

Одночастотный лазер с подстройкой длины волны для накачки цезиевых стандартов частоты

О.В.Журавлева, А.В.Иванов, А.И.Леонович, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, Р.В.Чернов, В.В.Шишков, С.А.Плешанов

Представлены результаты исследований одночастотного перестраиваемого лазера, предназначенного для накачки цезиевого стандарта частоты. Экспериментально показано, что лазер генерирует на одной частоте, несмотря на то что в контур дифракционной брэгговской решетки, записанной в волоконном световоде, попадает несколько продольных мод внешнего резонатора. Изменение длины волны генерации возможно за счет регулирования тока накачки лазера, его температуры и температуры волоконной решетки. Ширина линии генерации не превышает 2 МГц при мощности излучения 10 мВт.

Ключевые слова: одночастотный перестраиваемый лазер, стандарты частоты, волоконная брэгговская дифракционная решетка.

1. Введение

За последние 10–15 лет в нашу жизнь буквально ворвалось техническое новшество, сразу получившее повсеместное распространение и самое широкое применение, причем не только для сложных научных и технологических целей, но и на бытовом уровне. Этим новшеством являются глобальные навигационные спутниковые системы: американская Глобальная Система Позиционирования (GPS) и российская Глобальная Навигационная Спутниковая Система (ГЛОНАСС). Глобальность систем обеспечивается функционированием на орбитах набора видимых из любой точки Земли спутников, непрерывно передающих высокоточные измерительные сигналы. Тем самым вокруг нашей планеты создано как бы информационное координатно-временное поле, из которого находящийся в нем пользователь с помощью специального приемника может черпать данные о своем положении в пространстве и во времени [1].

Базовым прибором, обеспечивающим высокоточное навигационное и временное обеспечение глобальных систем позиционирования, является цезиевый стандарт частоты на основе атомно-лучевой трубки (АЛТ). Серийно выпускаемые в настоящее время АЛТ с магнитной селекцией атомных состояний практически достигли предела совершенствования. Значительно улучшить характеристики АЛТ можно лишь с помощью принципиально новой схемы лазерного возбуждения и регистрации атомного пучка.

Использование оптических методов в АЛТ позволяет заменить магнитную селекцию атомов по состояниям более эффективными методами – оптической накачкой и

оптическим детектированием. В результате упрощаются геометрия и конструкция прибора, снижается его вес, существенно повышаются эффективность использования рабочего вещества и амплитуда выходного сигнала.

Наиболее перспективными для использования в АЛТ являются одночастотные полупроводниковые инжекционные лазеры, которые отличаются исключительно малыми габаритами и весом, простотой накачки, а также высокой эффективностью преобразования электрической энергии в когерентное излучение в диапазоне длин волн 850–895 нм, охватывающем область резонансных оптических переходов в атомах цезия.

Для получения одночастотного режима работы полупроводникового лазера предложено несколько вариантов его конструкции.

2. Конструкции одночастотных лазеров

2.1. Лазер с коротким резонатором

Принцип создания таких лазеров состоит в уменьшении длины резонатора, следствием чего является увеличение межмодового интервала

$$\delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m-1} = \frac{\lambda^2}{2n_{gr}L}, \quad (1)$$

где λ_m – длина волны излучения m -й моды; n_{gr} – групповой показатель преломления; L – длина резонатора.

С ростом межмодового интервала уменьшается коэффициент усиления для боковых мод и лазер генерирует одну продольную моду [2].

2.2. Лазеры с внешним резонатором

В работе [3] представлена конструкция лазерного диода с внешним резонатором, волноведущий слой которого выращивался из не поглощающего лазерное излучение материала. Лазерный диод изготавливался из InGaAsP/InP-гетероструктуры ($\lambda = 1.3$ мкм), а внешний резонатор – из специально выращенной GaAlAs/GaAs-гетероструктуры ($\lambda = 0.8 - 0.9$ мкм). Толщина волноведущего слоя была ~ 2 мкм, что позволяло автоматически

О.В.Журавлева, А.В.Иванов, А.И.Леонович, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, Р.В.Чернов, В.В.Шишков. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: dilas@mail.magelan.ru; webeks@mail.ru
С.А.Плешанов. ФГУП НПП «Исток» Россия, 141190 Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а

совмещать активную область лазерного диода и волноведущий слой внешнего резонатора при напайвании их на теплоотвод.

Длина резонатора лазера L_1 отличалась от длины внешнего резонатора L_2 . В случае, когда разность длин резонаторов $\Delta L = |L_1 - L_2|$ мала по сравнению с L_1 и L_2 , для такой системы характерно периодическое совпадение интерференционных максимумов каждого из резонаторов. В спектре связанных резонаторов возникают биения с интервалом

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2(L_1 n_{1gr} - L_2 n_{2gr})}, \quad (2)$$

где n_{1gr} и n_{2gr} – групповые показатели преломления лазера и внешнего резонатора.

При определенном выборе длин лазерного диода и внешнего резонатора обеспечивался одночастотный режим генерации за счет эффекта «нониуса».

2.3. C^3 -лазеры

В отличие от предыдущей схемы, где лазер и внешний резонатор изготовлены из разных материалов, C^3 -лазеры состоят из двух оптически связанных секций, выполненных из одного и того же материала, причем на каждую из секций может подаваться свой ток накачки.

Лазер с составным резонатором с оптической связью секций подробно исследован в работе [4].

2.4. Лазеры с периодической структурой (РОС- и РБО-лазеры)

Большое количество статей посвящено лазерным диодам с распределенной обратной связью (РОС) и распределенным брегговским отражением (РБО). Литературные ссылки можно взять, например, из работ [4, 5].

Резонаторы этих двух типов лазеров представляют собой модификацию плоского резонатора Фабри – Перо, к которому добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В РОС-лазерах периодическая структура совмещена с активной областью, а в РБО-лазерах она вынесена за пределы активной области. Периодическая структура РОС- и РБО-лазеров влияет на их характеристики излучения и по сравнению с лазерами с резонатором Фабри – Перо приводит к уменьшению зависимости длины волны излучения лазера от тока инжекции и температуры. Преимуществом РОС- и РБО-лазеров является возможность модуляции излучения практически со 100 %-ной глубиной без изменения спектрального состава.

Пространственной периодической модуляции могут быть подвергнуты любые параметры лазера, влияющие на распространение в нем электромагнитной волны: показатель преломления среды, коэффициент затухания или усиления, размеры сечения волновода и т.д.

Обзоры по одночастотным РОС- и РБО-лазерам даны в работах [6 – 8].

2.5. Лазер с внешней дифракционной решеткой

Излучение лазерного диода с помощью коллимирующей оптики направляется на дифракционную решетку, которая установлена под определенным углом, обеспечивающим обратную связь с лазером. На резонатор лазерного диода со стороны дифракционной решетки

наносит просветляющее (антиотражающее) покрытие, а на второе зеркало лазерного диода – отражающее либо защитное покрытие. Поворачивая решетку, можно плавно изменять длину волны излучения.

Компактный лазерный диод для спектроскопии и метрологии рассмотрен в работе [9], в [10] исследован лазер с вертикальной дифракционной решеткой на кремнии. Пределы непрерывной перестройки частоты инжекционных лазеров с внешним селективным резонатором подробно рассмотрены в работах [11, 12].

2.6. Лазер с дифракционной решеткой в волоконном световоде

Эта схема аналогична рассмотренным в п.2.5, отличие состоит лишь в том, что брегговская решетка сформирована в волоконном световоде [13, 14]. Динамика излучения лазера с сильной оптической связью изучена в работе [15].

2.7. Лазер с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью (VCSEL)

Лазеры данного типа работают в одномодовом режиме и в них используется резонатор исключительно малой длины (порядка 1 мкм), для которого расстояние между продольными модами больше ширины полосы частот спектра усиления. В [16] описан прибор, излучающий на длине волны около 850 нм и имеющий пороговый ток накачки 310 мкА. При токе накачки 1.6 мА выходная мощность излучения составила 1 мВт.

2.8. Другие конструкции одночастотных лазеров

В [17] разработаны и исследованы одночастотные одноконтурные лазеры с плоским резонатором Фабри – Перо, длиной волны излучения 780 – 850 нм и оптической мощностью до 20 мВт.

В [18] создан полупроводниковый лазер с внешним дисперсионным резонатором, в котором роль частотного дискриминатора играет петлевой волоконный отражатель с селективным сплавным одномодовым ответвителем.

Высококогерентный инжекционный лазер с оптической обратной связью через микрорезонатор с модами типа шепчущей галереи исследован в работе [19].

В работе [20] предложена схема внешнего резонатора с волноводно-решеточным зеркалом для широкоапертурного полупроводникового лазера.

Таким образом, одним из основных способов селекции типов колебаний лазерного диода является использование дифракционной решетки, изменяя положение которой можно изменять частоту генерации лазера. Недостатком этого метода является необходимость использования для перемещения решетки механической системы, надежность которой низка. Применение пьезокерамики для подстройки положения дифракционной решетки требует наличия высоковольтных источников питания. Использование перестраиваемых РОС- и РБО-лазеров ограничивается сложностью технологии их изготовления.

В настоящей работе предложена конструкция прибора на базе дифракционной решетки, сформированной в одномодовом волоконном световоде.

В данной схеме (рис. 1) дифракционная решетка, сформированная в световоде, устанавливается с противоположной выходному зеркалу стороны резонатора лазера.

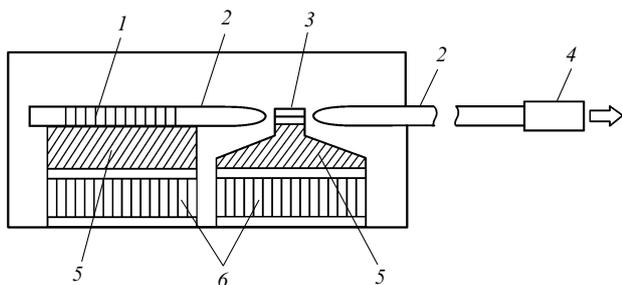


Рис.1. Схема конструкции активного элемента лазера с дифракционной решёткой и коллиматором:

1 – волоконная дифракционная решётка; 2 – волоконный световод; 3 – кристалл лазера; 4 – коллиматор (градиентная линза); 5 – медная подставка; 6 – микроохладитель.

Это позволяет увеличить коэффициент отражения дифракционной решетки до 100 %, уменьшить порог генерации лазера и тем самым снизить его энергопотребление. Отрезок световода с решеткой устанавливается на отдельный микроохладитель, вследствие чего температура решетки может изменяться независимо от температуры лазерного кристалла, что невозможно осуществить для РОС- и РБО-лазеров.

В работе использовались лазерные диоды, изготовленные на основе GaAlAs/GaAs-гетероструктур с одной квантовой ямой, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Ширина мезаполоски была равна 3 мкм, длина резонатора – 600 мкм. Лазерный диод напаивался на медный теплоотвод активной областью вверх. На грань кристалла, обращенную к решетке, наносилось просветляющее покрытие, на противоположную грань – защитное покрытие.

Коэффициент отражения волоконной брэгговской решетки составлял $\sim 90\%$. Эта решетка совместно с гранью лазера с защитным покрытием ($R \sim 30\%$) образует резонатор, который определяет основные параметры прибора: длину волны и ширину линии генерации, выходную мощность, ток накачки. Коллиматор, представляющий собой градиентную линзу, задает угловую расходимость и поперечное сечение пучка.

Подстройка длины волны излучения лазера осуществлялась за счет нагрева (или охлаждения) волоконной решетки микроохладителем. При этом выбранная рабочая температура решетки может поддерживаться с высокой точностью с помощью электронной системы стабилизации.

Для стабилизации параметров излучения лазерный диод также устанавливался на отдельный микроохладитель. Посредством изменения тока накачки лазерного диода, его температуры или температуры решетки происходит настройка длины волны излучения лазера на D₂-линию цезия. Фотография общего вида излучателя представлена на рис.2.

3. Результаты исследований параметров излучателя

На рис.3 показаны типичные ватт-амперные характеристики лазерного диода, резонатор которого образован скалыванием гетероструктуры по кристаллографическим плоскостям. Кривая 1 соответствует работе лазера без покрытий – коэффициенты отражения передней и задней граней резонатора равны и составляют $\sim 30\%$. Кривой 2 представлена ватт-амперная характеристика

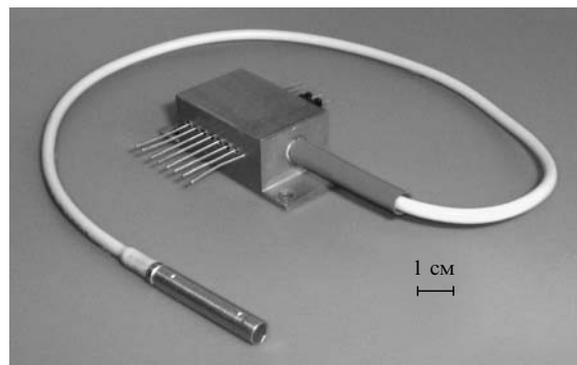


Рис.2. Общий вид излучателя.

лазера, изготовленного из той же гетероструктуры, на переднюю грань резонатора которого нанесено просветляющее покрытие ($R \rightarrow 0$), а на заднюю грань – защитное покрытие (коэффициент отражения этой грани остался равным $\sim 30\%$). Кривой 3 представлена ватт-амперная характеристика излучателя с волоконной решеткой, снятая на выходе коллиматора.

Просветление грани резонатора позволяет резко увеличить порог генерации лазера и перевести его в режим сверхлюминесценции. Это хорошо видно по спектрам излучения лазера с коэффициентами отражения граней $\sim 30\%$ (рис.4,а) и с коэффициентом отражения передней грани $R \rightarrow 0$ (рис.4,б). В последнем случае ширина спектра излучения по уровню 0.5 превышает 20 нм.

Максимум спектра электролюминесценции (рис.4,б) сдвинут относительно максимума генерации (рис.4,а) в коротковолновую область на 5.7 нм.

Наибольший интерес представляют спектральные характеристики излучателя. Дело в том, что в контур отражения волоконной дифракционной решетки (0.15 нм) попадают несколько мод внешнего резонатора, образованного внешней непросветленной гранью кристалла лазера и решеткой. Поскольку спектральная ширина коэффициента усиления много больше расстояния между модами внешнего резонатора, можно ожидать, что генерация будет проходить на нескольких продольных модах. Однако эксперимент показал, что это не так. На рис.5,а представлен спектр излучения лазера, записанный на оптическом анализаторе спектра AQ6317B (фирма Ando) при спектральном разрешении прибора 0.01 нм. Видно, что какие-либо паразитные оптические линии отсутст-

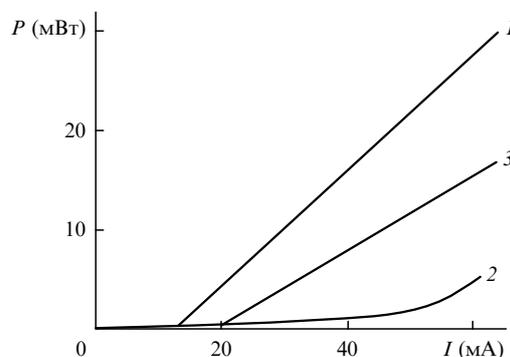


Рис.3. Ватт-амперные характеристики лазерного диода с коэффициентами отражения передней и задней граней $\sim 30\%$ (1), диода с коэффициентами отражения передней грани $R \rightarrow 0$ и задней грани $\sim 30\%$ (2), а также излучателя с волоконной решеткой (см. рис.1) на выходе коллиматора (3).

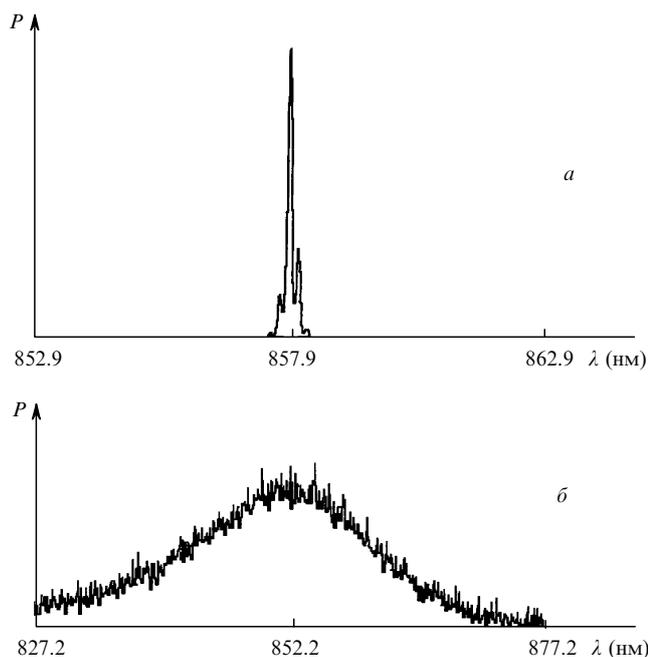


Рис.4. Спектр излучения лазерного диода с коэффициентами отражения граней $\sim 30\%$ (а) и спектр диода с коэффициентами отражения передней грани $R \rightarrow 0$ и задней грани $\sim 30\%$ (б).

вуют, а подавление боковых мод превышает 30 дБ; при этом продольные моды внешнего резонатора не разрешаются. Спектр на рис.5,б прописан на анализаторе Q8347 (фирма Advantest) с еще большим разрешением – 0.002 нм. Теперь моды внешнего резонатора хорошо разрешаются. Видно, что в окрестности генерирующей моды происходит почти полное подавление боковых мод внешнего резонатора, что, по-видимому, можно объяснить эффектом спектрального выгорания носителей, теория которого разработана в [5, 21, 22].

Эксперименты показали, что при вариации тока накачки длина волны излучения изменялась со скоростью $\Delta\lambda/\Delta I = 4.5 \times 10^{-2} \text{ \AA}/\text{мА}$. При измерении ширины линии излучения на сканирующем конфокальном интерферометре с областью свободной дисперсии 200 МГц было установлено, что ее ширина не превышает 2 МГц при мощности излучения 10 мВт.

При изменении температуры волоконной дифракционной решетки длина волны излучения лазера изменялась как $\Delta\lambda/\Delta T_{\text{grat}} = 4.8 \times 10^{-2} \text{ \AA}/\text{К}$. Угловая расходимость пучка на выходе излучателя была равна $\sim 10^{-3}$ рад.

Таким образом, дополнительная возможность подстройки длины волны излучения за счет изменения температуры решетки (а не только за счет изменения тока) позволяет проще настраиваться на D_2 -линию цезия в атомно-лучевой трубке.

Кроме того, разработанный излучатель может найти широкое применение в магнитометрах, спектроскопии высокого разрешения, в метрологии, а также в системах когерентной передачи и обработки информации.

Авторы выражают благодарность В.Л.Величанскому, В.В.Васильеву за изготовление конфокального сканирующего интерферометра, С.А.Васильеву за формирование дифракционных решеток в волоконном световоде и А.Т.Семенову, С.Д.Якубовичу за помощь при измерении спектральных характеристик излучателя.

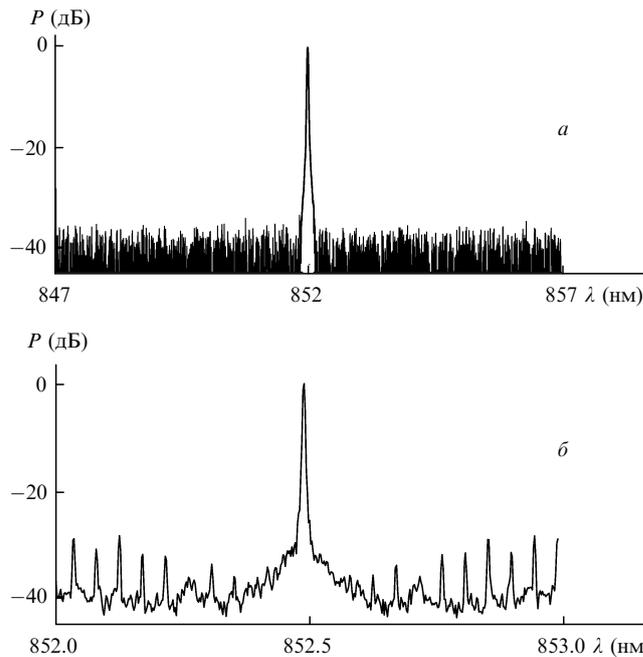


Рис.5. Спектры излучения прибора, записанные с помощью оптического анализатора спектра AQ6317B (фирма Ando) с разрешением 0.01 нм (а) и анализатора спектра Q8347 (фирма Advantest) с разрешением 0.002 нм (б).

1. Одуан К., Гино Б. *Измерение времени. Основы GPS* (М.: Техносфера, 2002)
2. Lee T.P., Burrus C.A., Copeland J.A., Dentai A.G., Marcuse D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **18**, 1101 (1982).
3. Гавриленко Н.Н., Колбасников А.Н., Курносов В.Д. и др. *Квантовая электроника*, **17**, 40 (1990).
4. *Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры*. Под ред. У. Тсанга (М.: Радио и связь, 1990).
5. Suemitsu Y., Adams A.R. *Handbook of Semiconductor Lasers and Photonic Integrated Circuits* (London: Chapman and Hall, 1994).
6. Kobayashi K., Mito I. *J. Lightwave Technol.*, **6**, 1623 (1988).
7. Jayaraman V., Chuang Z.M., Coldrew L.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 1824 (1993).
8. Suemitsu Y., Arai S. *IEEE J. Selected Top. Quantum Electron.*, **6**, 1436 (2000).
9. Vassiliev V.V., Zibrov S.A., Velichansky V.L. *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 013102 (2006).
10. Lohmann A., Syms R.A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 120 (2003).
11. Яровицкий А.В., Величанский В.Л. *Квантовая электроника*, **22**, 796 (1995).
12. Zang X.M., Liu A.Q., Lu C., Tang D.Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **41**, 187 (2005).
13. Premaratne M., Lowery A.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 716 (1998).
14. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 529 (2001).
15. Abdulrhmann S.G., Ahmed M., Okamoto T., Ishimori W., Yamada M. *IEEE J. Selected Top. in Quantum Electron.*, **9**, 1265 (2003).
16. Grabherr M., Jager R., Michalrik R., Weigl B., et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 1304 (1997).
17. Журавлева О.В., Киселева Н.Н., Курносов В.Д., Малашина О.Ю., Чельный А.А., Шишкин В.А. *Квантовая электроника*, **21**, 205 (1994).
18. Булушев А.Г., Гуров Ю.В., Дианов Е.М. и др. *Квантовая электроника*, **15**, 1083 (1988).
19. Васильев В.В., Величанский В.Л., Городецкий М.Л. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 675 (1996).
20. Звонков Б.Н., Зиновьев К.Е., Нургулиев Д.Х. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 35 (2001).
21. Yamada M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 1365 (1983).
22. Батрак Д.В., Богатов А.П., Каменец Ф.Ф. *Квантовая электроника*, **33** (11), 941 (2003).