготавливаемых на их основе. Длина резонатора полупроводниковых кольцевых лазеров варьировалась от 3 до 800 м, при этом ширина линии лазерного излучения менялась от 30 МГц до 3 кГц. Показана возможность создания на основе полупроводниковых оптических усилителей датчика вращения с масштабным коэффициентом 900 кГц/градус/с и минимально обнаружимой скоростью вращения $1^\circ/\text{с}$.

DOI: 10.7868/S0032816213010151

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковый оптический усилитель (п.о.у.) является основой полупроводникового кольцевого лазера (п.к.л.), в качестве резонатора которого используется замкнутое в кольцо оптическое волокно.

Интерес к п.к.л. вызван наличием широкого спектра оптических явлений в полупроводниках, возможностью управления излучением таких лазеров простыми методами, а также их относительной дешевизной изготовления. Полупроводниковые кольцевые лазеры могут быть использованы в оптических линиях связи, в составе различных устройств оптической обработки информации [1, 2], в навигационных системах, в составе лазерного гироскопа [3–6], в качестве задающего генератора в в.ч.- и с.в.ч.-генераторах [7] и др. устройствах.

Одним из важных отличий п.к.л. с волоконным резонатором от других лазеров является возможность встраивания в резонатор различных оптических устройств и компонентов. Использование волоконных резонаторов произвольной длины, от нескольких сантиметров до десятков и даже сотен километров, позволяет, в частности, создавать п.к.л. со сверхдлинными резонаторами.

В отличие от линейных лазеров с формированием в резонаторе в режиме генерации стоячей волны, в п.к.л. может осуществляться режим бегущей волны. При этом одновременно могут существовать две волны, распространяющиеся навстречу друг другу в резонаторе. Это свойство, в частности, позволяет создавать на основе п.к.л. лазерные гироскопы с использованием эффекта Саньяка.

Во многих современных применениях требуются датчики с небольшими массой и габаритами, а также низкой стоимостью. В течение последних 25-ти лет были достигнуты значительные успехи в получении одномодовых оптических волокон, одномодовых полупроводниковых лазеров, полупроводниковых оптических усилителей, в развитии технологии сварки, оконцовки оптических волокон, создании оптического волокна с сохранением поляризации, волоконно-оптических изоляторов, элементной базы (волоконных ответвителей, поляризаторов, электрооптических модуляторов и т.п.). Это позволило всерьез рассматривать возможность создания лазерного гироскопа на основе полупроводникового кольце-

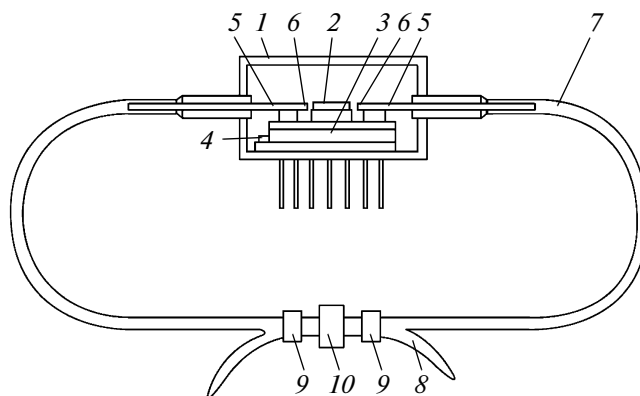


Рис. 1. Схема п.к.л. 1 – корпус butterfly; 2 – активный элемент; 3 – элемент Пельтье; 4 – терморезистор; 5 – оптические волокна; 6 – микролинзы; 7 – кольцевое оптическое волокно; 8 – вывод ответвителя; 9 – оптические коннекторы; 10 – ответвитель.

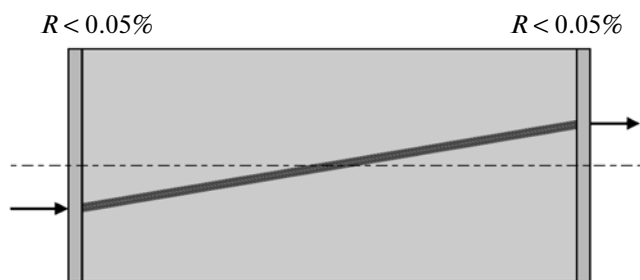


Рис. 2. Активный элемент со скошенными просветленными гранями.

вого лазера. В этом направлении работы ведутся одновременно в нескольких исследовательских центрах по всему миру. Использование п.к.л. в качестве датчика вращения позволит создавать компактные и дешевые гироскопы для систем инерциальной навигации различных объектов.

Одной из первых работ, в которой была продемонстрирована возможность использования п.к.л. для создания датчика вращения, является работа [3]. В этой работе авторы исследовали возможность детектирования вращения по возникновению разности частот встречных волн в кольцевом резонаторе. Возникающая разность частот определялась как частота биений между встречными волнами и вычислялась по формуле

$$\Delta f = 4A\Omega/\lambda L,$$

где A — площадь, охватываемая резонатором; L — длина резонатора; λ — длина волны; Ω , $^\circ/\text{с}$ — скорость вращения в плоскости резонатора. В работе использовался п.о.у. с зарощенной мезоструктурой (Buried-Heterostructure) на длину волны 1300 нм, а для ввода/вывода излучения из волокна в кристалл — скошенные полусферические линзы.

В работе [4] также проводились исследования характеристик полупроводникового кольцевого лазерного гироскопа, состоящего из п.о.у., кольца волокна с сохранением поляризации и направленного ответвителя для вывода излучения. Было показано, что разность частот между встречными волнами зависит не от полной длины, а только от площади, охватываемой резонатором. Кроме того, было показано, что с увеличением длины повышается точность измерения разности частот встречных волн, так как ширина линии биений обратно пропорциональна длине резонатора.

В данной работе описаны п.о.у., п.к.л. и датчик вращения на их основе и приведены результаты исследования их характеристик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Конструкция п.к.л., состоящего из п.о.у., кольцевого волоконного резонатора и оптического ответвителя для вывода излучения из резонатора, представлена на рис. 1.

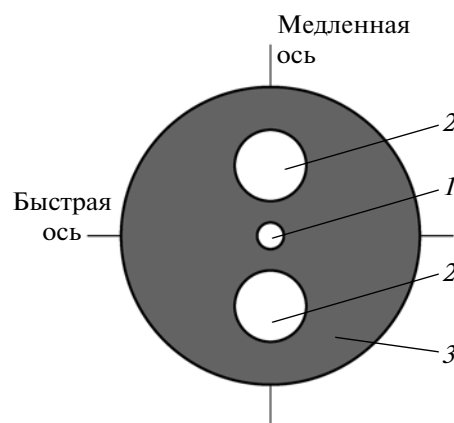


Рис. 3. Сечение волокна с сохранением поляризации. 1 — сердцевина; 2 — напряженные стержни; 3 — оболочка.

Активный элемент п.о.у. изготовлен на основе квантоворазмерных гетероструктур InGaAsP/InP методом МОС-гидридной эпитаксии. Для уменьшения обратных отражений передняя и задняя грани скошены под углом 7° к активному волноводу и на их поверхность нанесены двухслойные просветляющие покрытия (Al_2O_3 и ZrO_2), обеспечивающие коэффициент отражения $R < 0.05\%$.

Использовались эпитаксиальные структуры на длину волны 1300–1550 нм. С целью повышения эффективности инжекции носителей и предотвращения утечки носителей из активной области при повышенных температурах применены структуры с чередующимися квантово-размерными слоями [8, 9]. Длина активного элемента составляла 1200 мкм, ширина полоски 3 мкм (рис. 2).

Одной из основных проблем при создании п.о.у. является ввод лазерного излучения в одномодовый световод. Существуют разные способы согласования лазерного диода со световодом. Нами использовался способ согласования источника излучения с волокном с помощью микролинзы, сформированной на конце световода [10, 11].

Микролинзы могут изготавливаться методами плавления и шлифовки [10].

Метод плавления основан на вытягивании волокна под действием электрической дуги с последующим оплавлением конца волокна для формирования радиуса линзы. Такой способ не позволяет создавать линзы малого радиуса, поэтому максимальный коэффициент ввода составляет 40%.

Метод шлифовки состоит из двух этапов: шлифовка грубым порошком (6–9 мкм) для создания направляющих на конце волокна и полировка мелким порошком (1–3 мкм) на ворсистой ткани для создания скругления на конце волокна. Контроль качества изготовления проводится с помощью света красного лазера, выходящего из линзы и наблюдаемого на экране. Такой метод позволяет

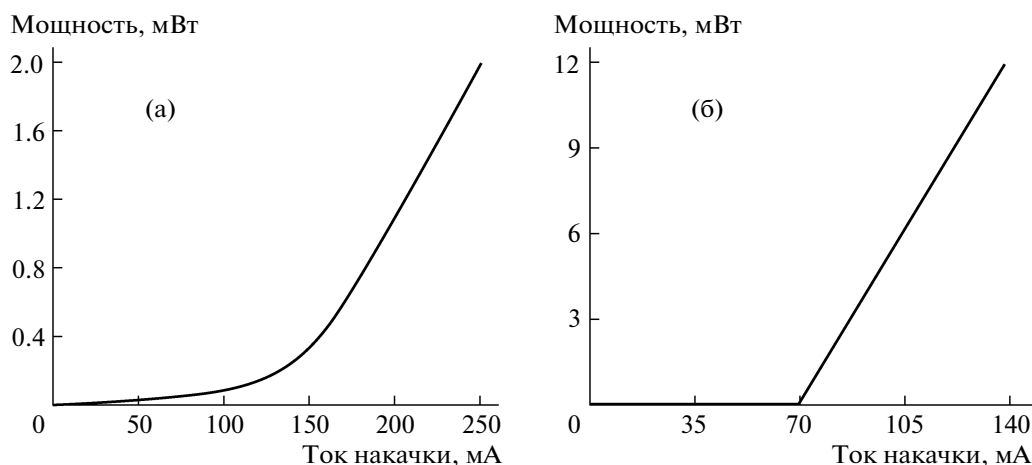


Рис. 4. Ватт-амперные характеристики: а – п.о.у.; б – п.к.л.

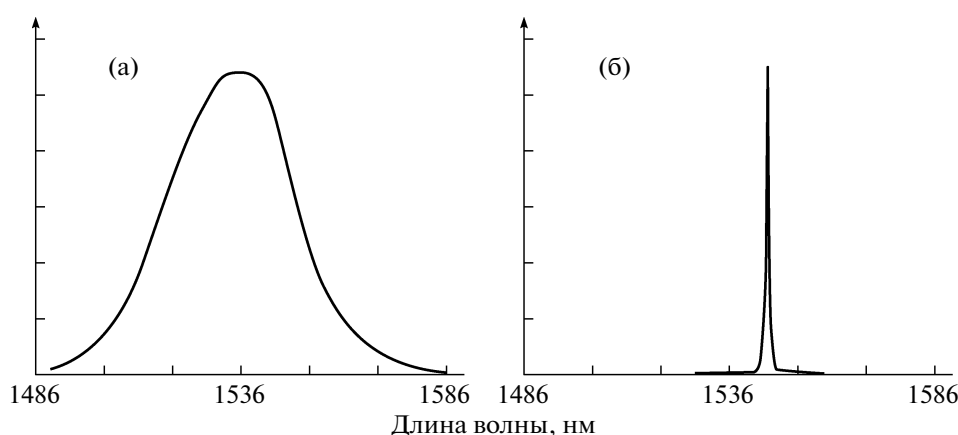


Рис. 5. Спектральные характеристики: а – п.о.у.; б – п.к.л.

получать цилиндрические линзы с радиусом ~ 5 мкм (при угле между направляющими 90°). Известно, что излучающая область торца кристалла п.о.у. геометрически представляет собой прямоугольник размером 3×0.1 мкм. Отсюда следует, что угол расходимости в одной плоскости (40° – 45°) значительно больше, чем в другой. Шлифованная цилиндрическая линза обеспечивает коэффициент ввода до 70%.

Волокно с микролинзой юстировалось на трехкоординатном столике и закреплялось припоем на микрорепке.

Волоконные выводы п.о.у. оконцовывались оптическими коннекторами FC/APC, которые обеспечивают стыковку модуля с остальными элементами оптической системы. При этом торцы коннектора отшлифованы под углом 7° , что снижает отражение от границы раздела волокно–воздух, подавляя, таким образом, нежелательную обратную оптическую связь.

Тип используемого в качестве резонатора волокна определяется областью его применения. Например, для гироскопов необходимо использовать волокно с сохранением поляризации, что обеспечивает наибольшую стабильность частоты генерации п.к.л. в состоянии покоя. В п.к.л. использовалось оптическое волокно типа Panda производства фирмы Corning (или Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН) [12] (поперечное сечение данного волокна показано на рис. 3). В этом волокне сохраняется линейная поляризация излучения, распространяющегося вдоль одной из его осей (быстрой или медленной) с экстинкцией более 40 дБ. Сохранение поляризации обусловлено наличием механических напряжений, вызванных специальными стержнями (позиция 2 на рис. 3). Эти напряжения приводят к возникновению двулучепреломления вдоль сердцевинны волокна.

Главным условием правильной юстировки и оконцовки является совмещение направления

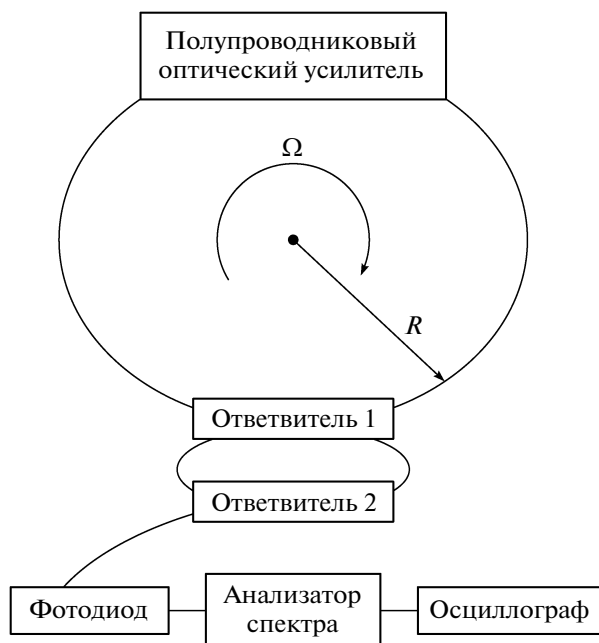


Рис. 6. Схема установки для измерения угла вращения.

линейной поляризации с медленной осью волокна Panda. При юстировке п.о.у. необходимо располагать волокно таким образом, чтобы плоскость p - n -перехода кристалла п.о.у. была совмещена с медленной осью волокна. При оконцовке коннекторами FC/APC необходимо совместить ключ коннектора с медленной осью волокна. Нами использован пассивный метод ориентации волокна [13], основанный на визуальной идентификации позиции напрягающих элементов в поперечном разрезе волокна.

Вывод излучения для регистрации фотоприемником осуществляется с помощью волоконного направленного ответвителя. Коэффициент ответвления выбирается в зависимости от конкретного применения лазера, например для гироскопа достаточно выводить 1–5% излучения. При использовании кольцевого лазера как источника излучения необходимо выводить большую долю света. Оптические волоконные ответвители являются волноводным эквивалентом обычных оптических полупрозрачных зеркал. Ответвители, чаще всего, изготавливаются либо полировкой сторон, либо свариванием световодов. Используемые в данной работе оптические ответвители были изготовлены в ЗАО “ИРЭ-Полус” из одномодового волокна с сохранением поляризации.

В качестве фотоприемника, на котором происходит интерференция и детектирование разностных частот оптического излучения, использовался PIN фотоприемник на основе четверных соединений InGaAs/InP. Фотодиод был состыкован с многомодовым оптическим волокном в керамиче-

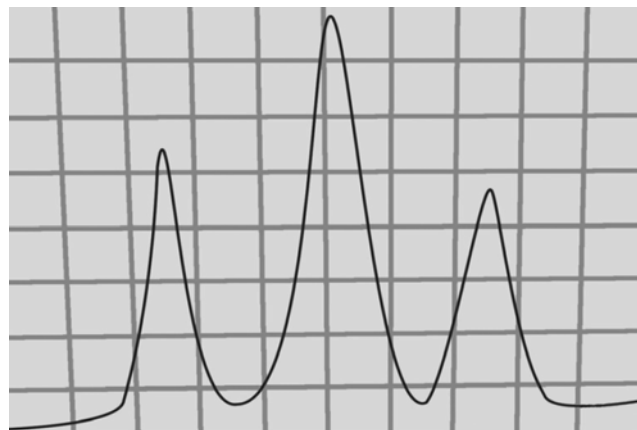


Рис. 7. Радиочастотный спектр биений встречных волн при скорости вращения $5^\circ/\text{с}$ (масштаб 7.2 Гц/деление).

ском корпусе miniDIL. Чувствительность фотодиода на длине волны 1.55 мкм составляла 0.9 А/Вт. Для съема сигнала фотодиод включался стандартным способом — с обратным смещением.

В процессе работы микросхема п.о.у., через которую пропускались токи 100–300 мА, сильно нагревалась, что приводило к снижению квантовой эффективности, разрушению волновода и изменению таких параметров, как положение центра линии усиления и коэффициент усиления. Поэтому кристалл полупроводника помещался на охлаждающий элемент Пельтье, который обеспечивал постоянство температуры кристалла с точностью 0.1°C . В качестве источника тока накачки и схемы стабилизации использовался драйвер производства QPhotonics.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ватт-амперные характеристики п.о.у. (на выходе одного из волоконных выводов п.о.у. до замыкания кольца) и п.к.л. (на выходе ответвителя) на длину волны 1540 нм показаны на рис. 4а и 4б соответственно. Мощность излучения п.о.у. в режиме суперлюминесценции составляла 1.9 мВт при токе накачки 250 мА. В режиме замыкания кольца пороговый ток генерации п.к.л. равен 70 мА, а мощность излучения при токе накачки 140 мА — 12 мВт. Это свидетельствует о том, что п.к.л. работает в режиме генерации.

Оптические спектры излучения п.о.у. и п.к.л., измеренные оптическим анализатором спектра ANDO до и после замыкания кольца, показаны на рис. 5. Для спектра суперлюминесцентного излучения п.о.у. (до замыкания кольца) полуширина линии излучения на длине волны 1536.4 нм составила 30 нм, в то время как для спектра генерации п.к.л. — менее 0.1 нм на длине волны 1540.2 нм.

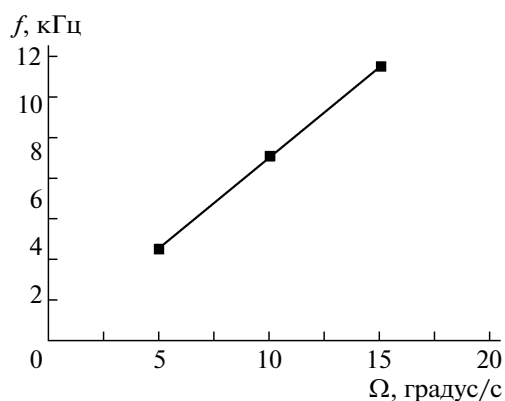


Рис. 8. Зависимость частоты биений от скорости вращения.

Так как длина резонатора п.к.л. обычно составляет ≥ 3.5 м, то частотный интервал между соседними модами будет ≤ 60 МГц. Ясно, что не существует такого оптического анализатора спектра, который мог бы разрешить моды с таким малым расстоянием между ними. Поэтому приведенные на рис. 5 оптические спектры являются, по сути, огибающими реального спектра п.к.л. Наблюдение продольных мод п.к.л. возможно с использованием методики спектрального анализа радиочастотного сигнала с фотоприемника.

На рис. 6 показана схема измерения отклика п.к.л. на вращение. Резонатор п.к.л. имел радиус 15 см и длину 800 м. Направленный ответвитель 1 использовался для вывода части излучения встречных волн из резонатора. Две встречные волны интерферировали в ответвителе 2 и поступали на фотоприемник. Сигнал с фотоприемника подавался на радиочастотный анализатор спектра GW-Instek 7830. Полупроводниковый кольцевой лазер был помещен на вращающийся стол производства французской компании Actidyn, обеспечивающий угловые скорости вращения в диапазоне $0-1000^\circ/\text{с}$. В проводимых исследованиях максимальная скорость вращения достигала $180^\circ/\text{с}$. Инфракрасная снималась через скользящие контакты, встроенные во вращающийся стол. К скользящим контактам был подключен радиочастотный анализатор спектра.

Как известно, кольцевой резонатор лазера чувствителен к невзаимности, поскольку вследствие эффекта Саньяка частоты встречных волн в отсутствие захвата расщепляются. Из-за наличия весьма значительного рассеяния в активном элементе п.к.л. следует ожидать большой области захвата частот встречных волн, что и было обнару-

жено (в нашем эксперименте она составила ориентировочно $1^\circ/\text{с}$).

На рис. 7 приведен радиочастотный спектр биений частот встречных волн при вращении п.к.л. вне области захвата со скоростью $\sim 5^\circ/\text{с}$. Спектр содержит три частотные компоненты: центральную и две боковые. Центральная компонента точно соответствует частоте межмодовых биений двух соседних оптических мод при неподвижном п.к.л. Однако при вращении п.к.л. каждая из этих двух оптических мод расщепляется на две оптические компоненты с расстоянием между ними, равным величине расщепления, вследствие эффекта Саньяка.

На основе радиочастотных спектров п.к.л., полученных при различных скоростях вращения, была построена зависимость саньяковской частоты биений от угловой скорости вращения п.к.л. (рис. 8). Зависимость имеет линейный характер, коэффициент пропорциональности (масштабный коэффициент) равен 900 кГц/градус/с. Было установлено, что чем больше длина резонатора, тем меньшую скорость вращения можно определить с помощью п.к.л. В частности, при длине резонатора 800 м удалось измерить скорость вращения $1^\circ/\text{с}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chow K.K., Shu C., Mak M.W.K., Tsang H.K. // IEEE Photon. Tech. Lett. 2002. V. 14. № 10. P. 1445.
2. Pleros N., Bintjas C., Kalyvas M. et al. // IEEE Photon. Tech. Lett. 2002. V. 14. № 5. P. 693.
3. Taguchi K., Fukushima K., Ishitani A., Ikeda M. // Optical and Quantum Electronics. 1999. V. 31. P. 1219.
4. Tamura S., Inagaki K., Noto H., Harayama T. // Proc. of SPIE. 2007. V. 6770. P. 14.
5. Sunada S., Tamura S., Inagaki K., Harayama T. // Physical Review A. 2008. V. 78. P. 053822.
6. Ishida T., Tamura S. et al. // Proc. of SPIE. 2008. V. 7004. P. 50.
7. Yao S.X., Maleki L. // Optics Letters. 1997. V. 22. № 24. P. 1867.
8. Гуляев Ю.В., Дураев В.П., Голикова Е.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 11. С. 680.
9. Morito K., Tanaka S., Tomabechi S., Kuramata A. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2005. V. 17. № 5. P. 974.
10. Ozyazici M.S. // Optica Applicata. 2004. V. XXXIV. № 2. P. 185.
11. Дураев В.П., Елусеев П.Г., Неделин Е.Т. и др. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 3. С. 633.
12. Noda J., Okamoto K., Sasaki Y. // Journal of Lightwave Technology. 1986. V. LT-4. № 8. P. 1071.
13. Maionchi D.O., Campos W., Frejlich J. // Opt. Eng. 2001. V. 40. P. 1260.