

# Фазочувствительное детектирование оптических резонансов с использованием акустооптического модулятора в режиме дифракции Рамана – Ната

В.Н.Барышев, Ю.С.Домнин, Л.Н.Копылов

*Представлен новый метод частотной стабилизации диодного лазера с внешним резонатором без непосредственной модуляции тока инжекции. Метод оптической гетеродинной спектроскопии Паунда – Древера, или метод подстройки частоты по частотно-модулированным боковым составляющим, в котором в качестве внешнего фазового модулятора используется акустооптический модулятор, функционирующий в режиме дифракции Рамана – Ната, может применяться для получения сигналов ошибки при частотной автоподстройке диодного лазера к резонансам насыщенного поглощения внутри D<sub>2</sub>-линии атома цезия или к резонансам оптического резонатора.*

**Ключевые слова:** диодный лазер, метод Паунда – Древера, акустооптический модулятор, дифракция Рамана – Ната.

## 1. Введение

Уменьшение частотных шумов полупроводниковых лазеров является насущной задачей в различных областях науки и техники, например таких, как нелинейная лазерная спектроскопия, метрология микроволновых и оптических квантовых стандартов частоты на холодных атомах, стабилизация и калибровка фемтосекундных гребенок оптических частот. Ширина спектра излучения нестабилизированного диодного лазера с внешним резонатором (ДЛВР) составляет примерно несколько мегагерц и обусловлена механическими и акустическими вибрациями внешнего резонатора. Подобные частотные флуктуации могут быть устранены посредством электронной обратной связи по току инжекции лазерного диода (ЛД). Для получения сигналов ошибки в экстремально высокоскоростных петлях обратной связи в настоящее время применяется общепринятый метод частотно-модулированных (ЧМ) боковых составляющих, или метод Паунда – Древера [1, 2], в котором электрооптический модулятор (ЭОМ) используется в качестве внешнего фазового модулятора.

Было обнаружено [3], что акустооптический модулятор (АОМ), функционирующий в режиме Рамана – Ната, может быть использован в качестве внешнего фазового модулятора в методе ЧМ боковых составляющих Паунда – Древера для разложения входного одномодового излучения ЛД в частотно-модулированный и пространственно разнесенный оптический спектр. При синусоидальной модуляции и нормальном падении входного излучения АОМ может применяться для генерации частотных боковых составляющих, расположенных в пространстве симметрично относительно оптического пучка несущей частоты. Синусоидальная модуляция на частоте акустической волны  $\Omega$  приводит к генерации кратных  $\Omega$  час-

тотных боковых составляющих вокруг центральной оптической частоты  $\omega$ . Электрическое поле  $E$  оптического пучка после его прохождения через АОМ описывается известной формулой [4]

$$E = E_0 \exp\{i[\omega t + m \sin(\Omega t)]\} = E_0 \left[ \sum_{k=0}^{\infty} J_k(m) \exp(ik\Omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_k(m) \exp(-ik\Omega t) \right] \exp(i\omega t).$$

Спектр модулированного по фазе электрического поля определяется функциями Бесселя. Амплитуда  $k$ -й боковой составляющей с частотой  $\omega + k\Omega$  пропорциональна  $J_k(m)$ , где  $J_k(m)$  – функция Бесселя  $k$ -го порядка, а  $m$  – индекс модуляции. Угол дифракции  $\vartheta_k$  для  $k$ -й боковой составляющей определяется из соотношения  $\sin \vartheta_k = k\lambda/L$ , где  $\lambda$  и  $L$  – соответственно световая и акустическая длины волн.

В настоящей работе описывается новый метод частотной стабилизации ДЛВР без непосредственной модуляции тока инжекции. Метод Паунда – Древера, или метод подстройки частоты по ЧМ боковым составляющим, в котором АОМ, функционирующий в режиме дифракции Рамана – Ната, используется в качестве внешнего фазового модулятора, применяется для получения сигналов ошибки в экстремально высокоскоростных электронных петлях обратной связи при частотной автоподстройке ДЛВР к резонансам насыщенного поглощения внутри D<sub>2</sub>-линии поглощения атомов цезия или к резонансам высокочастотного оптического резонатора.

## 2. Экспериментальная установка и результаты

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Лазерные диоды SDL-5422 (США) и IDL150S-850 (НИИ «Полнос», Россия) с внешним резонатором, образованным дифракционной решеткой в конфигурации Литтрова, обеспечивали перестраиваемое одночастотное излучение на  $\lambda = 851$  нм. В качестве модулятора использо-

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

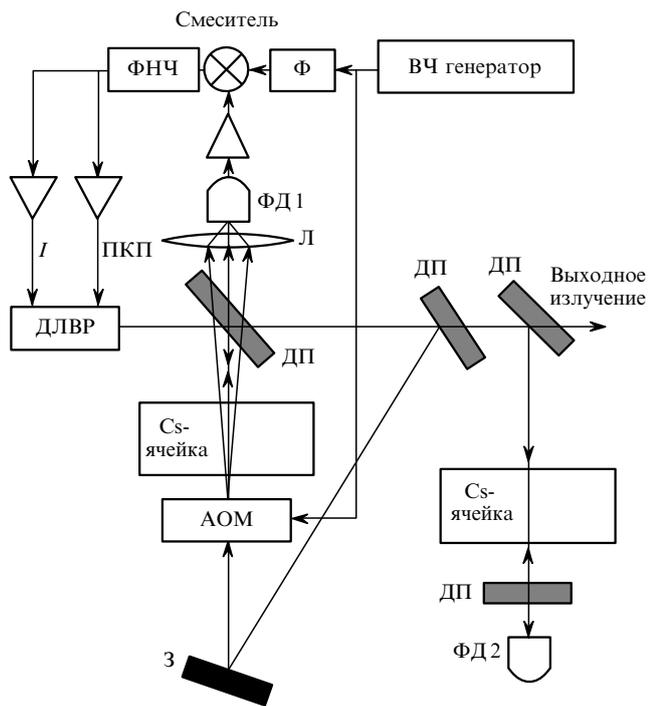


Рис.1. Схема экспериментальной установки: ПКП – пьезокерамический преобразователь; Ф – фазовращатель; ДП – делительные пластинки; Л – линза; З – зеркало; ФД1, ФД2 – фотодетекторы; ФНЧ – фильтр низкой частоты;  $I$  – ток инжекции.

вался акустооптический модулятор ISOMET 1205-C2 с центральной рабочей частотой 80 МГц и полосой модуляции 40 МГц, на который подавался сигнал (мощностью 40 мВт) от ВЧ генератора с частотой (варьируемой в пределах 30–40 МГц), гораздо большей естественной ширины (5 МГц) оптических переходов внутри  $D_2$ -линии поглощения атомов цезия.

Выходное излучение АОМ, представляющее собой спектрально и пространственно разнесенные световые пучки, использовалось в качестве пробного в спектроскопии насыщенного поглощения в магнитно-экранированной ячейке с насыщенными парами цезия при комнатной температуре и фокусировалось на быстрый фотодетектор ФД1. При выбранных параметрах модуляции и соответствующей юстировке входного оптического пучка излучение на выходе из АОМ состояло только из трех пучков, соответствовавших несущей и двум ближайшим боковым составляющим  $\pm 1$ -го дифракционного порядка с углом дифракции  $\vartheta_{\pm 1} \approx \pm 0.5^\circ$ . Отношение мощности каждой из боковых составляющих  $\pm 1$ -го дифракционного порядка к мощности несущей составляющей перед входным окошком цезиевой ячейки  $P_{\pm}/P_0 = 65 \text{ мкВт}/1.75 \text{ мВт} \approx 0.04$ .

Высокочастотные биения гетеродинно детектировались на смесителе (Mini-Circuits SRA-1), выходной постоянный сигнал которого использовался как сигнал ошибки в цепи быстрой электронной обратной связи. На рис.2 и 3 показаны сигналы ошибки с дисперсионной формой и нулевым фоновым уровнем, полученные при сканировании частоты ДЛВР по доплеровскому контуру  $D_2$ -линии поглощения атома цезия и совпадении ее с частотами оптических переходов  $(6S_{1/2}, F = 4) - (6P_{3/2}, F' = 3, 4, 5)$ , где  $F$  и  $F'$  – полные угловые моменты атома цезия в основном и возбужденном состояниях соответственно. В

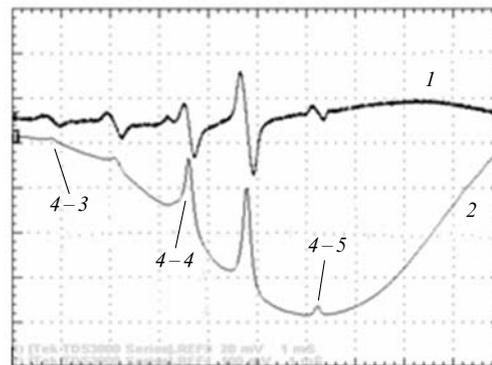


Рис.2. Осциллограммы сигнала ошибки (1) и сигнала насыщенного поглощения в области  $D_2$ -линии атома цезия (переход  $(6S_{1/2}, F = 4) - (6P_{3/2}, F' = 3, 4, 5)$ ) (2), записанного одновременно с сигналом 1 на ФД 2. Частота модуляции равна 30.1 МГц.

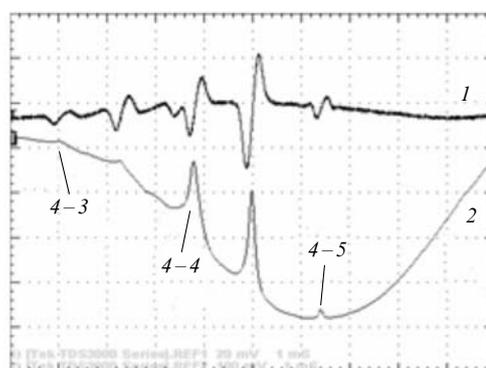


Рис.3. Осциллограммы сигнала ошибки (1) и сигнала насыщенного поглощения в области  $D_2$ -линии атома цезия (переход  $(6S_{1/2}, F = 4) - (6P_{3/2}, F' = 3, 4, 5)$ ) (2), записанного одновременно с сигналом 1 на ФД 2. Частота модуляции равна 34.3 МГц.

ходе записи этих осциллограмм изменялся единственный экспериментальный параметр – частота модуляции, составлявшая 30.1 и 34.3 МГц. При фиксированной частоте модуляции одновременное изменение формы и наклона сигналов ошибки достигается регулировкой фазового соотношения между входными сигналами смесителя. Эта регулировка выполняется простым изменением длины ВЧ кабеля, соединяющего смеситель и ВЧ генератор. Вторая, низкочастотная петля обратной связи использовалась для компенсации медленных дрейфов, вызванных температурными и механическими возмущениями. Усиленный и проинтегрированный выходной сигнал смесителя направлялся на пьезокерамический преобразователь, контролирующий пространственное положение дифракционной решетки.

Отметим, что метод ЧМ боковых составляющих, в котором АОМ используется в качестве внешнего фазового модулятора, дает тот же отклик на присутствие источников шума, уменьшающих его чувствительность, как и в работе [2]. Одним из нежелательных эффектов является наличие остаточного амплитудного шума, обусловленного тем, что существующие фазовые модуляторы не генерируют ЧМ спектр в чистом виде. Незначительный дисбаланс в амплитудах боковых составляющих или их относительный фазовый сдвиг могут препятствовать точному обнулению сигнала биений на фотодетекторе. Такая остаточная амплитудная модуляция может быть протектирована на фотодетекторе и даст ненулевой

фон, уровень которого может флуктуировать вместе с флуктуациями мощности лазерного излучения. В случае, когда в качестве внешнего фазового модулятора используется ЭОМ, этот шум может быть минимизирован обеспечением точного совпадения поляризаций входного и выходного излучений, для того чтобы сбалансировать мощности боковых составляющих, а также регулировкой относительной фазы входных сигналов смесителя для минимизации смещения фона из-за остаточного амплитудного шума. В нашем случае мы вообще не заботились о поляризациях излучения на входе в АОМ и на выходе из него. Баланс боковых составляющих и обнуление фона достигаются простым вращением АОМ в горизонтальной плоскости и подстройкой частоты ВЧ генератора.

После некоторых изменений в схеме экспериментальной установки, главным образом вследствие замены ВЧ кабелей, мы обнаружили то же самое поведение системы (см. рис.2, 3), но уже при частотах модуляции 23.8 и 26.8 МГц, в частотной области, где эффективность функционирования АОМ в режиме как дифракции Брэгга, так и дифракции Рамана–Ната даже ниже, чем при частотах модуляции в случае, описанном выше (рис.4, 5).

Более того, о высокой чувствительности метода говорит тот факт, что мы получили сигналы ошибки на частотах (около 10 МГц), на которых АОМ вообще не используется в режиме дифракции Брэгга. В этом случае боковые составляющие первого порядка в режиме диф-

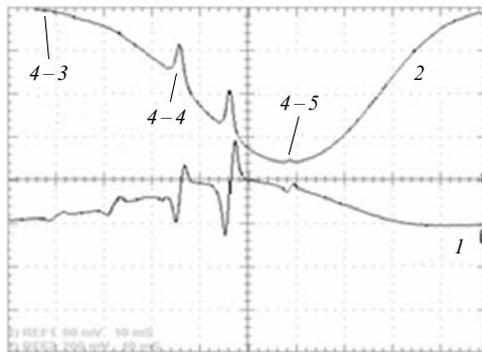


Рис.4. Осциллограммы сигнала ошибки (1) и сигнала насыщенного поглощения в области  $D_2$ -линии атома цезия (переход ( $6S_{1/2}, F=4$ ) – ( $6P_{3/2}, F'=3, 4, 5$ )) (2), записанного одновременно с сигналом 1 на ФД 2. Частота модуляции равна 23.8 МГц.

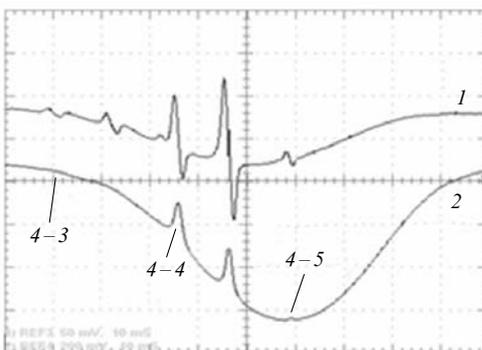


Рис.5. Осциллограммы сигнала ошибки (1) и сигнала насыщенного поглощения в области  $D_2$ -линии атома цезия (переход ( $6S_{1/2}, F=4$ ) – ( $6P_{3/2}, F'=3, 4, 5$ )) (2), записанного одновременно с сигналом 1 на ФД 2. Частота модуляции равна 26.8 МГц.

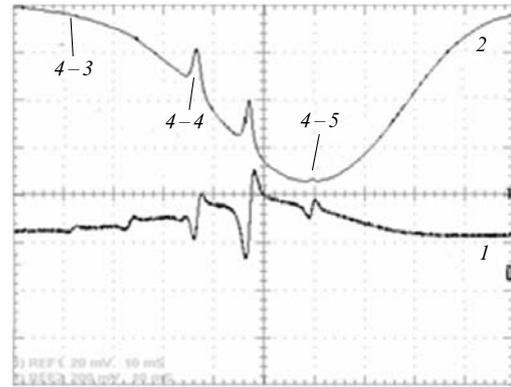


Рис.6. Осциллограммы сигнала ошибки (1) и сигнала насыщенного поглощения в области  $D_2$ -линии атома цезия (переход ( $6S_{1/2}, F=4$ ) – ( $6P_{3/2}, F'=3, 4, 5$ )) (2), записанного одновременно с сигналом 1 на ФД 2. Частота модуляции равна 12.2 МГц.

ракции Рамана–Ната также почти исчезают. Однако они все еще достаточно интенсивны для того, чтобы использовать метод ЧМ спектроскопии при таких низких частотах модуляции (рис.6 и 7). Следовательно, изменяя лишь частоты модуляции в области 10–40 МГц без изменения мощности сигнала, подаваемого на АОМ, мы можем легко различить два режима ЧМ спектроскопии: когда частота модуляции настолько высока, что только одна боковая составляющая эффективно взаимодействует с поглощающей средой [2], или когда расстояние между боковыми составляющими сравнимо с шириной внутридоплеровских резонансов [1].

Поскольку мы вынуждены экранировать детектирующие узлы электронной системы от воздействия ВЧ электромагнитного излучения, рассеянного, например, мощным усилителем, запитывающим АОМ, то использование более низких частот модуляции кажется предпочтительным.

Для подстройки частоты ДЛВР к максимуму линии насыщенного поглощения было решено использовать в системе частотной автоподстройки две электронные петли обратной связи: медленную и быструю. Роль медленной, узкополосной петли заключается в подавлении низкочастотных шумов, вызванных внешними акустическими и механическими воздействиями, и в устранении медленных температурных дрейфов длины резонатора ДЛВР с помощью контроля напряжения, подаваемого на пьезо-

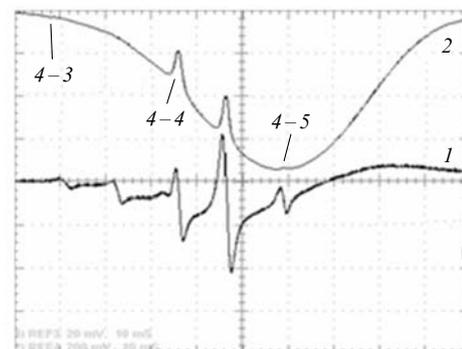


Рис.7. Осциллограммы сигнала ошибки (1) и сигнала насыщенного поглощения в области  $D_2$ -линии атома цезия (переход ( $6S_{1/2}, F=4$ ) – ( $6P_{3/2}, F'=3, 4, 5$ )) (2), записанного одновременно с сигналом 1 на ФД 2. Частота модуляции равна 11.2 МГц.

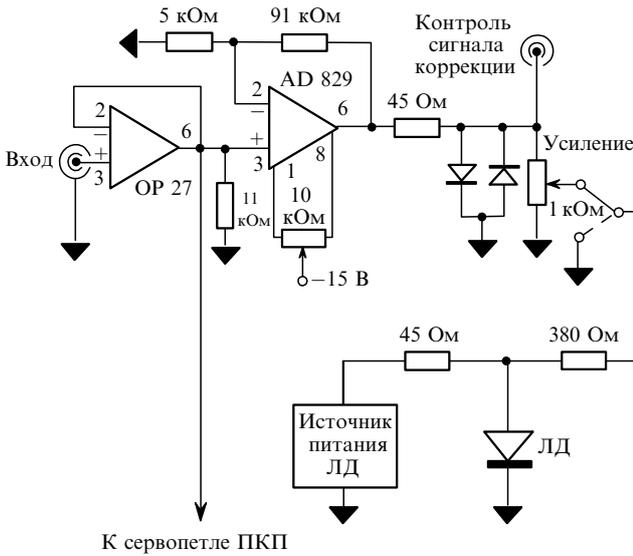


Рис.8. Электрическая схема петли обратной связи по току инжекции ЛД.

зокерамический преобразователь. Быстрая же петля с широкой (в нашем случае 6 МГц на уровне 3 дБ) полосой подстройки имеет на выходе сигнал коррекции, который суммируется с током источника питания ЛД.

На рис.8 показана упрощенная принципиальная схема петли обратной связи по току инжекции ЛД. Прошедший через фильтр низкой частоты с целью устранения остаточных сигналов на частоте ВЧ генератора и ее второй гармоники выходной сигнал смесителя, который является сигналом ошибки нашей системы частотной автоподстройки, подается на входы обеих петель обратной связи. Мы имеем возможность варьировать наклон сигнала ошибки. Это достигается простым изменением частоты ВЧ генератора. Кроме того, можно изменять наклон сигнала коррекции петли, контролирующей пространственное положение дифракционной решетки. В результате этого достигается правильное соотношение наклонов сигналов коррекции тока инжекции и напряжения источника питания пьезокерамического преобразователя.

Чтобы определить оптимальное усиление выходного сигнала коррекции быстрой петли подстройки по току инжекции ЛД, мы провели спектральный фурье-анализ (Fast Fourier Transform (FFT) – измерительный режим работы осциллографа Tektronix 3014В) сигналов коррекции медленной и быстрой петель обратной связи. Когда частота лазера была настроена на пик оптического резонанса и петля обратной связи по току инжекции ЛД была разомкнута, мы намеренно усиливали сигнал коррекции медленной петли до тех пор, пока пьезокерамический преобразователь не начал осциллировать на частоте, близкой к 1.5 кГц, и в спектре обоих анализируемых сигналов коррекции не появлялись шумовые частотные составляющие, обусловленные возбуждением петли (рис.9 и 10, кривые 1). Замкнув быструю сервопетлю и постепенно увеличивая (от нуля) сигнал коррекции тока инжекции ЛД, мы наблюдали широкополосное подавление этих шумов (рис.9 и 10, кривые 2).

Таким образом, сигнал ошибки является превосходным индикатором уровня и спектральных характеристик компенсируемых шумов, а также ширины полосы подстройки петель обратной связи. Так, например, на частоте

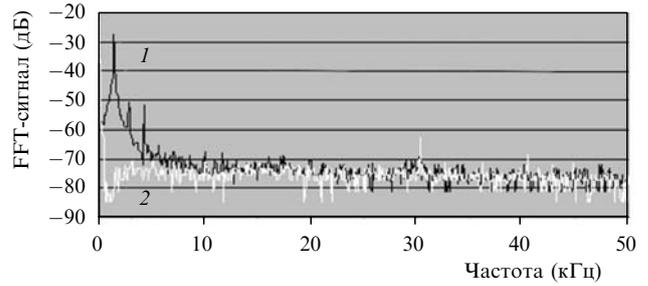


Рис.9. Спектр сигнала коррекции петли обратной связи по напряжению пьезокерамического преобразователя при разомкнутом (1) и замкнутом (2) состояниях петли обратной связи по току инжекции ЛД. Частота модуляции АОМ равна 40 МГц.

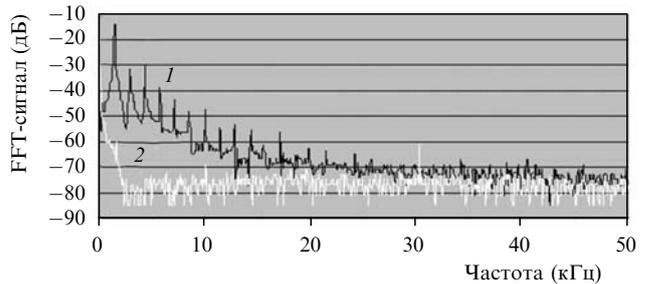


Рис.10. Спектр сигнала коррекции петли обратной связи по току инжекции ЛД при разомкнутом (1) и замкнутом (2) ее состояниях. Частота модуляции АОМ равна 40 МГц.

модуляции 39.6 МГц в спектре сигнала коррекции быстрой петли (рис.11, кривая 1) помимо шумов, вызванных осцилляциями в медленной петле, на частоте, близкой к 400 кГц, можно наблюдать шумовую составляющую (на рис. 11 отмечена стрелкой), которая подавлялась при замыкании быстрой петли (кривая 2).

В настоящее время мы располагаем только одной лазерной системой, описанной в данной статье, и поэтому не можем достоверно оценить ширину спектра выходного излучения ДЛВР. Анализ спектра сигнала биений частот излучений нашей лазерной системы и коммерческой лазерной системы DL 100 (Тортиса, ФРГ) при повторении вышеописанной процедуры, т. е. при намеренном возбуждении медленной сервопетли (приводящем к появлению в спектре биений частотных составляющих в полосе до 10 МГц относительно частоты центрального сигнала биений, имевшего ширину около 2 МГц на уровне 3 дБ) с последующим замыканием быстрой петли и подавлением наведенных составляющих, показал, что ширина полосы подстройки нашей лазерной системы может составлять несколько мегагерц. Лазерная система DL

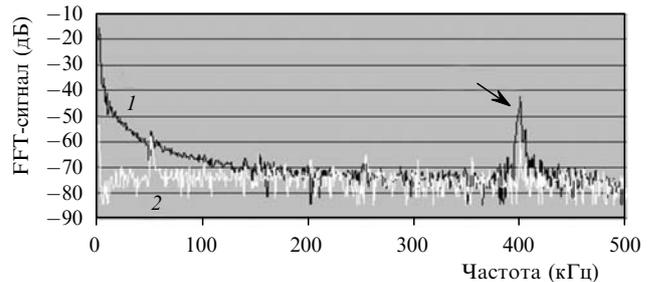


Рис.11. Спектр сигнала коррекции петли обратной связи по току инжекции ЛД при разомкнутом (1) и замкнутом (2) ее состояниях. Частота модуляции АОМ равна 39.6 МГц.

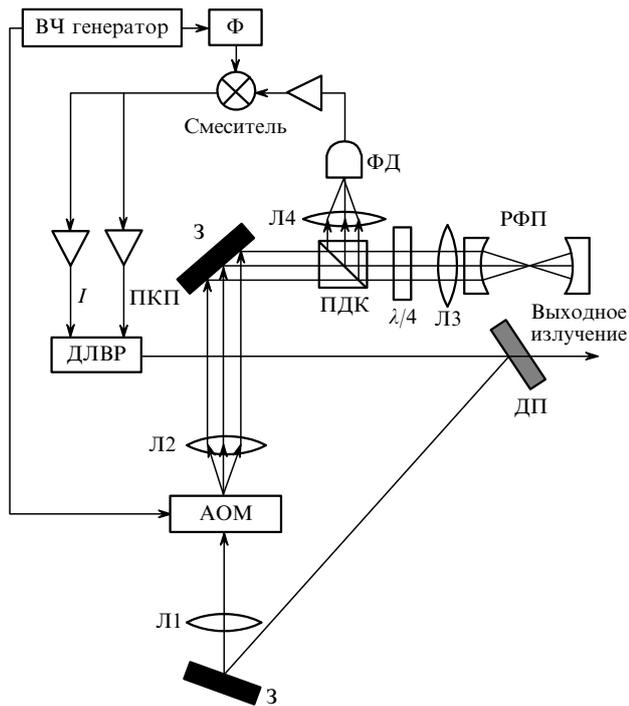


Рис.12. Предлагаемая схема экспериментальной установки с резонатором Фабри – Перо в качестве частотного дискриминатора: ПКП – пьезокерамический преобразователь; Ф – фазовращатель; ДП – делительная пластинка; ПДК – полярирующий делительный кубик; Л1–Л4 – линзы; ФД – фотодетектор; РФП – резонатор Фабри – Перо;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка; 3 – зеркала;  $I$  – ток инжекции.

100 также представляет собой диодный лазер с внешним резонатором, образованным дифракционной решеткой, и модуляцией тока инжекции диода на частотах вплоть до 14 кГц.

По нашему мнению, пространственная расходимость выходного излучения АОМ, т. е. пучков, соответствующих несущей и ближайшим боковым составляющим  $\pm 1$ -го дифракционного порядка, не является серьезным препятствием для того, чтобы использовать резонансы высокочастотного конфокального резонатора Фабри – Перо (вместо атомных резонансов) в качестве частотных

дискриминаторов в ЧМ спектроскопии Паунда – Дривера. На рис.12 показана схема экспериментальной установки, которую мы использовали для получения входных сигналов смесителя в этом случае. При подходящих фокусных расстояниях линз Л1 и Л2, формирующих телескопическую систему с АОМ в пространстве между ними, входное излучение резонатора представляет собой три коллимированных и параллельных друг другу пучка, соответствующих несущей и боковым составляющим  $\pm 1$ -го дифракционного порядка. Варьируя, как делали это прежде, частоту модуляции АОМ, мы опять наблюдали изменение наклона сигналов ошибки на различных частотах в области 10–40 МГц.

### 3. Заключение

Проведено фазочувствительное детектирование атомных резонансов методом ЧМ спектроскопии Паунда – Дривера, в котором используется АОМ, функционирующий в режиме дифракции Рамана – Ната. Представленный простой и эффективный метод подстройки частоты по ЧМ боковым составляющим с использованием АОМ в качестве внешнего фазового модулятора может применяться для получения сигналов ошибки (в широком диапазоне частот АОМ) в экстремально высокоскоростных электронных петлях отрицательной обратной связи по току инжекции при частотной автоподстройке ДЛВР к атомным оптическим резонансам или к резонансам высокочастотного оптического резонатора. Метод позволяет избежать проблем с частотными шумами, вносимыми при непосредственной частотной модуляции тока инжекции ЛД, а также увеличить полосу подстройки петли обратной связи по току инжекции (в мегагерцевом диапазоне) и, следовательно, сузить ширину спектра излучения лазера.

1. Drever R., Hall J., Kovalski F., Hough J., Ford G., Munley A., Ward H. *Appl. Phys. B*, **31**, 97 (1983).
2. Bjorklund G., Levenson M., Lenth W., Ortiz C. *Appl. Phys. B*, **32**, 145 (1983).
3. Barychev V. *Proc. 4-th Int. Symp. on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2004)* (Novosibirsk, Russia, 2004, p. 260).
4. Дьелесан Э., Руайе Д. *Упругие волны в твердых телах* (М.: Наука, 1982).