

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРАХ С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Э.А. САДЫХОВ, Р.Г. ГАМИДОВ

ТУБИТАК, Национальный Метрологический Институт
п/я 21 41470, Гебзе, Турция

Э.К. ГУСЕЙНОВ

Институт Фотозлектроники АН Азербайджана
370141, ГСП Баку, ул. Ф.Агаева, 555 квартал

Разработан новый метод для измерения малых перемещений на основе инжекционного лазера с внешним резонатором (ИЛВР). Благодаря обратной оптической связи, регистрируется изменение частоты ИЛВР вследствие механических вибраций исследуемого объекта. Теоретический предел разрешения данного метода ограничен квантовыми шумами лазера, в то время как в реальных экспериментах удалось достичь порога в 0.5 нм.

1. Введение

В последние годы предметом интенсивных исследований являются бесконтактные методы измерения малых перемещений [1,2]. Такой интерес несомненно связан с растущим их применением в целях диагностики и неразрушающего контроля движущихся узлов и механизмов в промышленности. Среди всех других имеющихся методов для измерения вибрационных параметров, оптические методы обладают рядом преимуществ, такими как высокая чувствительность, широкий динамический диапазон и т.д. В зависимости от физических принципов, на основе которых производится измерения, оптические методы в свою очередь делятся на три группы: интерферометрические, методы на основе модуляции параметров лазерного излучения и методы с использованием импульсных лидаров.

Резкий прогресс в технологии изготовления полупроводниковых лазеров открыл новые перспективы в широком их применении в прикладных задачах и метрологических целях [3]. Полупроводниковые лазеры очень чувствительны к обратной оптической связи [4]. Учитывая этот факт, разработан новый метод для бесконтактного измерения малых перемещений с субнанометровым разрешением. Предлагаемый метод основан на регистрации изменения частоты инжекционного лазера с внешним резонатором вследствие механических вибраций исследуемого объекта. В данной схеме движущийся объект служит внешним зеркалом ИЛВР. Перемещение внешнего зеркала вызывает изменение длины лазерного резонатора, что служит причиной изменения частоты лазерного излучения, которое регистрируется с помощью интерферометра Фабри-Перо. Настоящий метод, в отличие от классических схем на основе интерферометра Майкельсона менее критичен к отражающей способности вибрирующей поверхности, а теоретический предел пространственного разрешения метода определяется квантовыми шумами лазера и изменением оптической длины резонатора вследствие тепловых флуктуаций.

2. Экспериментальная установка для измерения малых перемещений.

Блок-схема экспериментальной установки для измерения малых перемещений активным лазерным методом показана на рис.1. Часть излучения инжекционного лазера ИЛ с помощью микрообъектива МО, полупрозрачного зеркала ППЗ, зеркала З на пьезокерамике ПЗТ и линзы Л фокусируется на поверхность движущегося объекта ДО. В проводимых экспериментах использовался одномодовый полупроводниковый лазер AlGaAs типа SDL-5401-G с длиной волны 780 нм. Оптический луч, отраженный от поверхности ДО и попадающий в лазер, создает нерезонансную обратную оптическую связь. Таким образом, ДО выполняет функцию внешнего зеркала инжекционного лазера с внешним резонатором. Оптический изолятор ОИ, используемый в экспериментальной установке, предназначен для устранения влияния многократно отраженных лучей от поверхностей оптических элементов на обратную оптическую связь.

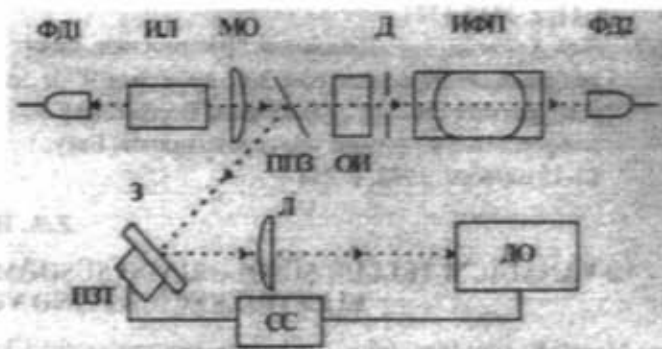


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для измерения малых перемещений.

Как известно, частота ИЛВР ν определяется длиной внешнего резонатора L , иными словами расстоянием от ИЛ до поверхности ДО. Изменение длины резонатора

ИЛВР на величину ΔL наводит сдвиг частоты лазерного излучения $\Delta \nu$. Частотный спектр лазера регистрируется с помощью конфокального интерферометра Фабри-Перо (ИФП) и фотодиода ФД2. Расстояние между максимумами пропускания ИФП, используемого в экспериментальной схеме составляла 600 МГц, а ширина резонанса 30. Используя частотную шкалу, определяемую характеристиками ИФП, определяется сдвиг частоты лазера $\Delta \nu$. Для более точного определения частотного сдвига $\Delta \nu$ использовалась модуляционная техника. В этом случае ток лазера I модулировался синусоидальным сигналом на частоте F , которая обычно в проводимых экспериментах составляла 10-300 МГц.

$$I = I_0 + I_1 \sin(2\pi Ft) \quad (1)$$

Модуляция тока лазера вызывает расщепление резонансов в спектре пропускания ИФП на основной и два боковых, отстоящих от основного на величину F (Рис.2). Для частотного спектра, показанного на рис.2 частота модуляции составляет 95 МГц.

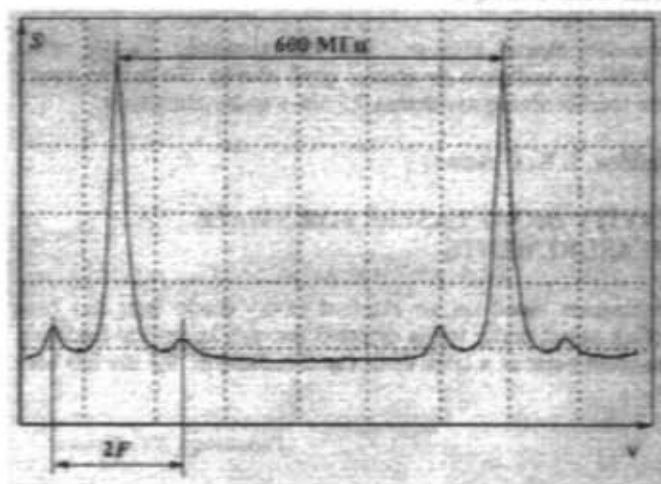


Рис. 2. Спектр пропускания интерферометра Фабри-Перо в случае модулированного тока лазера.

Принимая во внимание тривиальную связь между частотным сдвигом $\Delta \nu$ и изменением длины резонатора ΔL .

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

где L - длина резонатора ИЛВР, а ν - оптическая частота лазера, измерение $\Delta \nu$ позволяет определить величину ΔL . Как видно из (2), для вычисления абсолютной величины перемещения вибрирующей поверхности необходимо с высокой точностью определить значение коэффициента $K=L/\nu$. Во избежание дополнительных трудностей в определении расстояния L между зеркалом лазерного диода и поверхностью движущегося объекта, значение коэффициента K вычислялось исходя из параметров калиброванной пьезокерамики ПЗТ (Dr. Lutz Pickertmann GmbH, Тип: НР5т: 500/15-8/5). Калибровка пьезокерамики производилась по классической схеме интерферометра Майкельсона с использованием полупроводникового лазера с внеш-

ним резонатором, стабилизированного по линии D_2 атомов Cs (длина волны λ составляет 852.112 нм). Напряжение, необходимое для калибровки ПЗТ, а также для приведения в движение электродинамического генератора вибраций, на поверхности которого монтировался движущийся объект, прикладывалось с серво-системы СС.

Отличительной особенностью экспериментальной установки является тот факт, что в зависимости от абсолютного значения амплитуды вибраций ДО возможны две принципиально разные схемы измерения. В случае перемещений ДО в диапазоне 0.4-10 мкм выходная мощность полупроводникового лазера, регистрируемая ФД1, замодулирована по периодическому закону, в идеальном случае по синусу, что является следствием интерференции луча, отраженного от поверхности ДО и луча в первичном лазерном резонаторе [5]. В таком случае, определяя число интерференционных максимумов N за период вибраций, амплитуда перемещений d вычисляется как:

$$d = N \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Результаты эксперимента

Измерения малых перемещений с использованием активного лазерного метода можно разделить на две группы: измерения для амплитуды вибраций более 0,4 мкм и для амплитуды вибраций меньше 0,4 мкм. Первая группа исследований достаточно хорошо описана в литературе [5,6], поэтому предметом основного интереса являлось измерение перемещений в диапазоне 1,5-400 нм.

В качестве движущегося объекта был выбран вибрационный сенсор фирмы Brüel & Kjaer типа 8305, который используется в качестве стандарта в вибрационных измерениях. Тем самым исследовалась возможность применения данного метода с целью калибровки подобных сенсоров, который заключается в независимом измерении амплитуды вибраций, как правило, перемещения d или ускорения a , и электрического заряда q , наводимого на выходе сенсора вследствие механических вибраций.

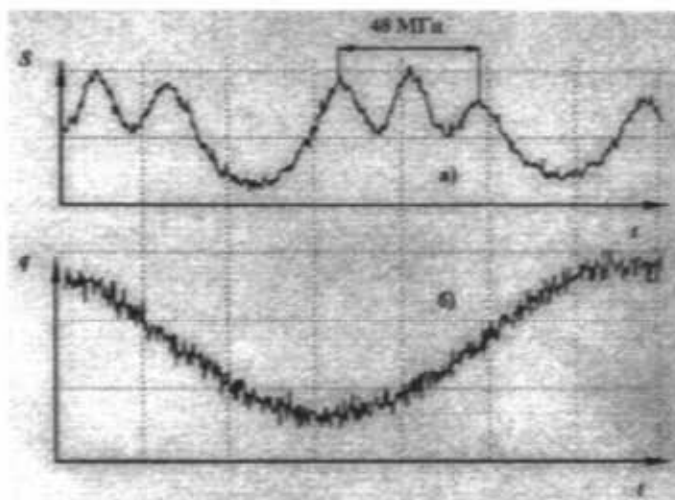


Рис. 3. График зависимости пропускания интерферометра Фабри-Перо (а) и электрического заряда наводимого на выходе вибрационного сенсора (б) от времени.

Тестируемый сенсор подвергался вибрациям на опорной частоте ($f=500$ Гц). Вследствие этого частота лазера изменяется на величину $\Delta\nu$, которая регистрируется по спектру пропускания ИФП. Типичный результат подобных измерений показан на рис.3. Сдвиг частоты лазера за полный период вибраций составляет 100,4 МГц, что соответствует амплитуде перемещений 22,6 нм, рассчитанной по формуле (2). Подобные измерения были проведены для механических вибраций с амплитудой перемещений до 1,5 нм. Кроме этого, используя данный метод, были

измерены перемещения различных бытовых объектов, коэффициент отражения поверхности которых составляет $10^{-3}-10^{-1}$ (диффузное отражение), чего практически невозможно достичь пользуясь классическими пассивными методами измерения, такими как на основе интерферометра Майкельсона, либо на основе эффекта Доплера. Регистрация более низких значений перемещений предлагаемым методом возможна с использованием интерферометра Фабри-Перо с улучшенными параметрами, например на базе оптического волокна.

[1] T. Hatsuzawa, Y. Tanimura and K. Toyoda. Rev.Sci.Instrum., 1994, v.65, n.8, p.2510-2513.
 [2] A.J.P. van Haasteren and H.J. Frankena. Applied Optics, 1994, v.33, n.19, p.4137-4142.
 [3] R.W. Fox, C.S. Weimer, L. Holberg and G.C. Turk. Spectrochimica Acta Rev., 1993, v.15, n.5, p.291-299.
 [4] L. Holberg and M. Ohtsu. Appl. Phys. Lett., 1988,

v.53, n.11, p.944-946.
 [5] W.M. Wang, K.T.V. Grattan, W.J.O. Boyle and A.W. Palmer. Applied Optics, 1994, v.33, n.10, p.1795-1801.
 [6] S. Shinohara, H. Naito, H. Yoshida, H. Ikeda, M. Sumi. IEEE Trans. on Instr. and Meas., 1989, v.38, n.2, p.574-577.

E.A. Sadixov, P.Q. Hamidov, E.K. Hüseyinov

KIÇIK YERDƏYİŞMƏLƏRİN ÖLÇÜLMƏSİ ÜÇÜN XARİCİ REZONATORLU İNJEKSİON LAZERLƏRİNDƏ OPTİK ƏKS ƏLAQƏ

Xarici rezonatorlu injeksiyon lazer (XRİL) əsasında kiçik yerdəyişmələri ölçmək üçün yeni üsul hazırlanmışdır. Tədqiq edilən obyektin mexaniki titrəməsi nəticəsində optik əks əlaqə vasitəsilə XRİL-in tezliyinin dəyişməsi qeyd olunur. Bu üsulun nazarı olaraq ayırdetmə həddüdü, lazerin kvant gürültüsü ilə məhdudlaşır, lakin təcrübi olaraq ayırdetmə 0,5 nm-ə qədər alınmışdır.

E.A. Sadikhov, R.G. Gamidov, E.K. Guseynov

OPTICAL FEEDBACK IN EXTERNAL CAVITY DIODE LASERS FOR SMALL DISPLACEMENT MEASUREMENTS

A new method for a non-contact measurements of small displacements based on an external cavity diode laser has been developed. A shift in a laser frequency due to mechanical vibrations of an object under test is detected through an optical feedback. The resolution of the proposed method is limited theoretically by a quantum noise of a laser while the threshold of 0.5 nm has been obtained in real experiments.

Дата поступления: 17.09.97

Редактор: Б.Г. Тареев

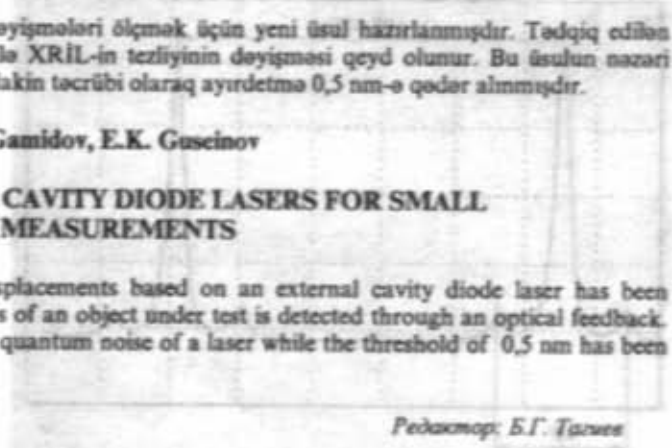
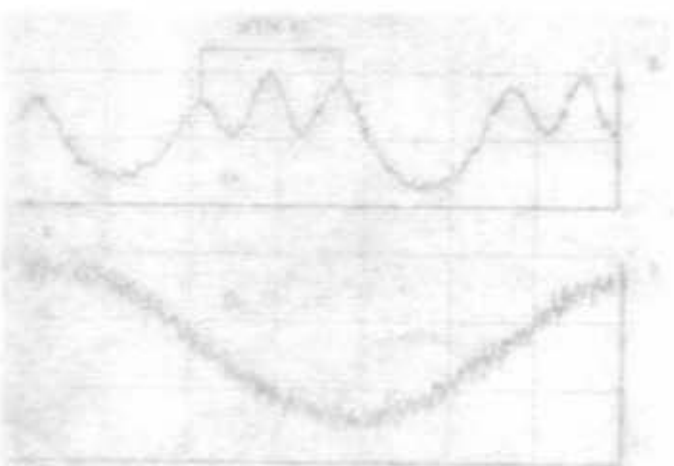


Рис. 3. Сдвиг частоты лазера за полный период вибраций составляет 100,4 МГц, что соответствует амплитуде перемещений 22,6 нм, рассчитанной по формуле (2).

Рис. 4. Типичный результат подобных измерений показан на рис.3. Сдвиг частоты лазера за полный период вибраций составляет 100,4 МГц, что соответствует амплитуде перемещений 22,6 нм, рассчитанной по формуле (2).

$$\Delta \nu = \frac{v \Delta L}{\lambda}$$

Этот сдвиг частоты лазера $\Delta \nu$ регистрируется по спектру пропускания ИФП. Типичный результат подобных измерений показан на рис.3. Сдвиг частоты лазера за полный период вибраций составляет 100,4 МГц, что соответствует амплитуде перемещений 22,6 нм, рассчитанной по формуле (2). Подобные измерения были проведены для механических вибраций с амплитудой перемещений до 1,5 нм. Кроме этого, используя данный метод, были измерены перемещения различных бытовых объектов, коэффициент отражения поверхности которых составляет $10^{-3}-10^{-1}$ (диффузное отражение), чего практически невозможно достичь пользуясь классическими пассивными методами измерения, такими как на основе интерферометра Майкельсона, либо на основе эффекта Доплера. Регистрация более низких значений перемещений предлагаемым методом возможна с использованием интерферометра Фабри-Перо с улучшенными параметрами, например на базе оптического волокна.