

УДК 681.787.2

**И. Е. Зуйков, И. Д. Оксенчук***(Минск, Беларусь)***ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫЙ МЕТОД  
РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Описан внутриврезонаторный метод регистрации изменения показателя преломления по изменению частоты межмодовых биений двухчастотного лазера с пространственно разнесенными ортогонально поляризованными модами. Дано описание экспериментальной установки для измерения изменения показателя преломления жидкости, протекающей через капилляр. Приведены результаты эксперимента, которые подтверждают высокую чувствительность метода.

**Введение.** Чувствительность интерферометрических рефрактометрических измерений зависит от метода измерения и оптической длины образца. Последнее условие во многих случаях определяется характером объекта исследования. Трудности с реализацией необходимой точности измерения начинают возникать при уменьшении размеров объекта до долей миллиметра и меньше, например, при контроле параметров оптоволоконных элементов, поперечные размеры которых не превышают нескольких сотен микрометров. С подобными проблемами сталкиваются в аналитической химии. Так, в высокоэффективной жидкостной хроматографии для повышения скорости проведения анализа объем вводимой пробы уменьшается до нескольких нанолитров. В таких случаях традиционные схемы регистрации изменения показателя преломления не позволяют проводить измерения с более высокой точностью, чем  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ , что не удовлетворяет современным запросам.

Хорошо известен факт, что частота генерации лазера зависит от оптической длины его резонатора и может изменяться как вследствие изменений геометрической длины резонатора, так и показателя преломления среды в резонаторной полости. Так, в работе [1] сообщается о регистрации периодического изменения периметра He–Ne-лазера величиной  $10^{-17}$  м. Девияция частоты определялась методом частично когерентного гетеродина. В качестве гетеродина использовался идентичный лазер. Ограничения такого подхода связаны с проблемой нескоррелированных технических флуктуаций частоты в независимых лазерах, которая не может быть полностью решена ни применением технически сложно реализуемых систем стабилизации, ни повышением времени осреднения (в данной работе оно доходило до 4 с).

Повышение степени корреляции технических флуктуаций частот опорного и измерительного лазеров может быть достигнуто за счет их совме-

ния в одном резонаторе. В литературе описано несколько рефрактометрических схем на базе двухчастотных лазеров. Например, использование зависимости частоты биений двух соседних продольных мод от дисперсии показателя преломления активной среды, по оценке авторов работы [2], дает возможность регистрировать изменение показателя преломления на уровне  $10^{-9}$ . В работе [3] описан рефрактометр, использующий метод внутрирезонаторной отражательной лазерной рефрактометрии, который позволяет измерять показатель преломления с чувствительностью  $10^{-8}$ .

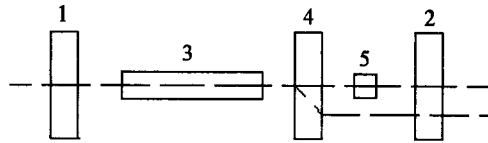


Рис. 1

Представляет интерес исследование возможности реализации метода рефрактометрического детектирования, основанного на применении двухчастотного лазера с пространственным разделением внутри резонатора каналов генерации ортогонально поляризованных волн и размещением объекта измерения в одном из этих каналов [4].

**Чувствительность к изменению показателя преломления.** Рассмотрим линейный лазер, схема которого приведена на рис. 1. Он образован зеркалами 1, 2 и изотропным активным элементом 3, имеющим запас по усилению, достаточный для размещения в резонаторе дополнительных оптических элементов. Для обеспечения генерации двух ортогонально поляризованных пространственно разнесенных мод в резонатор помещена плоскопараллельная фазоанизотропная пластинка 4, выполненная из одноосного кристалла, ось которого наклонена примерно на  $45^\circ$  относительно рабочих граней. В один из каналов генерации в области пространственного разделения ортогонально поляризованных волн перпендикулярно оси резонатора помещен прямоугольный изотропный капилляр 5.

Фазовое условие, определяющее частоту генерации [5], для ортогонально поляризованных мод запишем следующим образом:

$$\nu_{s,p} = \frac{q_{s,p}c}{2L_{s,p}}, \quad (1)$$

где  $\nu_{s,p}$  – частоты генерации  $s$ - и  $p$ -моды;  $c$  – скорость света;  $q_{s,p}$  – продольный индекс  $s$ - и  $p$ -моды;  $L_{s,p}$  – оптические длины резонатора для  $s$ - и  $p$ -моды.

Выберем такие условия, при которых

$$q_s = q_p, \quad L_s = L_p. \quad (2)$$

Это может быть реализовано, например, изменением на небольшой угол наклона фазоанизотропной пластинки 4. При этом разность частот ортогонально поляризованных мод будет равна нулю:

$$\Delta\nu = \nu_s - \nu_p = \frac{q_s c}{2L_s} - \frac{q_p c}{2L_p} = 0. \quad (3)$$

Пусть теперь в капилляре длиной  $l$ , расположенном в канале генерации моды  $s$ , произойдет изменение показателя преломления среды на величину  $\Delta n$ . Это приведет к соответствующему изменению разности частот

$$\Delta\nu = \frac{q_s c}{2L_s} \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta n l}{L_s}\right)} - \frac{q_p c}{2L_p} \neq 0. \quad (4)$$

Разложим выражение  $\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta n l}{L_s}\right)}$  в ряд и ограничимся первым членом разложения, тогда (4) примет вид

$$\Delta\nu = \frac{q_s c}{2L_s} - \frac{q_s c \Delta n l}{2L_s^2} - \frac{q_p c}{2L_p}. \quad (5)$$

Подставляя в (5) явное выражение для  $q$  и учитывая условие (2), получим окончательное выражение для зависимости разности частот ортогонально поляризованных мод от изменения показателя преломления среды в капилляре 5:

$$\Delta\nu = k \Delta n, \quad (6)$$

где

$$k = \frac{c l}{\lambda_s L_s} \quad (7)$$

– масштабный коэффициент ( $\lambda_s$  – длина волны излучения  $s$ -моды).

**Эксперимент.** Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. В ней использовался He–Ne-лазер, генерирующий на длине волны  $\lambda = 1,15$  мкм с нестабильностью биений ортогональных мод  $\sim 50$  кГц. Резонатор образован двумя сферическими зеркалами 1, 2 с радиусом кривизны 2500 мм. Внутри его размещались активный изотропный элемент 4 длиной 250 мм и анизотропный кристалл кальцита 5 толщиной 9 мм. Наклон оптической оси по отношению к рабочим граням кристалла составлял  $41^\circ$ , что

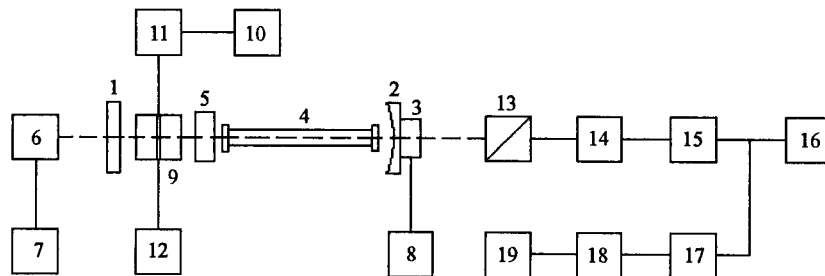


Рис. 2

обеспечивало требуемое разнесение каналов генерации ортогонально поляризованных мод. Причем из-за того что применялся резонатор с двумя сферическими зеркалами, поперечное разнесение мод было не только между кристаллом 5 и зеркалом 1, но и в активном элементе 4 (существенно меньшее). Это позволило устранить связь между ортогонально поляризованными модами и обеспечить их устойчивую генерацию даже при нулевой разностной частоте [6].

Для регулирования длины резонатора зеркало 2 было установлено на пьезокорректоре 3, который управлялся высоковольтным блоком питания 8. Модовая структура излучения контролировалась с помощью сканирующего интерферометра 6 и осциллографа 7. Частота биений ортогонально поляризованных мод выделялась лавинным фотодиодом 14 с пленочным дихроичным поляризатором 13, усиливалась широкополосным усилителем 15 и поступала для визуализации на анализатор спектра 16. Одновременно сигнал поступал на преобразователь частоты 17, который переносил частоту биений в рабочую область преобразователя частота-аналог 18. Выделенная девиация частот записывалась самописцем 19.

Кювета 9 с просветленными рабочими гранями изготовлена из стекла марки К8 с квадратным капилляром 1 мм. Она устанавливалась на координатном столике и могла перемещаться микрометрическими винтами. Прокатка жидкости через кювету осуществлялась насосом 10. Проба вводилась при помощи крана ввода пробы 11. Объем вводимой пробы составлял 8 мкл. Жидкость из кюветы свободно стекала в сосуд 12. Насос, кран ввода пробы, кювета и сосуд соединялись между собой капиллярами с внутренним диаметром 0,5 мм.

Разнесение центров каналов генерации ортогонально поляризованных мод составило 1,1 мм. Этого было достаточно для получения двухчастотной генерации в том случае, когда излучение одной поляризации проходило через капилляр, а другой – через стекло кюветы. При меньшем разнесении дефекты на краю капилляра вносили потери, не позволяющие обеспечить необходимый режим работы.

Для определения чувствительности установки к изменению показателя преломления через капилляр со скоростью 2 мл/мин прокачивался растворитель этилацетат. В него без остановки потока вводился раствор бензола в этилацетате. Концентрация пробы составила 0,02 мг/мл, что дало изменение коэффициента преломления на  $10^{-6}$  относительно чистого растворителя.

Типичный график изменения частоты генерации при прохождении пробы представлен на рис. 3. Всего было проведено 10 измерений. Средняя девиация частоты из-за прохождения пробы по каналу генерации моды составила 510 кГц при относительной точности измерения не более 5 %.

**Обсуждение результатов эксперимента.** Для оценки результатов эксперимента определим масштабный коэффициент  $k$  по формуле (7). Учитывая параметры установки ( $l = 1$  мм,  $L_s = 0,3$  м), получим  $k = 6,7 \cdot 10^{11}$ , что при изменении показателя преломления пробы на  $10^{-6}$  дает изменение частоты биений на 670 кГц. Следует отметить, что эта оценка не учитывает изменение состава пробы из-за неизбежного размытия при движении по капиллярам. Поэтому полученная величина 510 кГц неплохо согласуется с расчетной величиной и подтверждает ожидаемую высокую чувствительность предлагаемого метода измерения.

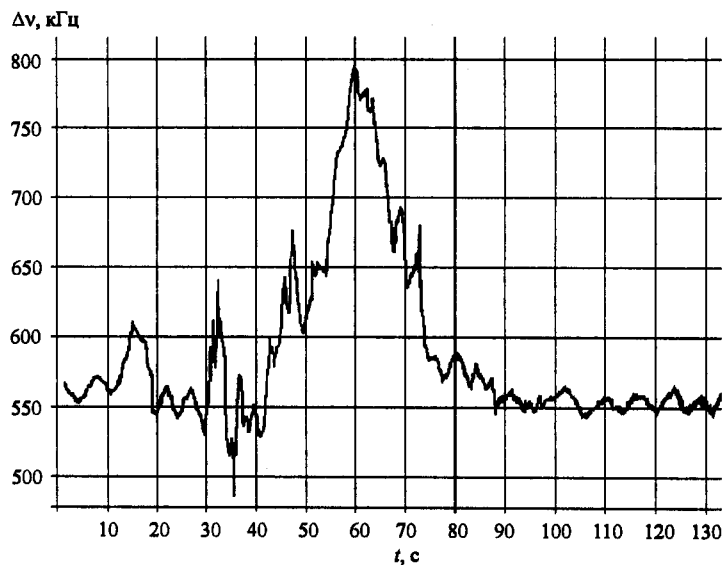


Рис. 3

**Заключение.** Для реализации более высокой чувствительности необходимо прежде всего повысить стабильность разностной частоты. Этого можно достичь, используя моноблочную конструкцию резонатора лазера, при которой реализуется долговременная стабильность разностной частоты не хуже 10 Гц. Также следует предпринять меры по стабилизации мощности генерации лазера. Ее изменения проявляются в виде термооптических эффектов, связанных с поглощением лазерного излучения внутррезонаторными элементами измерительной схемы. По этой же причине необходима высокая чистота и дегазация применяемых растворителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геликонов В. М. Измерение наноангстремных колебательных перемещений при помощи газового лазера с малой шириной естественной линии // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. 41, № 11. С. 1473.
2. Алексеев А. М., Немец В. М. О возможности применения лазерной внутррезонаторной частотной спектроскопии в анализе высокочистых газов // Вестн. СПбГУ. Сер. 4. 1993. Вып. 1, № 4. С. 90.
3. Гончуков С. А., Лазарев Ю. Б., Подколзин А. А. Лазерная рефрактометрия биологических жидкостей // Приборы и техн. эксперимента. 2000. № 6. С. 109.
4. А. с. 1646380 СССР. Способ определения разности показателей преломления и лазерный рефрактометр для его осуществления /О. Н. Зименков, И. Е. Зуйков, Н. В. Зуйкова. Заявл. 03.01.91.
5. Привалов В. Е. Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. Л.: Судостроение, 1989.
6. Губин М. А., Ермаченко В. М., Курляндский А. С. и др. Устранение взаимодействия мод в газовых лазерах // ЖЭТФ. 1983. 84, вып. 5. С. 1686.

Белорусская государственная  
политехническая академия,  
E-mail: Zuikov@ilc.unibel.by

Поступила в редакцию  
11 апреля 2001 г.