

УДК 535.417.26

ЭФФЕКТ ОПТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ В РЕЗОНАТОРЕ ФАБРИ–ПЕРО

И. А. Биленко, А. А. Самойленко

(кафедра физики колебаний)

E-mail: igor@hbar.phys.msu.su

Продемонстрирован эффект оптической жесткости в резонаторе Фабри–Перо. Использовался резонатор Фабри–Перо, одно из зеркал которого представляло собой механический осциллятор массой 33 мг с собственной частотой колебаний 135 Гц. При настройке лазера на склон резонансной кривой резонатора наблюдалось изменение частоты колебаний механического осциллятора. Резкость Фабри–Перо резонатора составила 61. При мощности накачки 10 мВт частота механического осциллятора изменялась приблизительно на 1 Гц.

Введение

Успехи современной экспериментальной физики и достижения технологии позволяют создавать оптические генераторы с очень высокой стабильностью частоты и когерентностью. Это, в частности, позволяет применять их в различных экспериментах по измерению перемещений с высокой чувствительностью. В качестве второго ключевого компонента таких экспериментов удобно использовать высокодобротные оптические резонаторы, собственная частота которых зависит от смещения объекта.

В макроскопических масштабах сила светового давления, создаваемая лазером с мощностью, доступной в «настошных» экспериментальных уста-

новках, мала. Однако при малых размерах и массе объектов она может заметно влиять на их динамику.

В работах [1, 2] описаны эксперименты по наблюдению эффекта «захватывания» лучом лазера прозрачных диэлектрических сфер в воде под действием светового давления. В этих экспериментах через стеклянную ячейку с водой, в которой находились в виде взвеси микросферы из латекса или кварцевого стекла, пропускался луч аргонового лазера мощностью 100 мВт. Диаметр микросфер варьировался в широком диапазоне — от 0.1 до 10 мкм. При этом наблюдался эффект затягивания сфер с большим, чем у среды, показателем преломления в область распространения луча лазера, т. е. туда,

где интенсивность электромагнитной волны была больше.

В этих работах сила светового давления слабо зависела от координаты частиц. Однако если взять механический осциллятор, на который падает световой поток, с интенсивностью, зависящей от текущей координаты, то меняющаяся при этом сила светового давления может добавлять значительную дополнительную жесткость [3–5].

В работе [4] был исследован эффект световой жесткости и возникающей радиометрической неустойчивости. Помимо описания проведенного эксперимента, в этой работе предлагается простая феноменологическая модель силы типа механической жесткости, но вносимой с запаздыванием. Модель была применена для оценки действия радиометрических сил на крутильный маятник.

В результате показано, что поправки к частоте и показателю затухания могут иметь любой знак в зависимости от соотношения между периодом собственных колебаний и величиной запаздывания. По абсолютной величине поправка к собственной частоте мала и исчезает при достаточно высоком вакууме. В то же время поправка к показателю затухания тем больше, чем меньше собственное затухание маятника, и для систем с малыми механическими потерями может сохранять существенное значение и при весьма высоких степенях разрежения.

Дополнительное трение возникает в механическом осцилляторе, когда на него действует некоторая сила, зависящая от координаты, так же как и обычная жесткость, но при этом запаздывающая на некоторое время. В только что рассмотренной работе такая сила была вызвана радиометрическим эффектом, а запаздывание — перераспределением тепла в лопасти крутильного маятника. Однако так же может вести себя и сила светового давления. Если какое-либо тело является одновременно стенкой электромагнитного резонатора (например, резонатора Фабри–Перо или объемного СВЧ резонатора) и массой механического осциллятора, то возникающая радиационная жесткость будет иметь запаздывание, вызванное релаксацией резонатора. Следовательно, в механический осциллятор будет внесено дополнительное радиационное трение.

Изучению эффекта радиационного трения и радиационной жесткости посвящена работа [3]. В ней авторы исследовали диссипативные пондеромоторные эффекты с помощью СВЧ-резонатора. Этот резонатор представлял собой отрезок прямоугольного волновода, одна стенка которого была выполнена в виде легкой пластинки из алюминиевой фольги, подвешенной на кварцевой нити.

В результате проведенных экспериментов были подтверждены теоретические оценки эффекта радиометрической жесткости и радиометрического трения, наблюдались предсказанные увеличение време-

ни затухания на правом склоне и уменьшение на левом.

Помимо интересных свойств самих по себе, эффект оптической жесткости имеет по крайней мере одно важное применение [6] — потенциальную возможность преодоления стандартного квантового предела для задачи обнаружения внешнего воздействия с помощью пробных тел путем превращения свободной массы в осциллятор. Это возможно потому, что при использовании оптической жесткости дополнительные шумы, вносимые в систему, могут быть малы [7].

В работе [6] рассмотрена простая схема, в которой пробной массой является зеркало оптического резонатора Фабри–Перо. Второе зеркало жестко закреплено.

Если пробная масса достаточно легкая ($m \simeq 20$ мг), то превратить ее в осциллятор с собственной частотой $\Omega_m \simeq 10^4$ с⁻¹ можно, используя лазер небольшой мощности и зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием. Величина оптической жесткости, возникающей в резонаторе Фабри–Перо с резкостью F и мощностью накачки W , настроенном на один из склонов резонансной кривой, выражается соотношением

$$m\Omega_m^2 = \frac{16\omega_0 W F^2}{\pi^2 c^2} \frac{\delta/\gamma}{[1 + (\delta/\gamma)^2]^2} \simeq 4 \times 10^{-2} \text{ Н/см} \times \left(\frac{W}{10 \text{ мВт}} \right) \left(\frac{F}{10^2} \right)^2 \frac{\delta/\gamma}{[1 + (\delta/\gamma)^2]^2}, \quad (1)$$

где $\omega_0 = 2 \times 10^{15}$ с⁻¹ — частота света накачки, δ — отстройка частоты накачки от резонансной частоты резонатора Фабри–Перо, γ — полуширина резонансной кривой. Так, при мощности накачки $W = 10$ мВт, $\delta/\gamma = 1/2$ и массе $m = 33$ мг собственная частота осциллятора определяется только оптической жесткостью, $\nu_m = \Omega_m/2\pi \simeq 26$ Гц.

С точки зрения практического применения такая жесткость имеет один недостаток: вместе с ней появляется «отрицательное трение», т. е. амплитуда колебаний такого осциллятора будет увеличиваться со временем по экспоненте с характерным временем

$$\tau_{\text{instab}} = \frac{\gamma}{2\Omega_m^2} [1 + (\delta/\gamma)^2]. \quad (2)$$

Если резкость резонатора $F \simeq 10^2$ и его длина $L \lesssim 1$ см, тогда $\gamma \gtrsim 5 \times 10^8$ с⁻¹ и $\Omega_m \tau_{\text{instab}} \gtrsim 10^6$, т. е. τ_{instab} достаточно велико, чтобы провести измерения до выхода установки из рабочего режима.

Экспериментальное изучение данного эффекта представляет практический интерес, поскольку схемы с пробными массами активно применяются в экспериментах по обнаружению гравитационных волн [8]. Ожидается, что на второй стадии проекта LIGO (Laser Interferometric Gravitational Observatory) (2006–2008) чувствительность будет

близка к стандартному квантовому пределу, а в LIGO III превысит ее [9].

1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1, 2. Резонатор Фабри–Перо полностью сделан из плавленного кварца и состоит из двух зеркал. Первое — жестко закрепленное, сферическое, вогнутое зеркало с многослойным диэлектрическим покрытием, пропускание которого $1 - R \approx 0.03$. При этом значении $1 - R$ резкость резонатора составляет $F = \frac{\pi}{1-R} \approx 100$. Радиус кривизны этого зеркала 3 см, что соответствует фокусному расстоянию 1.5 см. Второе, подвижное, плоское зеркало с таким же покрытием, расположено на расстоянии 2 см от первого.

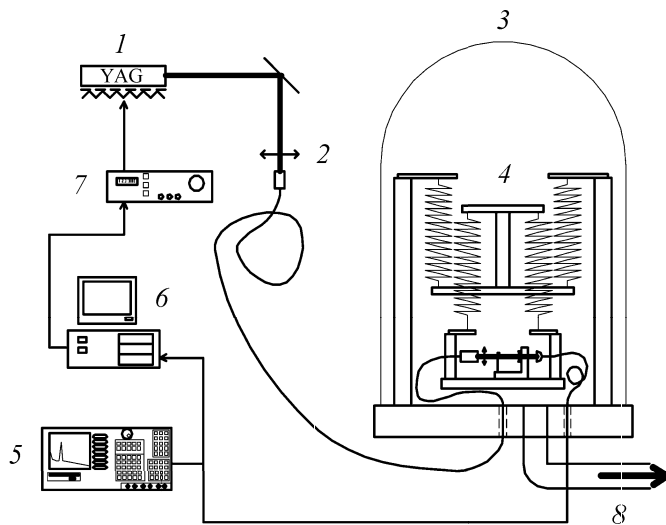


Рис. 1. Схема установки для получения и изучения искусственной оптической жесткости: 1 — YAG-лазер, 2 — оптоволоконный ввод, 3 — вакуумный колокол, 4 — антисейсмическая изоляция, 5 — спектроанализатор, 6 — компьютер, 7 — блок управления лазером, 8 — система откачки

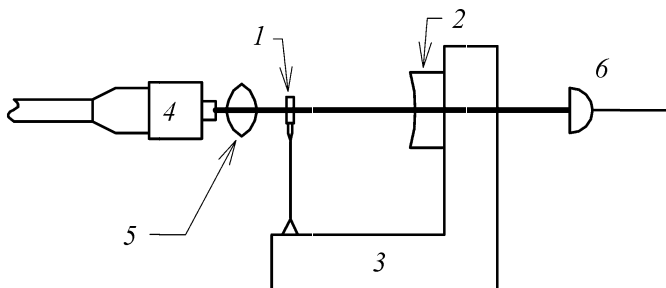


Рис. 2. Конструкция резонатора и оптических элементов: 1 — подвижное зеркало, 2 — неподвижное зеркало, 3 — кронштейн из плавленного кварца, 4 — оптоволоконно с разъемом, 5 — согласующая линза, 6 — детектор

Кронштейн с резонатором расположен на двухступенчатой пружинной системе антисейсмической изоляции. В первоначальном варианте антисейсмической платформы применялись обычные стальные пружины. При первых пробных запусках мы столкнулись с тем, что на частоте, соответствующей соб-

ственным колебаниям подвижного зеркала, уровень механических шумов лабораторного происхождения весьма высок, что приводило к неустойчивой работе системы. Причиной этого явления могла быть значительная амплитуда колебаний антисейсмической платформы на ее собственной частоте, и эти колебания, в свою очередь, раскачивали подвижное зеркало. Кроме того, высокочастотные механические шумы могли проникать на платформу через собственные внутренние моды колебаний пружин. Поэтому пружины задемпфировали — между витками вплели полоски из вакуумной резины. Такое решение дало удовлетворительный результат.

Накачка осуществляется YAG-лазером непрерывного излучения мощностью 50 мВт. Длина волны излучения лазера равна $\lambda = 1.064$ мкм. Резонатор настроен «на просвет», а детектор расположен на антисейсмической платформе со стороны неподвижного зеркала. Антисейсмическая платформа размещена под вакуумным колоколом, который откачивается до давления 1×10^{-5} Торр. Лазер расположен снаружи вакуумной камеры, а ввод излучения под колокол осуществляется с помощью оптического волокна. Поскольку рабочий динамический диапазон приблизительно равен $\lambda/F = 0.01$ мкм (а для надежной, устойчивой работы амплитуда колебаний подвижного зеркала должна быть еще меньше), то, несмотря на наличие антисейсмической изоляции, измерения проводились поздно ночью, когда величина локальных микросейсмических шумов минимальна.

Для детектирования мощности лазерного излучения на выходе из резонатора Фабри–Перо использовался фотодиод. Сигнал с детектора оцифровывался компьютером. Специальная программа позволяет отображать сигнал в удобной форме, измерять некоторые его параметры, а также, выдавая сигналы блоку управления лазером, поддерживать различные режимы работы установки. Частота лазера изменяется путем нагрева кристалла. Такой способ весьма медленный, практически не вносит дополнительных шумов и обладает большим диапазоном перестройки. Управляющая программа в режиме измерения поддерживает постоянный средний уровень сигнала, что позволяет, зная высоту резонансного пика, настраиваться на желаемую точку заданного склона резонансной кривой.

Оптимальные параметры системы автоподстройки подбирались для каждого измерения эмпирически.

Низкая скорость перестройки позволяет избежать влияния системы автоподстройки на полезный сигнал. После установления рабочего режима, с помощью спектроанализатора наблюдался спектр механических колебаний подвижного зеркала и измерялась его резонансная частота.

2. Результаты измерений

Для измерений был изготовлен кронштейн из плавленного кварца в виде уголка. На одной из его внутренних граней было приклеено неподвижное зеркало. Затем к подвижному зеркалу, размеры которого $5 \times 3 \times 1$ мм, эпоксидной смолой были приклеены две кварцевые ножки диаметром приблизительно 500 мкм и длиной ≈ 5 мм. К этим ножкам приварили более тонкие ножки толщиной примерно 100 мкм и длиной 1 см, низкая изгибная жесткость которых определяла частоту колебаний зеркала в отсутствие оптической накачки. Применялись две, а не одна ножка для того, чтобы уменьшить влияние колебаний зеркала вокруг вертикальной оси. Далее, эти ножки приваривались к кронштейну, при этом с помощью луча гелий-неонового лазера производилась предварительная юстировка интерферометра. После приваривания плоского зеркала взаимное расположение зеркал резонатора Фабри–Перо изменить уже нельзя. Таким образом, при массе 33 мг подвижное зеркало представляет собой механический осциллятор с собственной частотой 136 Гц для колебаний в направлении распространения лазерного излучения.

Далее, кронштейн с зеркалами закреплялся на антисейсмической платформе. Окончательная настройка производилась путем изменения положения луча накачки в пространстве. После настройки откачивался колокол и начинался процесс собственно измерений.

В начале производилось сканирование резонатора Фабри–Перо по частоте для выяснения структуры его мод и резкости основной моды, являющейся рабочей. Резкость этой моды в нашем эксперименте равна $F = 61$. Затем снималась зависимость частоты колебания подвижного зеркала при настройке системы по очереди на каждый из склонов резонансной кривой основной моды резонатора Фабри–Перо от

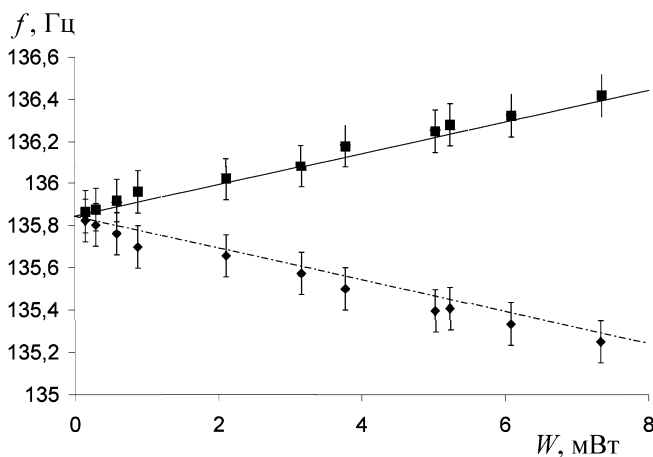


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний подвижного зеркала от мощности накачки для левого и правого склонов. Квадратами и сплошной линией обозначены соответственно результаты измерений и теоретическая оценка для левого склона резонансной кривой, ромбами и пунктирной линией — для правого

мощности накачки. На рис. 3 изображен график такой зависимости, на котором точками показаны результаты измерений на левом и правом склонах резонансной кривой, а линиями — соответствующие зависимости, полученные из формулы (1) при $\delta/\gamma = 1/2$.

На рис. 4 приведены два спектра выходного сигнала, соответствующие механическим колебаниям зеркала при одной и той же мощности, но на разных склонах при мощности $W = 5.2$ мВт. Значительная ширина пиков объясняется тем, что из-за большой амплитуды низкочастотных вибраций сейсмического происхождения за время измерения рабочая точка немного перемещалась по склону.

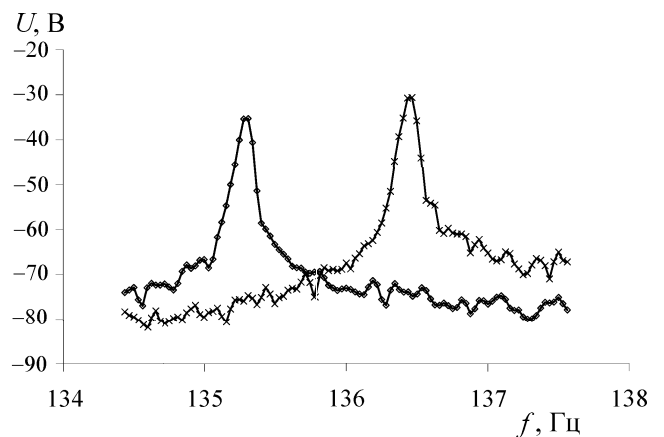


Рис. 4. Спектры, описывающие механические колебания зеркала при одной и той же мощности, но на разных склонах. $W = 5.2$ мВт

Заключение

В этой работе экспериментально продемонстрирован метод управления частотой механического осциллятора с помощью лазерного излучения. Применение данного метода в резонаторах Фабри–Перо с подвижным зеркалом малой массы может в принципе позволить получить чувствительность к внешнему силовому воздействию, превышающую стандартный квантовый предел.

Авторы выражают признательность проф. В.Б. Брагинскому за внимание, проявленное к данной работе, обсуждение возникавших проблем и ценные замечания.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке NSF США (грант RNY-0098715) и РФФИ (грант 03-02-16975).

Литература

1. Ashkin A. // Phys. Rev. Lett. 1970. **24**. P. 156.
2. Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S. // Opt. Lett. 1986. **11**, No. 5. P. 288.
3. Брагинский В.Б., Манукин А.Б., Тихонов М.Ю. // ЖЭТФ. 1970. **58**. С. 1548.
4. Брагинский В.Б., Кузнецов В.А., Руденко В.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1971. № 2. С. 192 (Moscow University Phys. Bull. 1971. No. 2. P. 56).

5. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М., 1974.
6. Braginsky V.B., Khalili F.Ya., Volikov P.S. // Phys. Lett. A. 2001. **287**. P. 31.
7. Braginsky V.B., Khalili F.Ya. // Phys. Lett. A. 1999. **257**. P. 241.
8. Abramovici A.A., Althouse W.E. // Science. 1992. **252**. P. 325.
9. Gustafson E., Shocmaker D., Strain K., Weiss R. // LSC white paper on detector research and development. LIGO T990080-00-D, 11 Sept. 1999. Available in <http://www.ligo.caltech.edu>.

Поступила в редакцию
31.01.03

УДК 535.555 и 535.015

ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ФОТОННАЯ ЗАПРЕЩЕННАЯ ЗОНА В СЛОЯХ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

В. А. Мельников, Л. А. Головань, В. Ю. Тимошенко, П. К. Кашкаров, С. А. Гаврилов^{*)}, Д. А. Кравченко^{*)}, Ю. Н. Пархоменко^{**)}, Е. А. Скрылева^{**)}

((кафедра общей физики и молекулярной электроноки))

E-mail: sapphire@vega.phys.msu.su

В работе сообщается о получении слоев пористого оксида алюминия (ПОА) методом электрохимического анодирования алюминиевой фольги при комнатной температуре и исследовании их структурных и оптических свойств. Измерена величина двулучепреломления в таких слоях и проведено сравнение ее значения с расчетами в рамках модели эффективной среды. Для длин волн, сравнимых с периодом структуры ПОА, наблюдается фотонная запрещенная зона, перестраиваемая с изменением угла падения излучения на слой.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается бурное развитие физики твердотельных систем пониженной размерности. Одним из важных примеров таких систем является пористый оксид алюминия (ПОА), полученный анодированием алюминия в различных электролитах [1–3]. Важным достоинством ПОА является то, что соответствующим подбором электролита и условий анодирования можно изменять диаметр пор и расстояние между ними от десятков до сотен нанометров [1–3]. Это открывает многочисленные области применения ПОА в оптике, включая нелинейную оптику [3–6]. Вариация структурных параметров материала позволяет формировать слои, обладающие как оптической анизотропией, так и свойствами двумерных фотонных кристаллов [4, 5]. В известных нам исследованиях требуемые оптические параметры ПОА достигались лишь в слоях, получаемых с использованием специальных и достаточно сложных технологических приемов, включающих, например, предварительное задание мест порообразования (импринтинг) [5, 7, 8] и/или последующее травление при низких температурах [1, 2, 8, 9], что позволяло достигнуть необходимого упорядочения структуры. В настоящей работе мы сообщаем о получении оптически качественных слоев ПОА методом электрохимического анодирования при комнатной температуре без предварительного

текстурирования алюминиевой подложки. Исследованы двулучепреломление и фотонно-кристаллические свойства полученных образцов.

1. Образцы и их структурные свойства

Образцы пленок ПОА формировались методом электрохимического травления подложек из фольги алюминия (чистоты 99.9) толщиной 500 мкм. Перед травлением поверхность фольги очищалась раствором CrO_3 (20 г/л) : H_3PO_4 (35 г/л 85%-го водного раствора). После получения образец промывался в дистиллированной воде, и затем слой ПОА отделялся от подложки растворением последней в растворе 0.05 М CuCl_2 : HCl (50%).

Образец 1 был получен в водном растворе щавелевой кислоты (40 г/л) в режиме стабилизации тока $j = 10$ мА/см² за 3 ч. Толщина образца измерялась на микроскопе и равнялась 42 мкм. Период пористой структуры составил 90 нм, а диаметр пор 30 нм.

Образец 2 был сформирован в водном растворе винной кислоты (60 г/л) в режиме стабилизации тока 10 мА/см² за 10 мин. Толщина образца была равна 6 мкм, период структуры 500 нм, а радиус пор 150 нм.

Структура слоев ПОА была исследована при помощи сканирующего электронного и атомного силового микроскопов. Из рис. 1, демонстрирующего изображение поверхности образца 1 в атомном

^{*)} Московский институт электронных технологий, 103498, Москва.

^{**)} Московский институт стали и сплавов, 119049, Москва.