ПОЛОСКОВЫЙ ДИОДНЫЙ ЛАЗЕР С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ АТОМОВ ЦЕЗИЯ

© 2004 А.К. Чернышов, С.П. Котова

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

В работе исследованы спектральные характеристики gain-guided AlGaAs/GaAs диодных лазеров с внешним резонатором, содержащим цилиндрическую линзу. При синхронном сканировании собственного и внешнего резонаторов получена перестройка частоты лазерного излучения в диапазоне 21ГГц при выходной оптической мощности 15мВт. Продемонстрирована возможность применения разработанной конфигурации лазерного излучателя для наблюдения гипертонкого расщепления D₂ линии атомов ¹³³Сs и внутридоплеровской спектроскопии насыщенного поглощения.

Введение

В исследованиях по квантовой оптике и фундаментальной метрологии важную роль играют атомы щелочных и редкоземельных металлов. Например, в парах щелочных металлов были открыты эффекты электро-магнитно наведенной прозрачности в виде квантового пленения или адиабатического переноса населенности [1], очень перспективные для создания оптико-электронных приборов нового поколения. В сравнении с другими элементами особенно важны атомы цезия, поскольку первичные микроволновые (9,1926317700 ГГц) стандарты частоты и времени работают на переходе между гипертонкими подуровнями основного состояния ¹³³Сs [2].

В качестве инструмента для приготовления атомов в необходимом квантовом состоянии широкое распространение получили дешевые, малогабаритные и перестраиваемые по частоте диодные лазеры (ДЛ) с внешним резонатором (BP) [3]. По способу ограничения оптического поля структуры диодных лазеров разделяются на два класса: gain-guided (GG) и index-guided (IG) [4]. IGлазеры обеспечивают более высокие излучательные характеристики по сравнению с GG приборами и для большинства приложений являются очевидным выбором. Поэтому в публикациях, посвященным диодным лазерам, преимущественно рассматриваются index-guided структуры. Однако в спектроскопии, где определяющим условием является

совпадение лазерной частоты с узким резонансом атомного перехода, использование GG излучателей по-прежнему достаточно распространено. Применение GG диодных лазеров во внешнерезонаторной конфигурации имеет ряд особенностей, правильный учет которых может представлять интерес для экспериментаторов, работающих в области диодно-лазерной спектроскопии высокого разрешения.

В работе продемонстрирована возможность применения ранее разработанной конфигурации ДЛВР [5] для наблюдения гипертонкого расщепления D₂ линии атомов цезия и внутридоплеровской спектроскопии насыщения. Особенностью рассматриваемой конфигурации ДЛВР является переключение за счет внешней оптической обратной связи в режим наклонного распространения оптического поля в активной области GG лазера. Это позволяет у диодного лазера в режиме одночастотной генерации повысить уровень доступной выходной мощности и диапазон непрерывной перестройки оптической частоты.

Экспериментальная установка

Как уже упоминалось, конфигурация диодного лазера с внешним резонатором аналогична описанной в работе [5]. В качестве излучателей применялись серийные приборы ИЛПН-108, представляющие собой gainguided AlGaAs/GaAs диодные лазеры (ширина полоскового контакта 10-15 мкм) с частич-



Рис. 1. Диодный лазер с внешним резонатором:

а) конфигурация внешнего резонатора; b) схема экспериментальной установки:
DL-диодный лазер; L1-коллимирующий микрообъектив (F=6mm; NA=0,4); L2-цилиндрическая линза (F=5cm);
DG-дифракционная решетка (1200 штр/mm); FP1-сканируемый конфокальный интерферометр (FSR=1,5 ГГц; F=35); FP2-эталон Фабри-Перо (FSR=50 ГГц, F=12); PD – фотодиоды; BS – делитель пучка; CCD – линейка фотодиодов; L3,L4 – сферические линзы

но просветленной передней гранью и напыленным высокоотражающим покрытием на задней грани. Схема экспериментальной установки показана на рис.1b. Излучатель DL работал в непрерывном режиме и при стабилизации температуры радиатора. С помощью микрообъектива L1 лазерное излучение коллимировалось в параллельный пучок и направлялось на дифракционную решетку DG, установленную в конфигурации Литтрова, на расстоянии 15 см от DL. Первый порядок дифракции от DG направлялся обратно в диодный лазер, формируя внешнюю селективную оптическую обратную связь. Нулевой порядок дифракции от решетки использовался в качестве выходного пучка. Во внешнем резонаторе размещалась полуволновая пластинка HP для повышения дифракционной эффективности DG и была установлена цилиндрическая линза L2, фокусирующая излучение в плоскости р-п перехода лазера. Пучок, отраженный от грани НР, использовался как вспомогательный выходной канал для мониторинга режима работы ДЛВР. Наблюдение спектральных характеристик выполнялось с помощью конфокального интерферометра FP1 и эталона FP2. Для контроля распределения интенсивности на грани лазера пучок от НР фокусировался линзой L4 на линейке фотоприемников ССД. Изменения в оптической мощности регистрировались фотодиодом PD1 по излучению от задней грани DL.

Результаты

Как отмечалось в работе [5], введение во внешний резонатор цилиндрической линзы позволяло увеличить уровень накачки, при котором сохраняется одночастотный режим генерации ДЛВР. Одновременно при этом происходило повышение устойчивости одночастотного режима к внешним возмущениям и как следствие расширение диапазона непрерывной перестройки оптической частоты. Улучшение спектральных характеристик ДЛВР в [5] связывалось с повышением эффективности ввода излучения от дифракционной решетки в активную область диодного лазера. Последнее происходило за счет компенсации внутреннего астигматизма ДЛ цилиндрической линзой. Однако более тщательные исследования показали, что устойчивая одночастотная генерация ДЛВР в близи порогового тока и при больших токах накачки наблюдалась для различных положений цилиндрической линзы L2. Это означает, что указанный механизм работает только для небольших превышений порогового тока.

Контроль формы распределения интенсивности на лазерной грани с помощью ССДкамеры позволил установить, что режиму одночастотной генерации вблизи порогового тока соответствует симметричный, не смещенный профиль рис.2а (низ, центр). При этом центр светового пятна излучения, возвращаемого обратно в лазер, совпадает с цен-



Рис. 2. Режимы работы ДЛВР:

 а) положение пятна обратной связи (вверху) и соответствующие профили распределения интенсивности на лазерной грани (внизу) для режимов симметричной и смещенной оптической обратной связи;
b) резонансы пропускания конфокального интерферометра FP1 в одночастотном режиме генерации

тром активной области лазера рис.2а (верх, центр). С другой стороны, при высоком уровне накачки режиму устойчивой одночастотной генерации соответствуют лево- или право-смещенные профили, представленные на рис.2а (низ). Подобные распределения интенсивности получаются за счет смещения возвращаемого светового пятна к краям полоскового контакта рис.2а (верх) путем изменения наклона внешней дифракционной решетки DG. Переход от симметричного распределения интенсивности, изображенного в центре рис.2а, к лево- или право-смещенным профилям, носил скачкообразный характер и наблюдался только при большом превышении порогового тока лазера. Смещенный профиль интенсивности на выходной грани в дальнейшем использовался как индикатор перехода диодного лазера в режим генерации с повышенной устойчивостью. Одночастотность генерации ДЛВР в режиме смещенной обратной связи достигалась главным образом за счет изменения осевого положения цилиндрической линзы L2, и лишь иногда требовалась незначительное изменение наклона дифракционной решетки DG. На рис.2b показаны резонансы сканирующего интерферометра FP1, полученные для лазера в одночастотном режиме с повышенной устойчивостью. Оценка ширины линии генерации ДЛВР, выполненная по резонансам FP1, дает величину DDnn, JJ40МГц, что определяется предельным разрешением интерферометра.

В [5] устойчивость одночастотной генерации ДЛВР оценивалась по отношению к

возмущениям собственного резонатора диодного лазера, вносимым через изменения тока накачки. В данной работе оценивается устойчивость к возмущениям внешнего резонатора. С этой целью длина ВР сканировалась с помощью пьезокерамической подвижки дифракционной решетки DG. На рис.3а представлены результаты, полученные в режиме смещенной оптической обратной связи. Кривая 1 на рис.За, соответствующая изменениям в оптической мощности, имеет протяженные ровные участки и участки с осцилляциями пилообразной формы. Подобные пилообразные осцилляции оптической мощности легко объяснимы в рамках модели лазера с составным резонатором [6] и связаны с переключением частоты генерации ДЛ по модам внешнего резонатора. Непрерывность перестройки оптической частоты на участках без осцилляций подтверждается плавной формой сигнала пропорционального пропусканию FP2 — кривая 2. Величина интервала непрерывной перестройки оптической частоты является количественной мерой устойчивости одночастотной генерации. Оценка этого интервала, выполненная по резонансам интерферометра FP1 (кривая 3), дает значение 4,5 ГГц. Для сравнения на рис.3b представлены сигналы, записанные при симметричном распределении интенсивности на грани ДЛ с внешним резонатором без цилиндрической линзы внутри. В этом случае область непрерывной перестройки оптической частоты не превышает 1,5 ГГц. Таким образом, для режима смещенной оптической обратной свя-



Рис. 3. Устойчивость одночастотной генерации ДЛВР к изменению длины внешнего резонатора:
а) режим повышенной устойчивости со смещенной обратной связью;
b) обычный режим;
1 - изменения в лазерной мощности;
2 - пропускание эталона FP2;
3 – резонансы пропускания FP1

зи наблюдалось приблизительно трехкратное повышение устойчивости одночастотной генерации к возмущениям в длине внешнего резонатора.

Описанная конфигурация ДЛВР была использована для наблюдения внутридоплеровских резонансов насыщенного поглощения D_2 линии (852,1нм) атомов цезия ¹³³Cs. Оптическая схема измерений и регистрируемые сигналы показаны на рис.4. Кривая 1 представляет сигнал пропорциональный величине поглощения, а кривая 2 показывает резонансы пропускания интерферометра FP1, обеспечивающие частотный масштаб. Измеренная полуширина доплеровского распределения на рис.4в составляет 460 МГц, что при-

мерно на 80 МГц больше ожидаемого расчетного значения и причина этого расхождения пока не ясна. Узкий внутридоплеровский резонанс в центре кривой 1 на рис.4b, соответствующий переходу с F = 4 на подуровень возбужденного состояния с F'=5, имеет естественную ширину около 10МГц. Следовательно, более точная оценка для лазерной ширины линии генерации будет тоже порядка ∆v₁≤10МГц. С другой стороны, из анализа схемы энергетических уровней на рис.4а следует, что интервал между резонансом на переходе F=4→F'=4 и перекрестным резонансом F=4 \rightarrow F'=3/5 составляет Δv =25МГц. Однако, не смотря на меньшую чем 25МГц ширину линии генерации ДЛВР, указанные ре-



а) схема измерений (слева) и диаграмма уровней энергии (справа);
b) внутридоплеровские резонансы насыщенного поглощения;
1 - сигнал поглощения, регистрируемый PD; 2 - резонансы пропускания FP1

зонансы на рис.4в не разрешались. Последнее обстоятельство связано с тем, что для надежного наблюдения двух близких резонансов необходимо добиться примерного равенства их амплитуд. В данном эксперименте это условие не выполнялось, что видно из сравнения амплитуд прямых и перекрестных резонансов, показанных на рис.4b.

Для спектроскопических применений лазеров важным является получение максимального интервала непрерывной перестройки оптической частоты. Например, когерентное пленение населенности может происходить в Лсистеме, где два подуровня основного состояния связаны с общим уровнем в возбужденном состоянии с помощью двух оптических полей, резонансно взаимодействующих с соответствующими переходами. Один из возможных подходов для наблюдения резонанса когерентного пленения населенности в парах цезия состоит в использовании двух лазеров с разницей между частотами равной гипертонкому расщеплению основного уровня (9,2ГГц). Другими словами желательно, чтобы ДЛВР обеспечивал непрерывную перестройку оптической частоты в пределах 10ГГц и более.

С целью получения максимальной спектральной перестройки в исследуемой конфигурации ДЛВР ток диодного лазера и длина внешнего резонатора сканировались одновременно. "Синхронные" перестроечные кривые для режима устойчивой одночастотной генерации представлены на рис.5. На рисунке кривая 1 пропорциональна поглощению в Cs ячейке, а кривая 2 показывает сигнал пропускания от FP1. Хорошо заметное нарушение эквидистантности частотных интервалов между резонансами FP1 связано с нелинейностями использованной пьезокерамической подвижки дифракционной решетки DG. Анализ рис.5 показывает, что ДЛВР обеспечивал 21 ГГц диапазон непрерывного сканирования оптической частоты. Следовательно, исследованные GG-лазеры легко могут быть настроены на любую компоненту гипертонкого расщепления основного состояния в D₂ линии ¹³³Cs. Отметим также, что при одночастотном режиме генерации излучатели обеспечивали в выходном пучке от решетки DG оптическую мощность на уровне 10-15 мВт. Это соответствует трех-пяти кратному увеличению



Рис. 5. Синхронная перестройка ДЛВР со смещенной оптической обратной связью: 1-сигнал пропорциональный поглощению в Cs ячеке; 2-резонансы пропускания FP1

по сравнению с традиционной конфигурацией ДЛВР без цилиндрической линзы.

Обсуждение и выводы

Возможное объяснение экспериментально наблюдаемого улучшения перестроечных спектральных характеристик ДЛВР может быть дано на основании учета взаимосвязи между комплексной диэлектрической проницаемостью активной среды диодного лазера, концентрацией электронов и оптическим полем. В работе [7] показано, что зависимость показателя преломления активной среды ДЛ от концентрации инжектированных электронов приводит к появлению механизма, связывающего моды собственного и внешнего резонаторов. Например, отстройка моды ВР в коротковолновую область будет снижать эффективный коэффициент отражения внешнего отражателя, что вызывает рост порогового оптического усиления. В свою очередь, повышение порогового усиления будет приводить к увеличению концентрации электронов и уменьшению показателя преломления лазерной среды. Уменьшение показателя преломления вызывает коротковолновое смещение моды собственного резонатора диодного лазера и компенсирует расстройку между внешним и собственным резонаторами. Частичное распространение лазерного поля в пассивных областях p-n перехода в режиме смещенной оптической обратной связи увеличивает эффективность воздействия описанного механизма слежения. Последнее, вероятно, связано с боковой неравномерностью в насыщении усиления на пороге генерации ДЛ. Эта неравномерность насыщения приводит к тому, что в центре под полосковым контактом концентрация электронов меняется гораздо слабее, чем в боковых крыльях распределения инжектированных носителей. Указанная особенность в насыщении усиления полоскового GG-лазера является причиной аномальной формы частотно-модуляционной характеристики, и подробно исследована в [8]. Приведенное описание дает только качественное пояснение особенностей ДЛВР со смещенной оптической обратной связью. Проработка модели до уровня, допускающего экспериментальную проверку теоретических выводов, является задачей последующих этапов.

Таким образом, использование полосковых диодных лазеров с внешним резонатором в конфигурации со смещенной обратной связью повышает устойчивость одночастотной генерации к акустическим и электронным шумам по сравнению с традиционной конфигурацией при аксиально-симметричной оптической обратной связи. Ранее такой подход использовался для улучшения, прежде всего пространственных характеристик излучения диодно-лазерных решеток и мощных диодных лазеров с широким (100-500 mmм) полосковым контактом без встроенного бокового ограничения поля. В данной работе эта методика распространена на излучатели со слабым боковым ограничением, формируемым распределением тока от узкого (10-15 µм) полоскового контакта. В результате для лазеров типа ИЛПН-108 в одночастотном режиме генерации увеличен уровень доступной оптической мощности до 15мВт и расширен интервал непрерывной перестройки частоты излучения до 21ГГц. Спектральная ширина линии оценивалась на уровне менее 10МГц. Продемонстрирована возможность использования разработанной конфигурации ДЛВР для внутридоплеровской спектроскопии насыщения D₂ линии цезия.

Авторы благодарят Васильева В.В. за ценные замечания и Чернышову Г.Н. за помощь в проведении экспериментов и подготовке публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Скалли М.О., Зубайри М.С.* Квантовая оптика. М.: Физматлит, 2003.
- Bauch A. Caesium atomic clocks: function, performance and applications // Meas. Sci. Technol. 2003. Vol. 14.
- Wieman C.E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics // Rev. Sci. Instrum. 1991.Vol. 62. № 1.
- Lang M. Correcting astigmatism in diode lasers // Laser & Optronics 1989. Vol.8, № 9.
- 5. Чернышов А.К., Чернышова Г.Н. Перестроечные спектральные характеристики астигматичных лазерных диодов с внешним резонатором // Известия Самарского нучного центра РАН. 2001. Т. 3. № 1.
- Lang R., Koboyashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. 16. № 3.
- Величанский В.Л., Зибров А.С. и др. Асимметрия некоторых характеристик перестраиваемых инжекционных лазеров с внешним резонатором // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 9.
- Kobayashi S., Yamamoto Y., et al. Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1982. Vol. 18. № 4.

GAIN-GUIDED DIODE LASER WITH AN EXTERNAL CAVIT FOR CAESIUM ATOMS SPECTROSCOPY

© 2004 A.K. Chernyshov, S.P. Kotova

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The spectral characteristics of gain-guided AlGaAs/GaAs diode lasers with an external cavity containing a cylindrical lens are explored in the article. The frequency tuning of a laser radiation with output power 15mW was obtained over 21GHz at synchronous scanning of a diode laser resonator and the external cavity. It is exhibited the application of a designed laser emitter configuration for the observation of a cesium D_2 line hyperfine splitting and the Doppler-free saturated absorption spectroscopy.