

Частотный репер в области $\lambda = 732$ нм для прецизионной лазерной спектроскопии мюония

С.Н.Багаев, А.М.Белкин, А.С.Дычков, А.С.Ефимов, В.А.Жмудь, Д.Б.Колкер, Ю.А.Матюгин,
В.С.Пивцов, С.А.Фарносов, Н.В.Фатеев

Проведен поиск частотного репера в области $\lambda = 732$ нм, необходимого для калибровки лазерного спектрометра в экспериментах по прецизионному измерению частоты перехода $1S - 2S$ мюония. Подходящий репер найден в спектре поглощения паров молекулярного иода, нагретых до температуры 600°C . Частота найденного репера отстоит менее чем на 1 ГГц от требуемой частоты настройки спектрометра на резонанс в мюонии.

Ключевые слова: мюоний, лазерная спектроскопия, спектр I_2 , спектр $I\text{Br}$.

Введение

Прецизионное измерение частот переходов одноэлектронных атомов, таких как водород, дейтерий, а также экзотических атомов типа мюония, позитрония и др., для которых возможен точный теоретический расчет частот переходов, открывает возможность определения с высокой точностью одной из фундаментальных физических констант – постоянной Ридберга, а также возможность измерения изотопического и релятивистского сдвигов, проверки основ квантовой электродинамики [1, 2].

Эксперименты по прецизионной лазерной спектроскопии атома водорода ведутся уже с 1975 г. [3] и к настоящему времени точность измерения частоты переходов превысила точность теоретических расчетов [4]. Интерес к мюонию вызван прежде всего тем, что для него возможен более точный, чем для водорода, теоретический расчет энергии уровней. При вычислении энергии уровней водорода наиболее труднопреодолимым препятствием для повышения точности является недостаток информации о размерах и структуре ядра. У мюония ядром является лептонная частица, внутренняя структура которой при регистрации с погрешностью до 10^{-18} м отсутствует и, следовательно, снимается ограничение на возможность вычисления уровней энергии с более высокой точностью.

Первые эксперименты по лазерной спектроскопии мюония [5] проводились с применением импульсного лазера на красителе с длиной волны $\lambda = 488$ нм. Вторая гармоника этого лазера использовалась для наблюдения двухфотонного резонанса на переходе $1S - 2S$. Систематическая погрешность измерения частоты в этом эксперименте составляла 46 МГц. Основной вклад в погрешность вносили динамический штарковский сдвиг и чирп, генерируемый импульсным усилителем. Чтобы уменьшить влияние факторов, приводящих к погрешности, в следующей серии экспериментов использовался новый спектрометр на основе непрерывного Тi-сапфирового лазера и им-

пульсного александритового усилителя. Данный спектрометр может работать с импульсами в 5–6 раз большей длительности, чем используемый ранее, а следовательно, в 5–6 раз должно быть меньше влияние эффектов, приводящих к возникновению систематических погрешностей.

Излучение с длиной $\lambda = 244$ нм, необходимое для наблюдения двухфотонного резонанса на переходе $1S - 2S$ мюония, создается в этом спектрометре за счет генерации 3-й гармоники излучения Тi-сапфирового лазера, генерирующего в области $\lambda = 732$ нм. Для точной настройки частоты лазера на линию двухфотонного поглощения мюония, а также для точного измерения частоты перехода $1S - 2S$ необходимо иметь стандарт частоты в области длин волн генерации Тi-сапфирового лазера. Эксперименты с мюонием проводятся на ускорителе, а следовательно, ограничены во времени и требуют повышенной надежности измерительных систем. В связи с этим, чтобы не усложнять процесс измерения частоты, желательно, чтобы частота стандарта не отличалась от измеряемой частоты более чем на 1 ГГц. Данное требование является достаточно жестким, т. к. существенно уменьшает вероятность нахождения подходящего репера.

Настоящая работа посвящена поиску поглощающих сред и линий поглощения, которые могли бы служить репером для создания стандарта частоты, исследованию выбранного репера, получению резонанса насыщенного поглощения на выбранной линии и стабилизации частоты по резонансу.

1. Поиск частотного репера

Частотный репер, предназначенный для использования в экспериментах по прецизионной спектроскопии мюония, должен удовлетворять следующим требованиям. Частота репера должна быть равна $1/6$ частоты перехода $1S - 2S$, т. е. 409254.7 ± 1 ГГц, что соответствует длине волны 732.5325 ± 0.0018 нм; нестабильность и погрешность воспроизводимости частоты частотного репера должны быть не хуже 10^{-11} . В рассматриваемом диапазоне спектра наиболее интенсивные полосы поглощения принадлежат электронно-колебательно-вращательным переходам некоторых молекул.

В работе [6] показана возможность использования линий поглощения молекулярного иода, нагретого до температуры 500°C , в качестве частотных реперов в области $\lambda = 800$ нм. Линиям поглощения I_2 в этом диапазоне соответствуют переходы с высоковозбужденных колебательных уровней основного электронного состояния, поэтому для обеспечения приемлемой населенности этих уровней и получения заметного поглощения пары I_2 необходимо нагревать.

В качестве кандидатов для исследований мы выбрали прежде всего двухатомные молекулы. Они имеют достаточно богатый спектр, состоящий из хорошо разрешаемых дискретных линий, в то время как в спектрах многоатомных молекул линии перекрываются, образуя сплошные полосы поглощения. Для двухатомных молекул имеются систематизированные данные по спектроскопическим константам (см., напр., [7]), по которым можно ориентировочно определить положение полос поглощения. На основании таких данных был выбран ряд молекул для исследований: I_2 , Br_2 , Bi_2 , Sb_2 , IBr , ICl и многоатомная молекула CF_3NO , имеющая полосу поглощения в интересующей нас области.

Детальный анализ спектроскопических параметров, проведенный для выбранных молекул, показал, что для большинства молекул, за исключением I_2 , точность приводимых в литературе констант недостаточна для вычисления частоты переходов с той точностью, какая необходима для репера (на один-два порядка ниже). В связи с этим единственным способом для нахождения подходящей линии было спектроскопическое исследование выбранных молекул с помощью лазерного спектрометра.

1.1. Лазерный спектрометр линейного поглощения

Для надежной идентификации спектральных линий необходимо иметь запись спектра, включающую достаточно большое число линий. Для большинства исследуемых молекул этому условию можно удовлетворить, если спектрометр обеспечит непрерывную запись спектра в пределах нескольких десятков гигагерц. Разрешение спектрометра должно обеспечить запись отдельных доплеровски-уширенных линий. И наконец, спектрометр должен обеспечить измерение частоты отдельных линий с погрешностью не хуже 0.01 см^{-1} . Такой спектрометр был создан на базе одночастотного перестраиваемого Тi-сапфирового лазера. Схема спектрометра приведена на рис.1. В спектрометре используется самодельный Тi-сапфировый лазер с традиционным кольцевым резонатором. Настройка на требуемую частоту осуществляется трехком-

понентным фильтром Лио. Одночастотная генерация обеспечивается внутррезонаторным эталоном с воздушным промежутком. Путем подачи напряжения на пьезокерамику эталона частоту лазера можно перестраивать в диапазоне шириной ~ 40 ГГц. Выходная мощность в области 732 нм в одночастотном режиме достигала 0.5 Вт. Ширина линии в режиме свободной генерации не превышала 1 МГц.

Для измерения поглощения пучок Тi-сапфирового лазера разделялся на два пучка с одинаковой интенсивностью. Один пучок проходил через поглощающую ячейку, второй – мимо ячейки. Интенсивности обоих пучков на входе фотоприемников в отсутствие поглощения в ячейке выравнивались с помощью регулируемых ослабителей. Сигналы с фотоприемников подавались на дифференциальный усилитель. Разностный сигнал, возникающий при поглощении в ячейке, был пропорционален поглощению.

Для наблюдения спектра поглощения частота лазера перестраивалась путем подачи управляющего напряжения на пьезоэлемент внутррезонаторного эталона. Частотой можно было управлять с помощью компьютера путем формирования управляющего напряжения по заданной программе, при этом в широких пределах можно было изменять как диапазон, так и скорость перестройки частоты. Имелась также возможность подавать переменное напряжение с частотой 50 Гц и наблюдать спектр на экране осциллографа. При перестройке эталона частота лазера изменялась не непрерывно, а ступенями из-за перескока с одной моды на другую. Ступень равнялась межмодовой частоте резонатора лазера и составляла около 300 МГц. Ступенчатая перестройка не была препятствием для получения общей картины спектра, т. к. типичные ширины наблюдаемых линий были в несколько раз больше отдельной ступени.

Для измерения длины волны использовался λ -метр на основе трехбазового интерферометра Физо и линейки фотодиодов для регистрации интерферограмм. Предварительно λ -метр калибровался по излучению He-Ne-лазера ($\lambda = 0.63$ мкм), стабилизируемого по провалу Лэмба, длина волны которого определена с погрешностью 10^{-7} . Точность измерения λ -метра проверялась путем измерения длин волн известных линий неона с использованием оптогальванической ячейки, а также при измерении известных линий молекулярного иода. Волновые числа линий I_2 приведены в атласе [8] и определены с погрешностью $2.5 \cdot 10^{-7}$. Результаты наших измерений совпадали с данными атласа с погрешностью ± 150 МГц. На основании этих данных погрешность наших измерений определена как ± 200 МГц. Из-за нелинейной зависимости длины волны от напряжения на пьезокерамике точную длину волны отдельной линии поглощения из спектрограмм определить невозможно, поэтому длина волны каждой линии измерялась в отдельном эксперименте при настройке лазера на пик поглощения.

Большинство выбранных для исследования веществ химически очень активно. Для наполнения поглощающих ячеек этими веществами была изготовлена стеклянная вакуумная система с фторопластовыми затворами. Все вещества, кроме IBr , использовались в готовом виде. IBr приготавливался непосредственно в вакуумной системе, хранился в отдельном резервуаре, соединенном с вакуумной системой, и при необходимости использовался для наполнения поглощающей ячейки.

Ячейки были изготовлены из кварцевых трубок диа-

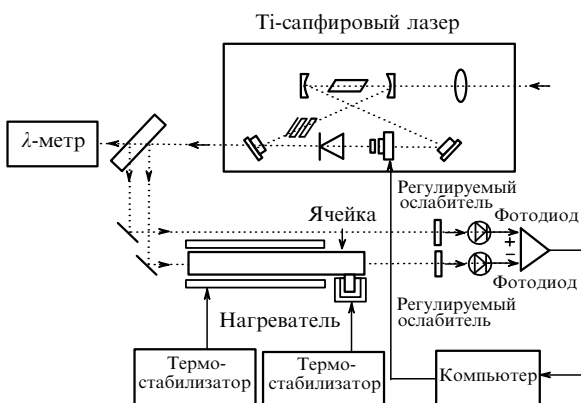


Рис.1. Схема лазерного спектрометра линейного поглощения.

метром 15–25 мм и длиной от 30 до 60 см. На торцах трубок были приварены кварцевые окна. Перед наполнением исследуемым веществом ячейки тщательно обезгаживались путем прогрева при температуре около 900°C в течение нескольких часов и откачивались до давления порядка 10^{-5} Тор. После отпайки ячеек давление паров в них регулировалось температурой стенок ячейки и специального отростка с пониженной по отношению к стенкам ячейки температурой. Для регулирования температуры охлаждаемого отростка и поддержания его при постоянной температуре был изготовлен специальный термостат на основе элемента Пельтье. Температура отростка могла поддерживаться постоянной с погрешностью 0.1°C.

1.2. Результаты исследования спектров линейного поглощения

На первом этапе исследований изучалось наличие линий поглощения вблизи заданной частоты. Спектр наблюдался на экране осциллографа. Вещества, в которых были обнаружены линии поглощения, близкие к заданной частоте, исследовались более детально. Для них записывался спектр и точно измерялась частота центров линий поглощения. В результате такого исследования были отобраны в качестве кандидатов на роль частотного репера молекулы IBr и I₂. При этом предпочтительно отдавалось молекуле IBr, т. к. для нее достаточно большое поглощение наблюдалось при комнатной температуре стенок ячейки.

В первых экспериментах спектр IBr наблюдался в отпаянной ячейке, однако было обнаружено, что со временем в ячейке образуется Br₂, по-видимому в результате фотодиссоциации IBr. По этой причине в дальнейшем ячейка была соединена с вакуумным постом и перед каждым измерением откачивалась и наполнялась вновь из резервуара путем перегонки в вакууме паров IBr в охлаждаемый отросток ячейки.

На рис.2 представлен спектр поглощения IBr, полученный в ячейке длиной 60 см при комнатной температуре стенок ячейки и отростка. Стрелкой отмечена частота, равная 1/6 частоты перехода 1S – 2S мюония. Из рис.2 видно, что вблизи требуемой частоты имеется слабая линия поглощения, пик которой отстоит от частоты мюония на 300 ± 200 МГц. Используя данные работы [9], мы определили эту линию как переход $R(64)23 - 2$ электронной системы $A^3\Pi_1 \rightarrow X^1\Sigma^+$ молекулы $^{127}I^{79}Br$. К сожалению, нам не удалось найти надежных данных по дав-

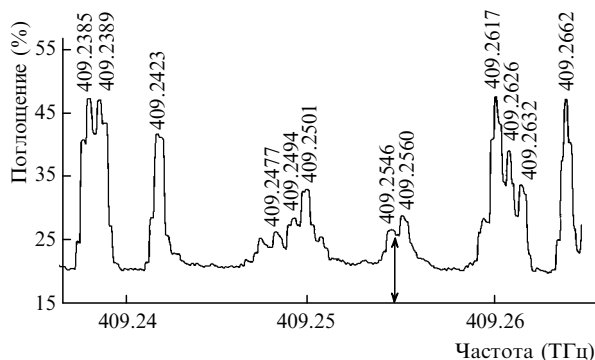


Рис.2. Спектр линейного поглощения IBr в ячейке длиной 60 см при температуре стенок ячейки и отростка 21°C. Стрелкой указана требуемая частота настройки спектрометра на двухфотонный резонанс в мюонии.

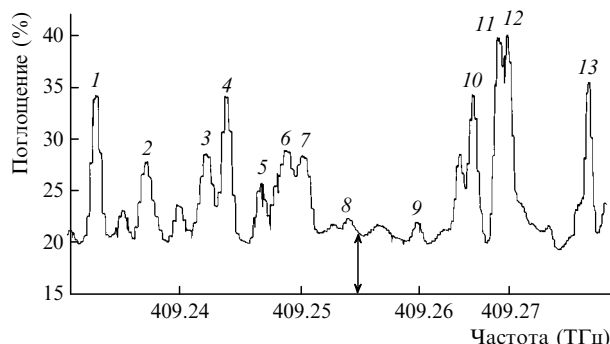


Рис.3. Спектр линейного поглощения I₂ в ячейке длиной 60 см при температуре стенок ячейки 600°C и температуре отростка 41°C (см. таблицу). Стрелкой указана требуемая частота настройки спектрометра на двухфотонный резонанс в мюонии.

лению насыщенных паров IBr, и поэтому мы не могли определить давление паров IBr в ячейке.

Ячейка с I₂ была аналогична ячейке с бромом. Давление паров в ячейке определялось температурой охлаждаемого отростка. На рис.3 представлен спектр линейного поглощения I₂, записанный при температуре стенок ячейки 600°C и температуре отростка 41°C. Этой температуре отростка соответствует давление паров иода $p = 1.1$ Тор, определяемое из соотношения [10]

$$\lg p = 9.7522 - 2863.54(273 + t - 19)^{-1},$$

где давление берется в торрах, а температура t – в градусах Цельсия.

В таблице приведены измеренные частоты, соответствующие максимумам линий, и для сравнения частоты этих же линий, взятые из атласа [8]. Видно хорошее совпадение наших измерений с данными атласа. Из рис.3 видно, что ближайшие сильные линии I₂ отстоят от интересующей нас частоты почти на 10 ГГц, а вблизи этой частоты имеется лишь очень слабая линия, центр которой отстоит от нее на 1.1 ± 0.2 ГГц. Мы идентифицировали эту линию, используя данные [11]. Она соответствует переходу $R(26)5-13$ электронной системы $B^3\Pi_{ou}^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$. Из рис.3 видно, что поглощение на указанной линии представляет собой сумму двух составляющих: не-

Линии поглощения I₂.

Номер линии на рис.3	Частота, измеренная в настоящей работе (ГГц)	Частота, измеренная в [8] (ГГц)
1	409234.0	409234.07 ± 0.15
2	409237.5	–
3	409242.6	–
4	409244.0	409244.14 ± 0.063
5	409246.8	–
6	409248.6	–
7	409250.3	–
8	409253.5	–
9	409259.6	–
10	409265.4	409265.27 ± 0.145
11	409267.8	409267.91 ± 0.081
12	409269.0	409269.14 ± 0.090
13	409277.6	409277.87 ± 0.078

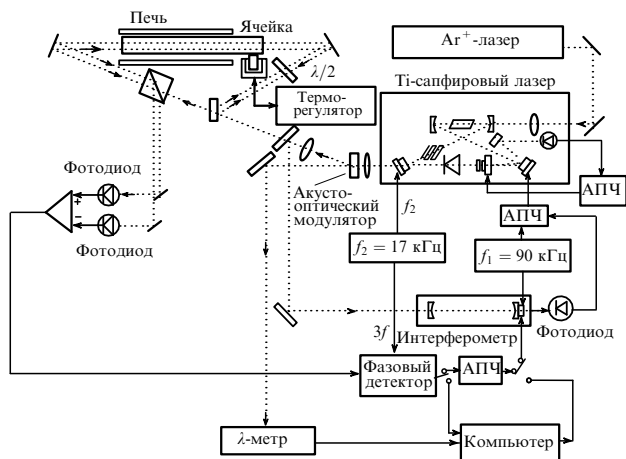


Рис.4. Схема лазерного спектрометра насыщенного поглощения.

селективной части поглощения (подкладки) α_{ns} и селективной части поглощения линии α_s . Из рис.3 для линии $R(26)5-13$ находим $\alpha_{ns} = 0.37 \text{ м}^{-1}/\text{Тор}$ и $\alpha_s = 0.04 \text{ м}^{-1}/\text{Тор}$. Параметры поглощения данной линии очень близки к параметрам поглощения линии $R(127)11-5$, используемой для стабилизации He-Ne-лазера ($\lambda = 633 \text{ нм}$). Действительно, согласно работе [12] для этой линии $\alpha_{ns} = 0.5 \text{ м}^{-1}/\text{Тор}$ и $\alpha_s = 0.038 \text{ м}^{-1}/\text{Тор}$.

2. Исследование сверхтонкой структуры линий поглощения

Наблюдаемые спектральные линии I_2 и IВг имеют ширину порядка $1-1.5 \text{ ГГц}$ и представляют собой суперпозицию перекрывающихся доплеровских контуров компонент сверхтонкой структуры, которая обусловлена взаимодействием ядерного электроквадрупольного момента и спина с вращением молекулы. Число компонент зависит от полного момента и для I_2 равно 15, если вращательное квантовое число четное, и 21, если оно нечетное [13, 14]. Для IВг сверхтонкая структура более сложная, она включает 24 сильных компонента и большее число более слабых [15].

В качестве частотного репера могут быть использованы резонансы насыщенного поглощения отдельных компонент сверхтонкой структуры. Для получения резонансов и их исследования был создан спектрометр сверхвысокого разрешения. Схема спектрометра приведена на рис.4. В основе спектрометра лежит титан-сапфировый лазер. Поскольку ширины резонансов насыщенного поглощения могут иметь порядок 1 МГц , ширина линии генерации лазера должна быть значительно меньше этого значения. Для сужения линии была осуществлена стабилизация частоты лазера по резонансу внешнего интерферометра. Для получения сигнала ошибки центральная частота резонанса интерферометра сканировалась с частотой 90 кГц с помощью пьезоэлемента, на котором крепилось одно из зеркал интерферометра.

Для исследования внутридоплеровской структуры линии лазер необходимо непрерывно перестраивать по крайней мере в пределах ширины линии, т. е. на $\pm 1.5 \text{ ГГц}$. Чтобы реализовать эту возможность, была осуществлена автоматическая подстройка частоты внутрирезонаторного эталона к частоте лазера. Благодаря этому при перестройке частоты за счет перемещения одного из зеркал резонатора лазера с помощью пьезоэлемента синх-

ронно перестраивалась частота внутрирезонаторного эталона. Сигнал ошибки для системы автоматической подстройки эталона вырабатывался за счет сканирования частоты эталона с частотой 4.5 кГц . Диапазон непрерывной перестройки частоты лазера составлял 1.2 ГГц и определялся возможностями пьезоэлемента. Поскольку частота лазера жестко привязана к частоте внешнего интерферометра, перестройка частоты осуществлялась путем подачи управляющего напряжения на пьезоэлемент внешнего интерферометра.

Для получения оптических резонансов использовался метод насыщенного поглощения, основанный на взаимодействии сильной и слабой встречных волн с поглощающей средой. Через поглощающую ячейку проходил насыщающий пучок высокой интенсивности и два слабых пробных встречных пучка, образующихся при отражении от плоскопараллельной кварцевой пластины. Поляризация пробных пучков поворачивалась на 90° с помощью пластины $\lambda/2$. Благодаря этому на выходе из ячейки пробные пучки отражались от грани поляроида. Один из них точно совмещался с насыщающим пучком и испытывал насыщение поглощения, создаваемое этим пучком, в центре доплеровской линии. Второй пучок проходил вблизи первого и испытывал только ненасыщенное поглощение. Разность сигналов, регистрируемых фотоприемниками, была пропорциональна только насыщенной части поглощения.

Используемая схема регистрации позволяла примерно в $10-20$ раз снизить флуктуации мощности лазера. Мощность насыщающего пучка в ячейке была равна $50-100 \text{ мВт}$, мощность пробных пучков – около 1 мВт . Сильный и слабые пучки фокусировались в центр поглощающей ячейки. Диаметр перетяжки составлял около 0.5 мм . Для получения сигнала насыщенного поглощения частота лазера модулировалась путем подачи переменного напряжения с частотой 17 кГц на пьезоэлемент одного из зеркал лазера. Полезный сигнал регистрировался на частоте 3 -й гармоники частоты модуляции. Благодаря этому исключалось влияние паразитной модуляции мощности лазера, возникающей при модуляции частоты. Акустооптический модулятор, работающий на частоте 160 МГц , служил для развязки лазера от интерферометра и оптической схемы.

При записи спектра насыщенного поглощения частота лазера перестраивалась путем подачи управляющего напряжения от ЭВМ на пьезоэлемент внешнего интерферометра. Измеряемый сигнал с синхронного детектора был пропорционален третьей производной от лэмбовского провала в центре доплеровской линии поглощения. Сигнал регистрировался ЭВМ и отображался на экране. Для более точной калибровки частотной шкалы одновременно с сигналом поглощения записывался сигнал пропускания конфокального интерферометра Фабри-Перо.

С помощью спектрометра были получены и записаны спектры насыщенного поглощения сверхтонкой структуры IВг и I_2 . На рис.5 представлена запись спектра насыщенного поглощения молекулы IВг для линии, частота которой наиболее близка к требуемой частоте репера. Запись спектра сделана при комнатной температуре стенок ячейки с IВг и охлаждении отростка до -14°C . Предварительные исследования показали, что при понижении температуры отростка, а следовательно, при снижении давления паров в ячейке отношение сигнал/шум увеличи-

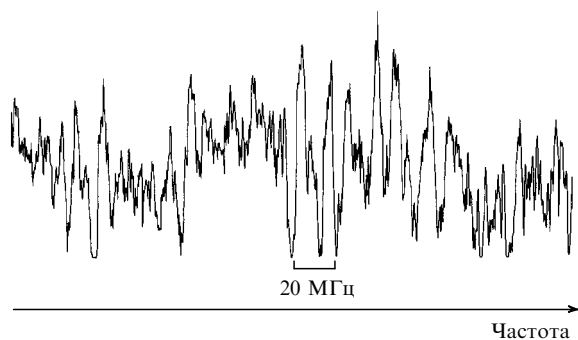


Рис.5. Спектр насыщенного поглощения компонент сверхтонкой структуры линии $R(64)23-2$ молекулы IBr при температуре стенок ячейки 21°C и температуре отрезка -13°C .

вается. На рис.5 отчетливо видны отдельные резонансы. То, что это не шумы, подтверждается повторяемостью картины при многократной записи. Характерными особенностями наблюдаемого спектра являлись большое число не полностью разрешенных резонансов и низкое отношение сигнал/шум.

Иная картина наблюдалась для I_2 . На рис.6 приведена запись спектра линии $R(26)5-13$. Даже для такой слабой линии мы имели хорошее отношение сигнал/шум. Запись сделана при температуре ячейки 600°C и температуре отрезка 35°C . Амплитуда девиации частоты составляла 15 МГц. Из сравнения спектров сверхтонкой структуры линий двух молекул видно, что I_2 имеет несомненные преимущества перед IBr . В спектре I_2 отношение сигнал/шум существенно выше и имеются одиночные, хорошо разрешаемые резонансы. Исходя из этого, I_2 был выбран в

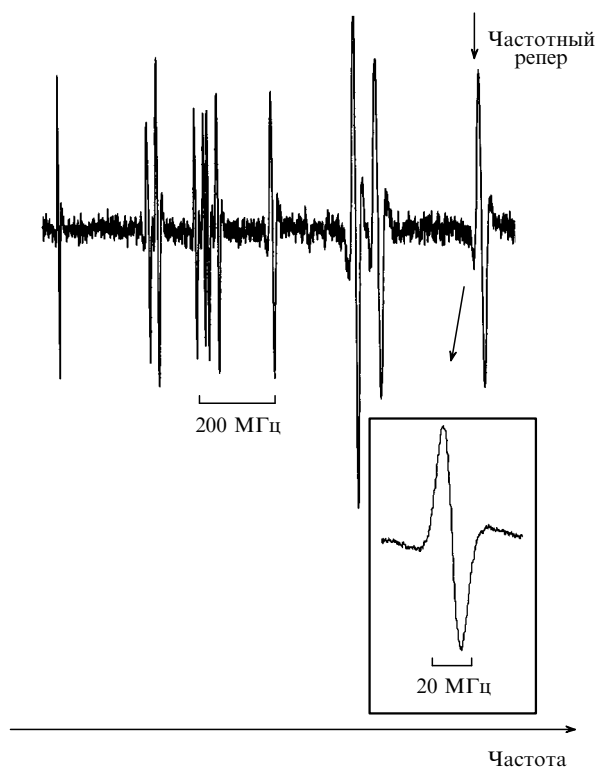


Рис.6. Спектр насыщенного поглощения компонент сверхтонкой структуры линии $R(26)5-13$ молекулы I_2 при температуре стенок ячейки 600°C и температуре отрезка 35°C . На вставке форма резонанса, выбранного в качестве частотного репера, показана в увеличенном масштабе.

качестве поглощающей среды для стандарта. В качестве частотного репера может быть использован крайний одиночный резонанс с высокочастотной стороны спектра. Он отстоит примерно на 400 МГц от центра линии и его частота равна 409253.9 ± 0.2 ГГц.

Таким образом, частота найденного репера отличается от требуемой частоты менее чем на 1 ГГц и, следовательно, удовлетворяет поставленному требованию. Ширина резонанса составляет около 10 МГц и определяется в основном ударным уширением. Частота Ti -сапфирового лазера была привязана к выбранному реперу посредством системы автоматической подстройки частоты. Оценки показали, что при полученном отношении сигнал/шум возможно достижение нестабильности частоты не хуже 10^{-10} . Для определения влияния различных физических и технических факторов на воспроизводимость частоты лазера требуется проведение специальных исследований.

Однако многие характеристики можно заранее предсказать с большой степенью достоверности, поскольку молекулярный иод как поглощающая среда для стабилизации лазеров широко используется и хорошо изучен. Зависимость сдвига частоты ν от давления пара иода изучалась на длинах волн 514 [16], 532 [17], 612 [18], 633 [19], 640 [20] и 790 нм [6]. Типичные $d\nu/dp$ лежат в пределах 0.17–1 МГц/Тор для давлений паров I_2 в интервале 0.015–0.53 Тор при температуре стенок ячейки $+20 \dots +500^\circ\text{C}$. Для давления насыщенных паров при температуре 41°C имеем $dp/dt = 84.2$ мТор/К и отсюда $d\nu/dt = 14.5 - 84$ кГц/К.

Таким образом, если поддерживать температуру охлаждаемого отрезка с погрешностью не хуже $\pm 0.5^\circ$, то погрешность воспроизводимости частоты, обусловленная сдвигом из-за давления, может быть не хуже ± 40 кГц или в относительных единицах 10^{-10} . Сдвиг частоты при изменении температуры стенок ячейки по имеющимся данным [19] не превышает 0.2 кГц/К. Если учесть, что достигнутые нестабильность и погрешность воспроизводимости частоты $\text{He} - \text{Ne}/\text{I}_2$ -лазера ($\lambda = 633$ нм) в настоящее время составляют 10^{-12} и 10^{-11} соответственно, а также тот факт, что параметры частотных реперов, найденного в этой работе и используемого для стабилизации $\text{He} - \text{Ne}$ -лазера, близки, можно ожидать достижения аналогичной нестабильности и для найденного репера.

Заключение

В результате проведенного исследования найден частотный репер в области $\lambda = 732$ нм, частота которого отличается менее чем на 1 ГГц от частоты настройки лазерного спектрометра на двухфотонный резонанс в иоонии. Подходящая линия поглощения найдена в абсорбционном спектре паров молекулярного иода, нагретых до температуры 600°C . В качестве репера выбрана крайняя высокочастотная компонента сверхтонкой структуры линии $R(26)5-13$ электронного $B \rightarrow X$ перехода молекулы $^{127}\text{I}_2$. По своим спектроскопическим параметрам найденная линия подобна линии $R(127)11-5$, используемой для стабилизации частоты $\text{He} - \text{Ne}$ -лазера ($\lambda = 633$ нм). На основании этой аналогии можно заключить, что для лазера, стабилизируемого по выбранному частотному реперу, вполне реально достижение таких же нестабильности и погрешности воспроизводимости частоты, как и для $\text{He} - \text{Ne}$ -лазера ($\lambda = 633$ нм), т. е. порядка 10^{-11} .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 96-02-19195), Международного научного фонда и INTAS (грант № 93-0263).

1. Cohen E.R., Taylor B.N. *J.Phys.Chem.Ref.Data*, **2**, 663; 734 (1973).
2. Baklanov E.V., Chebotayev V.P. *Optics Comms*, **12**, 312 (1974).
3. Hänsch T.W., Lee S.A., Wallenstein R., Wieman C. *Phys.Rev.Letts*, **34**, 307 (1975).
4. Udem Th. et al. *Phys.Rev.Letts*, **79**, 2646 (1997).
5. Schwarz W. et al. *IEEE Trans.Instrum.Measur.*, **44**, 505 (1995).
6. Kremser S., Bodermann B., Knöckel H., Tiemann E. *Optics Comms*, **110**, 708 (1994).
7. Хьюберг К.П., Герцберг Г. *Константы двухатомных молекул* (М., Мир, 1984).
8. Gerstencorn S., Luc P. *Atlas du spectre d'absorption de la molecule d'iode. Pt. 3* (Paris, SNRS, 1978).
9. Selin L.E. *Arkiv für Fysik*, **21**, 479 (1962).
10. Baxter, Grose. *J.Amer.Chem.Soc.*, **37**, 1061 (1915).
11. Gerstencorn S., Luc P. *J.Physique*, **46**, 867 (1985).
12. Brillet A., Cérez P. *Metrologia*, **13**, 137 (1977).
13. Hanes G.R.H., Dahlstrom C.E. *Appl.Phys.Letts*, **14**, 362 (1969).
14. Kroll M. *Phys.Rev.Letts*, **23**, 631 (1969).
15. Siese M., Tiemann E. *Zs.Phys.D*, **7**, 147 (1987).
16. Chebotayev V.P., Goldort V.G., Goncharov A.N., Ohm A.E., Skvortsov M.N. *Metrologia*, **27**, 61 (1990).
17. Eickhoff M.L., Hall J.L. *IEEE Trans.Instrum.Measur.*, **44**, 155 (1995).
18. Gläser M. *Metrologia*, **23**, 45 (1986).
19. Gläser M. *Metrologia*, **18**, 53 (1982).
20. Zhao K.G., Blabla J., Helmcke J. *IEEE Trans.Instrum.Measur.*, **34**, 252 (1985).

S.N.Bagaev, A.M.Belkin, A.S.Dychkov, A.S.Efimov, V.A.Zhmud', D.B. Kolker, Yu.A.Matyugin, V.S.Pivtsov, S.A.Farnosov, NV.Fateev. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium.

A search is performed for a frequency reference in the 732-nm region, which is required to calibrate a laser spectrometer in experiments on precision measurements of the $1S - 2S$ transition frequency in muonium. The adequate reference is found in the absorption spectrum of molecular iodine vapours heated to 600 °C. The reference frequency is spaced less than 1 GHz from the spectrometer frequency tuned to the resonance in muonium