

Полупроводниковый лазер с субгерцевой спектральной шириной линии

А.Н.Матвеев, Н.Н.Колачевский, Я.Алнис, Т.В.Хэнш

Полупроводниковый лазер, излучающий на длине волны 972 нм, стабилизирован относительно опорного вибрационно- и термически-компенсированного резонатора Фабри–Перо с вертикальной осью. Точки опоры лежат в горизонтальной плоскости симметрии резонатора, при этом влияние вибраций в вертикальном направлении оказывается существенно подавленным. Данная конфигурация обеспечивает низкую чувствительность частоты излучения лазера к вертикальным ускорениям опорного резонатора. Чтобы снизить влияние температурных флуктуаций, резонатор изготовлен из стекла ULE (ultra-low-expansion) и поддерживается при температуре, при которой коэффициент расширения этого стекла близок к нулю. Спектральная ширина линии генерации составляет менее 0.5 Гц при дрейфе частоты ~ 0.1 Гц/с. Минимум аллановской девиации, достигаемый за 3 с, равен 2×10^{-15} . С использованием данной лазерной системы зарегистрированы спектры перехода $1S-2S$ в атоме водорода.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, стабилизация частоты, субгерцевая спектральная ширина.

1. Введение

Для создания оптических атомных часов и решения ряда задач спектроскопии сверхвысокого разрешения требуются лазерные источники с узкой спектральной линией. Чтобы обеспечить высокий уровень стабильности и точности оптических часов (лучше 10^{15}), лазерный источник должен иметь спектральную ширину линии ~ 1 Гц. В течение последнего десятилетия был достигнут существенный прогресс в области стабилизации частоты лазеров. Все большее внимание уделяется стабилизации частоты излучения полупроводниковых лазеров, обладающих простой конструкцией, широким диапазоном перестройки длины волны и невысокой стоимостью. Однако полупроводниковые лазеры имеют избыточные шумовые характеристики, обусловленные амплитудно-фазовой связью, что осложняет задачу их стабилизации [1]. Так, спектральная ширина линии уединенного полупроводникового лазера может достигать сотен мегагерц [2]. Сужение спектральной линии генерации полупроводникового лазера обычно осуществляется в два этапа: сначала с помощью оптической обратной связи от внешнего дисперсионного резонатора, что позволяет достичь ширины линий 1 кГц – 1 МГц [3–5], а затем с помощью электронной петли обратной связи по пику пропускания

внешнего стабильного резонатора [6–8]. Несмотря на то что возможность электронной стабилизации частоты лазера относительно пика пропускания внешнего опорного резонатора с субгерцевой взаимной нестабильностью была продемонстрирована еще в 1988 г. [9] (при корректной работе петли обратной связи частота лазерной генерации практически совпадает с частотой моды резонатора), создание резонаторов, позволяющих достичь субгерцевого уровня стабильности, заняло еще около 10 лет. До недавнего времени такие системы были чрезвычайно громоздкими и использовались в ограниченном числе лазерных экспериментов, выполняемых в ведущих метрологических лабораториях мира.

Настоящая работа посвящена созданию компактного опорного резонатора, обеспечивающего субгерцевую спектральную ширину линии генерации полупроводникового лазера с длиной волны 972 нм. Четвертая гармоника излучения этого лазера позволяет возбуждать двухфотонный переход $1S-2S$ в атоме водорода с естественной шириной 1.3 Гц. Лазерная система также может быть использована в ряде других планируемых экспериментов, таких как исследование спектров перехода $1S-2S$ в атомах трития и антиводорода [10]. Для обеспечения узкой спектральной линии генерации расстояние между зеркалами в опорном резонаторе Фабри–Перо должно быть чрезвычайно стабильно, что накладывает жесткие ограничения на уровни вибраций, температурных флуктуаций и флуктуаций показателя преломления среды между зеркалами. Так, для обеспечения ширины линии 1 Гц у лазера, стабилизированного относительно опорного резонатора длиной 10 см, флуктуации оптической длины резонатора не должны превышать 10^{-15} м.

Впервые стабилизация частоты перестраиваемого лазера на субгерцевом уровне была экспериментально продемонстрирована в 1998 г. [11]. Лазер на красителе стабилизировался относительно опорного резонатора с горизонтальной осью, при этом для вибрационной изоля-

А.Н.Матвеев, Н.Н.Колачевский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: art_matan@mail.ru, kolachbox@mail.ru

J.Alnis. Max Planck Institute of Quantum Optics, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany; e-mail: Janis.Alnis@mpq.mpg.de

T.W.Hänsch. Max Planck Institute of Quantum Optics, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany; Ludwig-Maximilians University, Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539 Munich; e-mail: t.w.haensch@mpq.mpg.de

Поступила в редакцию 29 января 2008 г., после доработки – 22 апреля 2008 г.

ции оптический стол был подвешен на резиновых лентах к потолку лаборатории. Такая конструкция обеспечивает низкую собственную частоту системы и подавление неблагоприятных вибраций, однако большая масса и габариты исключают возможность ее транспортировки.

Альтернативным подходом является использование нового принципа монтажа опорного резонатора, что позволяет снизить его общую массу до 10–20 кг. В новой конфигурации точки опоры резонатора Фабри–Перо с вертикальной осью лежат в его горизонтальной плоскости симметрии. Вертикальное ускорение приводит к почти симметричному растяжению и сжатию верхней и нижней половинок резонатора, так что за счет взаимной компенсации растяжения и сжатия расстояние между зеркалами остается практически неизменным [12]. При этом резонатор должен устанавливаться на жестких опорах, фиксирующих его положение относительно платформы. Это необходимо для подавления эффекта Доплера, присущего системам, в которых резонатор подвешивается на нитях или пружинах. В качестве платформы используется коммерчески доступная система активного подавления вибраций, предлагаемая, например, фирмой Nanosonics Inc. Механическая связь резонатора с платформой в этом случае оказывается достаточно жесткой, однако высокая стабильность самого резонатора и система активного подавления вибраций обеспечивают достаточное подавление как вертикальных, так и горизонтальных ускорений, что требуется для достижения субгерцевых спектральных ширин линий. Высокая степень стабилизации резонаторов была достигнута также другими научными группами, которые использовали резонаторы с горизонтальной осью, точки опоры которых лежат в горизонтальной плоскости симметрии [13].

Для устранения флуктуаций показателя преломления резонатор необходимо размещать в вакуумной камере, при этом флуктуации давления не должны превышать 10^{-8} мбар. Это требование легко выполнить, если разместить резонатор в вакуумной камере, откачиваемой магниторазрядным насосом. Однако существенной проблемой при создании высокостабильных резонаторов являются флуктуации их длины l , вызываемые колебаниями температуры. Наилучшим материалом, используемым сегодня для изготовления как корпуса, так и зеркал опорных резонаторов, работающих при температуре, близкой к комнатной, является стекло ULE (ultra-low-expansion), производимое фирмой Corning [14]. Особенность этого материала – наличие так называемой нулевой точки, в которой коэффициент теплового расширения материала равен нулю. Отстройка $\Delta\nu$ частоты резонатора ν вблизи нулевой точки квадратично зависит от температуры:

$$\Delta\nu/\nu = \Delta l/l \approx 10^{-9}(T - T_{cr})^2, \quad (1)$$

где T – температура резонатора, а T_{cr} – температура в нулевой точке.

Для того чтобы уменьшить влияние флуктуаций температуры, желательно стабилизировать температуру резонатора Фабри–Перо около T_{cr} . В этом случае нестабильность длины будет связана с медленной рекристаллизацией стекла ULE (так, для резонатора, использовавшегося в эксперименте [15], этот дрейф составлял ~ 65 мГц/с). Как показывают измерения, температура T_{cr} для нашего образца стекла ULE равна $\sim 10^\circ\text{C}$, что заметно

ниже комнатной температуры. Охлаждение вакуумной камеры снаружи является сложной технической задачей из-за конденсации влаги на входных окнах, поэтому большинство существующих резонаторов работают при температуре, существенно превышающей T_{cr} .

В данной работе мы использовали две системы для стабилизации полупроводниковых лазеров с длиной волны $\lambda = 972$ нм. В обеих системах применялись идентичные резонаторы Фабри–Перо ФП1 и ФП2, однако системы температурной стабилизации существенно различались. Резонатор ФП1 был снабжен системой нагревания, обеспечивающей стабилизацию температуры вблизи 31°C , что существенно выше T_{cr} . Система температурной стабилизации с нагреванием, которая будет описана ниже, хорошо зарекомендовала себя в предыдущих экспериментах [8, 15]. Другая система, разработанная впервые, позволяла охлаждать резонатор ФП2 до температуры T_{cr} с помощью элементов Пельтье, размещенных в вакууме. В работе описывается конструкция приборов, приводятся характеристики стабилизированных полупроводниковых лазеров, а также результаты исследования спектра перехода $1S-2S$ в атоме водорода.

2. Экспериментальная установка

Схема вертикального резонатора, используемого в данной работе (производитель – фирма ATF Inc. [16]), представлена на рис. 1. К телу резонатора длиной 77.5 мм прикреплены два зеркала на оптическом контакте, подложки которых также изготовлены из стекла ULE. Для тела резонатора выбрана форма «мяча для регби» как приближение к оптимальной с точки зрения минимального возбуждения колебательных мод сферической форме. Зеркала имеют коэффициент отражения $\sim 99.999\%$

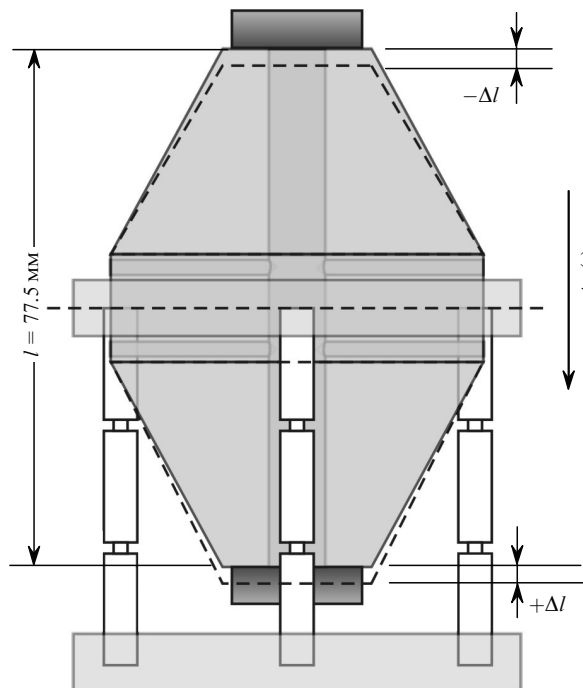


Рис.1. Схема резонатора Фабри–Перо с вертикальной осью, закрепленного в плоскости горизонтальной симметрии. При вертикальном ускорении g сжатие верхней половины резонатора компенсируется удлинением его нижней половины, и полная длина резонатора остается постоянной.

на $\lambda = 972$ нм; многослойная отражающая структура содержит 38 слоев SiO_2 и Ta_2O_5 с общей толщиной ~ 5 мкм. Одно зеркало является плоским, а другое имеет радиус кривизны 0.5 м. Резонатор крепится на трех тефлоновых опорах, вставленных в кольцо, изготовленное из церодура. Кольцо подавляет влияние температуры на расстояние между опорами и препятствует возникновению радиальных сил со стороны опор на тело резонатора. В опорах были сделаны кольцевые проточки, чтобы уменьшить жесткость в горизонтальном направлении и снизить влияние горизонтальных вибраций.

2.1. Система температурной стабилизации резонатора ФП1

Система температурной стабилизации резонатора ФП1 показана на рис.2. Резонатор помещен внутрь цилиндрической вакуумной камеры, изготовленной из дюралюминия. За счет высокой теплопроводности алюминиевая камера обеспечивает более равномерное распределение температуры, чем камеры из нержавеющей стали. Дюралюминий подвергнут химической обработке (пассивированию), что позволяет создать в камере вакуум 10^{-7} мбар с помощью ион-геттерного насоса производительностью 3 л/с. Все вакуумные уплотнения изготовлены из индиевой проволоки.

Для стабилизации температуры собственно вакуумной камеры используются нагреватель и электронная пропорционально-интегрирующая (ПИ) схема обратной связи. Система стабилизирует температуру (температура стабилизации 30.5°C) лишь в точке нахождения температурного сенсора, не отслеживая флуктуации и градиенты температуры в других точках поверхности. Что-

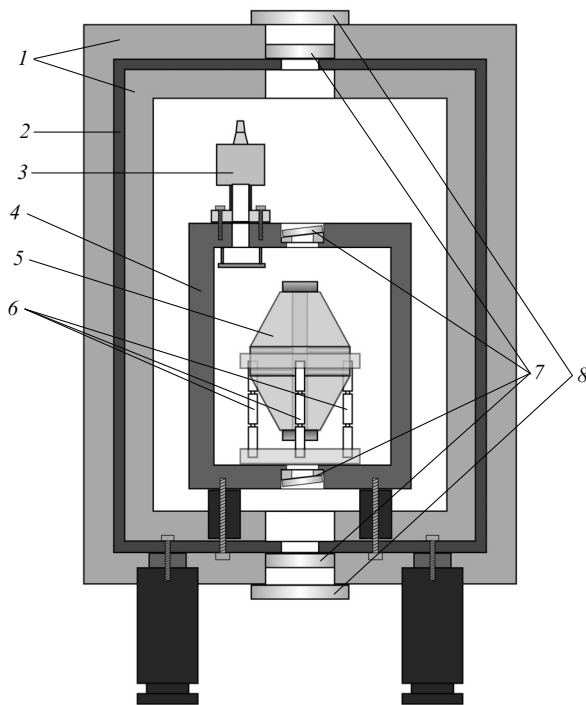


Рис.2. Система температурной стабилизации резонатора ФП1: 1 – теплоизоляция из пенополиуретана; 2 – дюралюминиевый контейнер (первая ступень температурной стабилизации); 3 – ион-геттерный насос производительностью 3 л/с; 4 – дюралюминиевая вакуумная камера; 5 – резонатор с вертикальной осью; 6 – тефлоновые стержни; 7 – окна вакуумной камеры и первой ступени стабилизации; 8 – интерференционные фильтры.

бы снизить влияние градиентов температуры и подавить тепловой обмен с окружающей средой используется вторая, внешняя шестиканальная система стабилизации. Вакуумная камера помещается в контейнер из теплопроводящих дюралюминиевых пластин, каждая из которых независимо нагревается и стабилизируется с помощью быстрого релейного двухпозиционного контроллера, обеспечивающего стабильность температуры в точке расположения сенсора не хуже 100 мкК. Вторая ступень создает равномерный тепловой фон с температурой 30°C вокруг вакуумной камеры с минимальными градиентами и дрейфами температуры. Как вакуумная камера, так и дюралюминиевый контейнер покрыты слоем теплоизоляции, служащей для пассивного подавления колебаний температуры. Для обеспечения равномерного распределения тепловой мощности все нагревательные элементы представляли собой тонкую нагревательную пленку. Сенсоры AD590 (Analog Devices, США), используемые в системах обратной связи температурного контроля, были предварительно откалиброваны. Постоянная времени теплового обмена резонатора составляет ~ 3 ч.

Система температурной стабилизации обеспечивает стабильность температуры внешней поверхности вакуумной камеры ~ 1 мК за десять часов и ~ 5 мК за одну неделю, что было измерено с помощью независимого сенсора. Остаточные флуктуации температуры обусловлены колебаниями комнатной температуры и влиянием этих флуктуаций на сами температурные контроллеры. Так, температура блока ПИ регулятора также была стабилизирована с точностью 0.1 К, чтобы предотвратить дрейф, связанный с влиянием температуры на емкость конденсаторов (десять фольговых конденсаторов емкостью 22 мкФ), сопротивления резисторов и напряжения смещения полупроводниковых элементов.

2.2. Система температурной стабилизации резонатора ФП2

Для того чтобы эффективно охлаждать резонатор, поддерживая при этом максимально стабильную температуру, использовалась новая конструкция, представленная на рис.3. Опорный резонатор находится внутри двух concentрических дюралюминиевых стаканов с толщи-

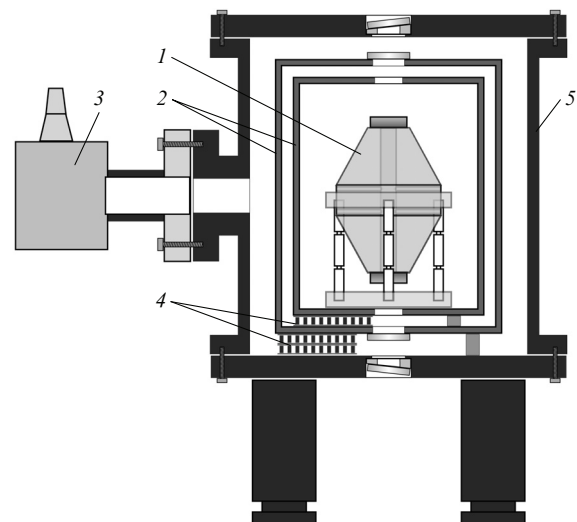


Рис.3. Система температурной стабилизации резонатора ФП2: 1 – резонатор с вертикальной осью; 2 – дюралюминиевые стаканы; 3 – ион-геттерный насос производительностью 20 л/с; 4 – элементы Пельтье; 5 – вакуумная камера.

ной стенок 5 мм, каждый из которых охлаждается с помощью элемента Пельтье. Стаканы помещены в вакуумную камеру из нержавеющей стали, которая одновременно служит и температурным буфером, охлаждающим внешнюю (нагревающуюся) сторону элемента Пельтье. Использование двух стаканов позволило снизить неоднородность теплового фона и добиться хорошей тепловой изоляции резонатора. Внешний стакан охлаждается с помощью элемента Пельтье размером 50×50 мм до температуры $T_{cr} = 12.5^\circ\text{C}$, являющейся температурой нулевой точки для этого резонатора (см. далее). Температура внутреннего стакана стабилизируется с помощью второго элемента Пельтье размером 20×20 мм также вблизи T_{cr} . Температурные сенсоры, включенные в соответствующие цепи обратной связи, приклеены к поверхности стаканов в непосредственной близости от соответствующих элементов Пельтье. Дополнительный температурный сенсор для независимого контроля температуры приклеен к поверхности внутреннего стакана на значительном расстоянии от элементов Пельтье. Системы обратной связи для стабилизации температуры обеих оболочек являются обычными ПИ контроллерами, также используемыми для стабилизации температуры полупроводниковых лазеров.

Температура стенок самой вакуумной камеры не контролировалась и достигала 34°C . Для поддержания вакуума используется ион-геттерный насос производительностью 20 л/с. Измерения колебаний температуры внутренней оболочки с помощью независимого сенсора показали, что характерная нестабильность температуры составляет ~ 15 мК за несколько дней, что примерно в

три раза хуже, чем стабильность, достигнутая для резонатора ФП. Тем не менее долговременная стабильность частоты резонатора улучшилась примерно на два порядка за счет приближения к нулевой точке стекла ULE (см. формулу (1)). В первые несколько недель после откачки камеры наблюдалось несколько резких скачков температуры, составлявших единицы милликельвинов и связанных, скорее всего, с переходными процессами в элементах Пельтье.

2.3. Стабилизация частоты полупроводникового лазера относительно частоты резонатора Фабри – Перо

Обе вакуумные камеры с резонаторами и системами температурной стабилизации были установлены на две платформы размерами 40×40 см, предназначенные для активного подавления вибраций. Благодаря использованию концепции вертикальных резонаторов габариты и вес конструкций удалось существенно уменьшить по сравнению с системой, применяемой ранее при исследовании спектра водорода [15]. Резонаторы применялись для стабилизации двух практически идентичных диодных лазеров с $\lambda = 972$ нм с внешними резонаторами, собранными по схеме Литтрова.

Оптическая схема, использованная для стабилизации лазеров, показана на рис.4. Излучение лазера поступает к платформе с опорным резонатором по одномодовому волокну. Для компенсации шумов фазы и интенсивности, вносимых волокном, применяется стандартная система активной компенсации с помощью акустооптического модулятора [17]. Гауссова мода на выходе волокна согласуется с модой резонатора с помощью линзы ($f =$

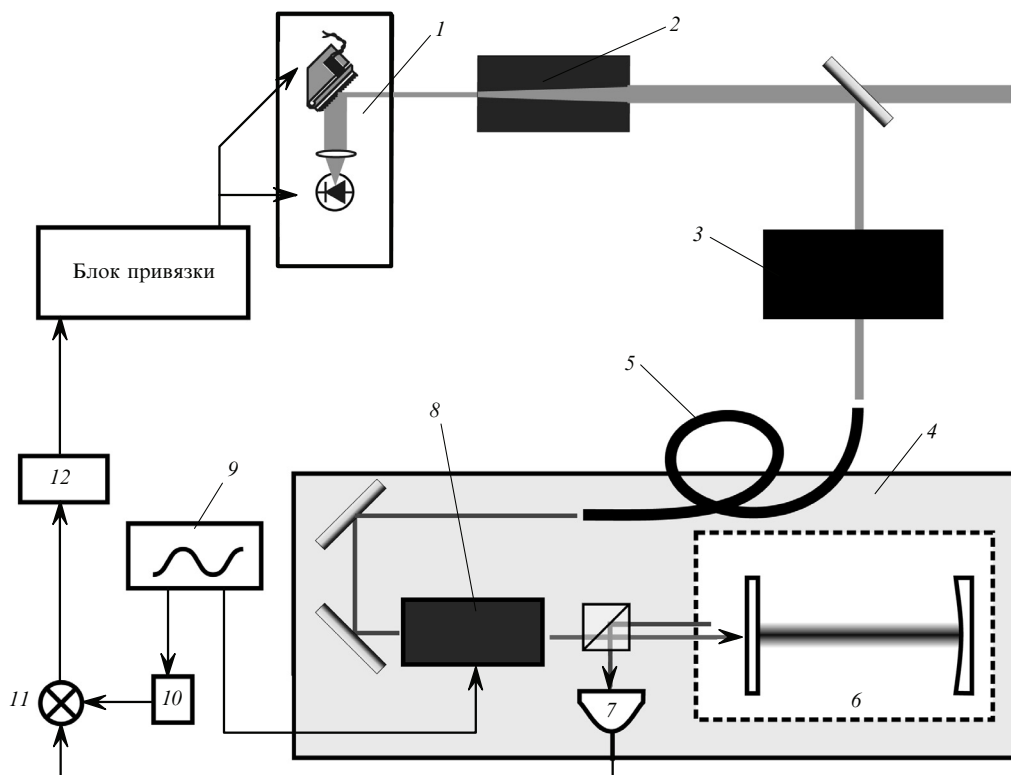


Рис.4. Схема стабилизации частоты диодного лазера методом Паунда – Древера – Холла:

1 – диодный лазер с внешним резонатором; 2 – рупорный усилитель; 3 – акустооптический модулятор; 4 – платформа активного подавления вибраций; 5 – оптоволокну; 6 – опорный резонатор; 7 – фотодиод; 8 – электрооптический модулятор, работающий в режиме фазовой модуляции; 9 – генератор радиочастоты; 10 – фазовращатель; 11 – балансный смеситель; 12 – фильтр нижних частот; оптоволокну снабжено системой компенсации шумов, которая, как и согласующая оптика, на рисунке не показана.

500 мм). Частота лазера стабилизируется по частоте определенной моды резонатора методом Паунда – Древера – Холла (ПДХ) [14]. Этот метод стабилизации частоты лазера работает как активная привязка фазы излучения лазера к фазе волны внутри резонатора, усредненной за счет длительного времени жизни фотона в резонаторе [18]. Резонатор при этом работает как маховик, фильтруя быстрые флуктуации фазы входящего излучения. Наличие активной фазовой привязки объясняет тот факт, что лазер с естественной шириной линии ~ 1 МГц, стабилизируемый относительно пика пропускания резонатора шириной 7 кГц, приобретает узкую спектральную линию с субгерцевой шириной.

Ряд причин, приводящих к сдвигу нулевого уровня в схеме привязки ПДХ, оказывает существенное влияние на стабильность частоты лазера. Одним из существенных нежелательных факторов является амплитудная модуляция поля, сопутствующая фазовой модуляции в схеме привязки ПДХ. Эффект оказывается очень сильным, если фазовая модуляция обеспечивается за счет модуляции тока диода. Поэтому нами использовалась схема, в которой модуляция осуществляется внешним электрооптическим модулятором, при этом поляризация света выбиралась такой, чтобы обеспечить минимальную амплитудную модуляцию. Кроме того, для уменьшения дрейфа оптических осей кристаллов температура электрооптического модулятора стабилизировалась с точностью 0.1 К. На сдвиг нуля привязки также оказывают влияние интерференционные эффекты, для устранения которых перед волокном размещался оптический изолятор.

Для управления частотой лазера, как обычно, используются два канала – быстрый (управление током лазерного диода) и медленный (управление смещением дифракционной решетки с помощью пьезоэлемента). Частотная кривая пропорционально-интегрально-дифференцирующего контролера, управляющего частотой лазера, обеспечивала высокое усиление на низких частотах (более 60 дБ) и полосу шириной до 10 МГц.

Для оптимальной работы схемы привязки в резонатор вводится излучение мощностью ~ 20 мВт. Повышение мощности приводит к заметному влиянию флуктуаций интенсивности излучения на частоту резонатора, характеризующему величиной 5 Гц/мкВт. Уменьшение мощности приводит к снижению отношения сигнал/шум для фотоприемников (использовались кремниевые pin-фотодиоды) и уменьшению стабильности.

3. Результаты эксперимента

3.1. Параметры резонаторов ФП1 и ФП2

Резкость резонаторов была определена по времени затухания излучения и составила 4.1×10^5 для резонатора ФП1 и 4.0×10^5 для резонатора ФП2. Температура в нулевой точке была определена по зависимости частоты биений двух лазерных полей от температуры одного из резонаторов (рис.5). Для этого температура одного резонатора поддерживалась постоянной, а температура другого варьировалась, причем для стабилизации температуры исследуемого резонатора требовалось около суток. После прекращения переходных процессов измерялась частота биений световых полей, результаты аппроксимировались квадратичной функцией (1). Ее минимум соответствовал нулевой точке резонатора. Для резонатора ФП1 измеряемая температура T_{cr} составила 7 ± 2 °С, а

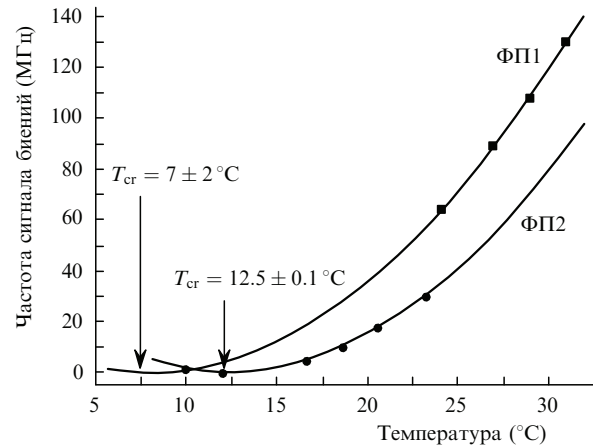


Рис.5. Определение нулевой точки резонаторов ФП1 и ФП2 (см. текст).

для ФП2 – 12.5 ± 0.1 °С. Эти значения различаются, скорее всего, вследствие влияния опор и за счет остаточных натяжений в резонаторах.

Простая оценка показывает, что охлаждение резонатора до температуры T_{cr} позволяет существенно снизить чувствительность к температурным флуктуациям. Предполагая, что точность настройки температуры составляет 0.1 °С, получаем чувствительность резонатора ФП1 примерно 10 кГц/мК, в то время как для ФП2 она снижается до 50 Гц/мК. Отметим, что вклад температурного расширения многослойного покрытия зеркал для ФП2 является существенным и равен 20 Гц/мК. Быстрые флуктуации температуры окружающей среды (теплообмен идет в основном за счет излучения) в первую очередь влияют на относительно тонкие подложки зеркал и многослойное покрытие, после чего начинается термализация с телом резонатора. Отсюда следует, что реальная чувствительность резонатора к быстрым флуктуациям температуры может существенно превышать оценку даже в случае его стабилизации вблизи T_{cr} . Этот эффект наблюдался в экспериментах. Таким образом, даже в случае использования нулевой точки стекла ULE температура резонатора должна быть стабилизирована с наибольшей достижимой точностью.

3.2. Остаточные фазовые шумы полупроводникового лазера

Исследование сигнала биений световых полей двух независимых стабилизированных лазеров с помощью спектроанализатора показало, что кроме узкого спектрального пика, содержащего основную часть сигнала, наблюдается также высокочастотный шум, образующий пьедестал шириной несколько мегагерц (рис.6). Этот высокочастотный шум возникает за счет остаточных фазовых шумов полупроводникового лазера, не до конца компенсируемых обратной связью. Оптимизация параметров обратной связи позволяет уменьшить шумовой пьедестал, но не подавить его полностью.

Измерения показали, что при введении в опорный резонатор излучения мощностью 20 мкВт (рабочий режим) в центральном пике (соответствующем несущей частоте) содержится 99.0 ± 0.1 % полной мощности. Увеличение мощности, используемой для привязки, приводит к повышению этого значения. Так, например, при введении в резонатор лазерного излучения мощностью 200 мкВт доля мощности на несущей частоте возрастает

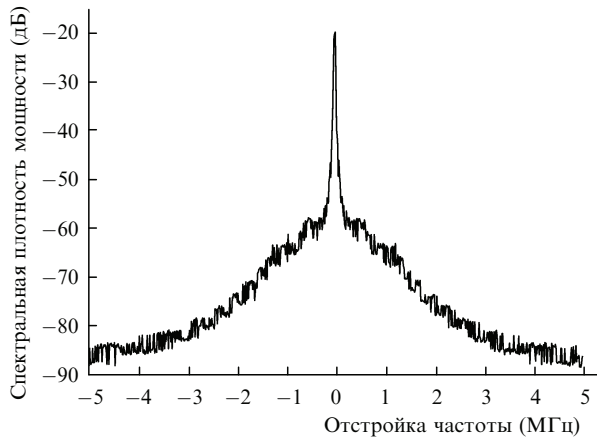


Рис. 6. Спектр сигнала биений световых полей двух лазерных систем на $\lambda = 972$ нм. Шумовой пьедестал обусловлен фазовыми шумами. Разрешение спектроанализатора 20 кГц.

до $99.7\% \pm 0.1\%$. Однако такой режим работы является неблагоприятным с точки зрения спектральной ширины центрального пика (см. выше). Шумовой пьедестал представляет серьезную проблему для спектроскопии перехода $1S-2S$ в атоме водорода, поскольку при его возбуждении последовательно задействованы три двухфотонных процесса. Умножение частоты приводит к росту фазовых шумов, падению доли мощности на несущей частоте и снижению эффективности возбуждения перехода [19].

3.3. Дрейф резонаторов и девиация Аллана

Сигнал биений лазерных полей был гетеродинирован в область вблизи 10 МГц и пропущен через полосовой фильтр с шириной полосы 1 МГц. На рис. 7,а представлен дрейф частоты сигнала биений в течение получаса. Средний дрейф частоты составляет несколько десятков миллигерц в секунду (для реализации, представленной на рис. 7,а он равен 15 МГц/с), в то время как максимальный дрейф не превышает 1 Гц/с, обычно оставаясь в пределах ± 100 МГц/с (величина дрейфа зависит от надежности работы лабораторной системы кондиционирования). К со-

жалению, в данном случае нельзя определить, какой из резонаторов дает больший вклад в наблюдаемый дрейф частоты. Резонатор ФП1 лучше изолирован и медленнее реагирует на изменения температуры окружающей среды, но при этом он обладает высокой чувствительностью к флуктуациям температуры (10 кГц/мК). Резонатор ФП2 хуже изолирован от окружающей среды, поскольку вакуумная камера служит тепловым радиатором, но при этом он имеет существенно более низкую чувствительность (50 Гц/мК). В настоящее время планируется измерение абсолютной частоты излучения стабилизированных полупроводниковых лазеров относительно частоты водородного мазера с помощью фемтосекундной гребенки частот [20].

Девиации Аллана, соответствующая данным рис. 7,а, представлена на рис. 7,б. Девиация достигает минимума (2×10^{-15}) для времени усреднения 3 с. Это всего в два раза выше, чем теоретический предел, обусловленный тепловым шумом резонатора [21].

3.4. Спектральная ширина линии

Для измерения ширины линии сигнал биений был гетеродинирован в область вблизи 100 Гц, что позволило исследовать спектр несущей с помощью фурье-спектроанализатора. Время записи одной реализации данных составляло 4 с, что соответствует разрешению спектроанализатора 0.25 Гц. Для 12 последовательно записанных реализаций спектральная ширина пика варьировалась от 0.3 до 0.75 Гц, что после усреднения дало 0.47 ± 0.14 Гц. На рис. 8 представлен результат усреднения полученных линий после совмещения их центров (компенсация дрейфа частоты лазера). Спектральный профиль результирующей линии хорошо аппроксимируется контуром Лоренца.

Сигнал биений был также записан на обычном цифровом осциллографе. Характерная осциллограмма, полученная после фильтрации высоких частот выглядит как синусоида с медленно флуктуирующей частотой (рис. 9). Гетеродинирование сигнала биений в область звуковых частот с последующим выводом на динамик удобно использовать для отладки системы и определения факто-

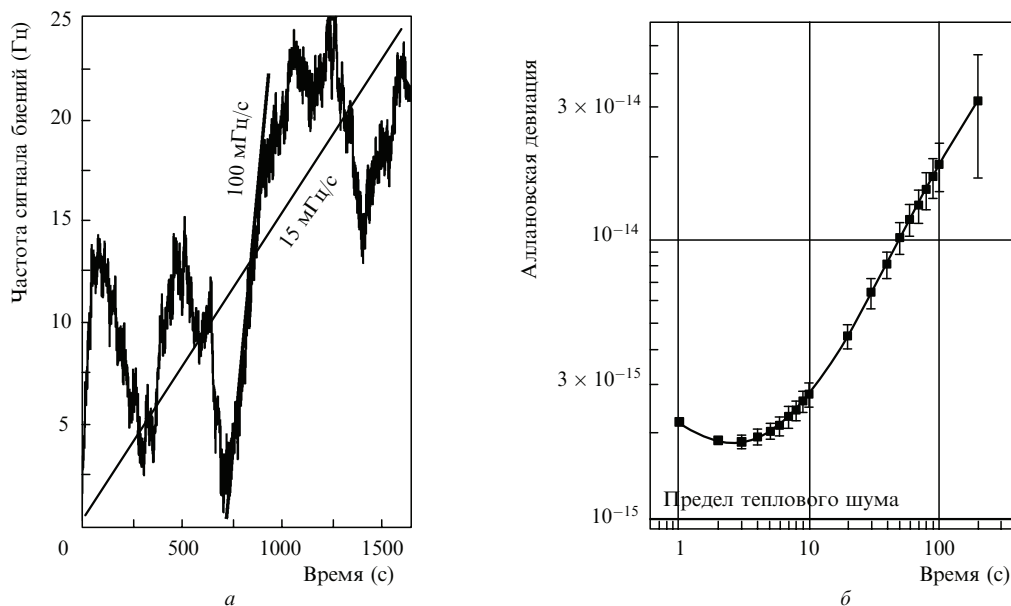


Рис. 7. Дрейф частоты сигнала биений световых полей двух лазерных систем (а) и соответствующая ему аллановская девиация (б).

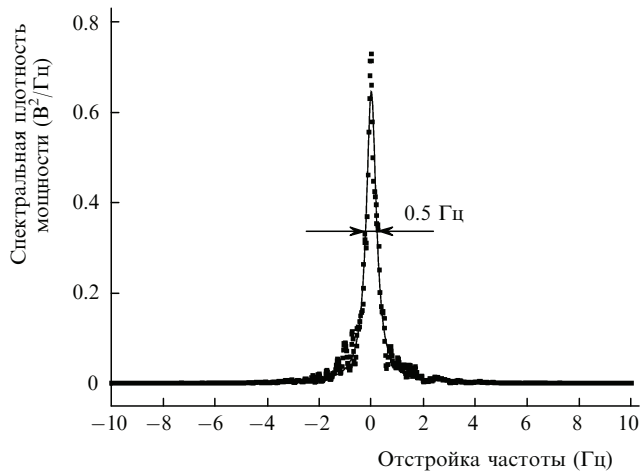


Рис.8. Спектр сигнала биений лазерных полей двух систем на $\lambda = 972$ нм, полученный с помощью фурье-спектроанализатора. Разрешение спектроанализатора 0.25 Гц.

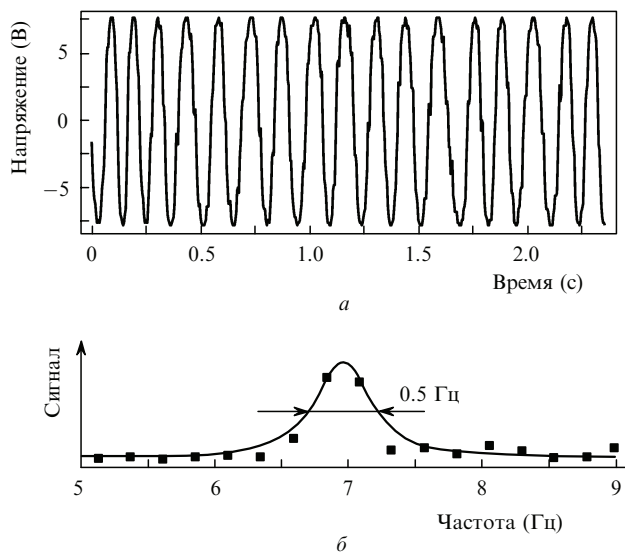


Рис.9. Сигнал биений лазерных полей двух систем на $\lambda = 972$ нм, записанный с помощью цифрового осциллографа (а) и спектр, полученный фурье-преобразованием этого сигнала (б). Результат согласуется с наблюдениями, сделанными с помощью фурье-спектроанализатора.

ров, влияющих на стабильность частоты лазерной системы.

4. Спектр перехода 1S–2S в атоме водорода

С помощью лазера, стабилизированного относительно резонатора ФП2, были зарегистрированы спектры перехода 1S–2S в атоме водорода. Для этого излучение лазера усиливалось в рупорном усилителе, обеспечивающем мощность 650 мВт, и направлялось в две последовательные ступени генерации второй гармоники [8]. На выходе второй ступени генерировалось излучение мощностью ~ 15 мВт на $\lambda = 243$ нм, необходимое для исследования двухфотонных спектров атома водорода. Для записи спектров частота излучения лазера изменялась с помощью акустооптического модулятора, который работал по двухпроходной схеме. Атомарный водород возбуждался в холодном пучке (температура атомов 5–7 К) внутри линейного резонатора, который повышает плот-

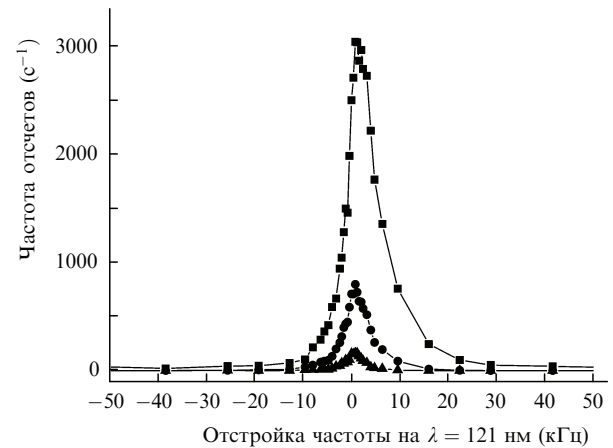


Рис.10. Линии перехода 1S–2S в атомарном водороде, полученные с помощью лазерной системы с резонатором ФП1 от всех атомов полного максвелловского распределения (■) и от групп атомов со скоростями менее 620 м/с (●) и менее 310 м/с (▲).

ность мощности излучения и обеспечивает условия возбуждения во встречных пучках без доплеровского уширения. Регистрация атомов в состоянии 2S проводилась с использованием фотоумножителя, который считал фотоны с $\lambda = 121$ нм, возникающие за счет распада возбужденных атомов в основное состояние в слабом электрическом поле.

Характерный спектр перехода приведен на рис.10. Выбранный метод спектроскопии позволяет получить сигналы как от всех атомов полного максвелловского распределения, так и от групп атомов с малыми скоростями. Селекция по скоростям проводится времяпролетным методом и позволяет уменьшить вклады времяпролетного уширения и эффекта Доплера второго порядка [15]. По сравнению с результатами, представленными в работе [8], с помощью стабилизированного полупроводникового лазера удалось зарегистрировать существенно более узкие резонансы за счет использования вертикальных опорных резонаторов. Оценки показывают, что эффективность возбуждения не превышала 50 %, что связано с остаточными шумами полупроводникового лазера. Спектральное разрешение установки составляет ~ 4 кГц (в пересчете для $\lambda = 121$ нм).

5. Заключение

Созданы две независимые лазерные установки на основе полупроводниковых лазеров с $\lambda = 972$ нм, стабилизированных относительно опорных резонаторов Фабри–Перо с вертикальными осями. Использование нечувствительной к вибрациям конструкции резонаторов позволило достичь спектральной ширины линии менее 0.5 Гц. Применен новый метод охлаждения опорного резонатора до температуры в нулевой точке стекла ULE, что существенно повысило стабильность частоты резонатора на больших интервалах времени. Дрейф частоты лазерных систем составлял ~ 0.1 Гц/с. Небольшие размеры резонатора позволили добиться высокой температурной стабильности. Измеренная девиация Аллана для частоты биений полей стабилизированных лазерных систем достигает 2×10^{-15} за 3 с. Доля мощности на несущей частоте составляет 99 %, что дает возможность исследовать спектр перехода 1S–2S в атоме водорода с эффективностью ~ 50 %. Показано, что с помощью данных

систем можно возбуждать узкие спектры перехода $1S-2S$ с разрешением 4 кГц (в пересчете для $\lambda = 121$ нм). Лазерная система компактна и может быть без труда доставлена в другие лаборатории для выполнения экспериментов с экзотическими водородоподобными системами.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 08-07-00127-а, грантом Президента РФ МД-887.2008.2, Фондом содействия отечественной науке и фондом Александра фон Гумбольдта.

1. Henry C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **18**, 259 (1982).
2. Богатов А.П., Елисеев П.Г., Сverdlov П.Н. *Квантовая электроника*, **1**, 2286 (1974).
3. Беленов Е.М., Величанский В.Л., Зибров А.С., Никитин В.В., Саутенков В.А., Усков А.В. *Квантовая электроника*, **10**, 1232 (1983).
4. Акульшин А.М., Басов Н.Г., Величанский В.Л., Зибров А.С., Зверков М.В., Никитин В.В., Охотников О.Г., Сенков Н.В., Саутенков В.А., Тюриков Д.А., Юркин Е.К. *Квантовая электроника*, **10**, 1527 (1983).
5. Dahmani B., Hollberg L., Drullinger R. *Opt. Lett.*, **12**, 876 (1987).
6. Stoehr H., Mensing F., Helmcke J., Sterr U. *Opt. Lett.*, **31**, 736 (2006).
7. Ludlow A.D., Huang X., Notcutt M., Zanon-Willette T., Foreman S.M., Boyd M.M., Blatt S., Ye J. *Opt. Lett.*, **32**, 641 (2007).
8. Kolachevsky N., Alnis J., Bergeson S.D., Hänsch T.W. *Phys. Rev. A*, **73**, 021801 (2006).
9. Salomon C., Hils D., Hall J.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **5**, 1576 (1988).
10. Gabrielse G., Bowden N.S., Oxley P., Speck A., Storry C.H., Tan J.N., Wessels M., Grzonka D., Oelert W., Schepers G., Sefzick T., Walz J., Pittner H., Hänsch T.W., Hessels E.A. *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 213401 (2002).
11. Young B.C., Cruz F.C., Itano W.M., Bergquist J.C. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3799 (1999).
12. Notcutt M., Ma L.-S., Ye J., Hall J.L. *Opt. Lett.*, **30**, 1815 (2005).
13. Nazarova T., Riehle F., Sterr U. *Appl. Phys. B*, **83**, 531 (2006).
14. <http://www.corning.com/specialtymaterials>.
15. Fischer M., Kolachevsky N., Zimmermann M., Holzwarth R., Udem Th., Hänsch T.W., Abgrall M., Grünert J., Maksimovic I., Bize S., Marion H., Pereira Dos Santos F., Lemonde P., Santarelli G., Laurent P., Clairon A., Salomon C., Haas M., Jentschura U.D., Keitel C.H. *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 230802 (2004).
16. <http://www.atfilminc.com>.
17. Ma L.-S., Jungner P., Ye J., Hall J.L. *Opt. Lett.*, **19**, 1777 (1994).
18. Drever R.W.P., Hall J.L., Kowalski F.V., Hough J., Ford G.M., Munley A.J., Ward H. *Appl. Phys.*, **31**, 97 (1983).
19. Матвеев А.Н., Колачевский Н.Н., Алнис Я., Хэнш Т.В. *Квантовая электроника*, **38**, 391 (2008).
20. Reichert J., Holzwarth R., Udem Th., Hänsch T.W. *Opt. Commun.*, **172**, 59 (1999).
21. Notcutt M., Ma L.-S., Ludlow A.D., Foreman S.M., Ye J., Hall J.L. *Phys. Rev. A*, **73**, 031804 (2006).