

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЛАЗЕР И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Полупроводниковый (п/п) кольцевой лазер (ПКЛ) относится к классу приборов, в которых световые волны распространяются навстречу друг другу в замкнутом оптическом контуре. ПКЛ – это сложная нелинейная автоколебательная система с распределенными параметрами, в которой может возникать большое число различных режимов генерации: режимов стоячей и бегущей волн, автомодуляционных режимов, режимов самопульсации и др. [1,2].

ПКЛ имеют много возможностей для применения в новых перспективных функциональных устройствах, таких как устройства сопряжения с внешними модуляторами и синхронизации цепей, различные логические устройства (переключатели), малогабаритные лазерные гироскопы и др. [3].

Явления самопульсации в ПКЛ исследовались в работе [4], где было показано, что ПКЛ могут использоваться как самоквантуемые оптические генераторы импульсов тока. Результаты исследования характеристик генерации и активной синхронизации мод в ПКЛ с внешним волоконным кольцевым резонатором приведены в работах [5,6]. В них ПКЛ являлся основой для создания высокостабильных генераторов СВЧ-колебаний. Стабильность их частоты может быть сравнима со стабильностью частоты лазерного излучения [7–9].

Применение п/п оптического усилителя (ПОУ) в ПКЛ было предложено в работе [10]. В ней впервые был изучен электрический отклик на оптический сигнал, проходящий по активному элементу ПОУ.

Эффект Саньяка (Sagnac [11]) при механическом вращении ПКЛ был исследован в [3]. Разность частот встречных волн измерялась по разнице напряжений (на активном элементе) для этих волн на выходе ПКЛ. Экспериментальные результаты, полученные при изменении в ПКЛ радиуса петли и числа витков волокна в ней, хорошо совпадают с

теоретическими, основанными на закономерностях эффекта Саньяка.

Эти результаты показывают, что на основе ПКЛ можно создать малогабаритный лазерный гироскоп – простой, надежный, дешевый (по сравнению с другими оптическими гироскопами) и компактный прибор, пригодный для массового производства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе описана конструкция и приведены экспериментальные результаты исследования основных характерис-

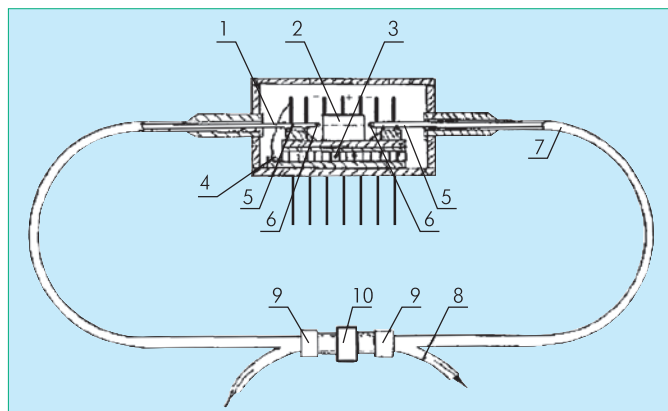


Рис.1 Полупроводниковый кольцевой лазер и элементы его конструкции

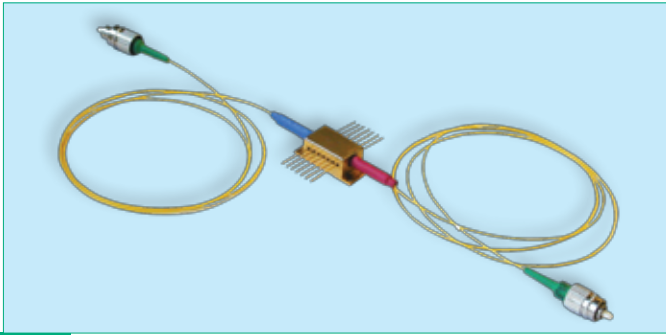


Рис.2 Полупроводниковый оптический усилитель

тик ПКЛ на базе ПОУ. ПКЛ был сформирован путем соединения в кольцо входного и выходного световодов ПОУ. При замыкании и размыкании кольца, а также при изменении его радиуса и степени поляризации света в кольцевом резонаторе лазера, были обнаружены изменения порогового тока, длины волны и спектра излучения, а также величины напряжения на активном элементе ПКЛ.

Были изготовлены ПКЛ с длинами волн 840, 1310 и 1550 нм и различными радиусами кольца: 10, 20 и 30 см, соответственно. ПКЛ с длиной волны 1550 нм был изготовлен на основе световода, сохраняющего поляризацию.

Конструкция ПКЛ представлена на рис.1. ПКЛ состоит из металлокерамического корпуса типа 14-pin DIL, или "Бабочка" (1), активного элемента (2), микроохлаждителя (3), термистора (4) и одномодового оптического волокна (5) (в том числе в варианте с сохранением поляризации), образующего кольцо с активным элементом ПКЛ. На концах световода (7) сформированы микролинзы (6), просветленные (с остаточным коэффициентом отражения <math><0,5\%</math>) для повышения коэффициента ввода лазерного излучения в световод.

Основа ПКЛ – усилитель ПОУ, представляющий собой суперлюминесцентный диод с просветленными торцами и расположением мезаполоски под углом к зеркальным граням активного элемента (рис.2).

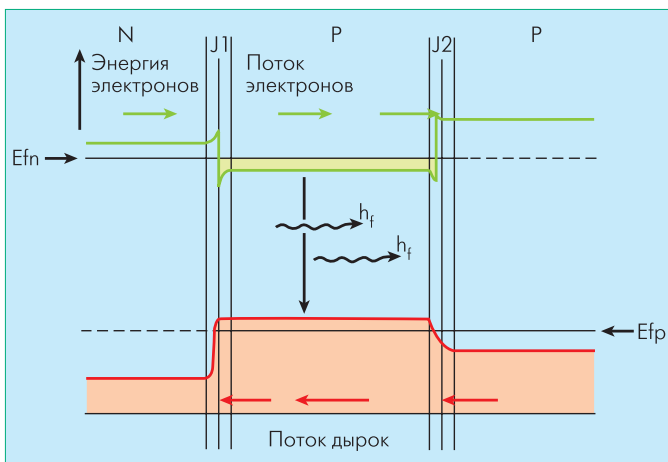


Рис.3 Энергетическая диаграмма активной области полупроводникового оптического усилителя при приложенном смещении

На рис.3 представлена энергетическая диаграмма активной области ПОУ при приложенном смещении. Активный элемент ПОУ изготовлен на основе квантоворазмерной наноструктуры на InGaAsP/InP с 5 квантовыми ямами (рис.4). Длина активного элемента равна 1200 мкм, а ширина мезаполоски – 3 мкм. Конструкция активного элемента ПКЛ представлена на рис.5. Мезаполоска была сформирована методом фотолитографии под углом 7° к просветленным граням активного элемента [10]. Температура активного элемента поддерживалась постоянной с точностью $0,1^\circ\text{C}$ с помощью микроохлаждителя.

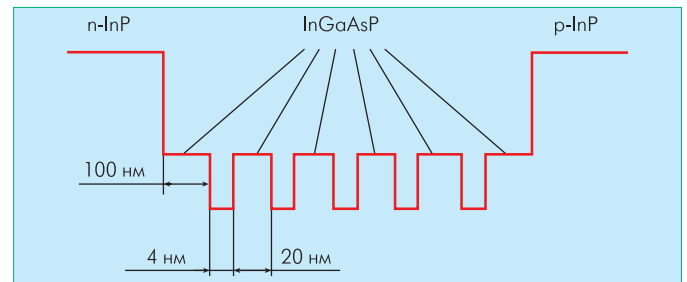


Рис.4 Конструкция активной области ПОУ

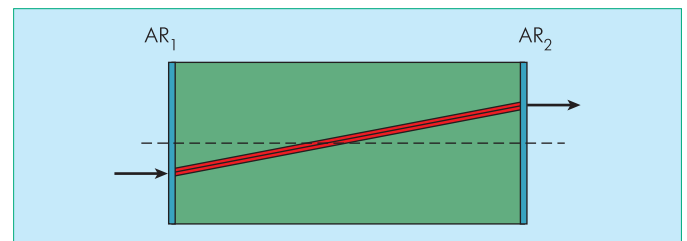


Рис.5 Активный элемент ПОУ

Для регистрации параметров оптического излучения в цепь обратной связи с помощью оптических разъемов (9) и соединительной розетки (10) включался X-образный оптический разветвитель (8).

Для исследования особенностей эффекта Саньяка использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис.6. Установка состоит из ПКЛ, генератора накачки, фотоприемника, широкополосного предусилителя, осциллографа и анализатора спектра. Вольт-амперные и ватт-амперные характеристики ПОУ и ПКЛ получены на серийной установке типа 9000 Laser diode test system, а спектры излучения – на спектроанализаторе ANDA AG-6317.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ватт-амперные характеристики излучения на длине волны 1550 нм до и после замыкания ПОУ в кольцо показаны на рис.7а и 7б, соответственно. Мощность излучения ПОУ составила 2 мВт при токе накачки 250 мА и имела характерную суперлюминесцентную зависимость мощности от тока накачки. Пороговый ток ПКЛ составил 70 мА, а мощность излучения – 12 мВт при токе накачки 140 мА.

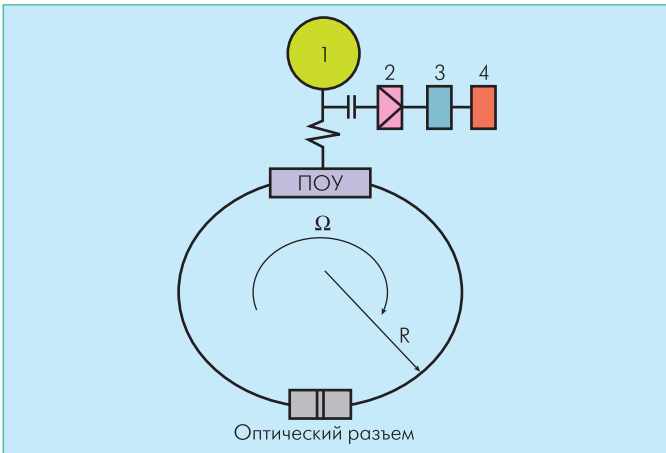


Рис.6 Экспериментальная установка для исследования ПКЛ: 1 – генератор накачки, 2 – широкополосный усилитель, 3 – радиочастотный спектр-анализатор, 4 – осциллограф

На рис.8 представлены вольт-амперные характеристики и их первые производные для ПКЛ в разомкнутом (1) и замкнутом в кольцо (2) вариантах. По первой производной этой характеристики был определен электрический отклик ("отрицательная фотоЭДС") на оптический сигнал генерации ПКЛ (7) при достижении порога генерации. Измеренная величина электрического отклика ("фотоЭДС") на пороге генерации составила 46 мВ.

Так как ПКЛ содержит р-п-переход, то входной оптический сигнал, введенный в активную область, может быть обнаружен как изменение напряжения на активном элементе. Изменение этого напряжения на пороге генерации ПКЛ вызвано фотоэлектрическим эффектом, появляющимся в связи с изменением квазиуровней Ферми, а значит и эффективной

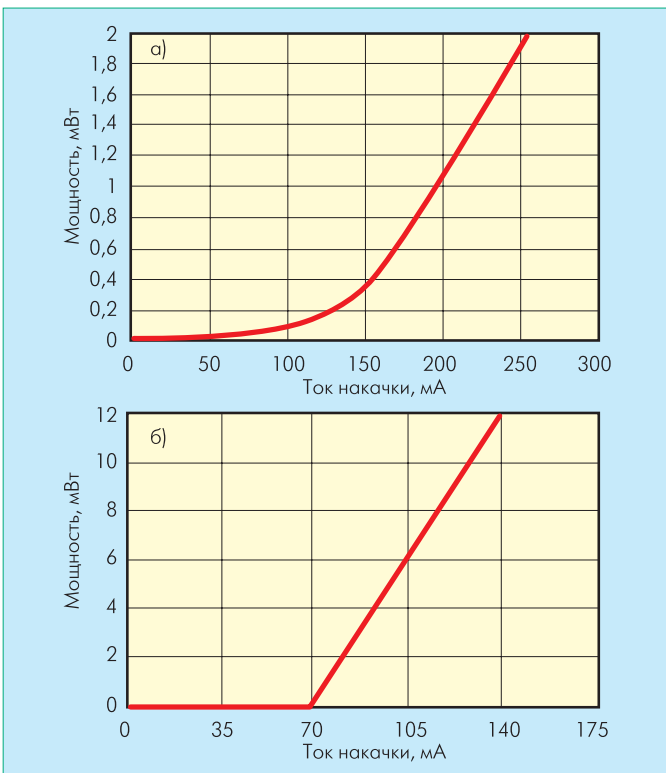


Рис.7 Ватт-амперные характеристики ПОУ(а) и ПКЛ(б)

ширины запрещенной зоны (что приводит к уменьшению эффективного времени жизни избыточных носителей) [10].

Оптические спектры излучения ПОУ и ПКЛ показаны на рис.9а и 9б, соответственно. Увеличение длины волны излучения до 1540,2 нм и резкое сужение спектра на пороге генерации свидетельствуют о наличии эффекта генерации. Измерения ширины линии генерации показывают, что ПКЛ работает в одночастотном режиме.

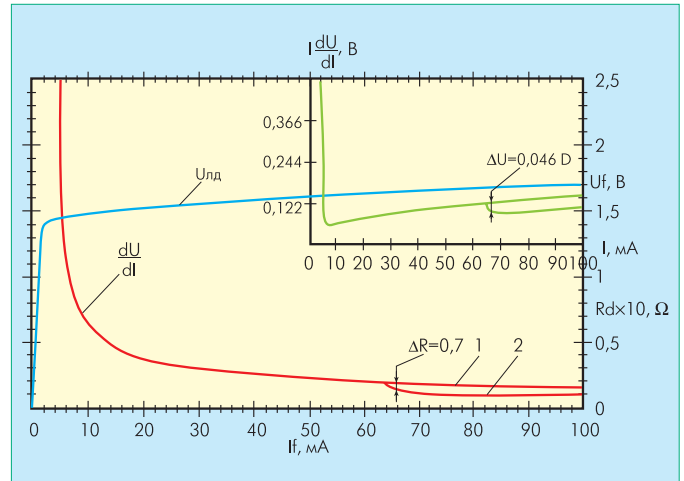


Рис.8 Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и первые производные ВАХ в разомкнутом ПОУ (1) и замкнутом ПКЛ(2) состоянии

При изменении поляризации света волоконным контроллером поляризации были обнаружены эффекты изменения порогового тока и длины волны излучения ПКЛ, а также изменение напряжения на активном элементе (отрицательной фотоЭДС). При этом пороговый ток уменьшался до 50 мА, а длина волны излучения увеличивалась до 1550 нм, что указывало на уменьшение концентрации неравновесных носителей заряда при переходе излучения из ТМ-поляризации в ТЕ-поляризацию. Уменьшение концентрации носителей в активной области приводит к уменьшению эффективной ширины запрещенной зоны ПКЛ и, соответственно, к снижению напряжения на р-п-переходе. Для данного типа лазеров усиление сигнала при ТМ-поляризации меньше, чем при ТЕ-поляризации.

Была предпринята попытка экспериментально обнаружить гироскопический эффект в ПКЛ. С этой целью ПКЛ был размещен на столе, вращающемся со скоростью 1–100 об/мин. Предполагаемое изменение частоты Саньяка Δf определялось по формуле [11]

$$\Delta f = 2R \Omega / \lambda,$$

где R – радиус кольца, Ω – угловая скорость вращения стола, λ – длина волны. Попытка, однако, не увенчалась успехом, что может быть связано с большой величиной захвата частот встречных волн в ПКЛ, а исследование автомодуляционного режима 1-го рода, ранее обнаруженного в кольцевых твердотельных лазерах (см. [2]), требует дополнительных экспериментов.

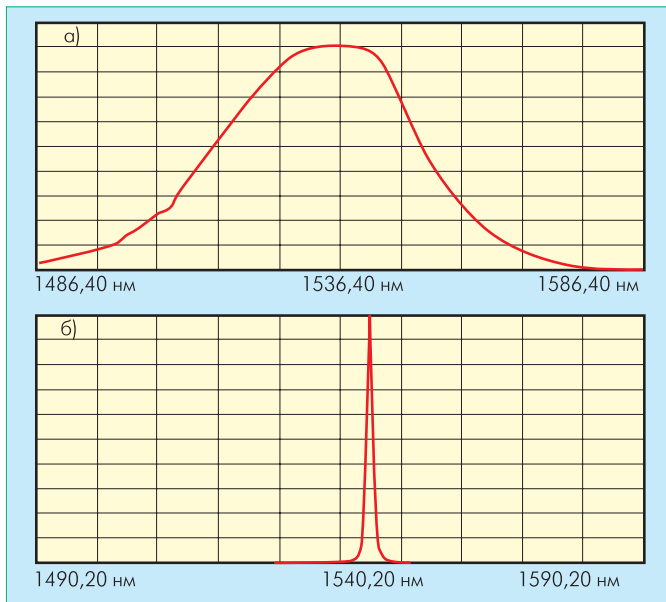


Рис.9 Оптический спектр излучения ПОУ (а) и ПКЛ (б)

Представлена конструкция лазера ПКЛ, основу которой составляет усилитель бегущей волны типа ПОУ. Исследованы его основные характеристики. Подтверждена возможность регистрации излучения в ПКЛ путем изменения падения напряжения на активном элементе. Показана эквивалентность сигналов, регистрируемых электрическим и оптическим способами. Получен одномодовый режим генерации ПКЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987.
2. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н. – Квантовая электроника, 1999, т.27, №2, с.98.
3. M.Ikeda, K.Taguchi. – CLEO/Europe, 98, p.p. CWE2, Sept. 1998.
4. K.Taguchi et al. – IEICE TRANS Electron., 1999, v.E82-C, №4.
5. Акапаров В.В., Дураев В.П. и др. Активная синхронизация мод в кольцевом лазере на основе полупроводникового оптического усилителя. – Фотон-Экспресс, 2005, №6 (46), с.23.
6. X.Steve Yao, L.Maleki. – Optics Letters, 1997, v.22, №24, p.1867.
7. Дураев В.П. Полупроводниковый оптический усилитель. – Lightwave, 2004, №2, с.45.
8. X. Steve Yao, L.Maleki. Dual microwave and optical oscillator. – Optics Letters, 1997, v.22, No.7.
9. D.Eliyahu, L.Maleki et al. Opto-Electronic Oscillator with Improved Phase Noise and Frequency Stability. – SPLE Photonics West 2003.
10. Ви Ван Лык, Дураев В.П. и др. Оптический усилительный модуль и его оптоэлектронные свойства. – Препринт ФИАН, Москва, 1989.
11. Саньяка опыт. – В кн.: Физическая энциклопедия. – М. БРЭ, 1994, т.4, с.417.