

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **16329**

(13) **С1**

(46) **2012.08.30**

(51) МПК

**G 01H 9/00** (2006.01)

(54)

**СПОСОБ ОПТИЧЕСКОЙ ВИБРОМЕТРИИ**

(21) Номер заявки: а 20101042

(22) 2010.07.08

(43) 2012.02.28

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Минченя Владимир Тимофеевич; Степаненко Дмитрий Александрович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) КИСЕЛЕВ М.Г. и др. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения. - Минск: Тесей, 2003. - С. 74-75.

ВУ 10240 С1, 2008.

RU 2116349 С1, 1998.

JP 6103901 А, 1994.

(57)

1. Способ оптической виброметрии, включающий выделение на поверхности исследуемого объекта контрольной области с меткой, воздействие на контрольную область оптическим излучением и определение предельных положений метки, соответствующих минимуму и максимуму ее колебательного смещения, **отличающийся** тем, что используют метку из флуоресцентного материала, на контрольную область воздействуют импульсным оптическим излучением с длительностью импульсов, значительно меньшей периода колебаний метки, и частотой повторения импульсов, соответствующей частоте колебаний метки, при этом используют флуоресцентный материал со временем жизни флуоресценции, значительно меньшим периода колебаний метки, а длину волны оптического излучения выбирают из диапазона, соответствующего спектру поглощения данного флуоресцентного материала.

2. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что в качестве флуоресцентного материала используют квантовые точки.

3. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что в качестве флуоресцентного материала используют флуоресцентные наноалмазы.

Изобретение относится к измерению механических колебаний с использованием оптических средств, в частности к способу оптической виброметрии, то есть способу количественного определения параметров колебаний и вибраций с помощью оптических приборов.

Известен способ оптической виброметрии, используемый для измерения амплитуды ультразвуковых колебаний и включающий выделение на поверхности исследуемого объекта контрольной области, воздействие на контрольную область оптическим излучением и определение предельных положений контрольной области, соответствующих минимуму и максимуму ее колебательного смещения [1, 2]. Наблюдение контрольной области производится с помощью оптического микроскопа, что позволяет измерять малые амплитуды колебаний. В качестве источника оптического излучения используют систему подсветки микроскопа. Наблюдение метки производится в проходящем свете, в результате чего исследу-

**ВУ 16329 С1 2012.08.30**

дваемый объект наблюдается в поле зрения микроскопа в виде теневой области. В качестве контрольной области используют плоскую поверхность исследуемого объекта, например торцовую поверхность при исследовании продольных колебаний концентраторов ультразвуковых колебаний, которую располагают параллельно направлению взгляда наблюдателя (оптической оси микроскопа). Проекция контрольной области на плоскость, перпендикулярную направлению взгляда наблюдателя, является разграничительной линией между теневой областью и освещенной областью в поле зрения микроскопа. Колебания контрольной области наблюдаются в виде появления в поле зрения микроскопа дополнительной полутеневой области, разграничивающей между собой теневую и освещенную области. Положения границ полутеневой области соответствуют предельным положениям контрольной области и определяются по масштабной сетке, встроенной в окуляр микроскопа, или путем регистрации изображения поля зрения микроскопа с последующим измерением координат, соответствующих границам полутеневой области. Разность этих координат определяет размах (удвоенную амплитуду) колебаний.

Недостатком описанного способа является сложность идентификации предельных положений контрольной области, что требует наличия у оператора определенного опыта выполнения подобных измерений и приводит к зрительному утомлению. Недостатком также является невозможность исследования пространственного распределения амплитуды колебаний. Например, при исследовании продольных колебаний концентраторов ультразвуковых колебаний данный метод позволяет определить лишь амплитуду колебаний выходного сечения концентратора и не дает возможности измерения амплитуды в промежуточных сечениях.

Наиболее близким к заявляемому является способ оптической виброметрии, используемый для измерения амплитуды ультразвуковых колебаний и известный как оптический способ [3]. Он включает в себя выделение на поверхности исследуемого объекта контрольной области с меткой, воздействие на контрольную область оптическим излучением и определение предельных положений метки, соответствующих минимуму и максимуму ее колебательного смещения. Могут использоваться естественные метки, например царапины на поверхности исследуемого объекта, и искусственные метки, например штрихи, создаваемые на поверхности исследуемого объекта с помощью алмазного инструмента. Наблюдение метки обычно производится с помощью оптического микроскопа, что позволяет измерять малые амплитуды колебаний. В качестве источника оптического излучения используют систему подсветки микроскопа. Наблюдение метки производится в отраженном свете. Колебания метки наблюдаются в виде возникновения "размытости" ее изображения, положения границ которой соответствуют предельным положениям метки и определяются по масштабной сетке микроскопа или путем регистрации изображения контрольной области с меткой с последующим измерением координат, соответствующих границам "размытости". Разность этих координат определяет с учетом размера метки размах колебаний.

Недостатком описанного способа является сложность идентификации предельных положений метки, связанная с малым контрастом между меткой и поверхностью исследуемого объекта. Это требует наличия у оператора определенного опыта выполнения подобных измерений и приводит к зрительному утомлению оператора.

Задачей изобретения является разработка способа измерения амплитуды колебаний, обеспечивающего упрощение измерений, снижение требований к квалификации оператора и снижение зрительной нагрузки на оператора.

Поставленная задача решается заявляемым способом оптической виброметрии, включающим выделение на поверхности исследуемого объекта контрольной области с меткой, воздействие на контрольную область оптическим излучением и определение предельных положений метки, соответствующих минимуму и максимуму ее колебательного смещения, в котором используют метку из флуоресцентного материала, на контрольную область

воздействуют импульсным оптическим излучением с длительностью импульсов, значительно меньшей периода колебаний метки, и частотой повторения импульсов, соответствующей частоте колебаний метки, при этом используют флуоресцентный материал со временем жизни флуоресценции, значительно меньшим периода колебаний метки, а длину волны оптического излучения выбирают из диапазона, соответствующего спектру поглощения данного флуоресцентного материала.

В одном из предпочтительных вариантов реализации изобретения в качестве флуоресцентного материала используют квантовые точки.

В еще одном варианте реализации в качестве флуоресцентного материала используют флуоресцентные наноалмазы.

Использование метки из флуоресцентного материала позволяет обеспечить высокий контраст между меткой и поверхностью исследуемого объекта, что упрощает измерения, снижает требования к квалификации оператора и снижает зрительную нагрузку на оператора за счет упрощения идентификации предельных положений метки.

Воздействие на контрольную область импульсным оптическим излучением с длительностью импульсов, значительно меньшей периода колебаний метки, и частотой повторения импульсов, соответствующей частоте колебаний метки, приводит к возникновению стробоскопического эффекта, то есть явления кажущейся остановки метки в одном из промежуточных положений ее колебательного движения. Координата этого положения зависит от величины фазового сдвига между колебательным смещением метки и интенсивностью оптического излучения. Путем плавного изменения фазового сдвига можно добиться совмещения изображения метки с положениями, соответствующими минимуму и максимуму колебательного смещения. Дополнительное достоинство применения импульсного оптического излучения состоит в возможности наблюдения и регистрации траектории движения метки за счет медленного (по сравнению с частотой колебаний) изменения фазового сдвига между колебательным смещением и интенсивностью излучения. При использовании оптического излучения постоянной интенсивности (в частности, в прототипе изобретения) траектория движения метки может наблюдаться лишь при условии, что период колебаний метки значительно больше постоянной времени человеческого глаза. При исследовании высокочастотных колебаний, в частности ультразвуковых колебаний, глаз оператора вследствие своей инерционности будет наблюдать "размытость", представляющую собой совокупность точек, соответствующих возможным положениям метки на протяжении периода колебаний. Возможность наблюдения и регистрации траектории движения метки может быть особенно полезной при исследовании сложных колебательных процессов, сопровождающихся сложением нескольких не совпадающих по фазе и направлению колебательных смещений с образованием фигур Лиссажу. Примером реальных технических устройств, в которых наблюдается это явление, могут служить ультразвуковые двигатели.

Флуоресцентные материалы, из которых выполняют метки, могут быть любыми флуоресцентными материалами, известными специалистам и предпочтительно обладающими флуоресценцией в видимой части спектра, интенсивность которой достаточна для восприятия человеческим глазом. Однако является возможным использование флуоресцентных материалов, обладающих флуоресценцией в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра, или с интенсивностью флуоресценции, недостаточной для восприятия человеческим глазом, с регистрацией изображения контрольной области с меткой с помощью фотоприемников, например ПЗС-матриц, чувствительных к оптическому излучению данной интенсивности и с длинами волн, лежащими в этих частях спектра. Предпочтительным, но не ограничивающим общности, является использование квантовых точек и флуоресцентных наноалмазов. Время жизни флуоресценции в случае воздействия на контрольную область импульсным оптическим излучением должно быть значительно меньше периода колебаний метки (периода повторения импульсов оптического излучения). Нанесение ме-

ток может производиться любыми известными специалистам способами, например путем нанесения на поверхность исследуемого объекта пленок или капель быстровысыхающих суспензий, содержащих частицы флуоресцентного вещества, путем импульсного лазерного осаждения и т.п. Возможно использование так называемых "несмываемых красителей", используемых для защиты ценных бумаг и денежных знаков и обладающих флуоресцентными свойствами. Основным требованием к способу нанесения меток является обеспечение высокой адгезии флуоресцентного материала к поверхности исследуемого объекта, которая обеспечивает устойчивость меток к воздействию колебаний и вибраций. Учитывая, что в общем случае длина волны флуоресцентного излучения не совпадает с длиной волны вынуждающего оптического излучения, вызывающего флуоресценцию, собственное флуоресцентное излучение меток может отделяться от фонового излучения и вынуждающего излучения с помощью оптических фильтров. В качестве источника вынуждающего излучения могут использоваться полупроводниковые лазеры (лазерные диоды), ультрафиолетовые лампы и светоизлучающие диоды (СИД), однако возможно использование и других источников оптического излучения, известных специалистам и обладающих длиной волны, необходимой для возникновения флуоресценции. В случае воздействия на контрольную область импульсным оптическим излучением источник вынуждающего излучения должен обладать достаточным быстродействием или, другими словами, достаточно малой постоянной времени (инерционностью), определяемыми условием малости длительности импульсов по сравнению с периодом колебаний метки. В качестве быстродействующих источников вынуждающего излучения могут использоваться импульсные источники и непрерывные источники, снабженные импульсными модуляторами интенсивности излучения, например акустооптическими модуляторами. Согласование частоты повторения импульсов вынуждающего оптического излучения с частотой колебаний метки может производиться путем подачи на формирователь импульсов сигнала с бесконтактного датчика перемещений, размещенного вблизи контрольной области. Бесконтактный датчик перемещений может иметь любой известный специалистам принцип действия, например индукционный, лазерный доплеровский и т.п. Выбор конкретного датчика определяется, в частности, свойствами материала исследуемого объекта.

Квантовые точки являются коммерчески доступными флуоресцентными маркерами, широко используемыми в медицине и биологии [4], и обладают рядом свойств, делающих их привлекательными для применения в качестве материала для выполнения меток в способе согласно данному изобретению. В частности, флуоресцентные свойства квантовых точек определяются их размерами и химическим составом. Изменение этих параметров позволяет управлять длиной волны флуоресцентного излучения в диапазоне от 400 до 2000 нм (от ближней ультрафиолетовой до ближней инфракрасной части спектра). Квантовые точки имеют широкий спектр поглощения, что позволяет использовать для возбуждения флуоресценции источники вынуждающего оптического излучения с широким диапазоном длин волн. Особенно сильное поглощение оптического излучения наблюдается у квантовых точек в ультрафиолетовой части спектра. По сравнению с органическими флуоресцентными веществами, например родамином, квантовые точки CdSe/ZnS имеет в 10-100 раз большую плотность потока излучения. Время жизни флуоресценции составляет для квантовых точек от 10 до 50 нс, что теоретически позволяет использовать их в качестве меток при исследовании колебаний с частотой до 2-10 МГц при условии, что время жизни флуоресценции в 10 раз меньше периода колебаний.

Флуоресцентные нанодиамазы также являются привлекательными для применения в качестве материала для выполнения меток в способе согласно данному изобретению. Они являются коммерчески доступными и имеют спектр флуоресцентного излучения с максимумом на длине волны около 700 нм (красный цвет) [5]. Спектр поглощения нанодиамазов имеет максимум на длине волны около 560 нм. В качестве источников вынуждающего оптического излучения могут использоваться аргоновые и криптоновые лазеры, Nd:ИАГ-

лазеры с удвоением частоты (длина волны 532 нм), гелий-неоновые лазеры и полупроводниковые лазеры. Интенсивность флуоресцентного излучения наноалмазов имеет примерно такое же значение, как для квантовых точек CdSe/ZnS, излучающих на той же длине волны. Время жизни флуоресценции составляет порядка 10-20 нс. Флуоресцентные наноалмазы могут быть получены из коммерчески доступных ультрадисперсных алмазов типа 1b, содержащих примеси азота, путем формирования точечных дефектов кристаллической решетки типа N-V-центров (азотно-вакантных центров). Это может быть достигнуто путем воздействия на алмазы ускоренными потоками электронов, протонов, нейтронов, ионов и гамма-квантов с последующим отжигом при температурах свыше 700 °С.

В одном из вариантов реализации заявляемый способ осуществляется следующим образом.

На поверхности концентратора ультразвуковых колебаний выделяют контрольную область с меткой, наблюдение которой осуществляют с помощью оптического микроскопа ПМТ-3 с увеличением 485х. Микроскоп оснащен окулярным винтовым микрометром МОВ-1-15, позволяющим измерять линейные размеры с точностью до 0,3 мкм. В качестве материала метки используют квантовые точки CdSe/ZnS с длиной волны флуоресцентного излучения 550 нм (зеленое излучение). На контрольную область воздействуют оптическим излучением ультрафиолетовой лампы или ультрафиолетового СИД, длина волны которого соответствует спектру поглощения квантовых точек. Стробирование излучения СИД производится с помощью электрического сигнала от индукционного датчика перемещений концентратора. Флуоресцентное излучение квантовых точек отделяют от фонового излучения и вынуждающего излучения с помощью зеленого интерференционного оптического фильтра с центральной длиной волны 550 нм и шириной полосы пропускания 45 нм. Колебания метки наблюдаются в виде возникновения "размытости" ее изображения, по положению границ которой определяют с помощью окулярного микрометра предельные положения метки, соответствующие минимуму и максимуму ее колебательного смещения. По разности координат, соответствующих предельным положениям метки, определяют размах колебаний. Использование в качестве метки квантовых точек обеспечивает высокий контраст между меткой и поверхностью концентратора, что упрощает измерения, снижает требования к квалификации оператора и снижает зрительную нагрузку на оператора за счет упрощения идентификации предельных положений метки.

#### Источники информации:

1. Патент RU 2271521, МПК G 01H 9/00 // Бюл. № 7. - 10.03.2006.
2. Chipurin E.V. et al. The stroboscopic method for determine oscillations amplitude of ultrasonic working tool surface // Proc. of the 3rd Annual Siberian Russian Workshop on Electron Devices and Materials. - 2002. - Vol. 2. - P. 42-44.
3. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Есьман Г.А. Ультразвук в технологии машино- и приборостроения. - Мн., 2003. - С. 74.
4. Bailey R.E., Smith A.M., Nie S. Quantum dots in biology and medicine // Physica E. - Vol. 25. - 2004. - P. 1-12.
5. Fu C.-C. et al. Characterization and application of single fluorescent nanodiamonds as cellular biomarkers // Proc. of the National Academy of Sciences of the USA. - Vol. 104. - 2007. - P. 727-732.