

Стабилизация частоты лазерного излучения методом Паунда–Древера–Холла с использованием акустооптического фазового модулятора, работающего в чистом режиме дифракции Рамана–Ната

В.Н.Барышев

Реализована частотная стабилизация излучения диодных лазеров методом Паунда–Древера–Холла с использованием нового акустооптического фазового модулятора, работающего в чистом режиме дифракции Рамана–Ната. Экспериментально показано, что, как и в случае спектроскопии насыщенного поглощения в атомных парах, пространственная расходимость составляющих частотно-модулированного спектра излучения на выходе такого модулятора не препятствует получению сигналов ошибки с использованием техники гетеродинной частотно-модуляционной спектроскопии с частотным дискриминатором на высокочастотном резонаторе Фабри–Перо с резкостью в несколько десятков тысяч.

Ключевые слова: диодный лазер, метод оптической гетеродинной частотно-модуляционной спектроскопии, метод лазерной частотной стабилизации Паунда–Древера–Холла, акустооптический модулятор, дифракция Рамана–Ната, резонатор Фабри–Перо.

1. Введение

Метод Паунда–Древера–Холла (ПДХ) является, без преувеличения, наиболее мощным инструментом частотной стабилизации современных лазеров [1]. В этом методе, который представляет собой дальнейшее развитие техники оптической гетеродинной частотно-модуляционной (ЧМ) спектроскопии [2, 3], используемой для фазочувствительного детектирования оптических резонансов, применяется высокоэффективный оптический частотный дискриминатор (интерферометр Фабри–Перо) и схема лазерной стабилизации на его основе.

Метод ПДХ прост, эффективен и заключается в гетеродинном детектировании резонансного излучения, отраженного из резонатора Фабри–Перо (РФП), и в получении сигнала ошибки для петель обратной связи, являющегося производной интенсивности этого излучения по частоте. В случае диодных лазеров электронная петля обратной связи по току инжекции диода может иметь спектральную ширину полосы подстройки, превышающую 10 МГц, что позволяет уменьшить спектральную ширину излучения диодных лазеров при привязке к высокочастотным РФП до субгерцевых величин [4]. Отметим, что возможность сужения линии генерации диодных лазеров с помощью фазовой автоподстройки по внешнему добротному интерферометру до единиц герц уже рассматривалась в [5] незадолго до внедрения гетеродинной частотно-модуляционной техники ПДХ или одновременно с ним.

В.Н.Барышев. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: baryshev@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2011 г., после доработки – 6 марта 2012 г.

В настоящей работе по частотной стабилизации диодных лазеров мы использовали метод ПДХ с новым образцом акустооптического модулятора, работающего в чистом режиме дифракции Рамана–Ната (АОМ-РН). Единственным неудобством при работе с АОМ-РН, да и то кажущимся, является пространственная расходимость составляющих частотно-модулированного спектра излучения на его выходе. Нами показано экспериментально, что, как и в случае спектроскопии насыщенного поглощения [6, 7], эта расходимость не препятствует получению сигналов ошибки методом ПДХ с частотным дискриминатором на высокочастотном резонаторе Фабри–Перо с резкостью в несколько десятков тысяч.

2. Экспериментальная установка и результаты эксперимента

Схема экспериментальной установки, которая использовалась для получения сигналов ошибки методом ПДХ, приведена на рис.1. В [6] было показано, что АОМ-РН может быть использован в качестве внешнего фазового модулятора в методе ПДХ для преобразования одночастотного излучения диодного лазера с внешним резонатором (ДЛВР) в частотно-модулированный спектр. В [7] был представлен новый образец АОМ-РН, функционирующего в чистом режиме дифракции Рамана–Ната. Как следует из [6, 7], его применение в качестве внешнего фазового модулятора имеет ряд преимуществ по сравнению со случаем, когда фазовым модулятором является электрооптический модулятор (ЭОМ). Получение сигналов ошибки с нужным наклоном их линейного, центрального, участка в широком частотном диапазоне достигается всего лишь простым варьированием частоты усиленного сигнала опорного ВЧ генератора, подаваемого на АОМ-РН, без изменения мощности сигнала. Сама же эта мощность, достаточная для того, чтобы отношение интенсивностей дифрагировавших пучков ± 1 -го и нулевого поряд-

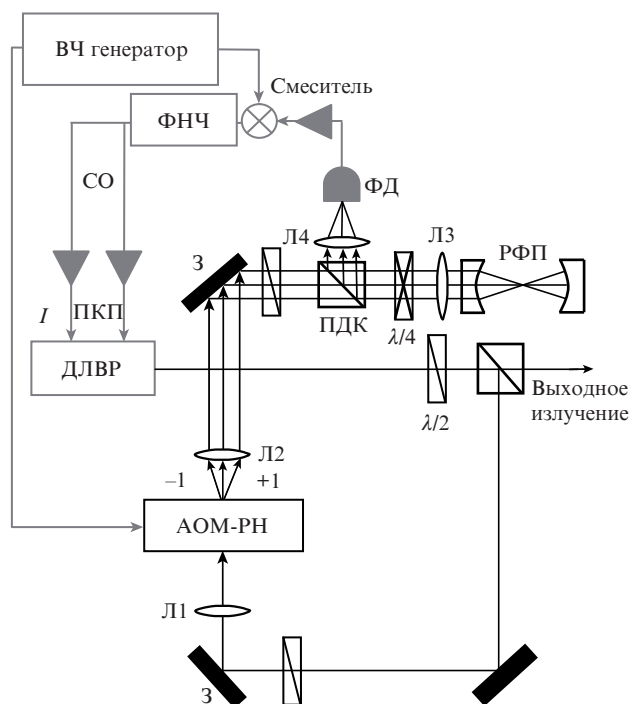


Рис.1. Схема экспериментальной установки. ДЛВР – диодный лазер с внешним резонатором; ПДК – поляризующий делительный кубик; $\lambda/2$, $\lambda/4$ – полуволновая и четвертьволновая пластинка; Л – линза; З – зеркало; ФД – фотодетектор; ФНЧ – фильтр низкой частоты; ПКП – пьезокерамический преобразователь; I – ток инжекции лазерного диода; РФП – резонатор Фабри–Перо; СО – сигнал ошибки.

ков составляло несколько процентов, не превышала 100 мВт. Отсутствие необходимости контроля поляризаций входного и выходного излучений с целью устранения остаточного амплитудного шума, обусловленного тем, что существующие ЭОМ не генерируют ЧМ спектр в чистом виде, упрощает экспериментальную конструкцию. Пространственная расходимость выходного излучения АОМ-РН, т.е. пучков, соответствующих несущей и ближайшим боковым составляющим ± 1 -го дифракционного порядка, не представляла собой серьезного препятствия или неудобства при получении сигналов ошибки, соответствующих резонансам насыщенного поглощения в насыщенных парах атома цезия [7]. В настоящей работе будет показано, что расходимость выходного излучения АОМ-РН также не является препятствием в более сложном в экспериментальном смысле случае получения сигналов ошибки, соответствующих резонансам высокодобротных резонаторов Фабри–Перо, используемых в качестве частотных дискриминаторов в ЧМ спектроскопии ПДХ.

АОМ-РН, разработанный во ВНИИФТРИ, имел длину акустооптического взаимодействия 2 мм, центральную частоту модуляции около 30 МГц и полосу модуляции 20 МГц и обеспечивал ЧМ спектр излучения одномодового ДЛВР на длине волны 689 нм. Отметим, что излучение на данной длине волны в оптических стандартах частоты на атомах стронция (^{87}Sr , ^{88}Sr) в оптической решетке используется на второй стадии охлаждения атомов на узком $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ -переходе [8, 9]. Естественная ширина этого перехода равна 7.5 кГц, и поэтому мгновенная спектральная ширина излучения ДЛВР должна быть того же порядка, что требует его частотной стабилизации по высокодобротно-

му оптическому резонатору с помощью метода ПДХ. Долговременная стабильность ДЛВР может быть обеспечена посредством ЧМ спектроскопии насыщенного поглощения в парах атомов Sr опять же с АОМ-РН в качестве фазового модулятора [7].

Итак, выходной спектр АОМ-РН (см. рис.1) состоит из сигнала несущей на частоте ω_{ECDL} и двух боковых составляющих, соответствующих ± 1 -му порядку дифракции, на частотах $\omega_{\text{ECDL}} \pm \Omega$, где Ω – частота модуляции АОМ-РН [7]. Точная юстировка положения АОМ-РН не является необходимой, поскольку особенность дифракции Рамана–Ната заключается в том, что при достаточно малой длине акустооптического взаимодействия она происходит при любом угле падения света на акустический пучок (в отличие от дифракции Брэгга, которая происходит только при определенном угле падения оптической волны, удовлетворяющем условию Брэгга). При помещении АОМ-РН в телескопическую систему, образуемую линзами Л1 и Л2 (рис. 1), излучение, приходящее на конфокальный РФП, представляет собой три коллимированных и параллельных друг другу пучка. Согласующая линза Л3 фокусирует входное излучение приблизительно в точку, находящуюся посередине между зеркалами РФП. В качестве частотного дискриминатора использовался коммерческий конфокальный РФП SA200-5B (Thorlabs) с величиной резкости $F \approx 200$ и межмодовым расстоянием $\Delta F_{\text{FSR}} = 1.5$ ГГц. Идентичные сферические зеркала, формирующие этот резонатор, отстоят друг от друга на расстояние, равное радиусу кривизны зеркал. Мощность пучка излучения, приходящего на РФП и имеющего размер 2 мм в горизонтальной плоскости, в которой лежат все три параллельных световых пучка, равна 1.25 мВт. Отраженное от РФП излучение с помощью четвертьволновой пластинки, поляризующего делительного кубика и собирающей линзы Л4 отклоняется и фокусируется на быстрый фотодетектор.

Излучение, приходящее на фотодетектор, есть сумма нескольких световых пучков: трех пучков, соответствующих ЧМ спектру выходного излучения АОМ-РН, не вошедших в резонатор, а отраженных от входного зеркала РФП и отраженного из РФП пучка, который является частью стоячей световой волны, сформированной внутри РФП при согласовании частоты любой из спектральных составляющих с резонансной частотой резонатора. Полоса пропускания РФП $\Delta F_{\text{FSR}}/F$ составляла 7.5 МГц, полная мощность излучения, пришедшего на фотодетектор, была равна 0.88 мВт. Оптическая волна на несущей частоте лазера ω_{ECDL} при согласовании с резонансной частотой РФП образует на этой частоте внутрирезонаторную стоячую волну. Поскольку входное зеркало РФП не является совершенным отражателем, часть стоячей волны проникает через это зеркало навстречу падающему на резонатор излучению. Вышедшая назад из резонатора волна и волна, отраженная от входного зеркала, имеют на частоте несущей равные амплитуды и находятся в противофазе, что приводит к их полной компенсации при точном резонансе и к обнулению сигнала биений на частоте Ω модуляции АОМ-РН, формируемого на фотодетекторе. Гетеродинное по отношению к сигналу опорного ВЧ генератора детектирование сигнала биений дает сигнал ошибки, несущий частотную и фазовую информацию о лазерном излучении и имеющий форму, соответствующую синфазной компоненте ($\sin \Omega t$ -компонента) сигнала биений [2, 3, 7].

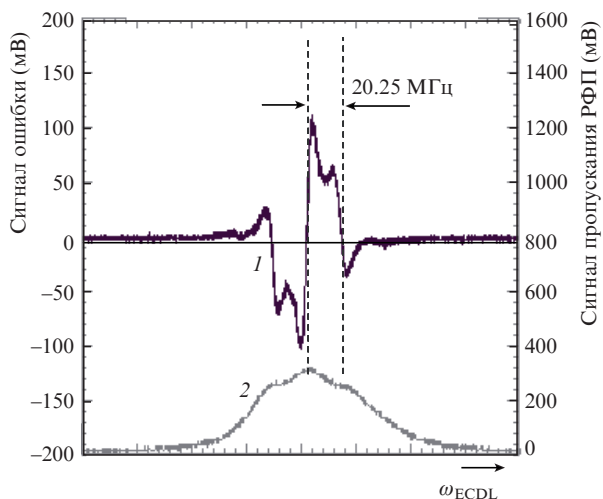


Рис.2. Сигнал ошибки (1) и сигнал пропускания конфокального РФП (2), записанные одновременно при сканировании частоты ДЛВР ω_{ECDL} . Частота модуляции Ω АОМ-РН равна 20.25 МГц.

На рис.2 приведены сигнал ошибки и сигнал пропускания РФП, записанные одновременно при сканировании частоты лазера ω_{ECDL} , которое осуществлялось подачей пилообразного напряжения на пьезокерамический преобразователь, контролирующей длину внешнего резонатора ДЛВР. Частота модуляции АОМ-РН Ω была равна 20.25 МГц. Сигнал пропускания снимался с фотодиода, находящегося за выходным зеркалом РФП. Кривая 2 состоит из трех полос пропускания, которые соответствуют трем резонансам, формируемым поочередно на частотах боковой, несущей и другой боковой составляющих спектра входящего в РФП излучения. Ширины этих трех полос зависят не только от собственного разрешения РФП, но и от частоты модуляции Ω и скорости сканирования частоты ДЛВР. При записи данных рис.3 частота модуляции была увеличена до 47.09 МГц, параметры сканирования не изменялись. При непрерывном изменении частоты модуляции от 20 до 50 МГц знак наклона сигнала ошибки последовательно и периодически изменялся несколько раз. В этом же диапазоне частоты

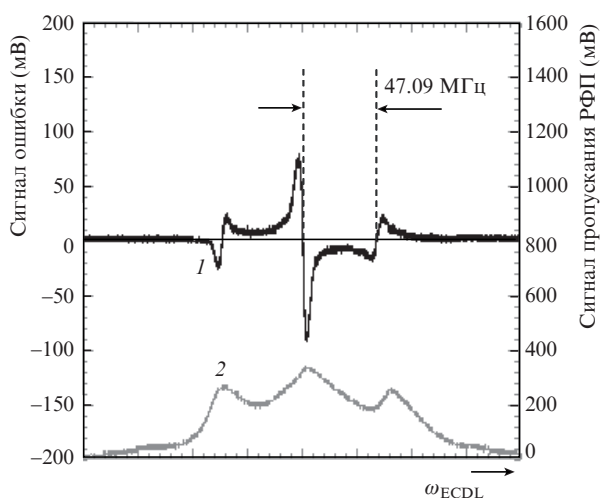


Рис.3. Сигнал ошибки (1) и сигнал пропускания конфокального РФП (2), записанные одновременно при сканировании частоты ДЛВР ω_{ECDL} . Частота модуляции Ω АОМ-РН равна 47.09 МГц.

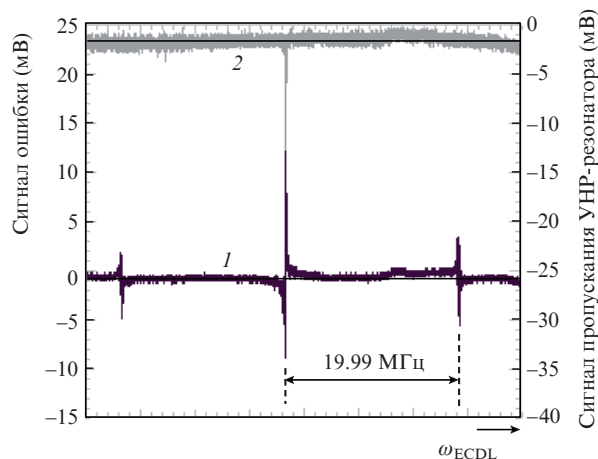


Рис.4. Сигнал ошибки (1) и сигнал пропускания высокодобротного УНР-резонатора (2), записанные одновременно при сканировании частоты ДЛВР ω_{ECDL} . Частота модуляции Ω АОМ-РН равна 19.99 МГц.

модуляции также возможно многократное получение сигналов ошибки с нулевым фоном, как это показано на рис.2 и 3.

Поскольку величина сигнала биений на фотодетекторе пропорциональна среднему геометрическому мощностей несущей P_c и какой-либо из боковых составляющих P_s , то, изменяя мощность сигнала опорного ВЧ генератора, подаваемого на АОМ-РН, можно максимизировать сигнал ошибки и увеличить наклон его центрального участка. В пренебрежении всеми другими порядками дифракции, кроме первого, т.е. при полной мощности излучения ДЛВР $P_0 = P_c + 2P_s$, величина $(P_c P_s)^{1/2}$ будет максимальной при $P_s/P_c = 1/2$ и $P_s = 1/4P_0$. Такое соотношение между мощностью, отводимой в первый порядок дифракции АОМ-РН, и мощностью несущей в несколько раз превышает их же соотношение, составлявшее несколько процентов и оказавшееся недостаточным для реализации спектроскопии насыщенного поглощения в парах атома цезия [6, 7]. Это соотношение не является критичным для функционирования АОМ-РН.

В той же экспериментальной конфигурации, приведенной на рис.1, в качестве частотного дискриминатора использовался ультрастабильный и сверхдобротный РФП с резкостью $F \approx 60000$ и межмодовым расстоянием $\Delta F_{FSR} = 1.92$ ГГц. Оптические элементы такого резонатора выполнены из материала с ультранизким коэффициентом теплового расширения (УНР-резонатор). Описание конструкции данного резонатора, являющегося частью оптической системы создаваемого в настоящее время во ВНИИФТРИ оптического стандарта частоты на атомах стронция в оптической решетке, как и описание самого стандарта, последует в будущих публикациях. Сигнал ошибки с нулевым фоном (кривая 1 на рис.4) был использован для частотной стабилизации ДЛВР по резонансу этого сверхдобротного РФП. Часть излучения на выходе АОМ-РН, состоящего, как и прежде, из несущей и двух боковых составляющих первого дифракционного порядка, заводилась в одномодовое и сохраняющее поляризацию оптоволокно и направлялась на УНР-резонатор (рис.5). Частота модуляции АОМ-РН была равна 19.99 МГц, суммарная мощность световых пучков на выходе оптоволокна составляла 0.34 мВт. При сканировании частоты ДЛВР ω_{ECDL} на кривой 1 можно видеть три обла-

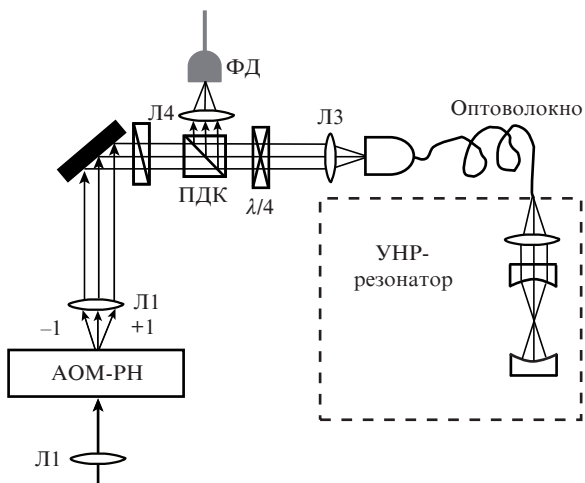


Рис.5. Часть схемы экспериментальной установки с оптоволокном и УНР-резонатором (резкость 60000).

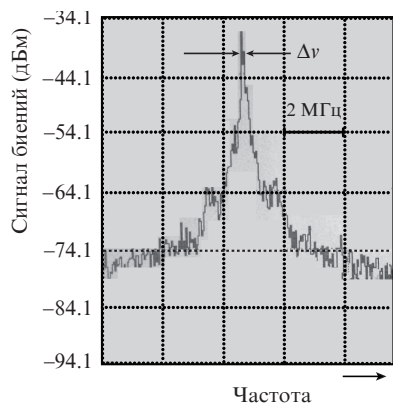


Рис.6. Сигнал биений излучения двух ДЛВР, стабилизированных в отдельности по резонансам резонаторов Фабри–Перо SA200-5В и УНР.

сти, в которых сигнал ошибки имеет вид дисперсионной кривой, формируемые при поочередном совпадении частот верхней боковой составляющей, несущей и нижней боковой составляющей с резонансной частотой УНР-резонатора (кривая 2 на рис.4).

На рис.6 представлен сигнал биений на частоте 520 МГц излучения двух ДЛВР, стабилизированных в отдельности по резонансам резонаторов Фабри–Перо SA200-5В и УНР. Полная ширина на полувысоте данного сигнала биений $\Delta\nu$, не превышающая 100 кГц, определяется главным образом шириной спектра излучения ДЛВР, стабилизированного по РФП SA200-5В. Оба этих прибо-

ра размещались на оптическом столе, не изолированном от внешних механических и акустических воздействий. Ширина спектра излучения ДЛВР в режиме свободной генерации превышает 1 МГц.

3. Заключение

Настоящая статья завершает серию работ, посвященных экспериментальной демонстрации и обоснованию применения АОМ-РН в качестве фазового модулятора в частотно-модуляционной гетеродинной спектроскопии оптических резонансов, таких как резонансы насыщенного поглощения и узкие резонансы когерентного пленения населенности. Метод ПДХ с новым образцом акустооптического модулятора АОМ-РН, работающим в чистом режиме дифракции Рамана–Ната, использован нами в качестве оптического фазового модулятора для частотной стабилизации диодных лазеров. Экспериментально показано, что расходимость выходного излучения АОМ-РН, т. е. пучков, соответствующих несущей и ближайшим боковым составляющим ± 1 -го дифракционного порядка, не является препятствием и в более сложном в экспериментальном отношении случае получения сигналов ошибки, соответствующих резонансам высокочастотных резонаторов Фабри – Перо. АОМ-РН, разработанный для использования в качестве внешнего фазового модулятора в частотно-модуляционной спектроскопии и имеющий такие преимущества перед электрооптическим модулятором, как компактность, низкое энергопотребление, широкий диапазон частот модуляции, отсутствие контроля поляризации входного и выходного излучения, для этой цели и в таком конструктивном исполнении никогда и никем ранее не применялся. С появлением этого устройства арсенал средств, используемых в качестве внешних фазовых модуляторов в лазерной спектроскопии, расширился.

1. Drever R.W., Hall J.L., Kovalski F.V., Hough J., Ford G.M., Munley A.J., Ward H. *Appl. Phys. B*, **31**, 97 (1983).
2. Bjorklund G., Levenson M., Lenth W., Ortiz C. *Appl. Phys. B*, **32**, 145 (1983).
3. Bjorklund G.C. *Opt. Lett.*, **5**, 15 (1980).
4. Notcutt M., Ma L.-S., Ye J., Hall J.L. *Opt. Lett.*, **30**, 1815 (2005).
5. Беленов Э.М., Величанский В.Л., Зибров А.С., Никитин Н.Н., Саутенков В.А., Усков А.В. *Квантовая электроника*, **10** (6), 1232 (1983).
6. Барышев В.Н., Домнин Ю.С., Копылов Л.Н. *Квантовая электроника*, **37** (11), 1006 (2007).
7. Барышев В.Н., Епихин В.М. *Квантовая электроника*, **40** (5), 431 (2010).
8. Katori H., Ido T., Isoya Y., Kuwata-Gonokami M. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 1116 (1999);
9. Mukaiyama T., Katori H., Ido T., Li Y., Kuwata-Gonokami M. *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 113002 (2003).